

63319

O'BRIEN, RONALD J.

Deteccion de fuentes

2014

73919



**DETECCION DE FUENTES SONORAS MEDIANTE EL
USO DE IMÁGENES ACÚSTICAS**

por

Ronald J. O'Brien

Tesis presentada para la obtención del grado de Doctor en
Ciencias de la Ingeniería

FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
MARZO 2014

83919

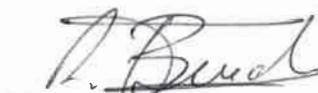
MFI
Classif
T.886

**DETECCION DE FUENTES SONORAS MEDIANTE EL
USO DE IMÁGENES ACÚSTICAS**

por

Ronald J. O'Brien


Dr. Leonardo Molisani
Director


Dr. Ricardo Burdisso
Co-Director

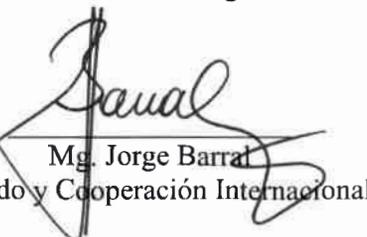
APROBADA POR:


Dr. Patricio Ravetta
Jurado


Dr. Víctor H. Cortínez
Jurado


Dr. Livio S. Maglione
Jurado


Dr. Leonardo Molisani
Secretario de Postgrado


Mg. Jorge Barral
Secretario de Posgrado y Cooperación Internacional de la U.N.R.C

MARZO 2014

DEDICADO

A mis dos grandes amores...

AGRADECIMIENTOS

Al Director de este trabajo de tesis, Dr. Leonardo Molisani, por acercarme este proyecto, por trasmitirme sus conocimientos, por su apoyo incondicional, sus consejos, su paciencia y su amistad. Al Co-Director Dr. Ricardo Burdisso por ser parte de este trabajo.

Al FONCyT y CONICET por el apoyo económico brindado durante la realización de esta tesis. A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto, por ser una institución de gran calidad que me brinda sus instalaciones. A las Autoridades, a los Docentes y No Docentes. Al Grupo de Acústica y Vibraciones (GAV), que me permitió desarrollar este trabajo. A los miembros del jurado por su tiempo dedicado.

A mi esposa, Georgina, por ayudarme a recorrer este camino y por estar conmigo en las alegrías y las tristezas. A mi hijo, Benicio, el cual llena mi corazón de alegría. A mis Padres, Patricio y Viviana, quienes me formaron como persona y me apoyaron para continuar con mis estudios. A mis hermanos, Denis y Tomás, por estar siempre a mi lado. A mis Abuelos, Elba, Rosa, Héctor y Patricio, por acompañar todos mis logros. A mis tíos y primos. A Liliana y Antonio por acompañar mis sueños.

A mis compañeros del GAV, Adriana, Daniel, Guillermo, Gonzalo, Nicolás, Juan, Jorge, Oscar, Manuel y Lina por orientarme, estimularme y acompañarme en este gran desafío pero sobre todo por su amistad. Al Dr. Sergio Preidikman por iniciarme en el camino de la investigación y por su amistad. A Marcos por su gran amistad y por compartir el deseo de aportes innovadores a la sociedad. A Luis y a Bruno por su contribución pero sobre todo por su amistad. Al Grupo de Electrónica Aplicada (GEA), al Grupo de Máquinas Térmicas e Hidráulicas (LMTH), a Diego Gallo y Luis Carusillo por sus soportes y apoyo para seguir avanzando en el desarrollo de esta tesis. A mis compañeros docentes con los que he compartido el dictado de clases, Raúl, Nicolás, Oscar, Daniel, Leonardo, Bruno, Juan, Mariano y Martín. A Rosita y Dina por sus charlas y sus cafecitos. A mis amigos, que acompañaron mis proyectos y mis logros en todo momento.

A todos ellos, por acompañar mis proyectos, por ser parte de mi vida y hacerme crecer tanto a nivel profesional pero sobre todo a nivel personal.

TABLA DE CONTENIDOS

INDICES DE TABLAS	xiii
INDICES DE FIGURAS	xv
RESUMEN	xix
ABSTRACT.....	xxi
1 INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	1
1.1 Introducción	1
1.2 Revisión Bibliográfica	5
1.2.1 Tecnología para la construcción de imágenes acústicas.	5
1.2.2 Optimización de arreglos de micrófonos.	8
1.2.3 Posproceso de datos para formación de imágenes acústicas.	10
1.2.4 Aplicaciones para detección de fuentes sonoras.	12
1.3 Objetivos	14
1.4 Contribución al estado del arte.....	14
1.5 Organización de la Tesis.	14
2 TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN DE IMÁGENES ACÚSTICAS.....	17
2.1 Imágenes acústicas y la ecuación de onda.	17
2.1.1 Ondas planas	17
2.1.2 Ondas esféricas.	18
2.2 Técnica de retraso y suma.	19
2.2.1 Ondas planas.	19
2.2.2 Ondas esféricas	23
2.2.3 Normalización.....	24
2.3 “Beamforming” Convencional.....	25
2.4 Calibración de la antena de micrófonos.	27
2.5 Cuantificación del mapa acústico.....	29
2.5.1 Retardo y suma: dominio temporal para ondas esféricas.	29
2.5.2 “Beamforming” convencional.	29
2.6 Técnica para mejorar resultados del Mapa acústico.	30
2.6.1 Remoción de la Diagonal Principal.	30
2.6.2 “Robust Adaptive Beamforming” (RABF).....	32
2.6.3 “Multiple signal clasification” (MUSIC).....	34

3	OPTIMIZACIÓN DE LA DISTRIBUCION DE MICROFONOS MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS.....	37
3.1	Resolución de la antena de micrófonos.....	37
3.2	“Aliasing” espacial.....	42
3.3	Máximo Lóbulo Lateral.	43
3.4	Algoritmos Genéticos.....	45
3.4.1	Algoritmos Genéticos: introducción.....	45
3.4.2	Algoritmo Genético: funcionamiento.	46
3.5	Optimización del Máximo Lóbulo Lateral mediante Algoritmos Genéticos... 47	
3.5.1	Diseño de la antena de 35 micrófonos.	48
3.5.2	Análisis de la distribución optimizada.....	52
3.6	Construcción de la antena, sistema de adquisición y micrófonos.....	54
4	TÉCNICAS DE IMÁGENES ACÚSTICA AVANZADAS.....	57
4.1	Introducción	57
4.2	Cepstrum	57
4.2.1	“Power cepstrum”	58
	<i>Ejemplo de aplicación de “power cepstrum” en fallas de rodamientos.</i>	<i>59</i>
4.2.2	“Complex Cepstrum”.....	61
	<i>Influencia de la SNR en el “complex cepstrum”.</i>	<i>61</i>
4.2.3	“Cepstrum Editing Procedure” (CEP).	63
	<i>Ejemplo de aplicación de filtros en el dominio “cepstral”</i>	<i>64</i>
4.3	“Acoustic High Dynamic Range” (HDR).....	68
4.4	“Acoustic High Dynamic Range” modificado con “diagonal removing” (HDR-DR).....	72
4.4.1	Ejemplo con fuente puntual.	75
4.4.2	Ejemplo con dos fuentes puntuales a diferente amplitud.	76
5	COMPARACIÓN DE TÉCNICAS Y APLICACIONES EXPERIMENTALES... 79	
5.1	Extracción de ecos de la imagen acústica con “Complex cepstrum” y “Cepstrum editing procedure” (CEP).....	79
5.1.1	Ensayos con “retardo y suma”.....	79
5.1.2	Imagen acústica con “Complex Cepstrum” y filtrado del eco.....	82
5.1.3	CEP	83
5.1.4	“Complex cepstrum” con fase de la señal sin reflexión.	83

5.1.5	“Acoustic HDR” y “Complex cepstrum” con fase de la señal sin reflexión.	87
5.2	Aplicaciones prácticas de las imágenes acústicas.	88
5.2.1	Introducción de la máquina a ensayar.....	88
5.2.2	Procedimiento de prueba de la bomba.	89
5.2.3	Comparación de los diferentes métodos de imágenes acústicas.	90
5.2.4	Comparación de “acoustic HDR” y “acoustic HDR-DR” con “retardo y suma”	93
6	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.	97
6.1	Conclusiones	97
6.2	Trabajos futuros	99
	REFERENCIAS.....	101
	ANEXO A.....	109
A.	SOFTWARE Y HARDWARE	109
1.	SOFTWARE	109
2.	HARDWARE.....	113
	ANEXO B.....	117

INDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Comparación de SNR con RPR.....	61
Tabla 4-2: Constante del cinematismo de los rodamientos y frecuencia a las cuales aparecen las falla.....	64



INDICE DE FIGURAS

Capítulo 1:

Figura 1-1: Mediciones de Nivel de presión sonora global.	1
Figura 1-2: Uso de la técnica de imágenes acústicas.	2
Figura 1-3: Comparación en resolución entre la técnica de “beamforming” y “Planar Near field Acoustic Holography” (PNAH).	6
Figura 1-4: Aeropuerto de Kai Tak en China.	13

Capítulo 2:

Figura 2-1: Arreglo de micrófonos haciendo foco en la dirección de las ondas planas que se propagan desde el infinito.	19
Figura 2-2: (a) Posición de la fuente. Suma constructiva, (b) Señal de interferencia o ruido. Suma destructiva.	20
Figura 2-3: “array pattern” correspondiente a la distribución de micrófonos pertenecientes a la Figura 2-4.	22
Figura 2-4: Ejemplo de una distribución de 16 micrófonos (●) en forma regular.	23
Figura 2-5: esquema de propagación de ondas esféricas.	24
Figura 2-6: Medición de un arreglo lineal con respecto a un punto de la grilla.	26
Figura 2-7: Mapa de ruido con “beamforming” convencional a 2000 Hz.	27
Figura 2-8: (a) Beamforming Con Autoespectro, (b) Beamforming Sin Autoespectro.	32
Figura 2-9: Diferencia entre el lóbulo principal y en máximo lóbulo lateral, (a) $\gamma = 0.01$, (b) $\gamma = 0.001$, (c) $\gamma = 0.0001$, (d) $\gamma = 0.00005$, (e) $\gamma = 0.00003$, (f) $\gamma = 0.0000205$	33
Figura 2-10: Variación de energía acústica, (a) $\gamma = 0.01$, (b) $\gamma = 0.001$, (c) $\gamma = 0.0001$, (d) $\gamma = 0.00005$, (e) $\gamma = 0.00003$, (f) $\gamma = 0.0000205$	34

Capítulo 3:

Figura 3-1: Esquema de dos ondas incidiendo sobre un arreglo de micrófonos plano.	37
Figura 3-2: Comparación del ángulo de incidencia de las ondas con respecto a la resolución del arreglo de micrófonos.	40
Figura 3-3: Cobertura de la distribución de micrófonos 2-D con buena resolución a una distancia z.	41
Figura 3-4: Tamaño de la superficie de la apertura a una distancia de 500 mm relativa al arreglo de micrófonos.	41
Figura 3-5: Distribución de micrófonos con una distancia mínima de 0,08 m.	42
Figura 3-6: Efectos del “aliasing” espacial.	43
Figura 3-7: Comparación entre $MLL(K)$ y $Wp(K)$	44
Figura 3-8: pseudo-código de funcionamiento de los AGs.	46
Figura 3-9: Distribución aleatoria.	48
Figura 3-10: a) Se observa la cantidad de generaciones y b) los valores para cada variable.	49
Figura 3-11: arreglo de 35 micrófonos optimizado mediante GA hasta 12000 Hz.	50

Figura 3-12: a) Se observa la cantidad de generaciones y b) los valores para cada variable. La Figura 3-13 muestra el arreglo de micrófonos obtenido mediante esta optimización.....	51
Figura 3-13: arreglo de 35 micrófonos optimizado mediante GA hasta 6000 Hz.	51
Figura 3-14: Posición de las fuentes de ruido.....	52
Figura 3-15: Comparación del MLL de las distribuciones optimizadas.....	53
Figura 3-16: (a) Distintos arreglos de 35 sensores de presión (de izq. A der. Grilla regular, Estrella y Optimizado A.G) y las comparaciones de las (b) simulaciones.....	53
Figura 3-17: Comparación del MLL para una distribución comercial de 66 micrófonos vs. la optimizada mediante AG de 35 micrófonos.....	54
Figura 3-18: Fase relativa al micrófono 1.....	55
Figura 3-19: Sistema de acondicionado y adquisición de datos.	56

Capítulo 4:

Figura 4-1: (a) Señal en el tiempo (b) señal en la frecuencia y (c) señal en el dominio cepstral (“Power Cepstrum”).	60
Figura 4-2: Muestra la variación en la detección del pico de 100 msec en relación a SNR de la señal en el dominio temporal.....	62
Figura 4-3: Diagrama esquemático del CEP.....	64
Figura 4-4: Banco de ensayos de rodamientos [75].....	65
Figura 4-5: Motor sin carga. (a) Rodamiento sano, (b) falla pista interna de 0.07”.....	65
Figura 4-6: Las frecuencias en azul corresponden a la primera frecuencia de giro hasta su cuarto armónico y la frecuencia en rojo corresponde a la falla de la pista interior....	66
Figura 4-7: Señal Cepstrum real. Se editaron las frecuencias correspondientes a las frecuencias de giro del eje y sus “rahmonics”.....	67
Figura 4-8: Espectro de frecuencias de la señal editada.	67
Figura 4-9: “Complex cepstrum” filtrado.....	68
Figura 4-10: Espectro logarítmico de frecuencias.	68
Figura 4-11: MLL (Máximo Lóbulo Lateral) de la distribución optimizada con AG....	69
Figura 4-12: (a) Retardo y suma, (b) “acoustic HDR”.....	72
Figura 4-13: (a) “Retardo y suma” con HDR, (b) “Retardo y suma” con DR-HDR.....	74
Figura 4-14: (a) Retardo y suma, (b) Retardo y suma sin autocorrelación.....	75
Figura 4-15: (a) HDR, (b) HDR con DR, (c) Mapa remanente de HDR, (d) Mapa remanente de HDR con DR.	76
Figura 4-16: (a) Retardo y suma, (b) Retardo y suma sin autocorrelación.....	77
Figura 4-17: (a) HDR, (b) HDR con DR, (c) Mapa remanente de HDR, (d) Mapa remanente de HDR con DR.	78

Capítulo 5:

Figura 5-1: Vista lateral del ensayo experimental.	80
Figura 5-2: Imagen acústica con reflexión.	81
Figura 5-3: “retardo y suma” con material acústicamente absorbente en el piso.....	81
Figura 5-4: “retardo y suma” con “complex cepstrum”.(a)Rango dinámico 55.5 – 50 dB ref. 20 μ Pa, (b) Rango dinámico 51 – 48.5 dB ref. 20 μ Pa.	82

Figura 5-5: “retardo y suma” con “CEP”.....	83
Figura 5-6: corrección de fase en los datos filtrados con “complex cepstrum”	84
Figura 5-7: “retardo y suma” con “complex cepstrum” filtrando solo el valor del eco y con fase corregida.	85
Figura 5-8: “retardo y suma” con “complex cepstrum” filtrando 10 puntos y con fase corregida.	86
Figura 5-9: “retardo y suma” con “complex cepstrum” filtrando 90 puntos y con fase corregida.	86
Figura 5-10: (a) “complex cepstrum” con corrección de fase y “acoustic HDR”, (b) mapa remanente de (a), (c) “complex cepstrum” con corrección de fase y “acoustic HDR-DR”, (d) mapa remanente de (c).	88
Figura 5-11: (a) Motor y Bomba de engranajes. (b) Entrada y salida de fluido de la bomba con su válvula de alivio.....	89
Figura 5-12: Detalle de la forma de los engranajes helicoidales doble.	89
Figura 5-13: Dimensiones del mapa de ruido y posición del centro del arreglo de micrófonos a 1 m de distancia relativa entre arreglo y máquina.	90
Figura 5-14: Mapa de ruido a 600 Hz con usando “beamforming” con válvulas abiertas.	91
Figura 5-15: (a) “beamforming”, (b) “robust adaptive beamforming”, (c) MUSIC y (d) “retardo y suma”.	92
Figura 5-16: (a) Señal en el dominio cepstral (Línea azul =filtrada; Línea roja=original). (b) Imagen acústica mediante “retardo y suma - cepstrum”.	93
Figura 5-17: (a) Retardo y suma en escala dB ref. 20μPa. (b) Retardo y suma sin autocorrelación en escala dB ref. 20μPa.....	93
Figura 5-18: (a) Imagen acústica con HDR, (b) mapa remanente de (a), (c) imagen acústica con HDR-DR, (d) mapa remanente de (c)	95

Anexo A:

Figura A-1: Pantalla principal con diferentes opciones.....	109
Figura A-2: Visualización de resultados.....	110
Figura A-3: Parámetros de la medición.	110
Figura A-4: Calidad de medición.....	111
Figura A-5: Visualización de medidas de micrófonos.....	111
Figura A-6: Video y foto adquirida mediante web cam.	112
Figura A-7: Visualización de la medición de un micrófono en tiempo y frecuencia. ..	112
Figura A-8: Sistema de detección de fuentes sonora en funcionamiento (software)....	113
Figura A-9: Sistema de adquisición y antena de micrófonos (hardware).....	114

RESUMEN

En la actualidad existen diferentes tipos de técnicas para cuantificar y cualificar la posición de una fuente sonora. Entre las técnicas modernas una de las más utilizadas son las imágenes acústicas, éstas se obtienen mediante el proceso de datos adquiridos por un arreglo de micrófonos, que constituye una antena, localizado a una distancia relativa del aparato emisor de ruido. Para la obtención de imágenes acústicas, en este trabajo se desarrolló una tecnología novedosa, optimizando el diseño de la distribución de sensores de presión y el proceso de obtención de la imagen acústica.

Entre los dispositivos utilizados en este esfuerzo la antena acústica es parte de los desarrollos, junto con los sensores de presión. Más aún, la distribución de los sensores de presión está relacionada implícitamente con el rango dinámico de la antena, que es un parámetro fundamental para la calidad de las mediciones. El rango dinámico está influenciado principalmente a través del Máximo Lóbulo Lateral (MLL) o como se lo denomina en la literatura de lengua inglesa "Maximum Side Lobe" (MSL). El parámetro MLL de la antena acústica se optimizó mediante el uso de algoritmos genéticos. De esa forma, con la antena acústica optimizada se obtuvieron los puntos principales de emisión de las fuentes de ruido evitando así, obtener falsas mediciones provenientes del efecto del MLL.

En cuanto a los tipos de post procesos, "Beamforming" (BF) es uno de los más utilizados, pero desafortunadamente presenta poca capacidad de distinguir la localización de dos fuentes de ruido emitiendo a baja frecuencia. Para superar esta desventaja, en este trabajo se investigaron diferentes técnicas. En primera instancia, se implementó "Robust Adaptive Beamforming" (RABF), en el cual se utilizó la información recolectada mediante los micrófonos para eliminar ruido blanco en la imagen acústica y evitar fuentes espurias en el mapa de ruido. Luego, se usó un método de alta resolución como es "Multiple Signal Classification" (MUSIC).

También se trabajó con Retardo y suma ("Delay and Sum"), el cual en comparación con los métodos anteriores, se realiza en el dominio del tiempo. Este caso es más general que los métodos en el dominio de la frecuencia ya que se puede aplicar en todo el ancho de banda de la señal y puede utilizarse fácilmente en fuentes de ruido no estacionarias. También puede utilizarse en anchos de banda angosto mediante un filtrado de la señal pero es recomendable usar anchos de banda superiores a 1/12 de octava para mejorar significativamente los lóbulos laterales.

En esta tesis doctoral se utiliza la transformada Cepstrum para mejorar la formación del mapa de ruido. Esta nueva técnica de “Retardo y suma – Cepstrum” permite eliminar ecos de la señal y detectar periodicidad en el espectro para mejorar la relación SNR y así optimizar los mapas de ruidos para ser utilizados en aplicaciones tecnológicas.

Luego se implementó el algoritmo “HDR” (High Dynamic Range) el cual permite aumentar el rango dinámico de las imágenes acústicas mejorando así su resolución y capacidad de visualizar fuentes de ruido ocultas. Sin embargo, existen dos desventajas en la utilización de esta técnica la primera es que no permite eliminar reflexiones y la segunda es que en lugares con ruido de fondo alto no permite detectar de forma correcta las fuentes de ruido. Para superar estos inconvenientes el autor propone en la primera desventaja la modificación de HDR por “HDR-cepstrum”, esto permite eliminar las reflexiones del mapa de ruido y para resolver la segunda desventaja se propone la eliminación del contenido auto correlacionado de la imagen acústica, a esta novedosa modificación se la denominará “HDR-DR” (High Dynamic Range-Diagonal Removing). HDR-DR no se encuentra en la literatura científica actual, por lo que este nuevo algoritmo contribuye como un aporte original del autor al estado del arte en el área de imágenes acústicas.

En particular se utilizó el sistema de imágenes acústicas para la detección de fallas en máquinas rotativas. Esta metodología novedosa permite monitorear una máquina completa sin la necesidad de evaluarla punto a punto. De esa manera, visualizando la imagen acústica podemos detectar variaciones en las intensidades y localización de las fuentes de ruido lo que posibilita asociar estos cambios a fallas.

Mediante el sistema de detección de fuentes ruido desarrollado en este trabajo es posible contar con una herramienta de propósito múltiple. La cual puede ser utilizada para cumplimentar las exigencias de las normas sobre regulaciones de emisiones acústicas hacia el medioambiente hasta establecer distintas estrategias de control sobre las fuentes de emisión de ruido o detectar fallas en máquinas rotativas.

ABSTRACT

Nowadays there are different types of techniques to quantify and qualify the position of sound sources. Among the modern techniques, the most common, are the acoustic images. They are obtained by the processing of data acquired by a microphone array, which is called antenna. The antenna is located at a relative distance from the noise source. In this paper a new technology is developed to obtain acoustic images. The design of the distribution of pressure sensors and the process of obtaining the acoustic image was optimized by using different strategies.

In addition of the different devices used in this effort the acoustic antenna and the pressure sensors are part of the main developments. Moreover, the distribution of the pressure sensors is implicitly linked to the dynamic range of the antenna, which is a key for the measurement quality. The dynamic range is mainly influenced by the Maximum Side Lobe (MSL). The acoustic antenna MSL parameter was optimized by using genetic algorithms. Thus, with the main antenna optimized the acoustic emission point sources were obtained avoiding false measurements from the effect of MSL.

Beamforming (BF) is one of the acoustic image techniques more used. Unfortunately BF has little ability to distinguish the location of two noise sources radiating at low frequency. In this work different techniques were investigated to overcome this disadvantage. First the author implemented the Robust Adaptive Beamforming (RABF). The information collected by the microphones was process by using RABF to eliminate white noise in the acoustic image. Also spurious sources in the noise map were eliminated. Then a high-resolution method called MUltiple Signal Clasification (MUSIC) was used to enhance the acoustic image.

Also was analyzed the method Delay and Sum (DS), which compared to previous methods is performed in the time domain. This method is more general than the methods in the frequency domain because can be applied for broadband signal and can easily be used in non-stationary noise sources. DS can be used for narrow band signals by filtering the signal but it is advisable to use bandwidths filter greater than 1/12 octave band to significantly improve the side lobes.

The author proposes the usage of the Cepstrum Transform to improve the analysis capability in the acoustic images. This new approach of Delay and Sum – Cepstrum permits to eliminate echoes and detect particular signals in the frequency spectrum. Therefore the SNR is improved and also the quality of acoustic images is enhanced to

be used in technological applications.

The High Dynamic Range (HDR) algorithm allowed to increase the dynamic range of the acoustic imaging resolution and improved their ability to visualize hidden noise sources of noise. There are two disadvantages in using this technique. First HDR does not eliminate reflections and second in areas with high background noise cannot correctly detect the position of noise sources. To overcome the first disadvantage a combination of HDR and Cepstrum is proposed by the author. This novel strategy eliminates the reflections in the acoustic images. The second disadvantage is eliminated by a modification in the HDR algorithm. The main modification was the removal of the autocorrelated content improving the source locations in the acoustic images. Moreover the modification upon the HDR leads to a new algorithm called HDR-DR (High Dynamic Range- Removing Diagonal) by the author.

In particular the detection of faults in rotating machines was performed by using acoustic images. This novel approach allows monitoring a complete machine without the need to tediously evaluate the machine point to point. Thus, the acoustic image was able to detect variations in the acoustic intensity and source localizations which permit uncover machinery faults associated to the noise changes.

The enhanced noise source detection system developed in this work is a multipurpose tool. The novel approach proposed by the author is used to quantify the regulation requirements for noise emission to the environment. Therefore locating the noise sources different control strategies can be used to reduce the radiating noise or to detect faults in rotating machinery.

1 INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

1.1 Introducción

Actualmente, fabricantes, usuarios y empresas pueden evaluar el nivel sonoro de diferentes procesos o máquinas a través de mediciones experimentales realizadas mediante decibelímetros (Figura 1-1). Éstas son comparadas con estándares presentados por diversos entes reguladores para indicar si el nivel máximo permitido por norma es satisfactorio. Pero cuando se exceden los valores establecidos, en general, las mediciones convencionales no proveen suficientes datos para establecer qué partes de las fuentes son más importantes en la producción del ruido global. Por lo tanto, para poder cuantificar la contribución de cada parte es necesario desarrollar nuevas técnicas de medición.

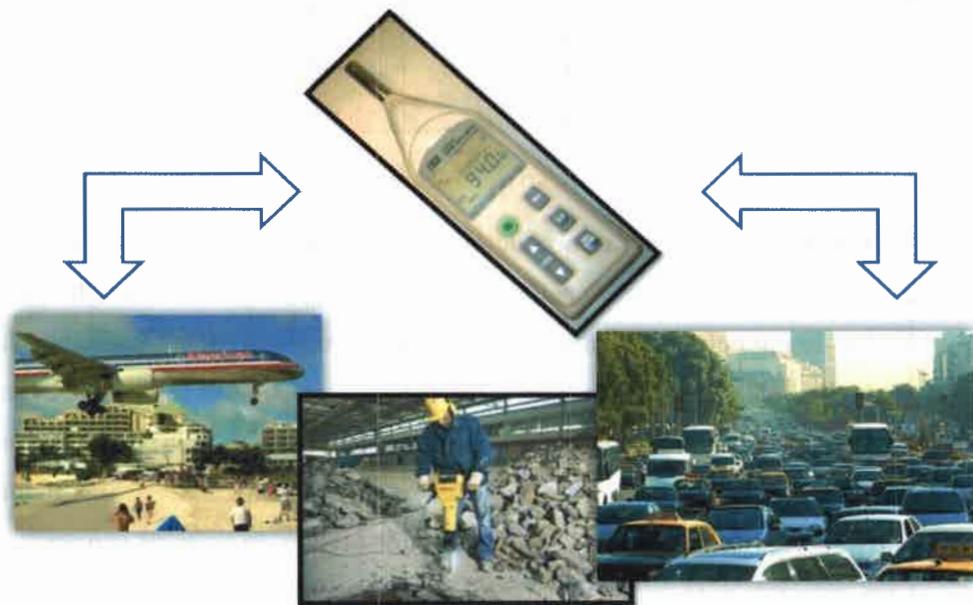


Figura 1-1: Mediciones de Nivel de presión sonora global.

Una alternativa a esta problemática, es el método de imágenes acústicas que es utilizado como una herramienta práctica para proveer la información experimental necesaria en espacio y tiempo de la contribución de las distintas partes de la fuente de ruido. Como puede observarse en la Figura 1-2, los métodos de las imágenes acústicas se basan en la adquisición de datos por medio de un arreglo de sensores de presión llamado antena. Mediante los resultados adquiridos a través del sistema de adquisición y un posproceso adecuado de los mismos es posible crear una imagen acústica. Ésta permite observar la posición, frecuencia y magnitud de las fuentes sonoras de un cuerpo radiante de geometría complejo [1, 2].

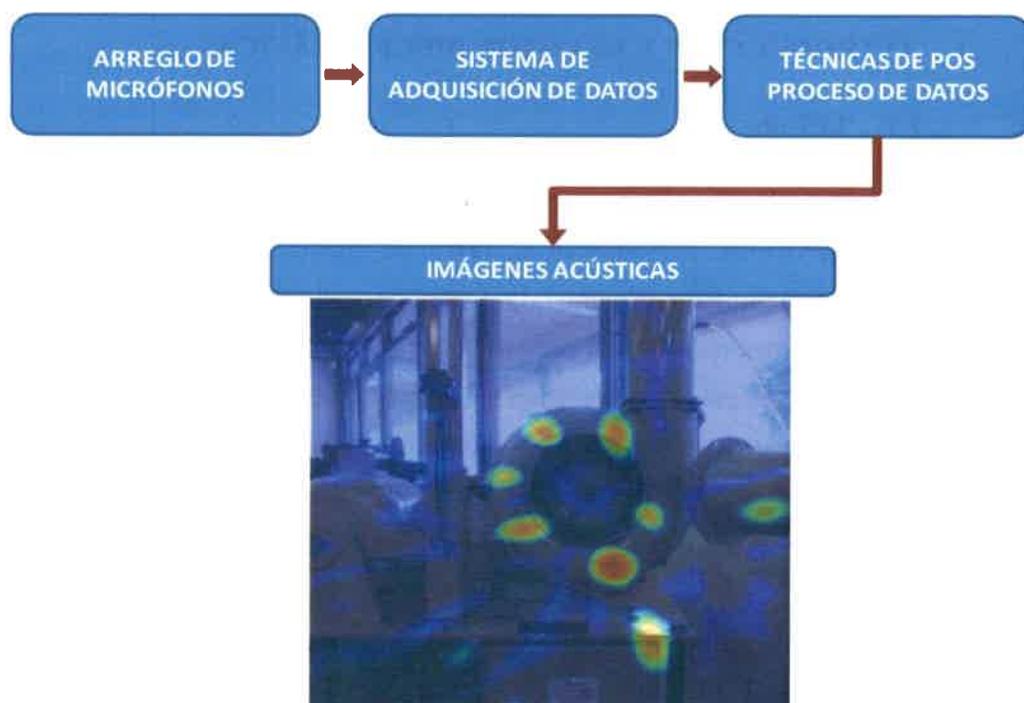


Figura 1-2: Uso de la técnica de imágenes acústicas.

Lo dicho, supone un enfoque innovador que aborde el análisis del ruido no desde el punto de vista de la cuantificación del problema global -como sucede con los actuales métodos de medición- sino desde el punto de vista de la identificación de las causas, la determinación de su importancia y la búsqueda de soluciones [3, 4, 5]. De esta manera, se pueden visualizar los lugares desde donde se irradia una mayor energía sonora permitiendo el diagnóstico del origen del ruido e identificando de una manera gráfica e intuitiva las partes de la máquina con mayores niveles de emisión sonora.

En relación a lo expuesto, el presente trabajo de tesis centra la atención en la detección de fuentes sonoras para actuar sobre el origen del riesgo y minimizar su impacto. Para lograr este objetivo general se dividió el estudio como se observa en la Figura 1-2. Como primer paso se desarrollaron las técnicas para realizar el diseño de la antena acústica. La misma está constituida por un arreglo espacial de sensores de presión. La distribución de los sensores de presión, afecta el rango dinámico de la antena y se manifiesta a través del Máximo Lóbulo Lateral (MLL). Para optimizar dicho parámetro se utilizaron algoritmos genéticos. Esta optimización fue parte del trabajo de maestría del autor, en la cual se realizaron pruebas con una antena de 16 micrófonos a través de ensayos experimentales y simulaciones para evaluar el comportamiento de la optimización. En el trabajo actual de tesis doctoral, se efectuó la optimización de una

antena con 35 sensores de presión, privilegiando aumentar el rango dinámico, la facilidad de construcción y transporte.

Como segundo paso se realizó la construcción del sistema de adquisición de datos y de los sensores de presión. El sistema de adquisición consta de 35 canales y contiene un acondicionamiento de la señal por hardware. En cuanto a los sensores de presión se fabricaron micrófonos de bajo costo y de la mejor calidad posible, el desarrollo de los mismos es parte de este trabajo.

Como tercer paso se implementaron diferentes técnicas de posproceso de datos que se utilizarán a lo largo de la tesis, "beamforming" convencional, retardo y suma, "robust adaptive beamforming" y "MUSIC", estas técnicas se realizaron mediante un software de desarrollo propio con una interface de usuario que permite realizar los ensayos, calibración y luego aplicar la técnica necesaria para la formación de imágenes acústicas.

En cuanto a "beamforming" convencional, "robust adaptive beamforming", "MUSIC" son técnicas que funcionan en el dominio de la frecuencia, por lo tanto permiten realizar mapas de ruido para cada frecuencia de estudio. En el caso de "beamforming" convencional las señales adquiridas a través de los micrófonos de la antena acústica son llevadas al dominio de la frecuencia a través del uso de la transformada rápida de Fourier (FFT). Posteriormente, con los datos obtenidos se construye una matriz espectral para cada componente. Esta técnica permite eliminar el ruido propio de los sensores de presión a través de la remoción de la diagonal principal de la matriz espectral cruzada ("Cross Spectral Matrix" (CSM)). Por último, se direcciona el arreglo de micrófonos a cada punto de una grilla espacial mediante un modelo de propagación de onda donde se puede calcular la presión sonora en un punto determinado del espacio. Después que el proceso de "beamforming" ha terminado, el máximo valor de nivel de presión sonora se asocia a la posición de la fuente para la frecuencia de estudio. Por su parte, "robust adaptive beamforming" permite mejorar el modelado del vector dirección a través de los datos experimentales obtenidos en la CSM. Este método permite aumentar la resolución del mapa de ruido y disminuir los lóbulos laterales. Por último "MUSIC", la cual es una técnica de alta resolución que utiliza las propiedades de descomponer la CSM en autovectores y autovalores para reconstruir una matriz espectral cruzada, CSM_R , solo con los autovectores que representan al ruido. Por lo tanto, como el vector dirección es ortogonal al dominio del ruido el producto de la CSM_R y el vector dirección será muy cercano a cero en la ubicación de la fuente sonora. Esta técnica se desempeña muy bien para fuentes simuladas pero es muy sensible a variaciones de

posición de los micrófonos o a señales con baja relación señal-ruido cuando se implementa en la práctica.

Las técnicas mencionadas anteriormente se desarrollan en el dominio de la frecuencia a diferencia de la técnica de retardo y suma que se realiza en el dominio del tiempo. Esta técnica es más general que “beamforming” convencional ya que realiza el mapa de ruido sobre la señal con todo su ancho de banda y se puede utilizar fácilmente en situaciones con fuentes de ruido no estacionarias. Para poder formar la imagen acústica se utiliza el retardo que existe desde el punto que se quiere medir la presión sonora hasta cada micrófono luego las señales son igualadas temporalmente con los retardos y sumadas. En caso que la fuente de ruido se encuentre en la posición que el arreglo de micrófonos está observando, la señal se sumará constructivamente, en caso contrario la señal se sumará de forma destructiva.

Aparte de los algoritmos ya mencionados se estudiaron e implementaron en el software desarrollado dos algoritmos novedosos. El primero se basa en utilizar la transformada “cepstrum” con la técnica de retardo y suma. Esta transformada es una técnica de procesamiento de señales no lineales. Permite transformar en una sumatoria, mediante el logaritmo, señales que estaban convolucionadas o multiplicadas en el dominio temporal. Luego, se pueden recuperar las señales en el dominio temporal mediante una transformada “cepstral” inversa de la señal de interés para realizar el proceso de formación de la imagen acústica. Uno de los problemas que trae aparejado, realizar esta transformación, es la recuperación de la fase en el dominio temporal, por lo tanto se estudiaron las técnicas de “complex cepstrum”, “cepstral editing procedure” (CEP) y filtrado homomórfico para evaluar su desempeño. Ya que la fase de las señales son de vital importancia para localizar precisamente la fuente de ruido.

El segundo algoritmo se basa en una modificación de la técnica de “High Dynamic Range” (HDR). Esta técnica surge como alternativa de aumentar el rango dinámico de la imagen acústica. Ya que, en general, el rango dinámico que se encuentra en el diseño de las antenas de micrófonos es de 8 a 15 dB aproximadamente, esto depende del número de micrófonos y su posición espacial, la ecuación que se utiliza para calcular estos valores es la (3.18). Por lo tanto, en el caso que haya fuentes de ruido con diferencia de amplitud mayor a 15 dB no se podrán distinguir en el mapa de ruido. Este inconveniente se soluciona agregando mayor cantidad de micrófonos en el hardware pero esto incrementar también el costo de la antena. La otra forma de solución es mediante el posproceso adecuado de los datos. Por lo tanto, gracias al aumento en la capacidad de cálculo

computacional es conveniente desarrollar un algoritmo que logre este cometido.

En el año 2012, Döbler *et. al.* presentaron un algoritmo basado en el método de “High Dynamic Range” utilizado en el posprocesamiento de imágenes [6]. A este nuevo algoritmo lo denominaron “acoustic HDR”. La idea básica del método es extraer del mapa de ruido la máxima fuente sonora incluyendo sus lóbulos laterales y colocarlo en un mapa “limpio”, luego con las señales sin la fuente principal se vuelve a reconstruir el mapa de ruido y nuevamente se extrae la segunda fuente dominante con sus lóbulos laterales. De esta manera se puede aplicar sucesivamente el método hasta extraer la cantidad de fuentes seleccionadas, esto permite obtener un mapa de ruido con baja influencia de fuentes fantasmas y aumentar el rango dinámico de la imagen acústica. La modificación que se propone en este trabajo es eliminar la autocorrelación en el proceso de las señales de los micrófonos. Esto permite limpiar el mapa de ruido de amplificaciones indeseadas de las señales de cada micrófono en particular.

Por lo tanto, el desafío en esta tesis involucra el diseño y desarrollo de una antena y software para la formación de las imágenes acústicas. Este esfuerzo tendrá incidencia directa en la producción de capacidades y herramientas que prestarán servicio directo a la comunidad, a empresas regionales [7], permitiendo desarrollar el estado del arte a nivel nacional e internacional.

1.2 Revisión Bibliográfica

La revisión de la bibliografía aborda las siguientes temáticas: tecnología para la construcción de imágenes acústicas, optimización de arreglos de micrófonos, posproceso de datos para formación de imágenes acústicas, y aplicaciones para detección precisa de fuentes sonoras.

1.2.1 Tecnología para la construcción de imágenes acústicas.

Desde la década de los '40 nacieron diferentes métodos para realizar imágenes acústicas basadas en arreglos de micrófonos. En general existen tres métodos principales para la formación de imágenes acústicas: Holografía Acústica de Campo Cercano del inglés “near field acoustic holography” (NAH), Métodos inversos del inglés “inverse methods” y “beamforming”.

Holografía Acústica de Campo Cercano

Esta técnica fue desarrollada por Maynard, Williams y Veronesi [8, 9] donde tomando un estudio previo realizado por Graham describen el campo de sonido cercano a

la fuente. A través de sus estudios, desarrollaron un método llamado “Planar Near field Acoustic Holography” (PNAH), el cual, al igual que “beamforming” convencional puede reconstruir mapas de ruidos.

El PNAH permite visualizar los mapas de ruido con mayor resolución que el “beamforming” convencional en bajas frecuencias, colocando el arreglo de micrófonos en el campo cercano de la fuente de ruido. De esa manera permite captar las ondas planas y las evanescentes de la fuente. Por lo tanto, en el caso de fuentes vibroacústicas que generalmente se presentan a bajas frecuencias, se puede lograr una mejor resolución de la fotografía acústica como se observa en la Figura 1-3.

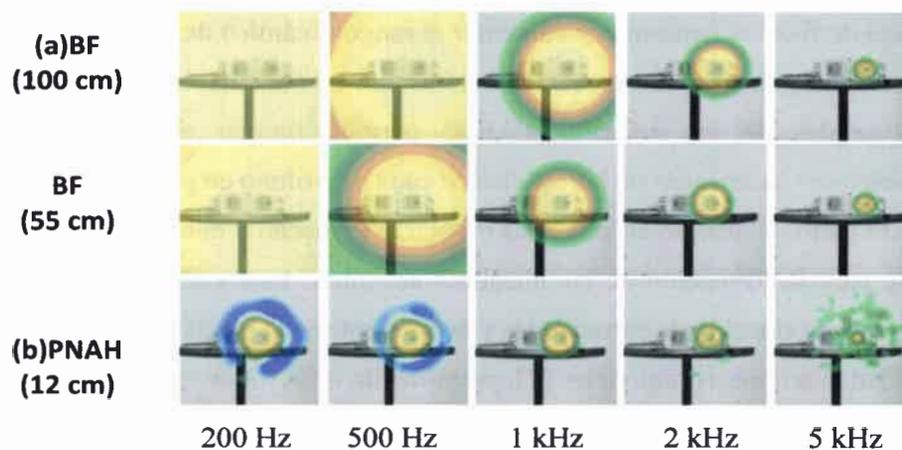


Figura 1-3: Comparación en resolución entre la técnica de “beamforming” y “Planar Near field Acoustic Holography” (PNAH).¹

En el año 2001, Steiner y Hald desarrollaron la técnica “Statically Optimized Near field Acoustic Holography” (SONAH) [10]. En comparación con PNAH, este método no utiliza la transformada discreta de Fourier (DFT), la cual es una limitante al momento de realizar el diseño de la distribución de micrófonos.

Métodos Inversos

Las segunda técnica, Métodos Inversos, también fue descrita por Maynard y Veronesi mediante el método inverso de elementos de borde (IBEM) [11]. Utiliza los datos obtenidos del sistema de adquisición usado con Holografía Acústica de Campo Cercano. Esta técnica, permite modelar la forma de la fuente de ruido evaluando una superficie de forma compleja como por ejemplo es un motor eléctrico. Dentro de los Métodos Inversos se desarrollaron tres alternativas: HELS, ESM y IPTF.

¹ Extraída de dominio público

<http://www.microworld.com/measurement-techniques/near-field-measurement-technique.html>.

El método de ecuación de Helmholtz con mínimos cuadrados del inglés “Helmholtz Equation-Least-Squares” (HELs) fue desarrollado por Wang en el año 1997 [12]. El mismo, utiliza expansión de ondas esféricas del inglés “spherical wave expansion” (SWE) para reconstruir el campo de presiones de un objeto vibrando. Un método similar es el de Fuentes equivalentes que proviene del inglés “Equivalent Source Method” (ESM), el cual permite representar el campo sonoro de una fuente de ruido a través de un número de monopolos ubicados sobre la misma. Esta representación equivalente de la fuente es luego usada para estimar el campo de sonido en lugares donde no se han realizado mediciones [13, 14]. La tercera alternativa se denomina Función de transferencia por camino inverso que proviene del inglés “Inverse Patch Transfer Function” (IPTF) y fue propuesto por Totaro *et al.* [15] en el año 2008. Este último, utiliza la medición de la presión y la velocidad de partícula cerca de la superficie a examinar. Luego, se realiza un modelado mediante elementos finitos para describir el volumen que encierra la fuente de ruido y el campo de puntos medidos.

Las técnicas citadas en el párrafo anterior, utilizan métodos numéricos para poder resolver los sistemas de ecuaciones que surgen de su aplicación. Uno de los problemas que conlleva la utilización de los procedimientos es el mal condicionamiento de esos sistemas. Este concepto fue definido por Hadamard en los comienzos del siglo XX. En esencia, un problema es mal condicionado si la solución no es única o si una perturbación muy pequeña causa una gran variación en los resultados [16].

Tikhonov fue uno de los precursores en trabajar con problemas mal condicionados en las décadas del '40 y '50. Con sus investigaciones logró desarrollar el método de regularización de Tikhonov, el cual es utilizado en las técnicas descriptas anteriormente. En el año 1971, Hanson [17] aplicó el procedimiento descomposición por valores singulares “Singular Value Decomposition” (SVD) para poder resolver un sistema de ecuaciones lineales y propuso la técnica descomposición por valores singulares truncada “Truncated Singular Value Decomposition” (TSVD).

Con el paso de los años, se siguieron desarrollando métodos de regularización. En algunos casos, se estudia la forma en que los problemas convergen a su solución [18]. Tarantola [19] orientó sus investigaciones desde el punto de vista probabilístico. Para ello, utilizó ampliamente el método de Monte Carlo y ciertas hipótesis probabilísticas que le permitieron, en algunos casos, obtener una solución analítica.

“Beamforming”

Como se mencionó anteriormente las técnicas de NAH y Métodos Inversos tienen muy buena resolución a baja frecuencia en comparación con “beamforming” [20], pero como desventaja la antena debe cubrir el tamaño de la fuente sonora, por lo tanto al momento de analizar una máquina de gran tamaño requiere muchas mediciones. En cambio, con “beamforming”, la antena usada puede ser más chica que la fuente de ruido y con una sola medición se pueden realizar imágenes acústicas de gran tamaño. Otra desventaja de estos métodos en comparación con “beamforming” es que se debe estar cerca de la fuente sonora para poder captar las ondas evanescentes, esto es perjudicial en situaciones donde no se puede acercarse a la antena hasta la fuente sonora. Es por ello que en este trabajo de tesis se utiliza la técnica de “beamforming” ya que permite tener una herramienta de propósito general. Por lo tanto, a continuación se presenta el estado del arte sobre el desarrollo de la antena de micrófonos o “phased array” y en el apartado 1.2.3 se desarrollarán los algoritmos de mejoras asociados con “beamforming”.

1.2.2 Optimización de arreglos de micrófonos.

El desarrollo de los métodos mencionados anteriormente fueron acompañados de avances en las tecnologías de mediciones. Sobre estos aspectos, se han desarrollado diferentes estrategias a través de los años donde la tecnología de “phased array” o arreglo de micrófonos sigue siendo la más utilizada dado que utiliza un conjunto de datos adquiridos mediante un arreglo de micrófonos donde se les realiza un posproceso direccionándose a cada punto del espacio, en los cuales se considera en general una fuente monopolo [21] como modelo de propagación, de esta forma se construye la imagen acústica del área estudiada. Por lo tanto, con una sola medición se puede obtener la distribución de las fuentes de ruido.

La tecnología “phased array” se comenzó a desarrollar para antenas de radar durante la Segunda Guerra Mundial [22, 23] y su implementación fue a través de un arreglo de hidrófonos para la detección de submarinos. En 1974, el primer sistema de detección de fuentes sonoras basado en micrófonos fue desarrollado por John Billingsley [24]. Al año siguiente, Soderman y Noble [25] usaron la técnica de retardo y suma en el tiempo aplicada a un arreglo lineal de micrófonos. Luego, en 1976 Billingsley y Kinns [26] desarrollaron un sistema de localización de fuentes de ruido para ser utilizado en el motor de un avión jet. Sin embargo, debido a las limitaciones técnicas de la época la señal se

convertía de analógica a digital mediante dos placas A/D las cuales se utilizaban para adquirir 14 señales de forma multiplexada.

Por otro lado, en 1976 se desarrolló una tecnología diferente llamada espejos acústicos que fue implementada por Grosche y Kendall [27, 28]. Los mismos, eran cóncavos y de forma elíptica con un micrófono colocado en el punto focal. Para detectar las fuentes de ruido distribuidas se debía mover el espejo, por lo que se tornaba dificultoso realizar las mediciones de forma rápida y continua en fuentes de baja frecuencia, ya que el tamaño del espejo era muy grande. Ante esta dificultad, se continuó desarrollando la tecnología de "phased array" convencional.

Hasta aquí, los arreglos de micrófonos que se utilizaban eran lineales. Estos, no permitían localizar espacialmente una fuente de ruido, sólo detectaba la dirección de arribo de la señal. Entonces, con la necesidad de localizar espacialmente las fuentes de ruido diferentes físicos e ingenieros comenzaron a trabajar con arreglos de micrófonos en dos dimensiones. Los primeros en utilizar un arreglo en dos dimensiones fueron Brooks *et al.* [29] para realizar mediciones aeroacústicas. Esto disparó la utilización de esta tecnología en diferentes ámbitos de investigación como por ejemplo en túneles del viento, situaciones de campo libre, ensayos "pass by" de vehículos, cámaras anecoicas, etc. Esto conllevó a que la interpretación de los resultados pueda ser dificultosa como consecuencia de diferentes efectos asociados a la distribución de micrófonos [30]. Algunos de los cuales se detallan en los siguientes párrafos.

Cada arreglo de micrófonos tiene una característica particular denominada "array pattern" el cual está dado por la distribución de los micrófonos. De acuerdo al "array pattern" la antena presentará una respuesta que está formada por el lóbulo principal donde la antena ofrece mayor direccionalidad y por los lóbulos laterales que al ser más pequeños y casi imposibles de eliminar pueden modificar la posición de la fuente real o mostrar fuentes fantasmas en el caso de que la antena esté inmersa en un lugar muy reverberante. Este problema puede modificar las mediciones cuando se cuantifica el mapa de ruido [31].

Una posibilidad que se presenta a la hora de reducir los lóbulos laterales, es aumentar el rango dinámico de la antena acústica y la resolución mediante la optimización de la distribución de los sensores de presión. Para lograrlo, se debe romper la uniformidad de la distribución de micrófonos, por lo que generalmente se utilizan distribuciones que no son regulares. Esto incrementa el rango dinámico de la antena suprimiendo el "aliasing" espacial [32]. Con respecto a este tema, se han realizado una variedad de geometrías de

antenas acústicas las cuales no son aleatorias y tienen un rango dinámico determinado con un bajo nivel de lóbulos laterales. Su diseño se basa en espirales logarítmicas concéntricas [33] y espirales de Arquímedes [34]. También J. Hald y J. J. Christensen [35] propusieron una optimización de los máximos lóbulos laterales a partir de la técnica MiniMax que se basa en la teoría de juegos.

1.2.3 Posproceso de datos para formación de imágenes acústicas.

En referencia a los algoritmos, “beamforming” convencional es el más utilizado, este trabaja en el dominio de la frecuencia. Esta técnica comenzó a desarrollarse durante la Segunda Guerra Mundial en el dominio del tiempo con el nombre de “delay and sum” o retardo y suma. Luego, el avance de la electrónica permitió implementar de forma eficiente la “Fast Fourier Transform” o FFT y en los años ‘70 se logró implementar “beamforming” convencional [36]. Sobre la base de esta técnica se continuaron desarrollando mejoras a través del tiempo.

En el año 1974, Högbom desarrolló la técnica CLEAN usando la deconvolución de las imágenes obtenidas por los radio astrónomos [37]. Este método de deconvolución permite identificar el patrón del arreglo o “point spread function” de una fuente puntual y reemplazarlo por un solo rayo permitiendo “limpiar” la imagen acústica de fuentes fantasmas. Una desventaja de este método es que la obtención de la “point spread function” se realiza mediante simulaciones y se reemplaza por un rayo único pero existen situaciones que no es conveniente utilizar esta forma de modelado.

Otro tipo de algoritmo surge en el año 1982 con la incorporación del uso de cepstrum con las técnicas de localización de fuentes sonoras. Fuller [38] *et. al.* lo utilizaron para eliminar los ecos de señales simuladas en un arreglo lineal de micrófonos. Luego, unos años más tarde lo utilizaron para corregir la directividad de una fuente sonora cuando se encuentra cerca de una superficie reflectante [39].

En el año 1986, surge un algoritmo de alta resolución. Este permite distinguir dos fuentes de ruido muy cercanas entre sí y se denomina “MUltiple Signal Clasification” (MUSIC) [40]. Al año siguiente, Cox desarrolló el algoritmo “robust adaptative beamforming” [41], el cual permite reducir el ruido blanco no correlacionado en la imagen acústica.

Como se desarrolló en la sección anterior, se pueden reducir los lóbulos laterales mediante una correcta distribución de micrófonos. Otra posibilidad, es que una vez adquiridos los datos se les realice un pos proceso para poder suprimirlos de la imagen

acústica. En el año 2004, se desarrolló la técnica DAMAS [42] donde se relacionan los resultados del “beamforming” convencional con un modelo de fuentes determinísticas, en el que luego se resuelve un sistema de ecuaciones para obtener el nivel de presión sonora de las fuentes. En este caso, debido a que la matriz modelada no es invertible se debe resolver el problema mediante una técnica numérica de iteración, pero la desventaja es que insume mucho tiempo de cálculo. Más tarde, Dougherty [43] implementó técnicas de regularización para poder resolver el problema inverso pero también se observaron limitaciones las cuales son mencionadas por el autor en su trabajo.

Otra situación en la que los resultados de las fotografías acústicas se tornan dificultosos de entender es cuando el ruido de fondo es elevado como por ejemplo, al realizar mediciones en una industria o en un túnel del viento. El propósito se basa en evitar su amplificación para lo cual la técnica de “beamforming” convencional en el dominio de la frecuencia permite eliminar la diagonal principal [44] de la matriz espectral cruzada (“Cross Spectral Matrix” (CSM)) que contiene el autoespectro de la señal de los micrófonos. Con este procedimiento se obtienen mejores resultados en la visualización de la imagen acústica, pero se debe tener en cuenta en el momento de su integración [45, 46] para evitar diferencias en las magnitudes del nivel de presión sonora. Durante 2004, Dougherty [47] desarrollo la forma de eliminar autocorrelación en la técnica de “delay and sum” lo cual es el símil a realizar la extracción de la diagonal principal de la CSM en el dominio de la frecuencia.

Ravetta *et. al.* desarrollaron el método LORE en el cual se modela la “point spread function” mediante una función compleja y luego se resuelve un sistema de ecuaciones no lineales. De esta forma se obtiene una imagen acústica con muy poca influencia de lóbulos laterales. En el año 2007 se presenta una modificación de CLEAN denominada CLEAN-SC [48], esta modificación permite extraer los lóbulos laterales que sean espacialmente coherentes con el lóbulo principal. TIDY [49] es un método similar a CLEAN-SC pero se realiza en el dominio del tiempo.

Como se describió en la introducción, en el año 2012 Döbler *et. al.* presentaron un algoritmo basado en el método de “High Dynamic Range” [50] utilizado en el pos procesamiento de imágenes. A este nuevo algoritmo los denominaron “acoustic HDR” es similar a CLEAN [51] aunque se diferencia en que “acoustic HDR” trabaja en el dominio del tiempo mientras que CLEAN se realiza en el dominio de la frecuencia.

En la actualidad, la detección de fuentes sonoras se está utilizando en la industria automotriz, en el control de ruidos en aviones civiles y militares [52], en maquinarias, en

mantenimiento predictivo [53, 54], etc. La necesidad de tener una herramienta que permita realizar mediciones en la ubicación de las máquina en tiempo real produjo que se comenzaran a buscar alternativas para mejorar la técnica [55].

1.2.4 Aplicaciones para detección de fuentes sonoras.

Las imágenes acústicas se utilizan ampliamente en la industria para la detección de fuentes de origen aeroacústicas. Los aviones y cualquier tipo de vehículos producen ruidos aerodinámicos los cuales dependen de su velocidad. Por ejemplo, los trenes modernos [56, 57] superan fácilmente los 350 km/hr de modo que, en este rango de velocidades las fuentes aerodinámicas son las que prevalecen sobre otras como en el caso del ruido generado por el motor.

Actualmente, en el caso de reducción de ruidos en el interior de vehículos, aviones, trenes, etc., se utilizan distribuciones de micrófonos esféricas [58, 59], los cuales permiten utilizar la técnica “beamforming” evaluando el ruido en esferas concéntricas a las del arreglo de micrófonos. Lo mencionado, se puede comparar con la distribución en dos dimensiones la cual se utiliza comúnmente para evaluar mapas de ruido paralelos al arreglo.

Otro caso importante de aplicación de detección de ruidos es en aviones completos [60], turbinas de aviones y trenes de aterrizaje [61], ya que en muchos casos debido al incremento de la población mundial los aeropuertos han quedado inmersos en medio de las ciudades produciendo gran contaminación sonora como lo muestra la Figura 1-4. Para evaluar el ruido emitido por las turbinas se comenzó a utilizar en 2010 distribuciones de micrófonos en forma cilíndrica, donde se introduce la turbina a analizar y se obtienen así los lugares críticos de emisión sonora [62].

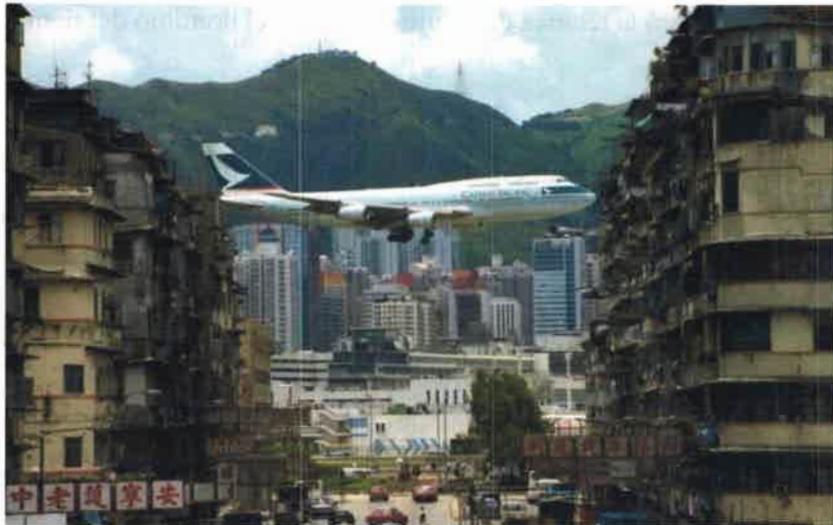


Figura 1-4: Aeropuerto de Kai Tak en China².

Una aplicación interesante de emisiones aeroacústicas es la reducción de ruidos por turbulencia en el desprendimiento del filo de un álabo de generadores eólicos. La misma, fue expuesta por Oerlemans et al [63] donde utilizaron un arreglo de micrófonos con un área de 270 m². Sin embargo, Ramachandran *et. al.* [64] muestran en estudios recientes la utilización de un arreglo con una superficie de 1,5 m², lo que permite trasladar fácilmente el sistema de un lugar a otro. Además, profundizan en la implementación de las técnicas CLEAN-SC y TIDY aplicadas a este tipo de problemas.

También se han realizado diferentes implementaciones de imágenes acústicas en el área de la detección de fallas en maquinarias asociando los diferentes mapas de ruido a posibles fallas. En general, las frecuencias asociadas a fallas son de baja frecuencia y en este sentido “beamforming” presenta dificultades en cuanto a su resolución.

Una alternativa a este inconveniente puede ser aumentar el tamaño del arreglo de micrófonos o trabajar con algoritmos alternativos que permitan aumentar la resolución y disminuir los lóbulos laterales. En el año 2001, [65] Hood et al. utilizaron un arreglo de micrófonos para encontrar fallas en ruedas dentadas. Luego, en 2007 [53] Ravetta *et al.* a través de simulaciones estudiaron las capacidades de instalar un arreglo de micrófonos en el techo de una industria para realizar el mantenimiento predictivo de las maquinarias. Camargo *et. al.* (2009) [66] realizaron una comparación de tres métodos de imágenes acústicas para la detección de fuentes sonoras a baja frecuencia. Otra aplicación reciente de imágenes acústicas, es en la detección de pérdidas en circuitos neumáticos [67], en

² Extraída de dominio público <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?p=53828233>.

donde se comparó la técnica de beamforming en el dominio del tiempo y frecuencia.

1.3 Objetivos

Este trabajo tuvo como objetivo principal el estudio y el desarrollo de herramientas novedosas que permitan obtener imágenes acústicas para la detección de fuentes sonoras.

Objetivos específicos:

- Aumentar la capacidad tecnológica para detectar las emisiones de las distintas partes de las fuentes emisoras al ruido total.
- Adquirir conocimientos sobre las distintas técnicas de imágenes acústicas.
- Desarrollar un código computacional para el posproceso de los datos adquiridos implementando diferentes algoritmos.
- Propiciar los conocimientos necesarios para realizar el diseño de una antena acústica (arreglo de micrófonos).
- Optimizar la distribución de micrófonos a través de técnicas de optimización, como por ejemplo algoritmos genéticos.
- Desarrollar e implementar un algoritmo novedoso para la formación de imágenes acústicas.
- Implementar las imágenes acústicas en mantenimiento predictivo de máquinas rotativas.

1.4 Contribución al estado del arte

Como contribución original de este trabajo se desarrolló el algoritmo DR-HDR el cual es una modificación del algoritmo HDR. Esta modificación permite quitar del mapa de ruido la contribución de la autocorrelación. Esto contribuye a quitar fuentes de ruido fantasmas de la imagen acústica y aumentar su rango dinámico.

También se implementó, a la técnica de retardo y suma, la transformada cepstrum. Esta permite, de acuerdo con la naturaleza de la fuente, eliminar las familias de armónicas, asociadas a ecos, con la deconvolución de fuentes de ruido o fuentes multiplicativas.

Se realizó un sistema de adquisición de datos y sensores de presión de bajo costo en comparación con los equipos existentes en el mercado. En cuanto a la distribución de los sensores de presión se realizó una optimización para poder aumentar el parámetro MLL.

1.5 Organización de la Tesis.

Este trabajo de tesis se organizó en cinco capítulos como se describe a continuación:

- Capítulo 1 – Proporciona una introducción y revisión bibliográfica del tema, como así también los objetivos y aportes al estado del arte que tiene esta tesis.
- Capítulo 2 – Se presenta la ecuación de ondas planas y esféricas. Luego, se realiza una descripción de la técnica de retraso y suma en ondas planas, ondas esféricas y su correspondiente normalización. Se introduce en la técnica de Retardo y suma y “beamforming” convencional. En este capítulo se describe cómo se realiza la calibración de la antena de micrófonos, las ventajas de eliminar la autocorrelación en el dominio temporal y la remoción de la diagonal principal de la matriz “Cross Spectral Matrix” (CSM) y cómo cuantificar el mapa acústico. También se describen dos técnicas en el dominio de la frecuencia, “Robust adaptive Beamforming” y “MUSIC”
- Capítulo 3 – Introduce los conceptos de resolución de la antena de micrófonos, “aliasing” espacial y Máximo Lóbulo Lateral (MLL). Se presenta una introducción a los Algoritmos Genéticos (AG). Estos se utilizan para realizar la optimización del parámetro Máximo Lóbulo Lateral (MLL) de una distribución de 35 micrófonos. Se realiza un análisis de los resultados mediante un campo de presiones simulado y se presenta la antena construida con su correspondiente acondicionamiento de señal.
- Capítulo 4 – Se realiza una descripción de las técnicas avanzadas comenzando con una descripción de “cepstrum”. Luego se realiza un ejemplo para mostrar las capacidades de “Power cepstrum”. Se describe el “complex cepstrum” y se estudia la influencia de la relación señal ruido mediante datos simulados. Otro método novedoso que se describe es CEP, este permite realizar la edición de señales con cepstrum pero manteniendo la fase original de los datos. Para poder aumentar el rango dinámico en las imágenes acústicas se utiliza HDR, el cual es descripto en este capítulo y se presenta la modificación novedosa HDR-DR la cual permite quitar la autocorrelación del mapa de ruido. Por último se presenta un ejemplo simple con una fuente puntual.
- Capítulo 5 – Se estudian los diferentes pos procesos de datos descriptos en los capítulos anteriores en distintas situaciones de uso de la antena de micrófonos construida. En primera instancia se utiliza “complex cepstrum” y CEP para la remoción del eco o reflexiones en las imágenes acústicas en conjunto con la

técnica de retardo y suma, HDR y HDR-DR. Luego se utiliza un banco de pruebas de bombas de engranajes para evaluar las técnicas de “beamforming” convencional, RABF, MUSIC, retardo y suma, retardo y suma-cepstrum, HDR y HDR-DR.

- Capítulo 6 – Muestra las conclusiones a las que se arriban a través de este trabajo de tesis, como así también una descripción de los trabajos futuros.

2 TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN DE IMÁGENES ACÚSTICAS.

2.1 Imágenes acústicas y la ecuación de onda.

Mediante las técnicas de formación de imágenes acústicas un receptor puede discriminar la dirección de llegada de diferentes señales que inciden sobre un arreglo de micrófonos. Estas técnicas presuponen un monopolo como fuente sonora emitiendo en cada punto de una grilla de escaneo virtual que encierra la fuente sonora en estudio. Entonces es necesario comenzar describiendo la ecuación que gobierna la propagación de ondas, la misma está dada por (2.1)

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

Donde ∇^2 representa el Laplaciano, c es la velocidad con que se transmite la onda en el medio y p representa la presión acústica.

2.1.1 Ondas planas

Las ondas planas son una solución particular de la ecuación (2.1). La propiedad que distingue a las ondas planas es que cada variable acústica tiene un valor constante en cualquier plano perpendicular a la dirección de propagación. Para que estas condiciones se cumplan es necesario considerar que la señal llega al arreglo de micrófonos desde un punto colocado en el infinito o que las ondas están lo suficientemente alejadas de la fuente sonora como para poder considerarlas planas. En el caso que la distancia entre la fuente sonora y el arreglo de micrófonos sea finita las ondas se deben considerar como esféricas.

Escribiendo el Laplaciano en coordenadas cartesianas y eligiendo la dirección de propagación de la onda a lo largo del eje x positivo, la ecuación (2.1) se reduce a.

$$\frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

Como la ecuación diferencial en derivadas parciales es de segundo orden se propone como solución dos funciones arbitrarias que sean diferenciables dos veces.

$$p(x, t) = \underbrace{F_1(ct - x)}_{\text{prop. (+)}} + \underbrace{F_2(ct + x)}_{\text{prop. (-)}} \quad (2.3)$$

Asumiendo que no existe reflexión, esto implica que solo una onda se propaga en la dirección positiva del eje x , por lo tanto en la ecuación (2.3) F_2 es igualada a cero y suponiendo una solución armónica $F_1 = A e^{i(\omega t - kx)}$.

$$p(x, t) = A e^{i(\omega t - kx)} \quad (2.4)$$

En la ecuación (2.4), $p(x, t)$ es la presión acústica, A es la amplitud de la fuente de ruido, ω es frecuencia angular de la fuente y k es el número de onda. Esta ecuación se puede extender para una onda viajando en una dirección arbitraria, por lo tanto la solución será.

$$p(x, y, z, t) = A e^{i(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z)} \quad (2.5)$$

Ahora podemos definir el vector de propagación $\vec{k} = k_x \hat{x} + k_y \hat{y} + k_z \hat{z}$ y un vector posición $\vec{r} = x\hat{x} - y\hat{y} - z\hat{z}$ con respecto al origen de coordenadas.

$$p(r, t) = A e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})} \quad (2.6)$$

2.1.2 Ondas esféricas.

Hasta aquí se consideró que la señal llegaba desde un punto situado en el infinito o lo suficientemente alejado como para que las ondas que lleguen a la distribución de micrófonos sean ondas planas. Ahora la distancia entre el arreglo de micrófonos y la fuente sonora es una distancia finita por lo tanto las ondas se deben considerar esféricas.

En este caso, el Laplaciano es conveniente escribirlo en coordenadas esféricas y asumiendo que la presión acústica p tiene solo variación espacial en la dirección radial, la ecuación (2.1) puede ser simplificada a una dimensión.

$$\nabla^2 p(r, \theta, \alpha, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(r, \theta, \alpha, t)}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

Nuevamente proponemos como solución dos funciones arbitrarias que sean diferenciables dos veces.

$$p(r, t) = \underbrace{\frac{F_1}{r} (ct - r)}_{\text{prop. (+)}} + \underbrace{\frac{F_2}{r} (ct + r)}_{\text{prop. (-)}} \quad (2.8)$$

Asumiendo que no existe reflexión, en la ecuación (2.8) F_2 es cero y para el caso de un monopolo $F_1 = A e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})}$ entonces

$$p(r, t) = \frac{A}{r} e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})} \quad (2.9)$$

En la ecuación (2.9) r representa la distancia desde el punto donde se asume la fuente monopolo hasta la posición del micrófono correspondiente, $p(r, t)$ es la presión acústica, A es la amplitud de la fuente de ruido, ω es frecuencia angular de la fuente y k es el número de onda.

2.2 Técnica de retraso y suma.

En la sección anterior se desarrollaron las ecuaciones de ondas planas y esféricas. Estos conceptos se utilizarán en la técnica de "retraso y suma". En primer lugar se abordará el método a través de ondas planas en el dominio del tiempo y de la frecuencia. En segundo lugar se desarrollará mediante ondas esféricas en los dos dominios. Y se finalizará la sección con una normalización del método para poder escalar los resultados.

2.2.1 Ondas planas.

Para comenzar, se considerará una distribución de M micrófonos en las coordenadas r_m ($m = 1, 2, \dots, M$) del plano xy como lo indica la Figura 2-1, se observa también una onda plana impactando sobre el arreglo de micrófonos con una dirección definida por K .

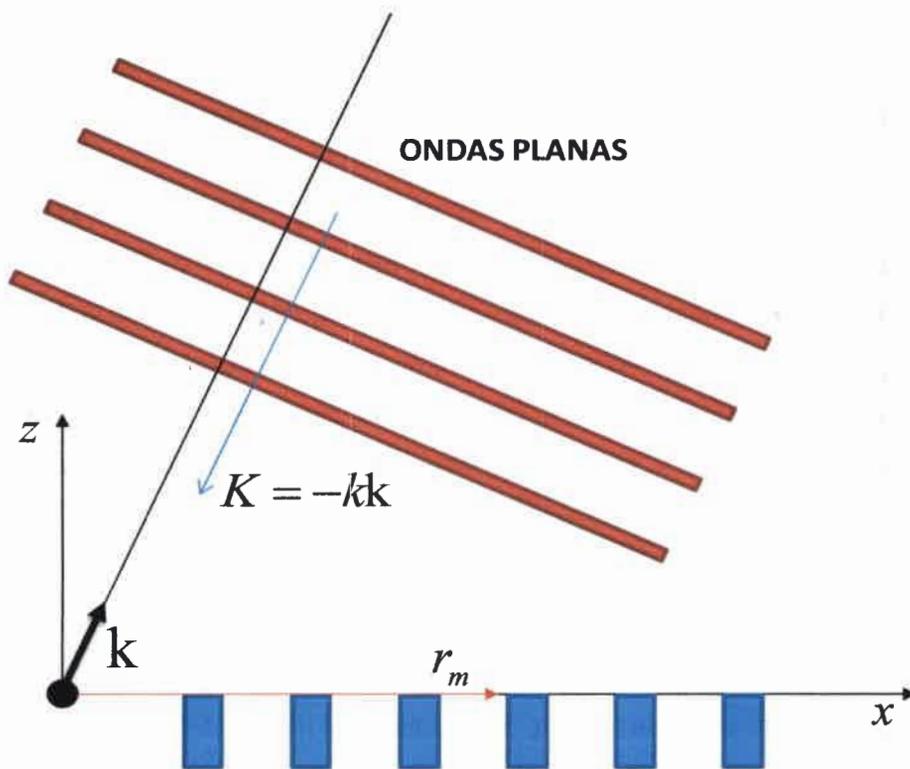


Figura 2-1: Arreglo de micrófonos haciendo foco en la dirección de las ondas planas que se propagan desde el infinito.

Cuando aplicamos este método las medidas de presión de cada micrófono p_m son individualmente alineadas en fase y luego sumadas. En el caso que la fuente de ruido se encuentre en la posición que se está observando la suma funcionará de forma constructiva y la salida será de mayor amplitud (Figura 2-2(a)) pero para señales que arriben desde

otra dirección en la cual no se está haciendo foco se sumarán de forma destructiva (Figura 2-2(b)). Esto permitirá armar un mapa de puntos con diferentes niveles de presión, por lo tanto los puntos de mayor energía sonora evidenciarán la ubicación de la fuente de ruido.

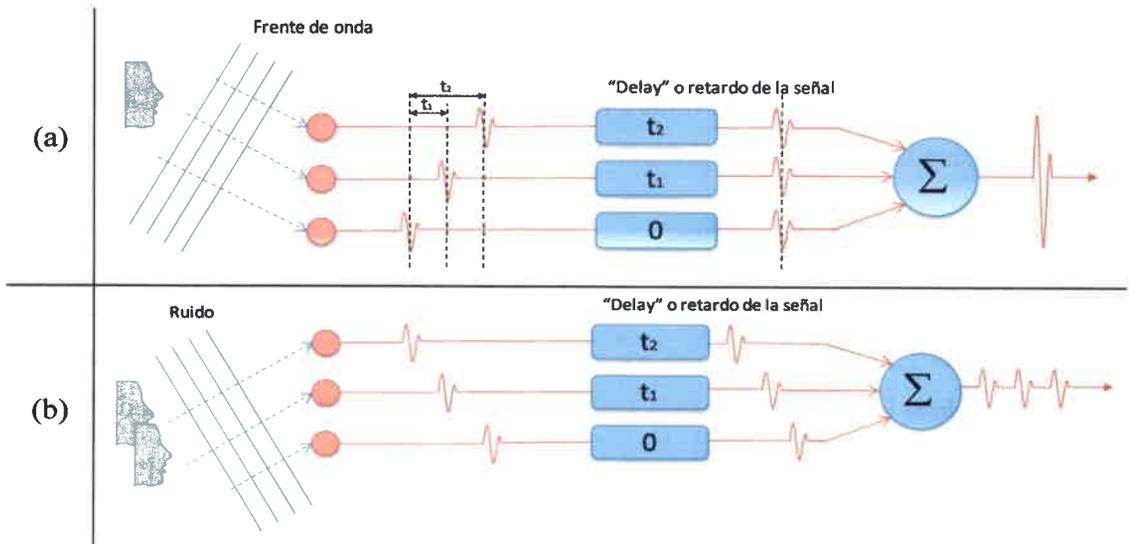


Figura 2-2: (a) Posición de la fuente. Suma constructiva, (b) Señal de interferencia o ruido. Suma destructiva.

La ecuación (2.10) representa la salida del método, donde $b(\mathbf{k}, t)$ es la energía en cada punto del plano de medición en un instante de tiempo, w_m es un vector de pesos aplicados individualmente a cada micrófono, p_m es la presión en el dominio del tiempo, Δ_m es el retardo en tiempo, el cual es elegido de manera que la antena de micrófonos tenga mayor sensibilidad en una dirección requerida, esta dirección está indicada mediante el versor \mathbf{k} . De esta manera se alinean en tiempo las ondas planas que inciden de la dirección \mathbf{k} antes de ser sumadas.

$$b(\mathbf{k}, t) \equiv \sum_{m=1}^M w_m p_m(t - \Delta_m(\mathbf{k})) \quad (2.10)$$

Para utilizar este método se debe calcular el tiempo de retraso de cada señal, esto se realiza geoméricamente según la ecuación (2.11),

$$\Delta_m = \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_m}{c} \quad (2.11)$$

Aquí c representa la velocidad del sonido, r_m es la distancia desde el micrófono m hasta un punto de medición.

Esta técnica se puede utilizar en el dominio de la frecuencia. Realizando la transformada de Fourier a la ecuación 2.10 la salida de la técnica retardo y suma tiene la siguiente forma [15]

$$B(\mathbf{k}, \omega) = \sum_{m=1}^M w_m P_m(\omega) e^{-i\omega \Delta_m(\mathbf{k})} = \sum_{m=1}^M w_m P_m(\omega) e^{i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}_m} \quad (2.12)$$

Donde la presión medida por cada micrófono será la ecuación (2.6), por lo tanto, renombrando las variables nos queda:

$$P_m(\omega) = P_o e^{-iK_o \cdot \mathbf{r}_m} \quad (2.13)$$

Donde P_o es la amplitud de la señal, K_o es el número de onda. En la ecuación (2.12) ω es la frecuencia angular, $\mathbf{K} = -k\mathbf{k}$ es el número de onda de la onda incidiendo desde la dirección \mathbf{k} en la cual el arreglo de micrófonos está enfocándose y $k = \omega/c$ es el número de onda. Implícitamente en la ecuación (2.12) existe un factor igual a $e^{i\omega t}$.

Según lo expuesto hasta aquí el arreglo de micrófonos apunta en la dirección \mathbf{k} , dándole prioridad a las ondas que llegan en esa dirección pero generalmente hay ondas que llegan de otras direcciones. Estas últimas las asumiremos con un número de onda distinto denominado K_o . De esta forma es posible investigar cómo influyen las ondas que llegan desde otras direcciones en nuestra distribución de micrófonos.

De acuerdo con la ecuación (2.12) la salida del "beamforming" es,

$$B(\mathbf{k}, \omega) = P_o \sum_{m=1}^M w_m e^{i(\mathbf{K} - \mathbf{K}_o) \cdot \mathbf{r}_m} = P_o W(\mathbf{K} - \mathbf{K}_o) \quad (2.14)$$

La función W se denomina "array pattern", "point spread function" (PSF) o patrón del arreglo de micrófonos.

$$W(\mathbf{K}) = \sum_{m=1}^M w_m e^{i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}_m} \quad (2.15)$$

En el caso que $w_m \equiv 1$, lo cual representa una distribución de pesos uniforme, el "array pattern" queda definido enteramente por la distribución de micrófonos. Debido a que la misma se realiza en el plano xy la coordenada $z = 0$, lo que establece que el "array pattern" es independiente de K_z . Por lo tanto consideraremos solamente el "array pattern" en el plano (K_x, K_y) , esto es la proyección del vector número de onda sobre el plano xy . En la ecuación (2.15) se observa mayor sensibilidad del arreglo de micrófonos en la dirección \mathbf{K} en el cual se obtiene el llamado lóbulo principal, en las otras

direcciones se presentan los llamados lóbulos laterales, estos influyen la medida del lóbulo principal produciendo falsos picos en el mapa acústico.

La ecuación (2.14) contiene información sobre la estructura de lóbulos laterales para todas las direcciones de llegada y para todas las frecuencias. La Figura 2-3 muestra una parte del “array pattern” para una geometría dada.

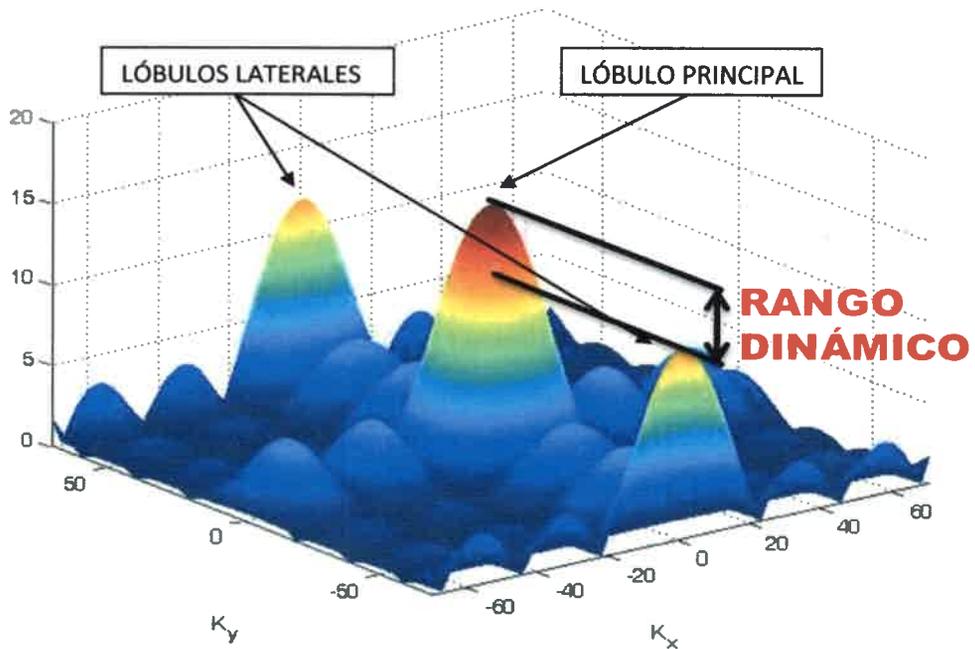


Figura 2-3: “array pattern” correspondiente a la distribución de micrófonos pertenecientes a la Figura 2-4.

Los lóbulos laterales no están asociados con la fuente principal, su aparición es debida a los efectos de “aliasing” espacial, esto se debe al número discreto de sensores de presión. El efecto de “aliasing” espacial se explicará más adelante. Al aumentar el valor de los lóbulos laterales se pueden llegar a confundir con fuentes sonoras, por lo tanto a este fenómeno se lo suele llamar “fuentes fantasmas”. Como se observa en la Figura 2-3 la relación entre los lóbulos laterales y el lóbulo principal definen el rango dinámico perteneciente a la distribución de micrófonos, en este caso en particular corresponde al arreglo mostrado en la Figura 2-4. Este parámetro caracteriza la habilidad de una determinada distribución de micrófonos para suprimir “fuentes fantasmas”. La razón entre los lóbulos laterales y el lóbulo principal se lo suele llamar relación señal – ruido del arreglo,

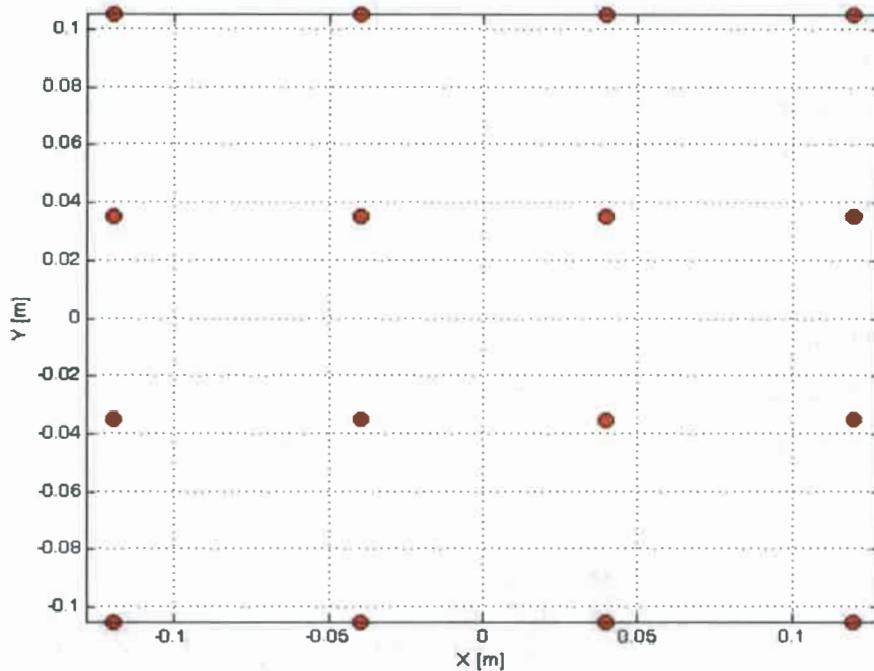


Figura 2-4: Ejemplo de una distribución de 16 micrófonos (●) en forma regular.

2.2.2 Ondas esféricas

La ecuación (2.11) se desarrollo para que una onda plana que proviene desde el infinito se pueda alinear en el tiempo y así calcular el retraso de cada señal con respecto a una señal de referencia para luego ser sumadas. En esta sección se desarrollará el caso de que la señal llegue desde una distancia finita, por lo cual no se pueden considerar como ondas planas sino como ondas esféricas radiando desde un punto determinado.

Por lo tanto la expresión retardo y suma (ecuaciones (2.10) y (2.12)) se modifican para hacer foco en un punto n de la siguiente manera,

$$\begin{aligned}
 b(\mathbf{r}, t) &\equiv \sum_{m=1}^M w_m p_m(t - \Delta_m(\mathbf{r})) \text{ (dominio temporal)} \\
 B(\mathbf{r}, \omega) &= \sum_{m=1}^M w_m P_m(\omega) e^{-i\omega\Delta_m(\mathbf{r})} \text{ (dominio de frecuencia)} \\
 w_m &= \frac{r_{mn}}{r_o}
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

Donde el vector de pesos w_m está formado por r_{mn} que es la distancia euclídea desde el micrófono m hasta un punto de medición n y r_o es la distancia euclídea a un punto de referencia como por ejemplo el centro de la distribución de micrófonos.

De esta manera, la ecuación (2.11) de retardo es reemplazada por la siguiente ecuación,

$$\Delta_m(r) = \frac{|r| - r_m(r)}{c} \quad (2.17)$$

Donde $r_m(r) = |r - r_m|$ es la distancia desde el micrófono m hasta el punto de estudio en la grilla, como muestra la Figura 2-5. El punto de estudio de la grilla tiene una distancia finita por lo tanto se debe modelar las ondas como esféricas.

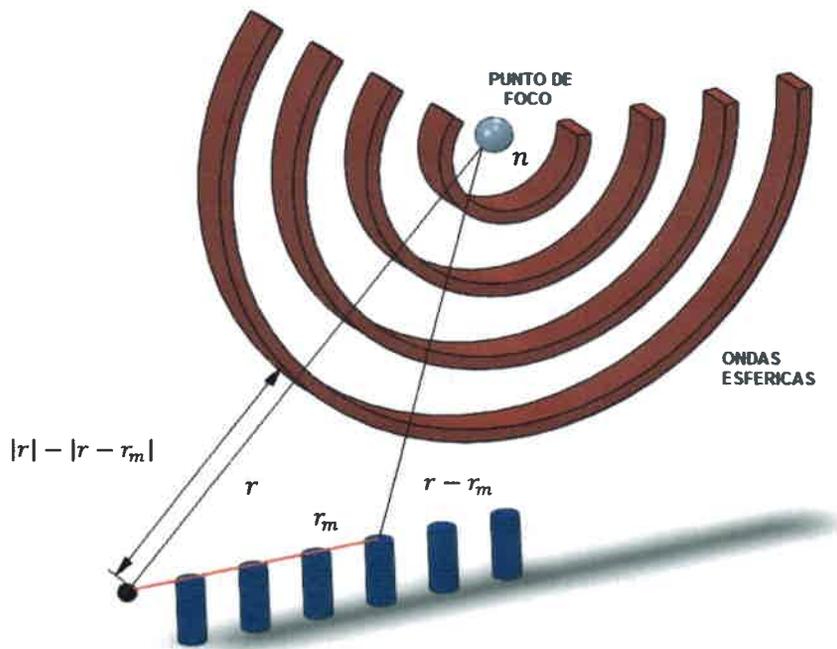


Figura 2-5: esquema de propagación de ondas esféricas.

2.2.3 Normalización

Cuando la señal desde el infinito llega en la misma dirección en la cual está haciendo foco la distribución de micrófonos $\mathbf{k} = \mathbf{k}_o$, la técnica de retardo y suma (ecuación (2.14)) amplifica la señal de entrada, esto depende de la cantidad de micrófonos que tenga el arreglo: $B\left(-\frac{\mathbf{k}_o}{k}, \omega\right) = MP_o$. Por esta razón la ecuación (2.14) se normaliza con la cantidad de micrófonos M de la siguiente manera,

$$B(k, \omega) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m P_m(\omega) e^{ik \cdot r_m} \quad (2.18)$$

Esta normalización se puede extender para el caso de ondas planas en el tiempo y ondas esféricas en el dominio temporal y de frecuencia.

2.3 “Beamforming” Convencional.

En esta sección se tratará la técnica de “beamforming” convencional la cual es una forma conveniente de describir la técnica de retardo y suma en el dominio de la frecuencia con ondas esféricas.

Esta técnica, al igual que antes, para poder obtener la presión acústica en un punto n de la grilla se debe conocer la ubicación de los micrófonos y la del punto a considerar, como se observa en la Figura 2-6. Para poder calcular la contribución de la presión acústica del punto se utiliza el retardo de fase de cada micrófono a través de la siguiente ecuación,

$$P_n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m^* P_m \quad (2.19)$$

Donde $*$ significa complejo conjugado, w_m es el factor de peso de la señal, p_m es la presión en el dominio de la frecuencia del micrófono m .

Reacomodando la ecuación (2.19) de manera vectorial.

$$P_n = \frac{\bar{w}^\dagger \bar{P}}{M} \quad (2.20)$$

En la ecuación anterior \bar{w} es el vector de pesos o vector dirección y donde \dagger indica hermitiano: complejo conjugado transpuesto. Para direccionar el arreglo de micrófonos hacia un punto de la grilla se utiliza el vector dirección (“steering”) otorgando a cada señal una correcta amplitud y retardo de fase.

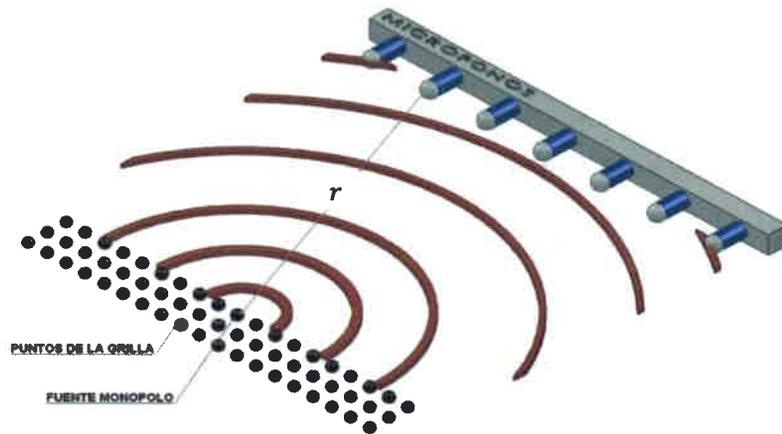


Figura 2-6: Medición de un arreglo lineal con respecto a un punto de la grilla.

Para construir el vector dirección (“steering”) se asumen fuentes monopolo emitiendo en cada punto de la grilla de evaluación. En campo libre las componentes del vector de propagación están dadas por la función de Green definida en la ecuación (2.21).

$$C_m(\vec{x}_n) = \frac{e^{-ikr_m}}{4\pi r_m} = \frac{e^{-ik|\vec{r}_n - \vec{r}_m|}}{4\pi|\vec{r}_n - \vec{r}_m|} \quad (2.21)$$

En la cual r_m es la distancia euclídea desde el micrófono m hasta el punto de la grilla n . Para maximizar la salida del “beamforming”, el vector de propagación se elige paralelo al vector dirección.

$$\vec{w} = \frac{\vec{C}}{\|\vec{C}\|} \quad (2.22)$$

El vector dirección contiene el retardo de fase teórica y la corrección en amplitud para cada micrófono con respecto a cada punto de la grilla.

El valor eficaz (ve) de la presión acústica está definido.

$$ve = \frac{p p^\dagger}{2} \quad (2.23)$$

Luego, la salida del “Beamforming” del arreglo de micrófonos es estimada por el valor eficaz de la presión en el punto n .

$$B_n(r, f) = \frac{\mathbf{w}_n^\dagger \vec{p} \vec{p}^\dagger \mathbf{w}_n}{2M^2} = \frac{\vec{w}_n^\dagger \text{CSM} \vec{w}_n}{M^2} \quad (2.24)$$

Donde “Cross Spectral Matrix” (CSM) representa la matriz espectral cruzada. La matriz espectral cruzada contiene los aportes de cada uno de los micrófonos en el dominio de la frecuencia. La matriz se define de la siguiente manera

$$CSM_{ij} = \frac{p_i(f)p_j^*(f)}{2} \quad \text{si } i \neq j \quad (2.25)$$

$$CSM_{ii} = \frac{p_i(f)p_i^*(f)}{2} = \frac{|p_i(f)|^2}{2} \quad \text{si } i = j \quad (2.26)$$

La matriz dada por la ecuación (2.26) contiene el auto espectro de los micrófonos y la ecuación (2.25) contiene el espectro cruzado fuera de la diagonal principal. Luego, cada punto de la grilla es evaluado con la ecuación (2.24), si en el punto se encuentra la fuente sonora, las señales de los micrófonos funcionan aditivamente, en cambio si no se encuentra la fuente en ese punto las señales se suman destructivamente.

Este proceso se repite para distintos planos en el espacio tridimensional y para las líneas espectrales del rango de frecuencias de interés. De esa forma se obtienen el mapa de ruido de la zona. Y cuantitativamente los puntos de emisión de ruido son ubicados y caracterizados.

A modo de ejemplo en la Figura 2-7 se observa un ensayo para una fuente con ruido blanco emitiendo en el centro del arreglo a una distancia de 1 m de la antena de micrófonos.

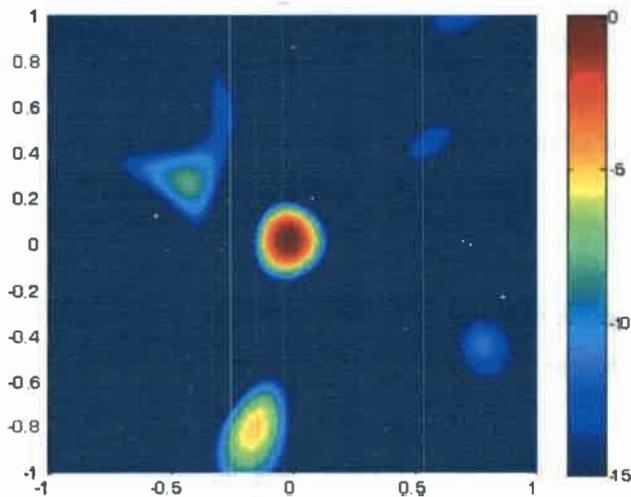


Figura 2-7: Mapa de ruido con “beamforming” convencional a 2000 Hz.

2.4 Calibración de la antena de micrófonos.

En la sección anterior se trabajó sobre la técnica de “beamforming” convencional, la misma implica el cálculo teórico del vector dirección. El mismo, está formado por la función de Green, uno de los parámetros que define a esta función es la distancia entre cada micrófono y el punto de la grilla de evaluación. Esta distancia se calcula de manera teórica por lo tanto al llevarlo a la práctica se producen errores de posición en los

micrófonos y errores de fase entre los mismos. Esto provoca diferencias entre el vector dirección teórico y el vector dirección real. Por lo tanto es necesario calibrar la antena de micrófonos para evitar el error que se produce al posicionar los micrófonos. Según el ejemplo de [5]: si un micrófono es instalado en una posición diferente de la esperada se producirá un error en el producto interno entre el número de onda y la diferencia entre la posición real y teórica de los micrófonos, es decir que para una frecuencia de 30 kHz si el micrófono está desplazado 3 mm el error de fase es de 90°.

Uno de los métodos utilizados según [5] para calibrar la antena de micrófonos es el uso de un parlante. El mismo se coloca frente al arreglo de micrófonos como fuente puntual. Para evitar las reflexiones se debe introducir el sistema dentro de una cámara anecoica.

Luego, se genera ruido blanco y mediante la distribución de micrófonos se colecta la información. La misma es procesada para formar la CSM en la frecuencia de interés para luego obtener los autovalores de la matriz. Como regla general el autovalor mayor deberá ser unas 10 veces más grande que los demás [5]. Si esto no sucede se debe incrementar el volumen del parlante.

Ahora con esta información se corrige la salida del “beamforming” usando el autovector asociado al mayor autovalor de la matriz CSM. De esta forma, se obtiene el vector \vec{v}_{cal} que se utiliza para corregir la expresión.

$$\frac{\vec{c}(x_s)}{\|\vec{c}(x_s)\|} \quad (2.27)$$

Donde x_s corresponde a la ubicación del parlante. Por lo tanto para esta ubicación de la fuente de ruido se tiene un vector de propagación teórico:

$$\vec{v}_{teo} = \frac{\frac{e^{iK|\vec{x}_m - \vec{x}_s|}}{|\vec{x}_m - \vec{x}_s|}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \frac{1}{(\vec{x}_m - \vec{x}_s)^2}}} \quad (2.28)$$

Mediante el \vec{v}_{cal} y el \vec{v}_{teo} se define la matriz diagonal de cómo;

$$D_{cal} = diag\left(\frac{\vec{v}_{cal}(1)}{\vec{v}_{teo}(1)}, \frac{\vec{v}_{cal}(2)}{\vec{v}_{teo}(2)}, \dots, \frac{\vec{v}_{cal}(M)}{\vec{v}_{teo}(M)}\right) \quad (2.29)$$

El vector de calibración se utiliza en el vector dirección para corregir la fase, por lo tanto;

$$\vec{w}_{corr} = D_{cal} \vec{w}$$

En la ecuación de "Beamforming" (2.24) se obtiene la siguiente expresión corregida;

$$B_n(r, f) = \frac{\bar{w}_n^\dagger D_{cal}^\dagger CSM D_{cal} \bar{w}_n}{M^2} \quad (2.30)$$

Ahora se define la matriz espectral cruzada corregida como:

$$CSM_{corr} = D_{cal}^\dagger CSM D_{cal} \quad (2.31)$$

2.5 Cuantificación del mapa acústico.

Generalmente no solo estamos interesados en obtener la posición del ruido sino también poder cuantificarlo. A continuación se describirá como obtener el nivel de presión sonora para el caso de la técnica de retardo y suma en el dominio temporal para ondas esféricas y la integración de la imagen acústica de "beamforming" convencional.

2.5.1 Retardo y suma: dominio temporal para ondas esféricas.

Usando la ecuación 2.16 en el dominio del tiempo y normalizándola se observa que para cada punto de la grilla se obtendrá una señal en el dominio del tiempo. Por lo tanto para poder cuantificarla en unidades de presión efectiva se calcula el RMS de esa señal para cada punto del mapa de ruido integrando en el tiempo de acuerdo con la ecuación 2.32 y luego se puede calcular el nivel de presión sonora de cada punto de la grilla.

$$b(\mathbf{r}_n) \equiv \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_{mn} p_m(t - \Delta_m(\mathbf{r}_n)) \right)^2 dt} \quad (2.32)$$

2.5.2 "Beamforming" convencional.

El caso más simple de cuantificar es la fuente tipo monopolo, su pico se corresponde con el máximo nivel de ruido pero esto rara vez se produce en la realidad ya que los lóbulos principales de las diferentes fuentes de ruido se pueden solapar o la fuente puede ser diferente de una fuente monopolo. Por lo tanto los picos de las fuentes de ruido dependen de la extensión de la fuente y de la capacidad de la antena de micrófonos para distinguir dos fuentes de ruido (resolución). Otro inconveniente puede ser la influencia de los lóbulos laterales generados por otras fuentes sonoras en el mapa de ruido.

Para poder cuantificar el mapa de ruido generalmente se utiliza la integración del mismo [2]. Esta técnica realiza la suma de la potencia de la fuente en cada parte del mapa

de ruido y se escala respecto a un valor de referencia. Este valor de referencia se obtiene de simular una fuente monopolo en el centro del volumen de integración [33].

$$R_{Norm}(V, f) = \frac{\sum_n B_n^{exp}(f)}{\sum_n B_n^{sim}(f)} R_{stm} \quad B_n^{exp} > B_{max} - \varepsilon \quad (2.33)$$

Donde V representa el volumen que encierra la fuente de interés, $B_n^{exp}(f)$ es la salida de la ecuación de “beamforming” convencional experimental a la frecuencia f , $B_n^{sim}(f)$ es la salida de la ecuación de “beamforming” convencional simulada a la frecuencia f , B_{max} representa el máximo valor de la salida del “beamforming” convencional, ε es el umbral, el cual está relacionado con el valor señal – ruido de la distribución de micrófonos y evita que se sumen contribuciones de los lóbulos laterales y R_{sim} es el valor de la potencia de la fuente simulada.

2.6 Técnica para mejorar resultados del Mapa acústico.

Hasta aquí se han desarrollado las técnicas de retardo y suma en el dominio temporal y de frecuencia, este ultimo deriva en la técnica de “beamforming” convencional. Pero a través de los años se han desarrollado diferentes mejoras de las técnicas que permiten reducir los lóbulos laterales o aumentar la resolución del mapa de ruido. Como desventaja presentan sensibilidad a la variación de ubicación de los sensores de presión y también a una baja relación señal - ruido de las señales adquiridas. Como técnicas avanzadas se presentarán en primer lugar remoción de la diagonal principal, la cual consiste en una modificación de la técnica de “beamforming” convencional y se extenderá también para retardo y suma en el dominio del tiempo. En segundo lugar, “Robust Adaptive Beamforming” utiliza la información que se tiene de la CSM para mejorar el vector dirección. Y en tercer lugar, “MUSIC” que utiliza la descomposición en autovalores y autovectores de la CSM para mejorar la resolución del mapa de ruido.

2.6.1 Remoción de la Diagonal Principal.

Retardo y suma: dominio temporal para ondas esféricas.

Para este caso la remoción de la diagonal principal no es tan evidente como en el siguiente ya que no se tiene una CSM que permite visualizar el auto espectro y el espectro cruzado. Para esta situación se deberá separar la auto correlación de la correlación cruzada (análogo al auto espectro y al espectro cruzado en el dominio de la frecuencia) en la ecuación 2.32. Por lo tanto, según [47] la ecuación 2.32 se puede escribir,

$$b^2(\mathbf{r}_n) \equiv \frac{1}{TM^2} \int_0^T \left\{ \sum_{m=1}^M w_{mn}^2 p_m^2(t - \Delta_{mn}) + \sum_{m \neq j}^M w_{mn} p_m(t - \Delta_{mn}) p_{jn}(t - \Delta_{jn}) \right\} dt \quad (2.34)$$

La primera sumatoria es la que contiene la autocorrelación de los datos y la segunda es la correlación cruzada. Entonces, por comparación entre la ecuación 2.34 y ecuación 2.32 se obtiene,

$$b^2(\mathbf{r}_n) \equiv \frac{1}{TM^2} \int_0^T \left[\left(\sum_{m=1}^M w_{mn} p_m(t - \Delta_{mn}) \right)^2 - \sum_{m=1}^M w_{mn}^2 p_m^2(t - \Delta_{mn}) \right] dt \quad (2.35)$$

“Beamforming” convencional.

Al igual que en el caso anterior, los elementos de la diagonal principal de la CSM (ecuación 2.26) no contienen información con respecto a la fase relativa de los micrófonos es por ello que se hace cero los valores de la diagonal principal. De hecho en muchas situaciones el auto espectro de la matriz CSM tiene efectos adversos en los resultados del mapa acústico. Por ejemplo en mediciones aeroacústicas en las cuales la antena de micrófonos debe estar inmersa en un flujo de aire los micrófonos no solo captan la presión acústica sino también la presión hidrodinámica ejercida por el flujo sobre los sensores de presión o el mismo ruido electrónico que introduce cada micrófono se ve amplificado al realizar el auto espectro a la matriz CSM (Figura 2-8).

En el caso de mediciones en lugares abiertos el espectro cruzado comienza a reducir su intensidad ya que es afectada por la pérdida de coherencia con los datos. En cambio, el auto espectro no tiene pérdida de coherencia debido a que no contiene información de la fase. Por lo tanto, el auto espectro tiende a dominar la CSM cuando hay una pérdida de coherencia importante.

Al aplicar la remoción de la diagonal principal se está eliminando el contenido no correlacionado pero también se elimina algo del contenido correlacionado como lo demuestra Ravetta en su tesis doctoral [2]. Sin embargo esto ayuda a mejorar la imagen acústica y se utiliza en aplicaciones aeroacústicas. Otra desventaja surge al momento de integrar la imagen acústica ya que los valores pico de las fuentes de ruido no son exactamente idénticos. Para superar este inconveniente Dougherty propone ajustar la diferencia sumando a la imagen acústica la siguiente cantidad [82].

$$\mu = 10 \log \left(\frac{M}{M-1} \right) \quad (2.36)$$

Donde M es número de micrófonos.

Como se hizo notar al principio de la sección el autoespectro y al espectro cruzado en el dominio de la frecuencia son los análogos de la autocorrelación y la correlación cruzada en el dominio del tiempo.

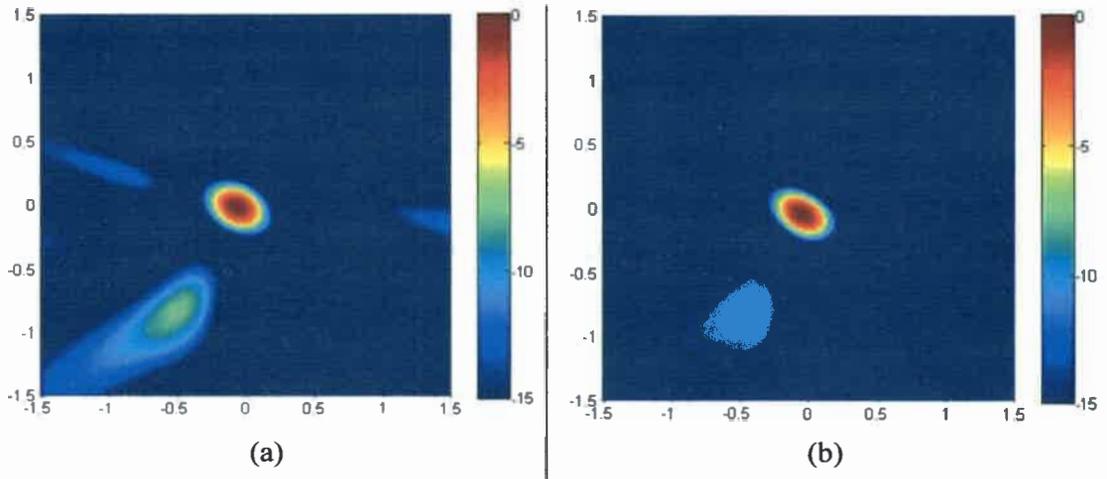


Figura 2-8: (a) Beamforming Con Autoespectro, (b) Beamforming Sin Autoespectro.

2.6.2 “Robust Adaptive Beamforming” (RABF).

Este método está basado en las técnicas de “beamforming” adaptativo. El objetivo de las técnicas de beamforming adaptativo son las de extraer la señal de interés minimizando los lóbulos laterales y el ruido blanco. Para ello se utiliza la información que provee la CSM para mejorar el vector dirección. Por lo tanto, se llega a un problema de minimización,

$$\begin{aligned} \text{SINR} &\equiv \frac{\sigma^2 |\vec{d}^+ \vec{C}|}{\vec{d}^+ \text{CSM} \vec{d}} \\ \min_{\vec{d}} (\vec{d}^+ \text{CSM} \vec{d}) & \quad \vec{d}^+ \vec{C} = 1 \end{aligned} \quad (2.36)$$

La solución a este problema de minimización es cerrada. Luego,

$$\vec{d}^+ = \frac{\text{CSM}^{-1} \vec{C}}{\vec{C}^+ \text{CSM}^{-1} \vec{C}} \quad (2.37)$$

Donde d es el nuevo vector dirección y C es el vector dirección anterior. Esta técnica se la conoce como “Capon Beamforming”. La desventaja que presenta es su sensibilidad a pequeños errores en ruido no correlacionado o ruido blanco. Para superar este

inconveniente y darle robustez al método se le agrega un valor de ruido blanco artificial a la diagonal de la CSM, esto es una forma de regularizar el método mediante una penalización cuadrática en la función objetivo [79].

$$\min_{\vec{d}} (\vec{d}^{\dagger} [\text{CSM} + \gamma I] \vec{d}) \quad \vec{d}^{\dagger} \vec{c} = 1 \quad (2.38)$$

Esto fuerza a reducir a reducir más el ruido blanco que las interferencias.

$$\vec{d}^{\dagger} = \frac{[\text{CSM} + \gamma I]^{-1} \vec{c}}{\vec{c}^{\dagger} [\text{CSM} + \gamma I]^{-1} \vec{c}} \quad (2.39)$$

Donde γ es un valor propuesto por el usuario. Una forma de seleccionar el valor aproximado de γ es utilizando los autovalores de la CSM y seleccionando el valor más alto, esto es debido a que el problema de minimización no tiene una solución cerrada. Esta mejora en el método se denomina “Diagonal Loading Capon Beamforming” o “robust adaptive beamforming”. Entonces, cuando γ es muy alto $\vec{d} \rightarrow \vec{c}$ y la salida que se obtiene es la misma que “beamforming” convencional. Si γ tiende a cero entonces la salida tiende a ser igual a la de “adaptive beamforming”.

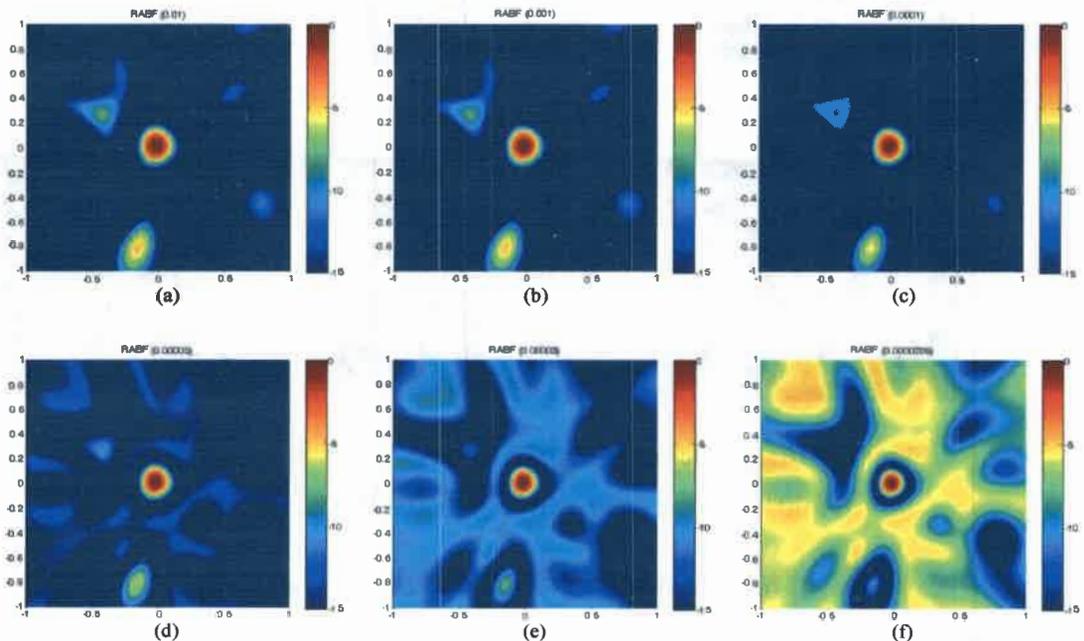


Figura 2-9: Diferencia entre el lóbulo principal y en máximo lóbulo lateral, (a) $\gamma = 0.01$, (b) $\gamma = 0.001$, (c) $\gamma = 0.0001$, (d) $\gamma = 0.00005$, (e) $\gamma = 0.00003$, (f) $\gamma = 0.0000205$.

En la Figura 2-9 se observan diferentes mapas de ruido para diferentes valores de γ . El ensayo se realizó para una fuente emitiendo ruido blanco en las coordenadas $x = 0, y =$

0. Se observa que para valores altos de γ los resultados son idénticos a los de “beamforming” convencional y para valores bajos comienza a tener problemas en los resultados aumentando los niveles acústicos alrededor de la fuente detectada. El resultado más satisfactorio es el de la Figura 2-9(e) para un valor de $\gamma = 0.00003$ ya que logra reducir los lóbulos laterales y disminuir el tamaño del lóbulo principal donde se encuentra la fuente de emisión. Por lo tanto, existe un γ óptimo que mejora la imagen acústica. El rango dinámico utilizado es de 15 dB referido al máximo de cada figura, de esta forma se destaca la diferencia entre el Lóbulo principal y los lóbulos laterales. Como desventaja de aplicar este método se debe tener en cuenta la variación en la energía acústica que se presenta debido a la variación del valor γ . Esta variación se observa en la Figura 2-10, en la cual las imágenes acústicas se encuentran normalizadas con respecto a un mismo valor correspondiente al pico de la Figura 2-10(a).

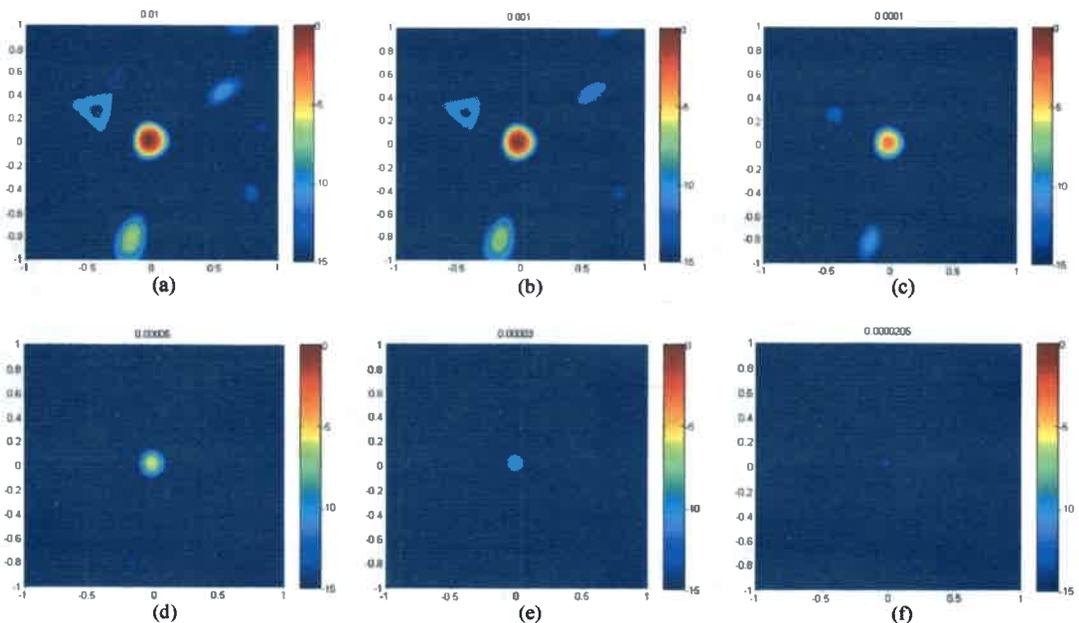


Figura 2-10: Variación de energía acústica, (a) $\gamma = 0.01$, (b) $\gamma = 0.001$, (c) $\gamma = 0.0001$, (d) $\gamma = 0.00005$, (e) $\gamma = 0.00003$, (f) $\gamma = 0.0000205$.

2.6.3 “Multiple signal classification” (MUSIC).

Este algoritmo se utiliza para poder aumentar la resolución que presentan las técnicas descritas anteriormente. El algoritmo MUSIC, es un método de subespacios que utiliza las propiedades de la CSM para aumentar la capacidad de distinguir dos fuentes de ruido muy cercanas [80]. El objetivo es separar la CSM en el subespacio de señales más ruido y el subespacio del ruido mediante una descomposición por autovectores [80]. Por lo tanto,

$$CSMv = v\Lambda \quad (2.40)$$

Donde $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_0 \ \lambda_1 \ \dots \ \lambda_{M-1}\}$ son los autovalores y $\lambda_0 > \lambda_1 > \dots > \lambda_{M-1}$ corresponden a los autovectores de

$$v = [q_0 \ q_1 \ \dots \ q_{M-1}] \quad (2.41)$$

Por lo tanto si al arreglo llegan D fuentes sonoras existirán D autovectores en el subespacio señal+ruido y $M - D$ correspondientes al subespacio del ruido, donde M corresponde a la cantidad de micrófonos del arreglo. De esta forma, mediante los autovectores asociados al ruido se puede formar una nueva CSM_R .

$$CSM_R = \sum_{i=1}^{M-D} v_i v_i^\dagger \quad (2.42)$$

Ahora bien, el vector dirección se encuentra en el subespacio de las señales y como este es ortonormal al del ruido el producto será nulo en la ubicación de la fuente sonora. Por lo tanto MUSIC se define,

$$b_{MUSIC}(r, f) = (\vec{C}^\dagger CSM_R \vec{C})^{-1} \quad (2.43)$$

Debido a que el producto será cero cuando se encuentre la fuente sonora se utiliza la inversa para que se manifieste un pico en el mapa de ruido al momento de realizar la gráfica. Esto se puede realizar ya que CSM es definida positiva por lo tanto su inversa tendrá los mismos autovectores.

La desventaja de este método es que requiere un arreglo de sensores muy preciso y calibrado como también información sobre la cantidad de fuentes que están incidiendo sobre la antena. Otra desventaja es su alta sensibilidad a señales con relación señal ruido muy baja. Así también, se debe adoptar un criterio para poder optar por un valor apropiado de D y poder reconstruir la CSM_R .

3 OPTIMIZACIÓN DE LA DISTRIBUCION DE MICROFONOS MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS.

3.1 Resolución de la antena de micrófonos.

Por resolución de la antena de micrófonos se entiende la habilidad de una distribución de micrófonos para poder distinguir entre 2 fuentes que están cercanas una de la otra. Cuando se hace foco a una distancia infinita o lo suficientemente alejada del arreglo de micrófonos la resolución se define como el mínimo ángulo que separa dos fuentes permitiendo distinguir una de otra. En cambio, cuando la distancia es finita la resolución se define como la distancia mínima que separa dos fuentes pudiéndolas distinguir.

Para analizar la resolución de la antena de micrófonos se comenzará considerando dos ondas planas incidiendo sobre la distribución de micrófonos con números de onda k_1 y k_2 . Se asume que ambas ondas tienen una amplitud de 1, la salida del "beamforming" será una superposición de ambas ondas.

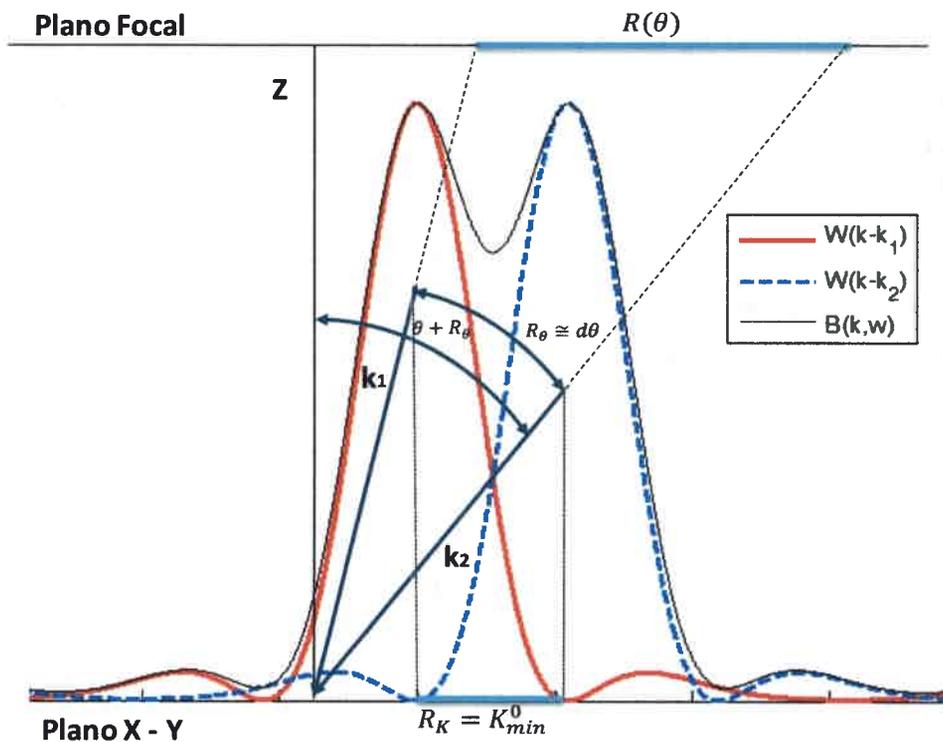


Figura 3-1: Esquema de dos ondas incidiendo sobre un arreglo de micrófonos plano.

En la Figura 3-1 se muestran dos ondas planas incidentes sobre la distribución de micrófonos con un número de onda k_1 y k_2 . Donde $W(k-k_1)$ y $W(k-k_2)$

corresponden al “array pattern” de cada onda y $B(\mathbf{k}, \omega)$ es la salida de la ecuación de “beamforming”.

$$B(\mathbf{k}, \omega) = W(\mathbf{k} - \mathbf{k}_1) + W(\mathbf{k} - \mathbf{k}_2) \quad (3.1)$$

Según el criterio de Rayleigh [34] las dos ondas serán perfectamente distinguibles entre sí cuando el pico de $W(\mathbf{k} - \mathbf{k}_2)$ se encuentre sobre el primer cero de $W(\mathbf{k} - \mathbf{k}_1)$. En este trabajo se requiere que la resolución sea la optima por lo tanto la separación angular entre \mathbf{k}_1 y \mathbf{k}_2 debe ser pequeña. Para lograr cuantificar la proyección de \mathbf{k}_1 y \mathbf{k}_2 , las cuales denominaremos $\hat{\mathbf{k}}_1$ y $\hat{\mathbf{k}}_2$ respectivamente, en el plano en el cual encontramos la distribución de micrófonos no deben estar dentro de un radio denominado $R_K = K_{min}^0$. Donde R_K es el diámetro de lóbulo principal del array pattern $W(K)$, y K_{min}^0 es el primer mínimo del “array pattern”. Por lo tanto

$$R_K = |\hat{\mathbf{k}}_2 - \hat{\mathbf{k}}_1| \quad (3.2)$$

La señal con número de onda \mathbf{k}_1 avanza con una inclinación θ , para una perfecta resolución la segunda señal con número de onda \mathbf{k}_2 deberá llegar con una inclinación $\theta + R_\theta$, por lo tanto R_θ nos definirá el valor de la resolución para las dos señales en la dirección radial. Lo que es necesario saber es la resolución en la dirección x a la distancia z de la distribución de micrófonos, esto es el plano donde la distribución de micrófonos se haya haciendo foco.

El número de onda proyectado en el plano xy es $K = k \sin(\theta)$, para un mejor análisis se expresará en forma diferencial, esto es $dK = k \cos(\theta) d\theta$ donde $dK \cong R_K$ y como la resolución también depende de $R_\theta \cong d\theta$ y $R \cong dx$.

$$d\theta = \frac{dK}{k \cos(\theta)} \quad (3.3)$$

La relación que hay entre x y z es: $x = z \operatorname{tg}(\theta)$

$$dx = \frac{z d\theta}{\cos^2(\theta)} \quad (3.4)$$

Combinando las ecuaciones (3.3) y (3.4) resulta en,

$$dx = \frac{z dK}{\cos^3(\theta) k} \quad (3.5)$$

Finalmente reemplazamos la resolución diferencial por un resolución real finita resultando en,

$$R \approx \frac{z R_K}{\cos^3(\theta) k} \quad (3.6)$$

El valor exacto de R_K depende de la posición de los micrófonos en el arreglo y de la cantidad, cuando la cantidad de micrófonos tiende a ser infinita y están uniformemente distribuidos sobre una línea de longitud D o sobre un área circular de radio $D/2$, la ecuación (2.15) se expresa en su forma continua [1].

$$W(K) = \frac{1}{(2\pi)^d} \int_{|r| < D/2} w(r) e^{iK \cdot r} dr \quad (3.7)$$

Donde $d = 1$ para una línea, $d = 2$ para una apertura circular y $w(r)$ es ahora una función de pesos continua. En el caso de una apertura continua como la de la ecuación (3.7) deberá evaluarse mediante una función de Bessel de orden 1 (J_1) [34].

$$W(K_x) = 2 \frac{\sin(K_x D/2)}{K_x}, \quad d = 1 \quad (3.8)$$

$$W(K) = \frac{\pi D}{K} J_1(KD/2), \quad K = \sqrt{K_x^2 + K_y^2}, \quad d = 2 \quad (3.9)$$

Con la ecuación (3.8) y (3.9) se puede encontrar el primer cero de la apertura para la distribución de micrófonos correspondientes al segmento de línea y la apertura circular quedando:

$$K_{min}^0 = \alpha \frac{2\pi}{D} \quad (3.10)$$

Donde $\alpha = 1$ para una apertura lineal y $\alpha \approx 1.22$ para una apertura circular [1]. El número de onda, k , está relacionada con la longitud de onda, λ , por

$$k = 2\pi/\lambda \quad (3.11)$$

Introduciendo la ecuación (3.10) y (3.11) en la ecuación (3.6) se obtiene la resolución del "beamforming" en función del ángulo de llegada de la señal.

$$R(\theta) = \frac{z \alpha \lambda}{\cos^3(\theta) D} \quad (3.12)$$

Por ejemplo para una onda incidiendo de forma que $\theta = 0$ la ecuación (3.12) queda,

$$R_0(0) = \frac{z \alpha \lambda}{D} \quad (3.13)$$

Se observa a partir de la ecuación (3.13) que la resolución de la distribución de micrófonos depende del tamaño del mismo y de la longitud de onda en estudio, o sea que

a mayor frecuencia y mayor tamaño de apertura mejor es la resolución de la distribución de micrófonos, pero empeora la resolución al aumentar la distancia entre la apertura y el plano en el cual el arreglo de micrófonos hace foco.

Ahora comparando la resolución para una onda incidiendo con un ángulo $\theta = 0$ (3.13) y para cualquier ángulo de incidencia (3.12),

$$\frac{R(\theta)}{R_0(0)} = \frac{1}{\cos^3(\theta)} \quad (3.14)$$

En la Figura 3-2 se observa que para ondas con un ángulo de incidencia mayor a 30° la resolución disminuye en un 50%, por lo tanto en la práctica se recomienda usar una grilla de puntos con una apertura de 30° como máximo.

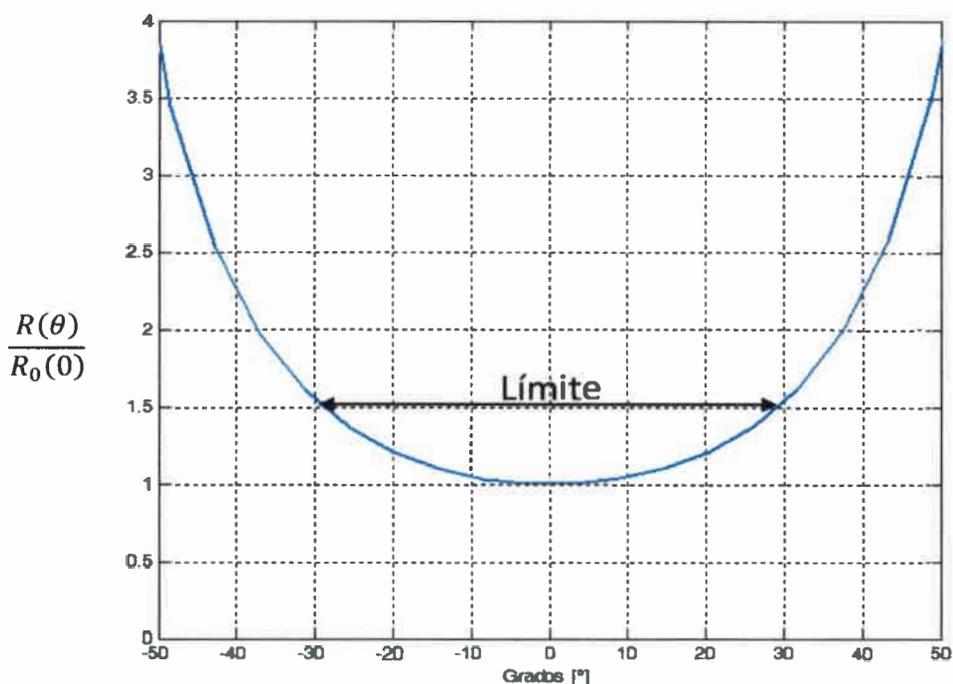


Figura 3-2: Comparación del ángulo de incidencia de las ondas con respecto a la resolución del arreglo de micrófonos.

A partir de las conclusiones obtenidas anteriormente el arreglo de micrófonos permite detectar la posición y frecuencia de una fuente sonora con buena resolución en un cierto rango de apertura. Como regla general, desde el centro del arreglo de micrófonos se tienen aproximadamente 30° grados de apertura en la dirección positiva y negativa. La apertura utilizada en el arreglo bidimensional es mostrada en la Figura 3-3.

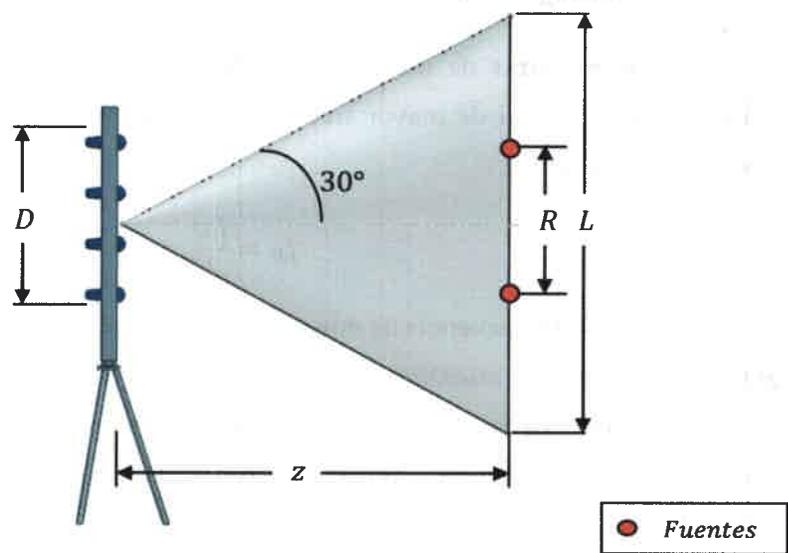


Figura 3-3: Cobertura de la distribución de micrófonos 2-D con buena resolución a una distancia z .

Por lo tanto la expresión que permite calcular el diámetro de la apertura del arreglo de micrófonos en función de la distancia a la cual queremos obtener el mapa de ruido es:

$$L = 2 \tan(30^\circ)z, L = 1,15 z$$

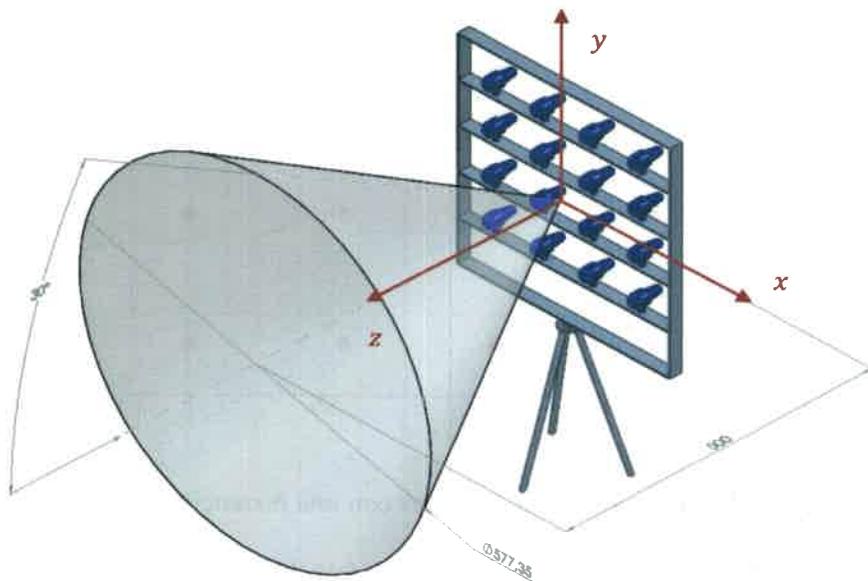


Figura 3-4: Tamaño de la superficie de la apertura a una distancia de 500 mm relativa al arreglo de micrófonos.

3.2 “Aliasing” espacial.

Al tomar muestras de una señal armónica en el tiempo con una frecuencia de muestreo fija, la señal de mayor frecuencia que se puede construir viene dada por la frecuencia de Nyquist;

$$f_N = \frac{f_m}{2} \quad (3.15)$$

Donde f_m es la frecuencia de muestreo. El mismo criterio se debe tomar con respecto al espaciado entre los micrófonos, la distancia mínima entre ellos es la que establece la frecuencia máxima a la cual se podrá reconstruir el mapa acústico. La distancia entre los sensores, s , debe ser como máximo la mitad de la longitud de onda de la señal que se quiere detectar.

$$s = \frac{\lambda_{\min}}{2} = \frac{c}{2f_{\max}} \quad (3.16)$$

Donde λ_{\min} es la longitud de onda mínima, c es la velocidad del sonido y f_{\max} es la frecuencia máxima que se quiere detectar.

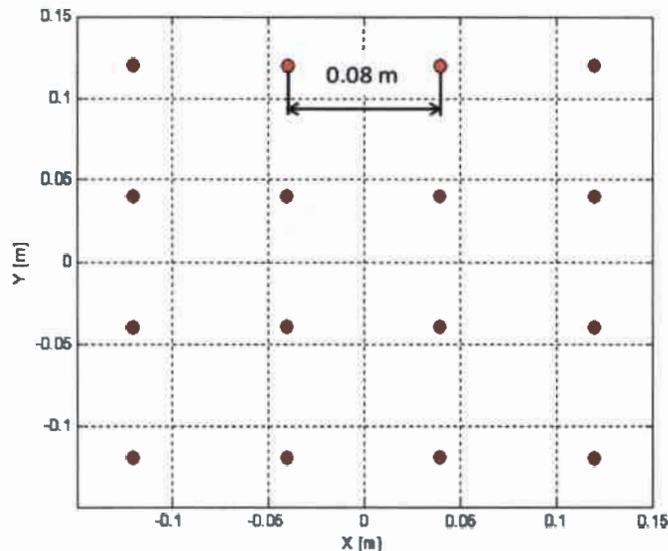


Figura 3-5: Distribución de micrófonos con una distancia mínima de 0,08 m.

La Figura 3-5 muestra una distribución regular con un espaciado entre micrófonos de 0,08 m, por lo tanto la frecuencia máxima que se puede reconstruir el mapa acústico es de 2143 Hz. Este valor en frecuencia está dado por la distancia mínima entre micrófonos. La

Figura 3-6 muestra las fuentes fantasmas que aparecen debidas a superar la frecuencia permitida por el arreglo de micrófonos en la reconstrucción del mapa de ruido. El mapa fue reconstruido a 8000 Hz a una distancia relativa al arreglo de 1m por lo tanto de acuerdo a la Figura 3-2 el tamaño de grilla debería ser de 1.15 x 1.15 m para no perder resolución pero a fin de mostrar el mapa de ruido completo se decidió aumentar el tamaño a una grilla a 3 x 3 m, esto se utilizará a lo largo de todo el trabajo de tesis para poder evaluar cómo influyen los lóbulos laterales en las mediciones del mapa de ruido.

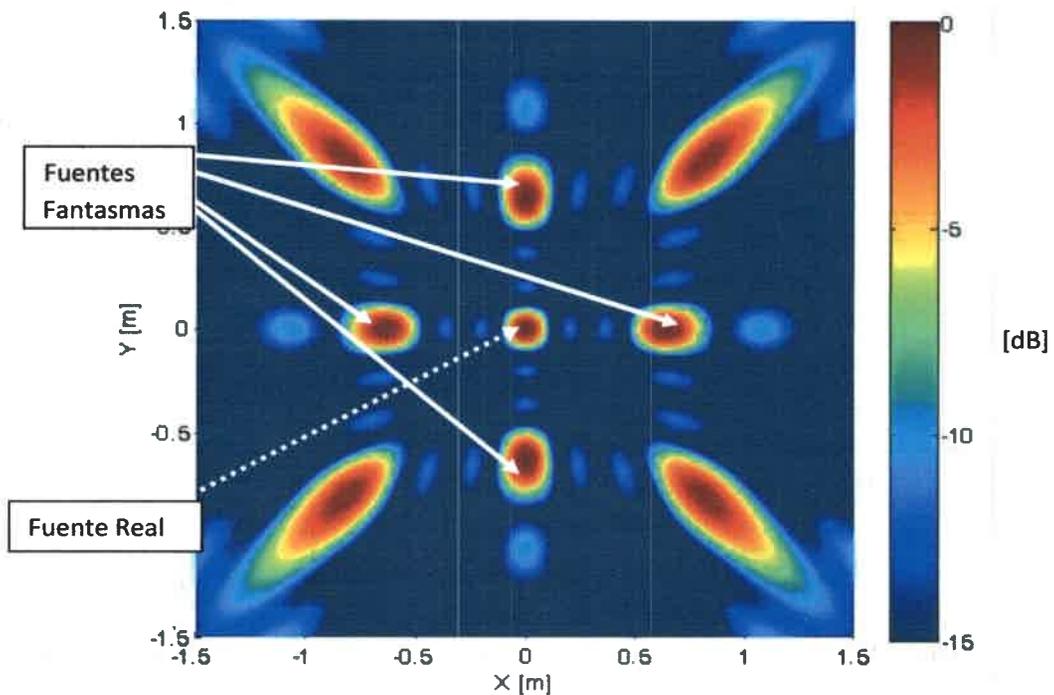


Figura 3-6: Efectos del “aliasing” espacial.

3.3 Máximo Lóbulo Lateral.

En la ecuación $W(K) = \sum_{m=1}^M w_m e^{iK \cdot r_m}$ se observa mayor sensibilidad del arreglo de micrófonos en la dirección K en el cual se obtiene el llamado Lóbulo Principal, en otras direcciones se presentan los llamados Lóbulos Laterales, estos influyen la medida del Lóbulo Principal produciendo falsas fuentes en el mapa acústico. Una buena distribución de micrófonos se caracteriza por tener un bajo Máximo Lóbulo Lateral (MLL) relativo al Lóbulo Principal. Se define a continuación el perfil patrón del arreglo de micrófonos o “array pattern profile”,

$$W_p(K) = 10 \text{ Log}_{10} \left(\frac{\max_{|K| < K} |W(K)|^2}{M^2} \right), \text{ donde } M = \text{cant. de micrófonos} \quad (3.17)$$

Ahora a partir de este perfil definiremos el Máximo Lóbulo Lateral (MLL),

$$\text{MLL}(K) = 10 \text{ Log}_{10} \left(\frac{\max_{K_{\min}^0 < |K| \leq K} |W(K)|^2}{M^2} \right) \quad (3.18)$$

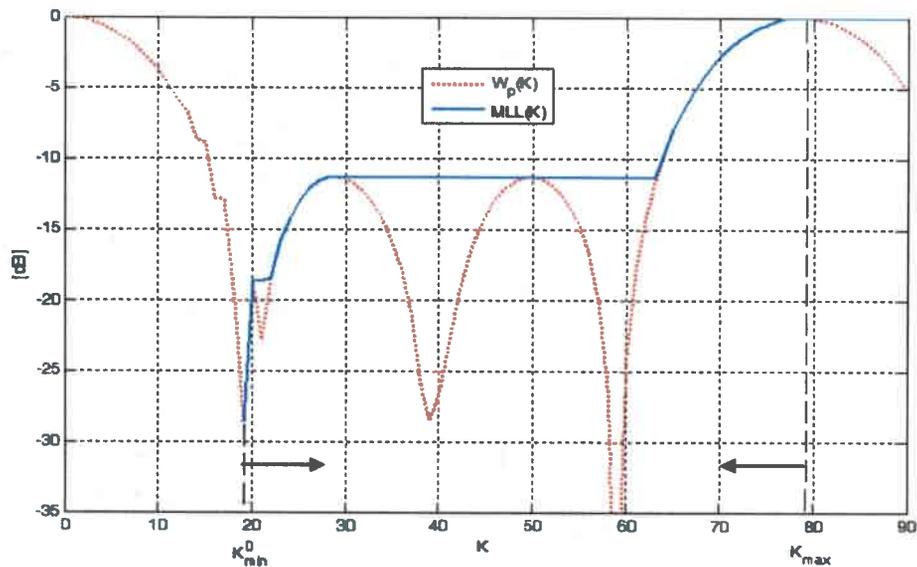


Figura 3-7: Comparación entre $MLL(K)$ y $W_p(K)$

Donde K_{\min}^0 se presentó mediante la ecuación (3.10). La Figura 3-7 muestra la comparación entre el perfil patrón del arreglo de micrófonos y el Máximo Lóbulo Lateral del arreglo de micrófonos de la Figura 3-5. Si restringimos la dirección de foco para un ángulo θ solamente la sección $|K| \leq K_{\max}^\theta$ del patrón de dirección será visible.

$$K_{\max}^\theta(\omega) = [1 + \sin(\theta)] \frac{\omega}{c} \quad (3.19)$$

Si la antena de micrófonos tiene una distribución tal que el Máximo Lóbulo Lateral es bajo, también será buena la relación señal – ruido y por lo tanto no habrá falsas mediciones. El Máximo Lóbulo Lateral (MLL) define el rango dinámico de la distribución de micrófonos y su habilidad para separar fuentes que llegan en distintas direcciones. El MLL es un parámetro importante a tener en cuenta en el diseño de una distribución de micrófonos.

3.4 Algoritmos Genéticos.

En esta sección se realizará una introducción a los algoritmos genéticos, los cuales se utilizan en esta tesis como método de optimización de la distribución de micrófonos a través de MLL y la resolución.

3.4.1 Algoritmos Genéticos: introducción.

Los algoritmos genéticos (AG) forman parte de la computación evolutiva, la cual está constituida por estrategias evolutivas y programación evolutiva. Estos métodos están inspirados en la evolución natural para realizar procesos de búsqueda y optimización. Son procesos que se utilizan en la resolución de problemas muy diversos.

Los AG utilizan una analogía directa con el mecanismo del proceso evolutivo. En este proceso los cromosomas cumplen un papel fundamental ya que a cada individuo le definen características únicas. Los cromosomas forman parte del material genético de un individuo. Por lo tanto, a través de las generaciones estos cromosomas realizan un proceso de adaptación al medio en el cual viven para poder sobrevivir, esto se denomina evolución.

El proceso evolutivo está ligado a tres reglas generales: la selección natural, la recombinación del material genético y la mutación. Por lo tanto la evolución está ligada a la supervivencia del más apto, esto implica que el individuo que mejor se adapte podrá procrear y sobrevivir. Lo cual significa que el material genético del más apto será el que sobrevivirá, extinguiendo a los más débiles. De esta forma funciona la naturaleza, los AG intentan imitar este comportamiento para encontrar el mejor individuo o la solución óptima a un problema.

Los AGs se utilizan en este trabajo porque se diferencian de los algoritmos de optimización clásicos en tres puntos. La primera diferencia es que los algoritmos clásicos generan un solo punto en cada iteración por lo tanto la secuencia de puntos se aproxima a la solución óptima. En cambio, los AGs generan una población de puntos en cada iteración y el mejor punto es el que se aproxima a la solución óptima. La segunda diferencia es que los algoritmos clásicos seleccionan el siguiente punto en la secuencia de forma determinística a diferencia de los AGs que seleccionan la siguiente población de forma probabilística. La tercera diferencia se encuentra en la función a optimizar, en el caso de los algoritmos clásicos utilizan derivadas u otros detalles extras de la función en

contraste con los AGs que no necesitan ningún detalle extra de la función a optimizar.

3.4.2 Algoritmo Genético: funcionamiento.

Los AGs utilizan una cadena binaria para codificar cada cromosoma y representar a cada individuo. La suma de todos los individuos forma una población, la cual es la primera generación. A esta generación se le aplica una función objetivo o “fitness function”, esta representa el medio en el cual deben sobrevivir los individuos. La evaluación de cada individuo se la compara con las otras soluciones de la población midiendo así la calidad de la solución. Si esta evaluación no satisface cierto criterio de parada se debe proseguir a formar la siguiente generación. Para ello, se utilizan operadores artificiales de selección, cruzamiento y mutación de los individuos. Una vez aplicados estos operadores se evalúa nuevamente la generación formada mediante la función objetivo. Este proceso se sigue realizando hasta obtener la mejor solución. En la Figura 3-8 se muestra un pseudo-código del funcionamiento de los AG.

```
INICIO(Generación)  
    Función Objetivo=Evalúa(Generación)  
    MIENTRAS Función Objetivo > Condición de parada  
        Selección=Seleccionar(Generación)  
        Cruzamiento=Cruzar(Generación)  
        Mutación=Mutar(Generación)  
        Función Objetivo=Evalúa(Generación)  
FIN  
FIN
```

Figura 3-8: pseudo-código de funcionamiento de los AGs.

La función objetivo o “fitness function” le asigna a cada individuo un valor numérico el cual sirve para comparar el nivel de adaptación de cada uno al medio, de esta forma se puede comparar entre cada individuo para poder obtener el más apto. Esta función se debe diseñar para cada problema en particular.

Como se observa en la Figura 3-8, si la función objetivo no satisface la condición de parada se debe proceder a formar la generación siguiente de individuos, para ello se utilizan tres reglas:

1. La *selección* de padres se realiza de manera estocástica, como ocurre en la naturaleza, pero se busca privilegiar los individuos más aptos tomando como referencia su valor de función objetivo. De esta manera se obtiene los padres que formarán la siguiente generación. En este proceso un padre puede ser elegido más de una vez por lo tanto más de un hijo llevarán sus genes.
2. El *cruzamiento* de dos padres se utiliza para formar un hijo en la siguiente generación. En este trabajo se utilizó la forma denominada "scattered". El cual, genera un cromosoma binario con genes aleatorios. Luego, del primer padre selecciona los genes con valor 1 y del segundo padre los genes con valor cero. Como ejemplo:

$$\begin{aligned}
 \text{padre1} &= [A B C D E F G H] \\
 \text{padre2} &= [1 2 3 4 5 6 7 8] \\
 \text{padreBinarioAleatorio} &= [0 0 1 1 1 1 0 0] \\
 \text{hijo} &= [1 2 C D E F 7 8]
 \end{aligned}$$

3. La *mutación* realiza pequeños cambios aleatorios en los genes de los individuos. Esto permite mantener la diversidad de individuos, lo cual implica que las soluciones no se estanquen en mínimos locales. Este se realiza con una probabilidad baja para no alterar las mejores soluciones.

$$\begin{aligned}
 \text{padre} &= [1 2 3 4 5 6 7 8] \\
 &\quad \downarrow \text{Gen mutado} \\
 \text{hijoMutado} &= [1 2 3 4 6 6 7 8]
 \end{aligned}$$

3.5 Optimización del Máximo Lóbulo Lateral mediante Algoritmos Genéticos.

Para realizar el diseño de la distribución de micrófonos de manera controlada se optó por la alternativa de optimización numérica mediante Algoritmos Genéticos (AG). Específicamente se optimizó el rango dinámico de la antena de micrófonos en un intervalo de frecuencias de interés a través de la minimización de los Máximos Lóbulos Laterales (MLL).

$$\min_{r_m} MLL(K) \quad K < K_{max} \quad (3.20)$$

Donde K_{max} determina la frecuencia máxima de estudio mediante la distribución de micrófonos a optimizar. Para realizar el proceso de optimización se decidió el uso de AG

ya que estos se adaptan muy bien a la resolución de problemas discontinuos, no diferenciables, estocásticos y altamente no lineales.

La forma en que se introduce la función a optimizar en los AG es a través de una función objetivo. La misma, simula el medio ambiente donde tienen que sobrevivir las soluciones que mejor se adapten. Para modelar este medio ambiente se utilizó el valor de MLL (ecuación 3-18) para cada distribución de micrófonos de cada población. Esto permite seleccionar los arreglos que tengan el mínimo MLL para formar la próxima generación. También se tuvo en cuenta tres restricciones:

1. Las coordenadas de cada micrófono no se pueden solapar.
2. La distribución de micrófonos se realiza sobre un área determinada por el usuario.
3. El rango de frecuencia para el cual se optimiza la antena es definido por el usuario.

3.5.1 Diseño de la antena de 35 micrófonos.

De acuerdo con las dimensiones de la distribución de micrófonos y las distancias relativas entre micrófonos es posible obtener parámetros que caracterizan las distribuciones de micrófonos, como ser la frecuencia mínima y máxima para la cual se puede reconstruir el mapa de ruido. Alguno de esos parámetros se observan en la

Figura 3-9 como ser: la distancia mínima entre micrófonos s y el tamaño máximo D de la distribución de micrófonos.

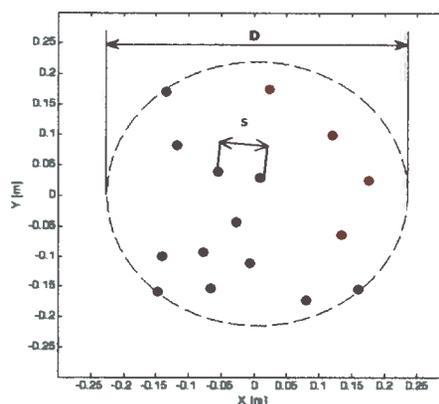


Figura 3-9: Distribución aleatoria.

Mediante AG se optimizó el parámetro MLL de la antena, esto permite incrementar el rango dinámico para un cierto rango de frecuencias donde la antena puede distinguir

fuentes de ruido con menor interferencia de fuentes fantasmas. Un aspecto importante a tener en cuenta en el diseño de la antena es la forma de realizar el soporte de los micrófonos. Como los AG trabajan de forma estocástica la distribución de micrófonos final no tendrá un patrón definido y por lo tanto la construcción del soporte se hace dificultosa. Por lo tanto, se decidió realizar un proceso de optimización en el cual los micrófonos se distribuyeran en 7 ramas de 5 micrófonos cada una.

En relación al costo de la antena la cantidad de micrófonos es un factor muy importante a tener en cuenta. Por lo tanto se decidió utilizar 35 micrófonos que es aproximadamente la mitad de los micrófonos utilizados en antenas comerciales.

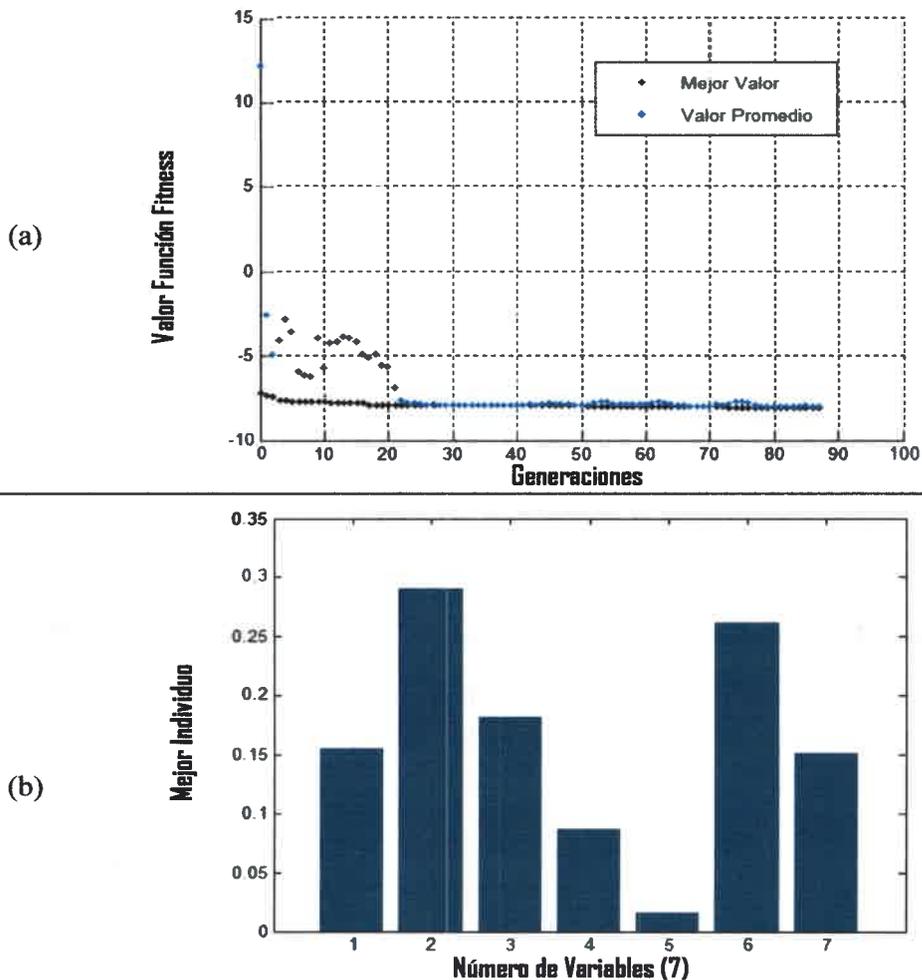


Figura 3-10: a) Se observa la cantidad de generaciones y b) los valores para cada variable.

En la Figura 3-10 (a) se muestra la cantidad de generaciones utilizadas en la optimización para la función objetivo propuesta, en este caso el algoritmo converge a una

cantidad aproximada de 88 generaciones y en la Figura 3-10 (b) se observan las variables utilizadas con su valor final correspondiente. Los valores tomados por las variables que tiene el problema, son las coordenadas radiales de 5 micrófonos, las variables 6 y 7 se utilizan para darle el grado de libertad a la barra de salir de la dirección radial. Se utilizó una población inicial de 20 individuos y la tolerancia (diferencia entre el valor en la iteración n y el calculado en la iteración $n + 1$) para el criterio de parada fue $1e-10$. La distribución de micrófonos resultante debe satisfacer la condición de poder reconstruir mapas de ruido hasta 12000Hz. La Figura 3-11 muestra en arreglo de micrófonos obtenido mediante esta optimización.

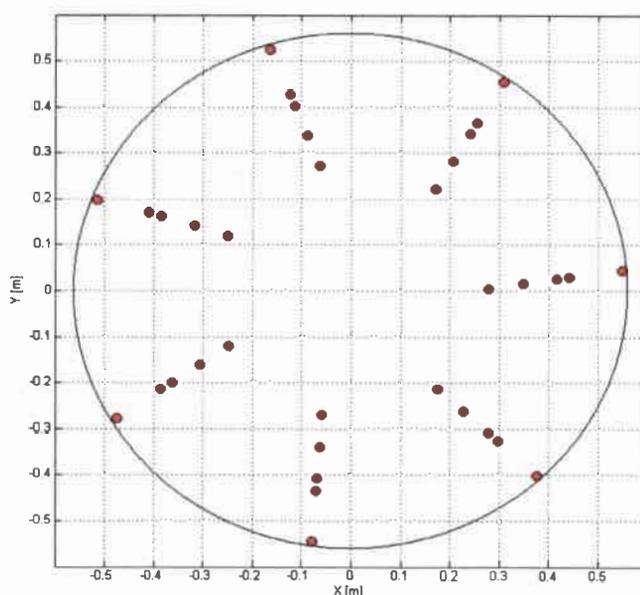


Figura 3-11: arreglo de 35 micrófonos optimizado mediante GA hasta 12000 Hz.

En el caso de la Figura 3-12 se realizó la optimización de la distribución de micrófonos con los mismos parámetros de la Figura 3-10 pero con un rango de frecuencias hasta 6000 Hz.

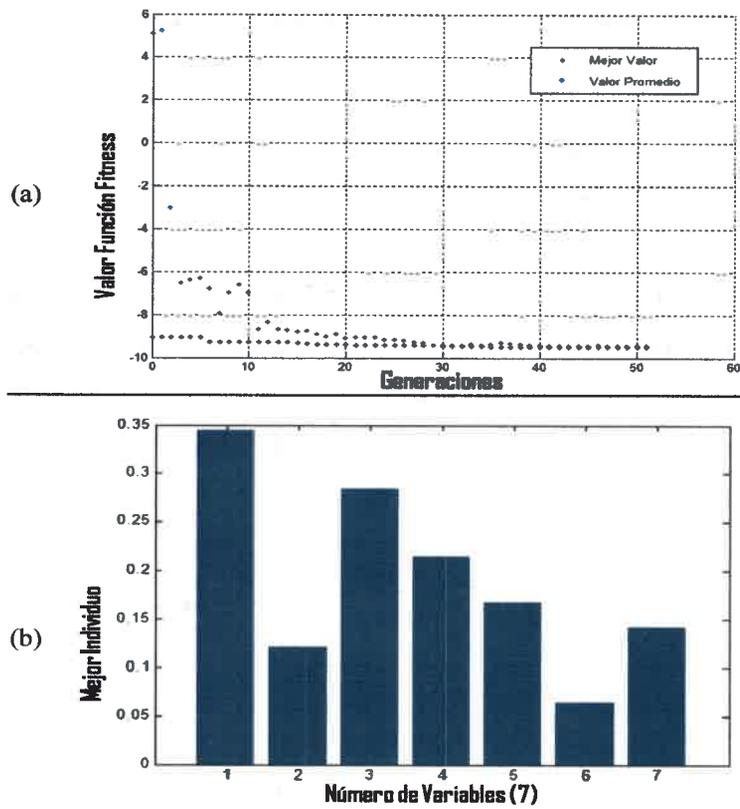


Figura 3-12: a) Se observa la cantidad de generaciones y b) los valores para cada variable.

La Figura 3-13 muestra el arreglo de micrófonos obtenido mediante esta optimización.

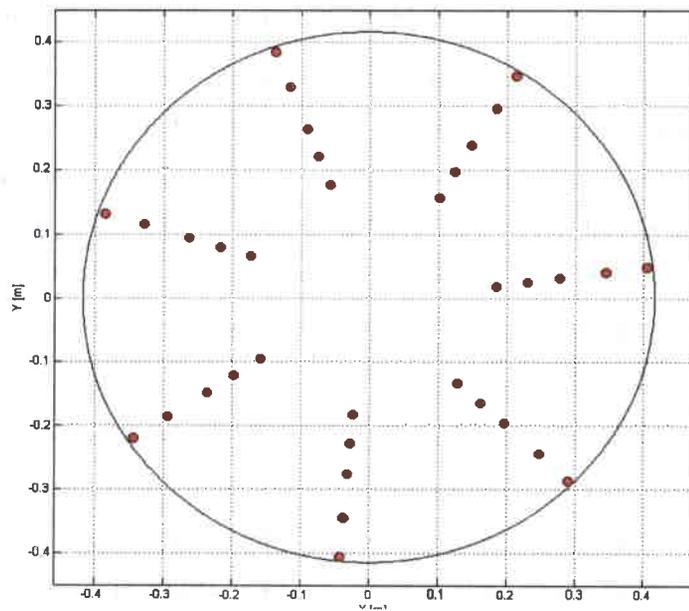


Figura 3-13: arreglo de 35 micrófonos optimizado mediante GA hasta 6000 Hz.

3.5.2 Análisis de la distribución optimizada.

Para corroborar los resultados de la optimización se procedió a simular un campo de presiones de acuerdo a lo mostrado en Figura 3-14. La fuente simulada consistió en un monopolo radiando a una frecuencia de 6 kHz ubicado en las coordenadas (0, 0, 1) y se agregó otro monopolo a la misma frecuencia pero desfasado $\pi/4$ (Figura 3-14). Dicha fuente se utilizó para simular una fuente de ruido que no se encuentra en el plano donde se observa el mapa de ruido, por lo tanto se deben esperar mapas de ruido en los que la fuente lateral no tenga influencia. El campo de presiones simulado se introdujo al programa desarrollado en este trabajo para realizar el proceso de “beamforming” convencional.

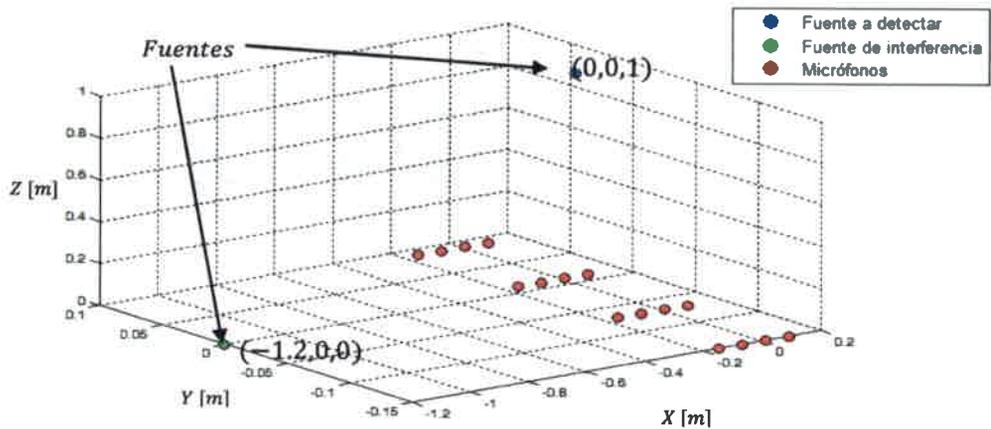


Figura 3-14: Posición de las fuentes de ruido.

La cantidad de micrófonos es un factor importante al definir los costos de construcción de la antena. Es por ello que se realizó un proceso de optimización para poder reducir la cantidad de micrófonos a la mitad en comparación con la distribución óptima comercial de 66 canales. Como requisito la nueva distribución de micrófonos optimizada deberá comportarse, desde el punto de vista del MLL, de manera similar que la distribución óptima comercial. En la Figura 3-15 se observan dos distribuciones de micrófonos de 35 canales.

Para realizar la optimización se decidió introducir un rango de frecuencia de 6000 Hz y otro de 12000 Hz. Como se observa en la Figura 3-15 para el caso de la optimización hasta 6000 Hz el algoritmo convergió a una solución que se comporta mejor que la obtenida con 35 micrófonos optimizados hasta 12000 Hz en el rango de 0 a 11000 Hz.

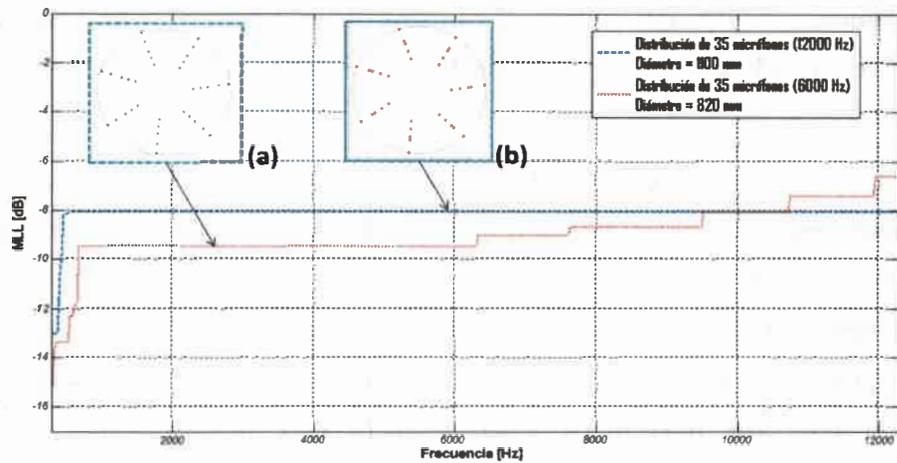
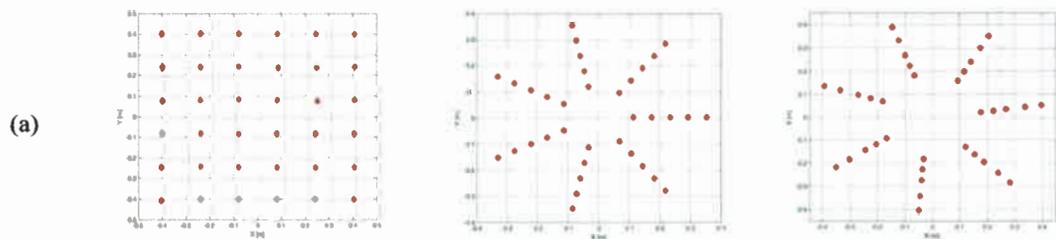


Figura 3-15: Comparación del MLL de las distribuciones optimizadas.

De la Figura 3-15 se puede concluir que la distribución de 35 micrófonos (a) tiene valores más bajos de MLL hasta la frecuencia de 11000 Hz en comparación con la distribución (b). Por lo tanto, se puede construir una antena de micrófonos de relativo bajo costo con un desempeño del MLL muy bueno.

ARREGLO DE 35 SENSORES DE PRESION



MAPAS DE RUIDO SIMULADOS

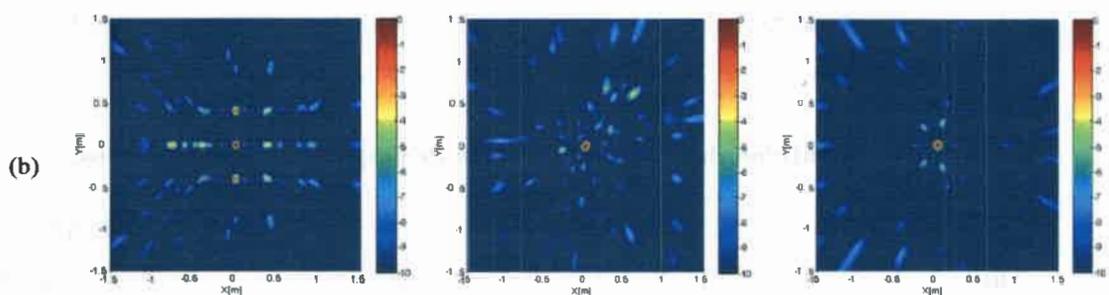


Figura 3-16: (a) Distintos arreglos de 35 sensores de presión (de izq. A der. Grilla regular, Estrella y Optimizado A.G) y las comparaciones de las (b) simulaciones.

La Figura 3-16(a) muestra tres arreglos de micrófonos. El primero de la izquierda muestra una distribución de micrófonos regular, el segundo es una distribución de micrófonos en estrella y el último arreglo es la distribución optimizada mediante AG. Los

resultados de las simulaciones se muestran en la Figura 3-16(b). El mejor resultado se observa en la distribución optimizada mediante AG la cual tiene la menor cantidad de MLL.

En cuanto a la comparación del MLL de la distribución comercial optima de 66 micrófonos y la obtenida con los 35 micrófonos se observa que esta ultima mejora el MLL en el rango de frecuencias de 5000 Hz a 9500 Hz (Figura 3-17). Por lo tanto se obtiene una distribución de micrófonos a un costo menor con un buen desempeño desde el punto de vista del MLL en casi todo el rango de frecuencias y mejorando el optimo comercial de 66 micrófonos en el rango de frecuencias mencionado.

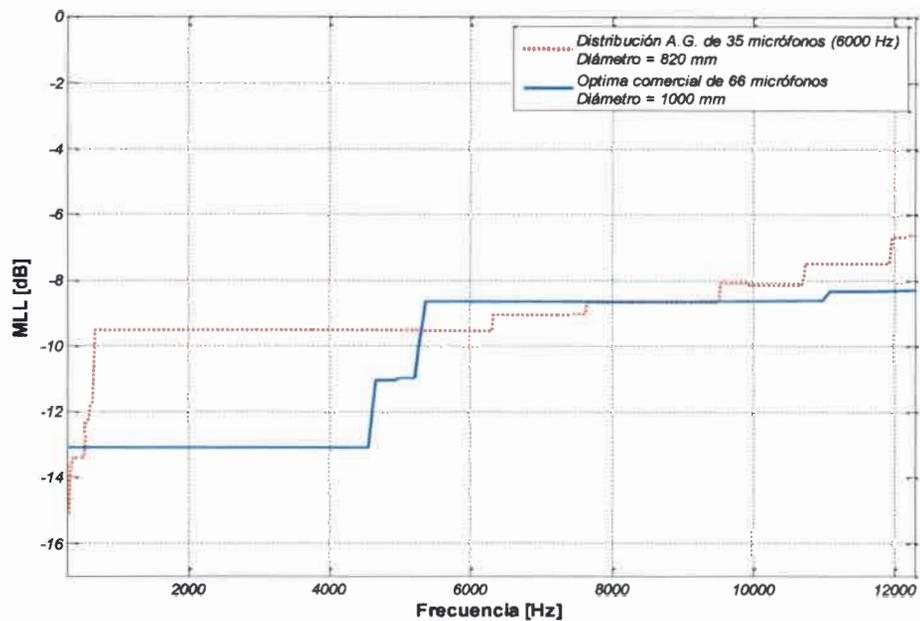


Figura 3-17: Comparación del MLL para una distribución comercial de 66 micrófonos vs. la optimizada mediante AG de 35 micrófonos.

3.6 Construcción de la antena, sistema de adquisición y micrófonos.

Debido a que se utiliza una gran cantidad de micrófonos para la construcción de la antena y al costo que esto trae aparejado se optó por la construcción de micrófonos de bajo costo. Como se vio en secciones anteriores la antena consta de 35 micrófonos, en este caso de tipo “electret”. Los micrófonos “electret” son una variante de los de condensador. Están formados por material dieléctrico que tiene una carga eléctrica cuasi-permanente o polarizada. Que el “electret” este polarizado significa que este cargado eléctricamente desde fábrica. La existencia de esta carga electrostática hace que

no sea necesario alimentarlo eléctricamente para su funcionamiento, sin embargo, sí se requiere alimentación eléctrica para el preamplificador. En cuanto a su directividad, se utilizaron omnidireccionales. Como se muestra en la Figura 3-18 se realizó la medición de fase relativa entre los 35 micrófonos y se colocó un límite de $\pm 10^\circ$. En cuanto a la amplitud, se realizó una calibración mediante una fuente conocida.

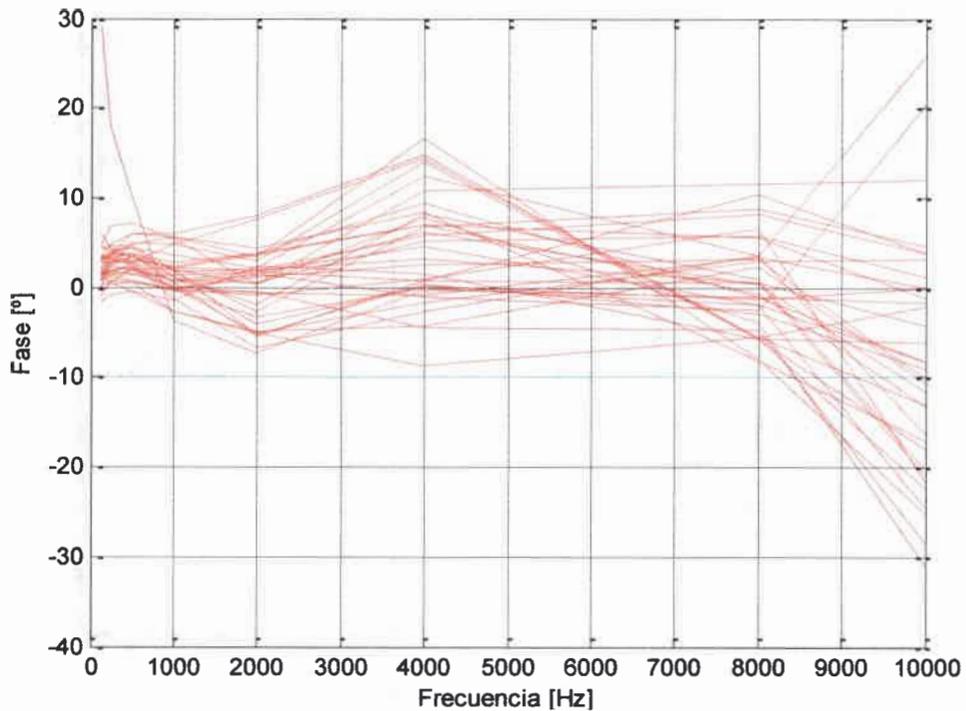


Figura 3-18: Fase relativa al micrófono 1.

Para adquirir la señal se necesita un acondicionamiento de la misma ya que luego se introduce en una placa de adquisición de datos. El acondicionamiento se realizó mediante el sistema mostrado en la Figura 3-19 que consta de pre amplificación de la señal a través de un voltaje de referencia.

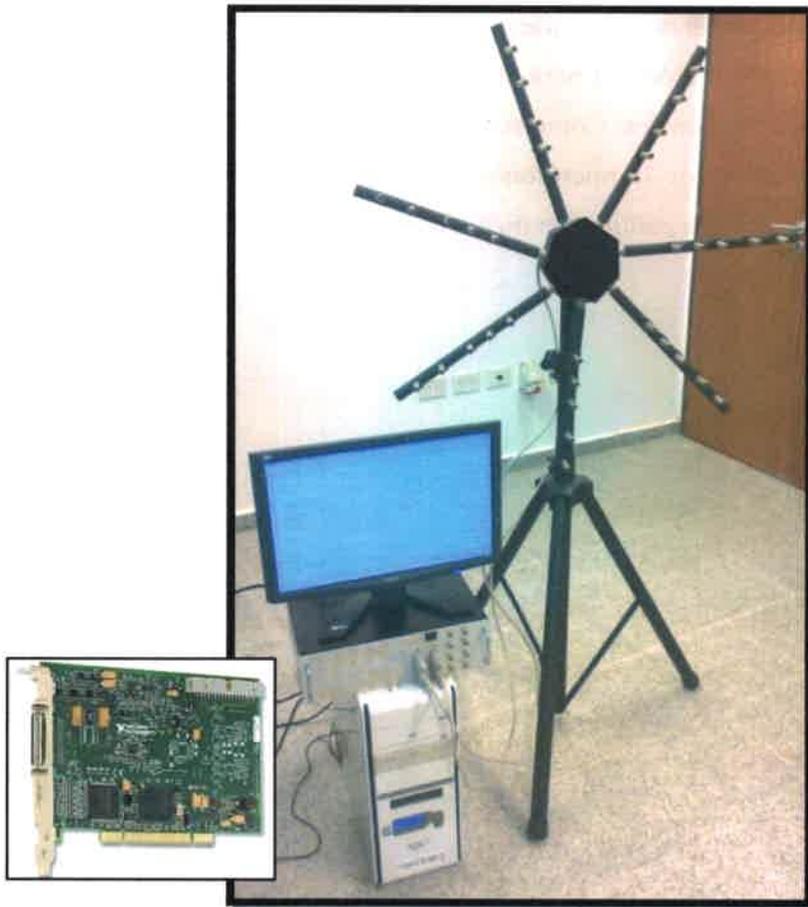


Figura 3-19: Sistema de acondicionado y adquisición de datos.

Una vez acondicionada la señal es introducida a una tarjeta de adquisición para poder convertirla de analógica a digital, para ello se utilizó una placa “Peripheral Component Interconnect” (PCI) con 80 canales analógicos Figura 3-19.

4 TÉCNICAS DE IMÁGENES ACÚSTICA AVANZADAS.

4.1 Introducción

En este capítulo se realizará una introducción a cepstrum, se expondrán algunas de sus limitaciones y capacidades. Luego, se desarrollará una técnica conocida como “acoustic High Dynamic Range” (HDR) y se propondrá una mejora al método el cual se denominará “acoustic High Dynamic Range – Diagonal Removing” (HDR-DR).

4.2 Cepstrum

El cepstrum surge como una herramienta para realizar la deconvolución de dos señales. Este se introdujo en 1963 para utilizarse en señales sísmicas permitiendo detectar los ecos y así determinar el epicentro del sismo [68]. Los autores mostraron que la onda de eco se manifiesta en el espectro logarítmico. Por lo tanto, la *frecuencia* de esa onda se puede detectar fácilmente mediante el cálculo del espectro del espectro logarítmico donde el eco aparecerá como un pico. Sin embargo, las unidades de este pico son temporales y se observó el mismo cambio de unidades en otros parámetros. Es por ello que Bogert *et. al.* [68] para evitar la confusión introdujo el término “cepstrum” que surge de parafrasear la palabra “spectrum”. A continuación se detallan los términos en inglés utilizados habitualmente y los que se utilizan en el dominio “cepstral”.

frequency	-----	quefreny
spectrum	-----	cepstrum
phase	-----	saphe
magnitide	-----	gamnitude
filtering	-----	liftering
harmonic	-----	rahmonic
period	-----	repiod

La transformada “cepstrum” se utiliza para poder localizar periodicidad dentro del espectro de señales [70]. A continuación se detallan los usos más comunes del cepstrum:

- Monitoreo y diagnostico de máquinas rotativas.
- Detección de fallas de rodamientos.
- Detección de fallas en cajas de engranajes.
- Detección y remoción de ecos.
- Análisis del habla.

En el caso de máquinas rotativas, por ejemplo en una caja reductora, se utiliza para encontrar fallas de engrane por variación de carga, excentricidad del engranaje, desgaste de los engranajes, fallas en rodamientos, etc. Las características principales de la transformación son:

- Detección de patrones repetidos dentro de las señales espectrales.
- Detección de periodicidad y de espaciado entre frecuencias.
- Separación de familia de armónicas.
- Separación de fuentes y “transmission path”

La característica más importante es la propiedad de separar dos señales convolucionadas en el dominio del tiempo en una suma de su “cepstro” complejo.

4.2.1 “Power cepstrum”

El “Power cepstrum” se define como la transformada de Fourier inversa del logaritmo del valor absoluto de la transformada de Fourier. Por lo tanto, expresando matemáticamente el “Power cepstrum” se define como,

$$C_p(\tau) = |\mathcal{F}^{-1}\{\text{Log}\{|\mathcal{F}\{x(t)\}|^2\}\}|^2 \quad (4.1)$$

Donde $x(t)$ es la señal en el dominio del tiempo. Recordando que la transformada de Fourier y la inversa de Fourier se definen de la siguiente manera,

$$\mathcal{F} = X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4.2)$$

$$\mathcal{F}^{-1} = x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (4.3)$$

El problema que surge de aplicar el “power cepstrum” con las técnicas de imágenes acústicas es la pérdida de fase durante el proceso. Esto se evidencia en la Ecuación (4.1), al aplicar el valor absoluto a los datos en el dominio de la frecuencia se elimina la contribución de la parte imaginaria la cual contiene la información de la fase. Por lo tanto se debe pensar en otra técnica que permita realizar la transformación sin perder la fase.

Ejemplo de aplicación de "power cepstrum" en fallas de rodamientos.

Para mostrar el funcionamiento de la transformada "power cepstrum" se realizó una simulación de una falla en un rodamiento. Esto permite mostrar alguna de las ventajas que presenta esta transformación en la realización de mantenimiento predictivo.

Una falla en rodamiento se puede detectar a partir de los impactos producidos por los elementos rodantes sobre la grieta, esto produce fuerzas impulsivas que se evidencian en la señal temporal. Para poder asociar una falla a una parte determinada del rodamiento se pueden relacionar la frecuencia de impacto con las RPM del eje y la geometría del rodamiento de la siguiente manera:

BPFO: "Ball Passing Frequency Outer race" representa una falla en pista exterior.

BPFI: "Ball Passing Frequency Inner race" representa una falla en pista interior.

BSF: "Ball Spin Frequency", frecuencia de giro de los elementos rodantes.

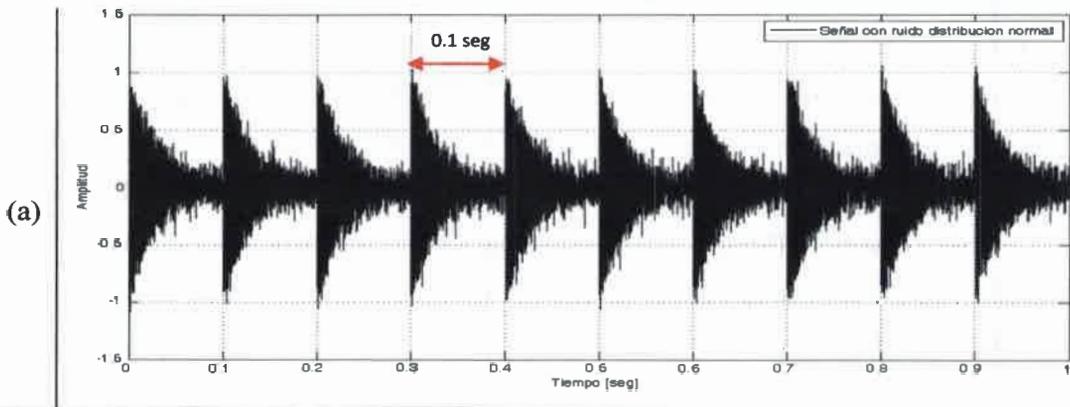
BFF: "Ball Fault Frequency", falla en los elementos rodantes. Representada por $2 \times \text{BSF}$.

FTF: "Fundamental Train Frequency".

En primera instancia se comenzó por simular una señal de falla de rodamiento a través de una serie de impulsos con decaimiento exponencial.

$$y(t) = A \sin(2\pi ft) e^{-|\beta\tau|} \tag{4.4}$$

Donde β corresponde a un valor de amortiguamiento, τ corresponde al intervalo de tiempo amortiguado, f es la frecuencia y A es la amplitud.



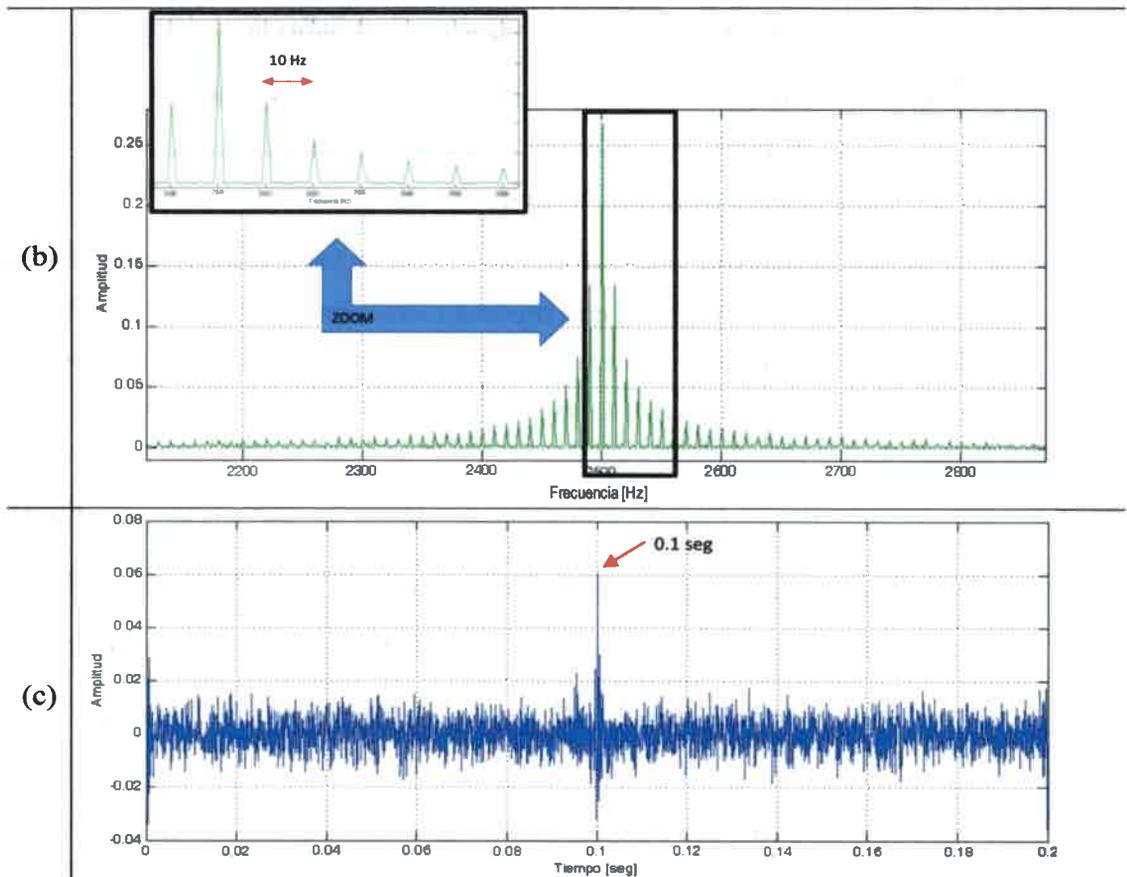


Figura 4-1: (a) Señal en el tiempo (b) señal en la frecuencia y (c) señal en el dominio cepstral (“Power Cepstrum”).

En la Figura 4-1 (a) se observa la señal en el dominio temporal con un golpeteo que simula una falla en un rodamiento, esta frecuencia de golpeteo se repite cada 0.1 segundos, en el dominio de la frecuencia (Figura 4-1(b)) se evidencia que la señal tiene una frecuencia de resonancia de 2500 Hz y se observan bandas laterales cada 10 Hz. Esta energía cada 10 Hz se encuentra distribuida en toda la banda de frecuencia y es difícil de visualizar en caso de querer realizar un monitoreo de mantenimiento predictivo. Entonces, para controlar la amplitud de la falla es conveniente tener toda la energía asociada al golpeteo en un solo valor, esto se puede lograr a través de la transformada “power cepstrum” (Figura 4-1 (c)) que encuentra las repeticiones dentro del espectro. Como se observa en la Figura (c) el valor de 0.1 seg está asociado directamente con la frecuencia de 10 Hz ($1/0.1\text{seg} = 10\text{ Hz}$).

4.2.2 "Complex Cepstrum"

Como se comentó anteriormente con el "power cepstrum" no se puede reconstruir la señal en el dominio del tiempo nuevamente, para superar este inconveniente se introdujo la transformación "complex cepstrum" [69]. Este utiliza el logaritmo complejo de la señal para poder conservar la fase.

$$C_c(\tau) = \mathcal{F}^{-1} \{ \text{Log} \{ \mathcal{F} \{ x(t) \} \} \} \quad (4.5)$$

Por lo tanto, podemos expresar la transformada de Fourier

$$X(f) = \mathcal{F} \{ x(t) \} = a(f) + ib(f) = A(f) e^{i\phi(f)} \quad (4.6)$$

Donde, $a(f)$ es la parte real y $b(f)$ la parte imaginaria de los datos. Esto puede ser expresado de la forma eulereana con $A(f)$ representando la amplitud y $\phi(f)$ la fase de los datos en el dominio de la frecuencia.

Luego, aplicando el logaritmo complejo,

$$\text{Log} \{ X(f) \} = \text{Log} \{ A(f) \} + i\phi(f) \quad (4.7)$$

Notar que para calcular el logaritmo complejo se necesita que la función $\phi(f)$ sea continua.

Influencia de la SNR en el "complex cepstrum".

Para evaluar esta condición se realizará la variación del valor "SNR" en la señal temporal y se medirá la Relación Pico Ruido "RPR" en el "complex cepstrum". A continuación se muestran las definiciones de "SNR" y "RPR".

$$SNR[dB] = 20 \log_{10} \left(\frac{x_{RMS}(t)}{x_{ruido-RMS}(t)} \right) \quad (4.8)$$

$$RPR[dB] = 20 \log_{10} \left(\frac{x_{Cepstrum \ RMS(100mseg)}}{(x_{Cepstrum}(t) - x_{Cepstrum(100mseg)})_{RMS}} \right) \quad (4.9)$$

La siguiente Figura 4-2 muestra la variación en el pico de 100 mseg de acuerdo a la relación señal ruido de la señal en el dominio del tiempo. Se observa que a medida que la SNR disminuye la capacidad del "complex cepstrum" de detectar el pico también se ve disminuida.

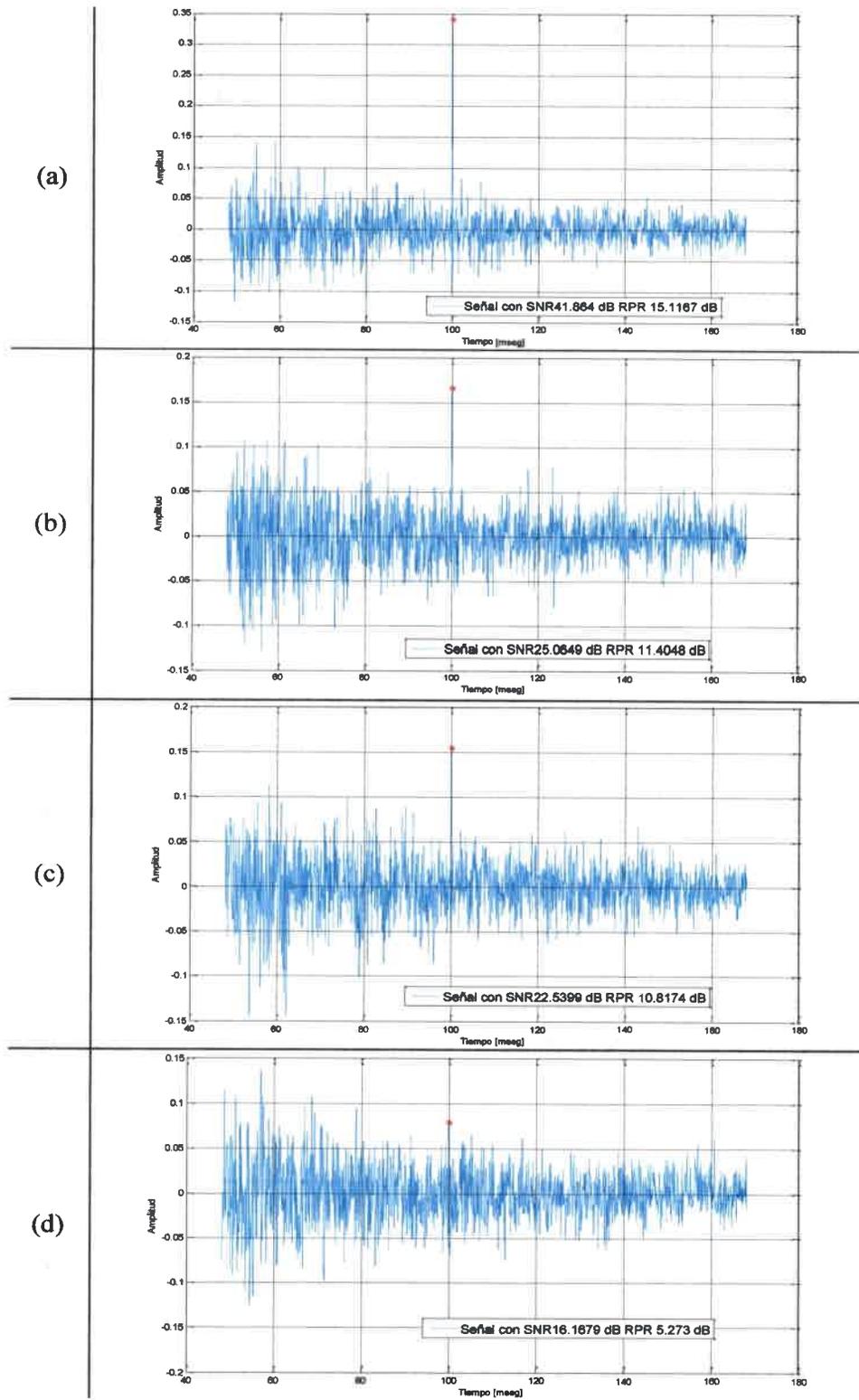


Figura 4-2: Muestra la variación en la detección del pico de 100 mseg en relación a SNR de la señal en el dominio temporal.

En la siguiente tabla se detallan los valores:

SNR[dB]	RPR[dB]
41.8	15.1
27.6	13.5
25	11.4
24.4	11.8
22.5	10.8
21.5	9.4
19.9	9.1
18.9	8.4
16.1	5.2

Tabla 4-1: Comparación de SNR con RPR.

De la Tabla 4-1 se observa que a medida que disminuye el SNR en el dominio del “complex cepstrum” se pierde el pico de 100 mseg. Una forma de mejorar la relación SNR es a través de un promedio de la señal en el dominio temporal. Esta mejora se debe a que se asume que la señal y el ruido no están correlacionados, que la magnitud de la señal no varía en las diferentes mediciones y que el ruido es aleatorio, con media cero y varianza constante.

4.2.3 “Cepstrum Editing Procedure” (CEP).

Debido a los problemas con la SNR que presenta la transformada “complex cepstrum” y principalmente en la recuperación de la fase cuando se realiza la transformada inversa. Es que, en el año 2011 Randall et. al. (2011) [71] propusieron una metodología diferente para realizar la edición de la señal en el dominio “cepstral” y luego reconstruir la señal en el tiempo con el filtrado deseado. En la Figura 4-3 se describe el método denominado “Cepstral Editing Procedure” (CEP). Este permite eliminar armónicas o bandas laterales del espectro, por ejemplo si se tienen señales en la cual se encuentra el ruido de un rodamiento fallado y una caja reductora, la señal estará llena de armónicas debidas a las frecuencias de engrane, a la cinemática del rodamiento y también se encontrarán en la señal bandas laterales debidas a las fallas del rodamiento. Entonces mediante este método se pueden separar estas señales sin la necesidad de que la fase deba ser desenvuelta como el caso del “complex cepstrum”. Como desventaja de este método los autores mencionan el error de fase que se comete en las frecuencias editadas pero como la cantidad de frecuencias removidas es relativamente baja no afecta a la reconstrucción y las amplitudes se reducen en igual nivel que las componentes aleatorias adyacentes.

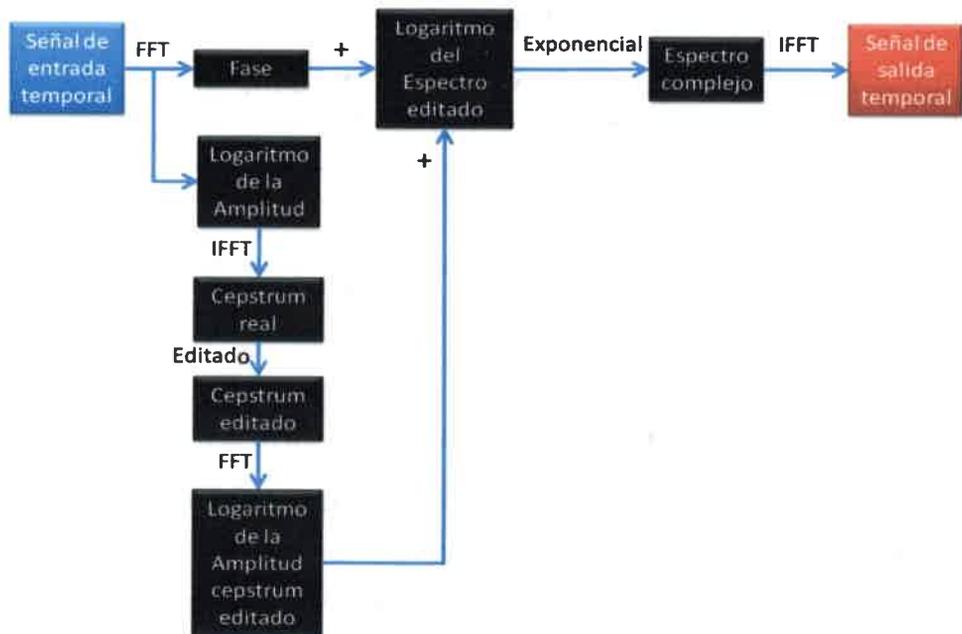


Figura 4-3: Diagrama esquemático del CEP.

Ejemplo de aplicación de filtros en el dominio “cepstral”.

Hasta aquí se recordó el uso de los métodos de “power cepstrum”, “complex cepstrum” y “CEP”. En este trabajo se utilizarán los dos últimos ya que permiten editar la señal y recuperarla en el dominio temporal. Entonces, como se detallo al principio de esta sección en el dominio cepstral el filtrado se lo llama “liftering”, se utiliza para poder remover los picos en el dominio cepstral. Luego, invirtiendo el proceso llevamos la señal al dominio del tiempo lo que permite eliminar las reflexiones o separar señales convolucionadas. Si estas señales resultantes están localizadas en bandas diferentes y cumplen el principio de señales lineales e invariantes en la frecuencia [72], entonces se pueden separar por un filtrado lineal simple (liftering).

Cada una de las señales separadas puede recuperarse por la transformación inversa. Pero estas técnicas tienen el inconveniente de que el cepstrum complejo de una señal de duración finita siempre se extiende al infinito [73], y su cálculo mediante FFT produce errores de “aliasing” que no se resuelven con aumentar la frecuencia de muestreo, porque se incrementan los efectos del ruido en los componentes cepstrales [74]. También es difícil fijar los parámetros para un filtro ideal (“lifter”) en el dominio del “cepstrum” (“quefrequency”), por lo que tiene que cambiarse sistemáticamente para obtener buenos resultados en la deconvolucion.

Se analizará un filtrado mediante el “complex cepstrum” y otro mediante el método “CEP”. El filtrado se realiza multiplicando por cero la parte de la señal a editar. Los datos que se utilizan para realizar los ensayos se extrajeron de la base de datos de “Case Western University” [75]. En la Figura 4-4 se observa la disposición del motor, acople y dinamómetro. Los rodamientos en estudio soportan el eje del motor.

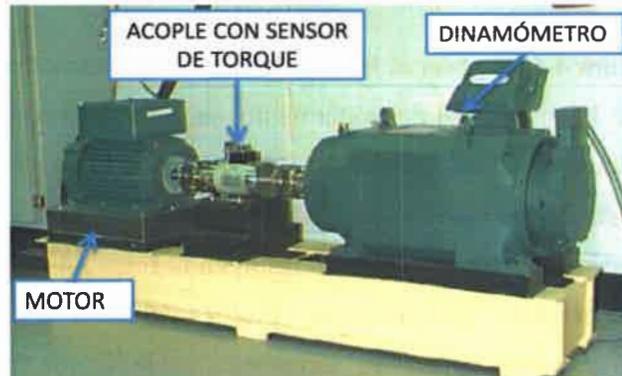


Figura 4-4: Banco de ensayos de rodamientos [75].

El rodamiento estudiado en este caso es del lado del ventilador del motor. En la Figura 4-5 se observa la señal en el tiempo para el rodamiento sin falla y con una falla en pista interna de 0.007” de diámetro para el motor trabajando en vacío.

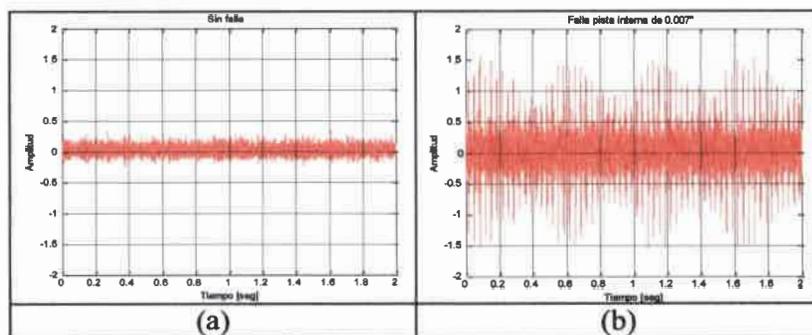


Figura 4-5: Motor sin carga. (a) Rodamiento sano, (b) falla pista interna de 0.07”.

Se utilizará la falla de 0.07” de pista interna sin carga (0 Hp) para analizar en frecuencia y se editará mediante el proceso CEP. En la Tabla 4-2 se colocaron los valores por los que multiplicados a la frecuencia de giro del motor (1797 rpm sin carga) en Hz nos devuelve la frecuencia de cada falla.

	Falla en pista interior	Falla en pista exterior	Jaula	Elementos rodantes
Constante	4.9469	3.0530	0.3817	3.9874
Constante x Frecuencia de giro [Hz]	148.15	91.43	11.43	119.42

Tabla 4-2: Constante del cinematismo de los rodamientos y frecuencia a las cuales aparecen las falla.

En la Figura 4-6 se observa las frecuencias del sistema dentro de las cuales algunas son debidas a la cinemática del rodamiento, se observa una ampliación de los primeros 150 Hz donde se visualiza la frecuencia de giro hasta su cuarto armónico y la frecuencia de falla en pista interior. Luego de analizado el cinematismo y las frecuencias de giro se realiza el proceso de CEP el cual se muestra en la Figura 4-7. En línea azul se observa el cepstrum real original donde el primer pico es debido a la familia de armónicas de la frecuencia de giro y las demás son “rahmonics” de la familia de la frecuencia de giro. Por lo tanto, estas se filtraron mediante la multiplicación por cero en los lugares de interés, esto permite tener un espectro continuo en las frecuencias removidas. El resultado de este filtrado se puede visualizar en la Figura 4-8 en el cual se observa una disminución en amplitud con respecto al espectro original.

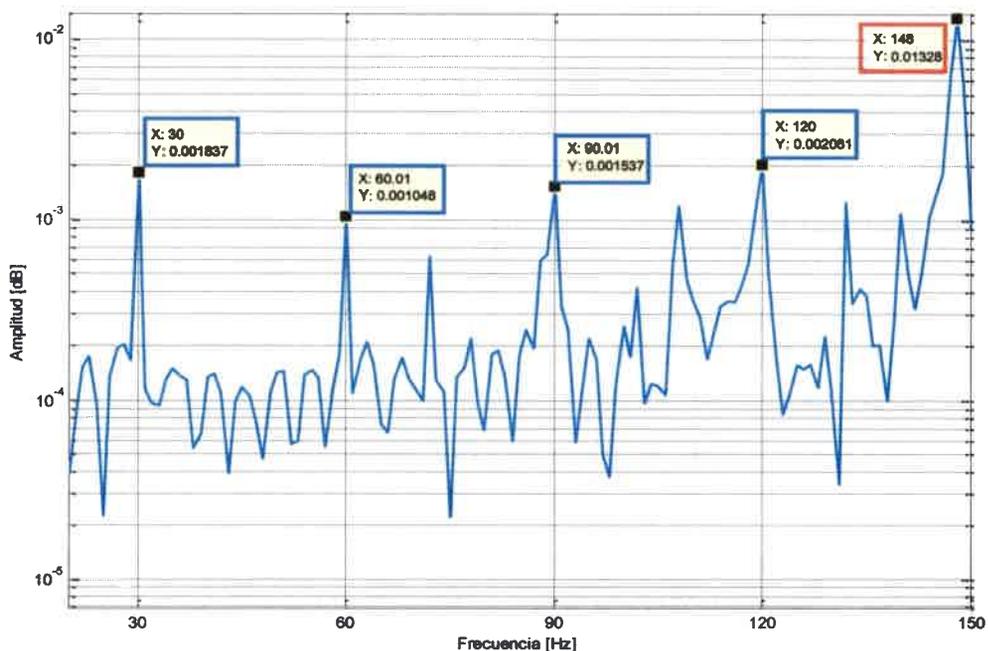


Figura 4-6: Las frecuencias en azul corresponden a la primera frecuencia de giro hasta su cuarto armónico y la frecuencia en rojo corresponde a la falla de la pista interior.

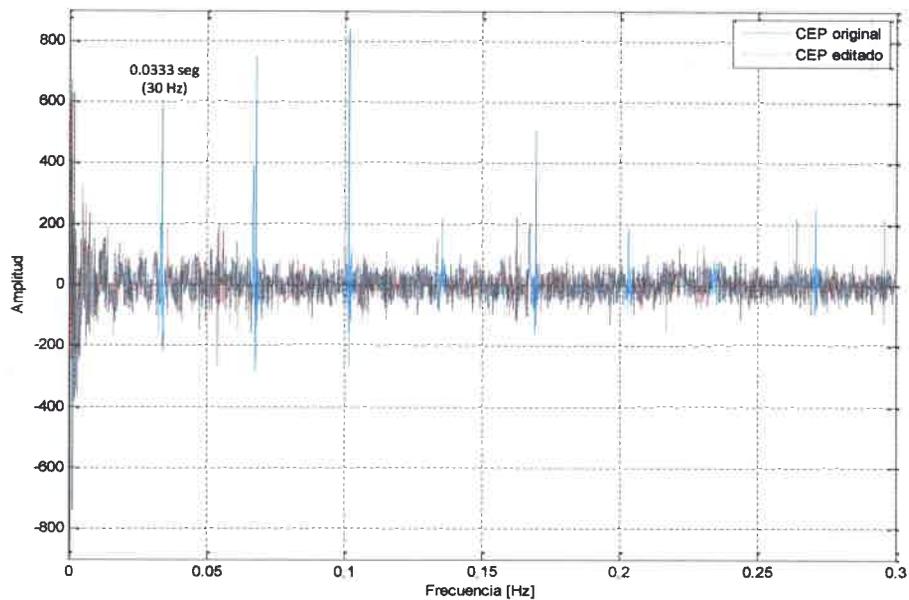


Figura 4-7: Señal Cepstrum real. Se editaron las frecuencias correspondientes a las frecuencias de giro del eje y sus “rahmonics”.

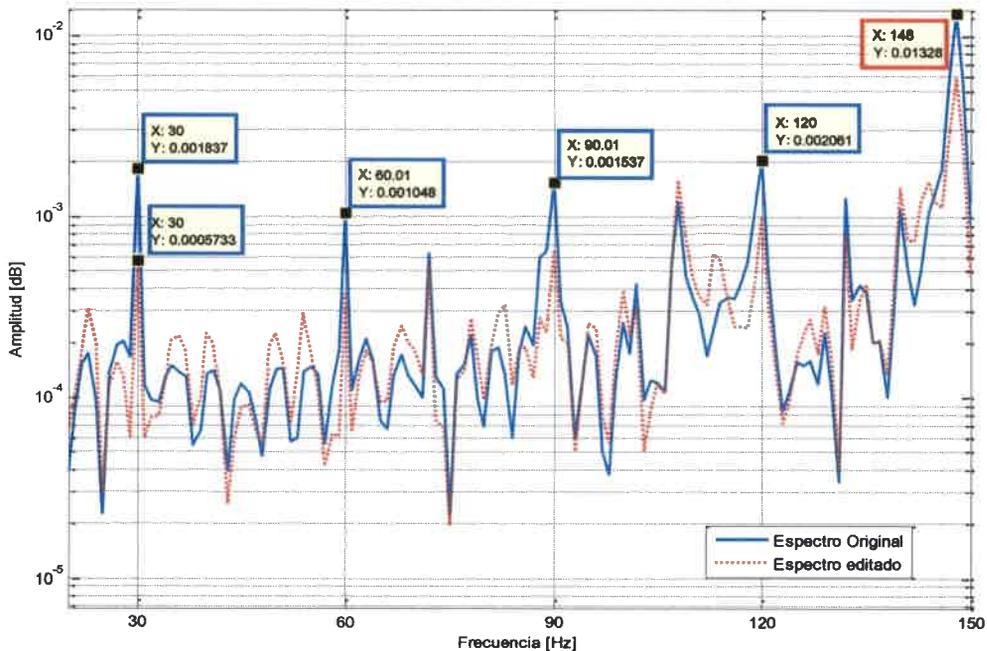


Figura 4-8: Espectro de frecuencias de la señal editada.

En la Figura 4-9 se muestra el cepstrum complejo editado. Luego, en la Figura 4-10 se observa el logaritmo del espectro de la señal original y la señal editada. En este caso se removi6 de la se1al todas las familias de frecuencias menores a la frecuencia de giro del

eje. Esto permite suavizar el espectro ya que se eliminan familias de bajas frecuencias evidenciando las partes no periódicas del espectro.

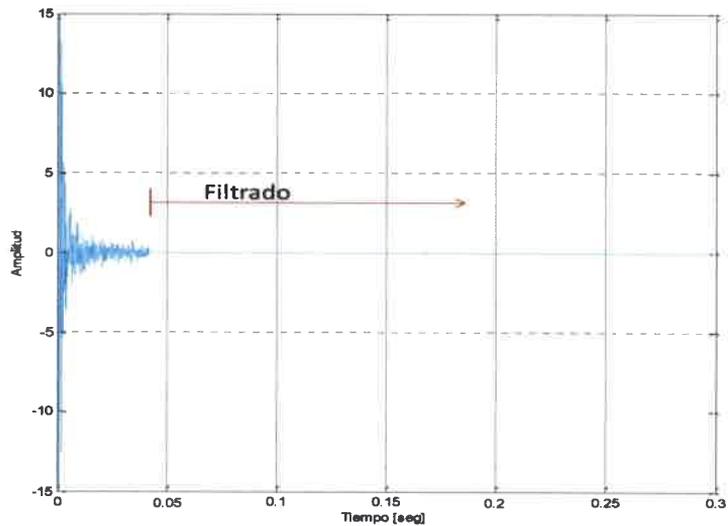


Figura 4-9: “Complex cepstrum” filtrado.

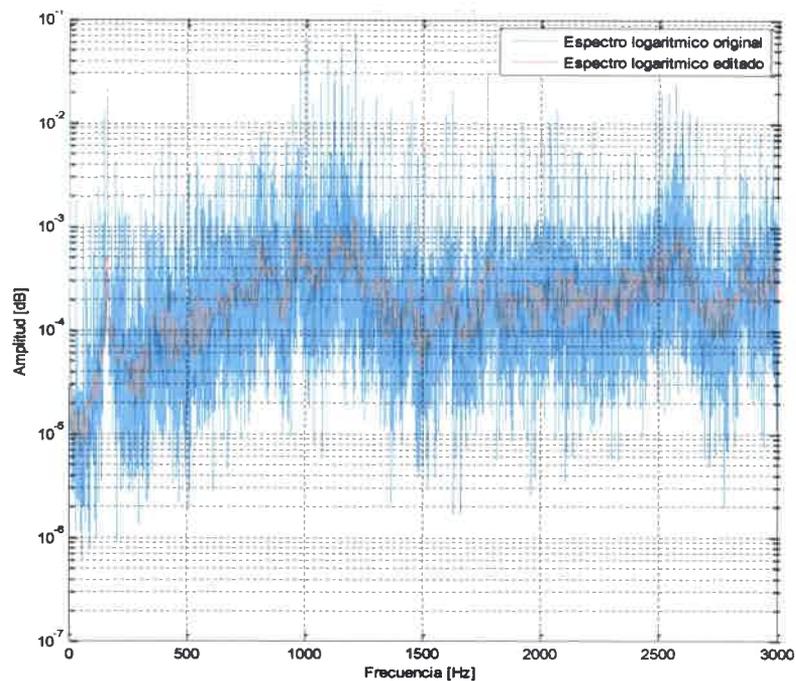


Figura 4-10: Espectro logarítmico de frecuencias.

4.3 “Acoustic High Dynamic Range” (HDR).

En general el rango dinámico que se encuentra en el diseño de las antenas de micrófonos es de 8 a 15 dB aproximadamente, dependiendo del número y posición de los

micrófonos. En la Figura 4-11 se puede observar el rango dinámico de acuerdo a la frecuencia de interés de la distribución de micrófonos optimizada construida.

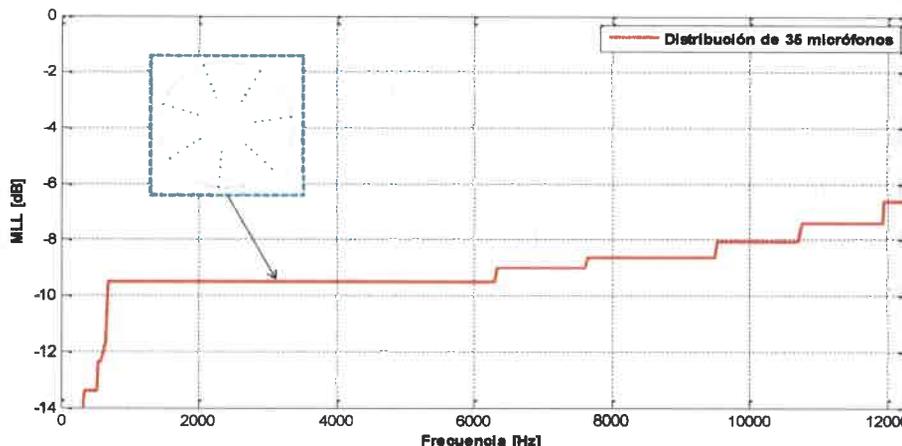


Figura 4-11: MLL (Máximo Lóbulo Lateral) de la distribución optimizada con AG.

Por lo tanto, si en el mapa de ruido se intentan distinguir fuentes que tengan una diferencia mayor a 9 dB entre 1000 y 6000 Hz no se podrán diferenciar. Este inconveniente se podría solucionar agregando mayor cantidad de micrófonos en el hardware pero esto incrementaría también su costo. La otra forma de solucionarlo puede ser mediante el pos proceso adecuado de los datos. Por lo tanto, gracias al aumento en la capacidad de cálculo computacional es conveniente desarrollar un algoritmo que logre este cometido. En el año 2012, Döbler et. al. presentaron un algoritmo basado en el método de “High Dynamic Range” utilizado en el pos procesamiento de imágenes [2]. A este nuevo algoritmo los denominaron “acoustic HDR”.

La idea básica del método es extraer del mapa de ruido la máxima fuente sonora incluyendo sus lóbulos laterales y colocarlo en un mapa “limpio”, luego con las señales sin la fuente principal se vuelve a reconstruir el mapa de ruido y nuevamente se extrae la segunda fuente dominante con sus lóbulos laterales. De esta manera se puede aplicar sucesivamente el método hasta extraer la cantidad de fuentes seleccionadas, esto permite obtener un mapa de ruido con baja influencia de fuentes fantasmas y aumentar el rango dinámico de la imagen acústica. Para realizar el proceso de “acoustic HDR” se deben realizar los siguientes pasos:

- Construir la imagen acústica mediante “Retardo y suma”.
- Buscar las coordenadas del pico máximo en la imagen acústica.

- Extraer la fuente de ruido máxima junto con sus lóbulos laterales.
- De la fuente máxima se eliminan los lóbulos laterales y el lóbulo principal se coloca en una imagen acústica “limpia”.

Este proceso se realiza de forma iterativa hasta que se extraen todas las fuentes de ruido deseadas. El algoritmo inicializa en la iteración $i = 0$ con una imagen acústica nula la cual servirá para poder colocar las fuentes máximas sin sus lóbulos laterales. Se debe introducir también la cantidad de fuentes de ruido que se desean extraer, esto servirá como parada del algoritmo.

$$b_{MapaFinal}^{(i-1)}(\mathbf{r}_n) = 0 \quad (4.10)$$

$i = 1: NF$

Donde \mathbf{r}_n representa los puntos de una grilla espacial y NF es el número de fuentes que se desean extraer. Luego, se realiza la imagen acústica mediante “Retardo y suma”.

$$b_M^{(i)}(\mathbf{r}_n, t_k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_{mn} p_m^{(i)}(t_k - \Delta t_m(\mathbf{r}_n)) \quad (4.11)$$

$$b_{MapaParcial}^{(i)}(\mathbf{r}_n) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T (b_M^{(i)}(\mathbf{r}_n, t_k))^2} \quad (4.12)$$

De la imagen acústica obtenida se localiza la posición de la fuente con mayor presión acústica y se reconstruye la señal que llega desde ese punto al arreglo de micrófonos.

$$[b_{max}^{(i)}, \mathbf{r}_{nmax}^{(i)}] = \max_{b_{max}^{(i)}} b_{MapaParcial}^{(i)}(\mathbf{r}_n) \quad (4.13)$$

$$b_M'^{(i)}(t_k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_{mn} p_m^{(i)}(t_k - \Delta t_m(\mathbf{r}_{nmax}^{(i)})) \quad (4.14)$$

Luego, se aplica los retardos con signo positivo para cada micrófono.

$$b_{M_m}''^{(i)}(t) = b_{M_m}'^{(i)}(t + \Delta t_j(\mathbf{r}_{nmax}^{(i)})) \quad (4.15)$$

Con estos datos se realiza la imagen acústica con la fuente de ruido máxima.

$$b_M''^{(i)}(\mathbf{r}_n, t_k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_{mn} b_{M_m}''^{(i)}(t_k - \Delta t_m(\mathbf{r}_n)) \quad (4.16)$$

$$b_{MapaLimpio}^{(i)}(r_n) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T (b_M''^{(i)}(r_n, t_k))^2} \quad (4.17)$$

Aquí, $b_{MapaLimpio}^{(i)}$ representa la presión RMS de cada punto de la grilla para la fuente sonora máxima de la imagen acústica. A esta fuente se le quitan los lóbulos laterales mediante la siguiente operación;

$$N^{(i)} = \frac{1}{p_{MapaLimpio}^{(i)}(r_{nmax})} \quad (4.18)$$

$$b_{MapaLimpio}^{(i)}(r_n) = \frac{(b_{MapaLimpio}^{(i)}(r_n) N^{(i)})^{SLSE}}{N^{(i)}} \quad (4.19)$$

Donde *SLSE* es un valor denominado "Side Lobe Supression Exponent" y *N* es un valor de normalización. El valor de la fuente sonora máxima se coloca en una imagen acústica "limpia".

$$b_{MapaFinal}^{(i)}(r_n) = b_{MapaFinal}^{(i-1)}(r_n) + b_{MapaLimpio}^{(i)}(r_n) \quad (4.20)$$

Ahora se extrae el valor de la fuente sonora máxima de los datos de los micrófonos para volver a armar una imagen acústica sin la fuente máxima.

$$p_m^{(i+1)}(t) = p_m^{(i)}(t) - b_M''^{(i)}(t) \quad (4.21)$$

El proceso finaliza cuando se cumple la condición de que el número de fuentes extraídas es igual al valor seleccionado al iniciar el algoritmo.

$$i = NF \quad (4.22)$$

La Figura 4-12 muestra una comparación entre Retardo y Suma y HDR para dos fuentes a una distancia de 20 cm emitiendo un tono de 2 kHz a una distancia de 70 cm de la antena a 77 dB ref. 20 [μPa]. Mediante Retardo y suma (Figura 4-12(a)) no se pueden diferenciar las fuentes y los lóbulos laterales para el rango dinámico seleccionado se confunden con fuentes fantasmas y debido a la baja resolución se observa como si fuera una sola fuente. En cambio mediante HDR (Figura 4-12(b)) el rango dinámico de la imagen aumenta y se pueden diferenciar las dos fuentes correctamente.

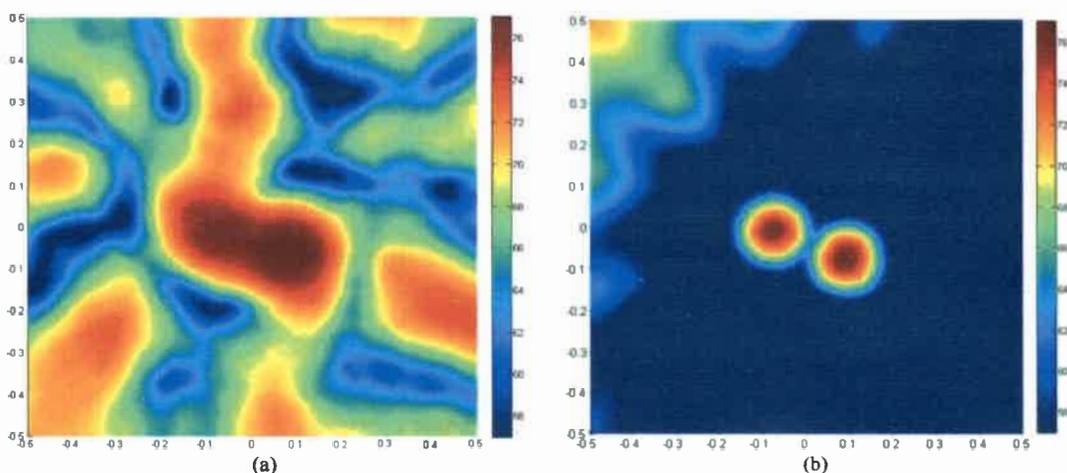


Figura 4-12: (a) Retardo y suma, (b) “acoustic HDR”.

4.4 “Acoustic High Dynamic Range” modificado con “diagonal removing” (HDR-DR).

La filosofía de funcionamiento de “acoustic HDR” es similar a CLEAN [7] pero existen dos diferencias. La primera es que “acoustic HDR” trabaja en el dominio del tiempo mientras que CLEAN se realiza en el dominio de la frecuencia. Y la segunda, es que CLEAN utiliza “beamforming” convencional con la remoción de la diagonal principal (sin el auto espectro de las señales) de la CSM y “acoustic HDR” utiliza “retardo y suma”. En este trabajo se propone utilizar la remoción de la auto correlación en la técnica de “Retardo y suma” como se detalla en la sección 2.6.1 en conjunto con “acoustic HDR”, esta modificación fue denominada por el autor de este trabajo como “acoustic HDR-DR”.

A diferencia del caso anterior iniciamos el algoritmo de la siguiente manera,

$$b_{MapaFinal}^{(i-1)}(\mathbf{r}_n) = 0 \quad (4.23)$$

Donde \mathbf{r}_n representa los puntos de una grilla espacial y NF es el número de fuentes que se desean extraer. Aquí se utilizará la remoción de la auto correlación en la técnica de “Retardo y suma” para poder armar la imagen acústica. Como se mostró en el capítulo 2 la imagen acústica presentará una mejora en cuanto a la reducción de sus lóbulos laterales y como consecuencia la reducción de las fuentes fantasmas. Esta técnica presenta la posibilidad de que existan valores negativos de presión debidos a la extracción de la auto correlación y al calcular el valor RMS se conviertan en complejos. Por lo tanto se introduce una condición para rechazar esos valores y reemplazarlos por un valor real ϵ .

$$b_M^{(i)}(\mathbf{r}_n, t_k) = \left\{ \sum_{m=1}^M w_{mn} p_m^{(i)}(t_k - \Delta t_m(\mathbf{r}_n)) \right\}^2 - \sum_{m=1}^M \{w_{mn} p_m^{(i)}(t_k - \Delta t_m(\mathbf{r}_n))\}^2 \quad (4.24)$$

$$b_{\text{MapaParcial}}^{(i)}(\mathbf{r}_n) = \sqrt{\frac{1}{TM^2} \sum_{k=1}^T b_M^{(i)}(\mathbf{r}_n, t_k)} \quad (4.25)$$

$$\text{Si } b_{\text{MapaParcial}}^{(i)}(\mathbf{r}_n) \leq 0 \text{ o } \infty \therefore b_{\text{MapaParcial}}^{(i)}(\mathbf{r}_n) = \varepsilon \quad (4.26)$$

De la imagen acústica obtenida se localiza la posición de la fuente con mayor presión acústica y se reconstruye la señal que llega desde ese punto al arreglo de micrófonos.

$$[\mathbf{b}_{\max}^{(i)}, \mathbf{r}_{n\max}^{(i)}] = \max_{\mathbf{b}_{\max}^{(i)}} b_{\text{MapaParcial}}^{(i)}(\mathbf{r}_n) \quad (4.27)$$

$$b_M'^{(i)}(t_k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_{mn} p_m^{(i)}(t_k - \Delta t_m(\mathbf{r}_{n\max}^{(i)})) \quad (4.28)$$

Luego, se aplica los retardos con signo positivo para cada micrófono.

$$b_{Mm}''^{(i)}(t) = b_{Mm}'^{(i)}(t + \Delta t_j(\mathbf{r}_{n\max}^{(i)})) \quad (4.29)$$

Con estos datos se realiza la imagen acústica con la fuente de ruido máxima.

$$b_M''^{(i)}(\mathbf{r}_n, t_k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_{mn} b_{Mm}''^{(i)}(t_k - \Delta t_m(\mathbf{r}_n)) \quad (4.30)$$

$$b_{\text{MapaLimpio}}^{(i)}(\mathbf{r}_n) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T (b_M''^{(i)}(\mathbf{r}_n, t_k))^2} \quad (4.31)$$

Aquí, $b_{\text{MapaLimpio}}^{(i)}$ representa la presión RMS de cada punto de la grilla para la fuente sonora máxima de la imagen acústica. A esta fuente se le quitan los lóbulos laterales mediante la siguiente operación;

$$N^{(i)} = \frac{1}{p_{\text{MapaLimpio}}^{(i)}(\mathbf{r}_{n\max}^{(i)})} \quad (4.32)$$

$$b_{\text{MapaLimpio}}^{(i)}(r_n) = \frac{\left(b_{\text{MapaLimpio}}^{(i)}(r_n) N^{(i)}\right)^{SLSE}}{N^{(i)}} \quad (4.33)$$

Donde *SLSE* es un valor denominado “Side Lobe Supression Exponent” y *N* es un valor de normalización. El valor de la fuente sonora máxima se coloca en una imagen acústica “limpia”.

$$b_{\text{MapaFinal}}^{(i)}(r_n) = b_{\text{MapaFinal}}^{(i-1)}(r_n) + b_{\text{MapaLimpio}}^{(i)}(r_n) \quad (4.34)$$

Ahora se extrae el valor de la fuente sonora máxima de los datos de los micrófonos para volver a armar una imagen acústica sin la fuente máxima.

$$p_m^{(i+1)}(t) = p_m^{(i)}(t) - b_{M_m}^{(i)}(t) \quad (4.35)$$

A diferencia del caso anterior no es necesario definir la cantidad de fuentes a extraer sino que la parada del algoritmo se realiza mediante la siguiente condición.

$$\sum_{m=1}^M \left(\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T |p_m^{(i+1)}(t_k)| \right) \geq \sum_{m=1}^M \left(\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T |p_m^{(i)}(t_k)| \right) \quad (4.36)$$

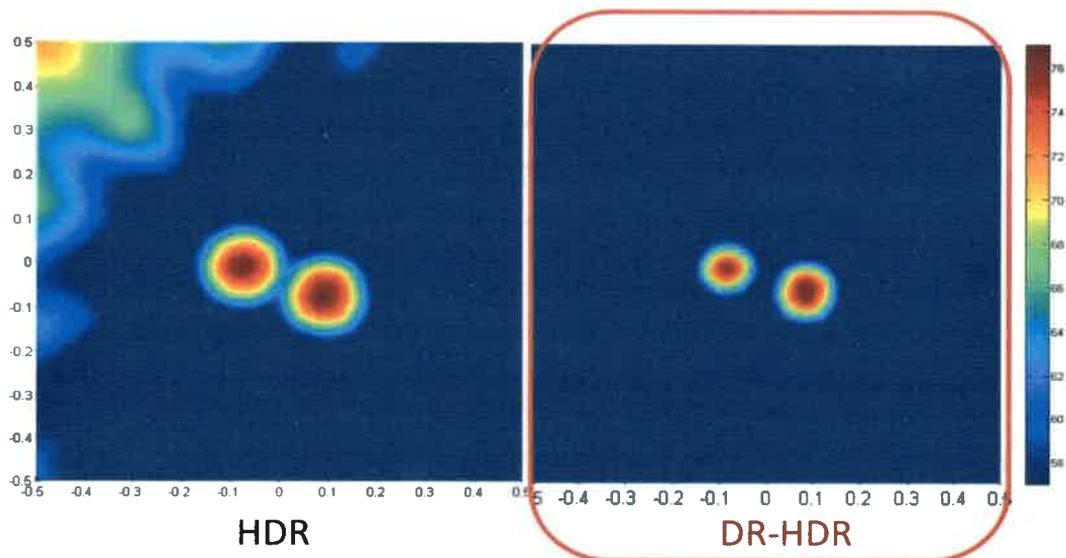


Figura 4-13: (a) “Retardo y suma” con HDR, (b) “Retardo y suma” con DR-HDR.

4.4.1 Ejemplo con fuente puntual.

A modo de ejemplo se realizará un ensayo con una fuente puntual emitiendo a una frecuencia de 2000 Hz a 71 dB ref. a 20 [μPa], la misma se encuentra a una distancia de 1 m del arreglo de micrófonos y en las coordenadas $(x_1, y_1) = (-0.07, -0.01)$ m. Este ensayo permitirá comparar los resultados encontrados con “retardo y suma”, “retardo y suma” con remoción de la autocorrelación con lo obtenidos con “acoustic HDR” y “acoustic HDR-DR”.

En la Figura 4-14(a) se muestra la imagen acústica de “retardo y suma” y en la Figura 4-14(b) se observa la reducción en la intensidad de los lóbulos laterales, esta imagen acústica se realizó con “retardo y suma” sin autocorrelación.

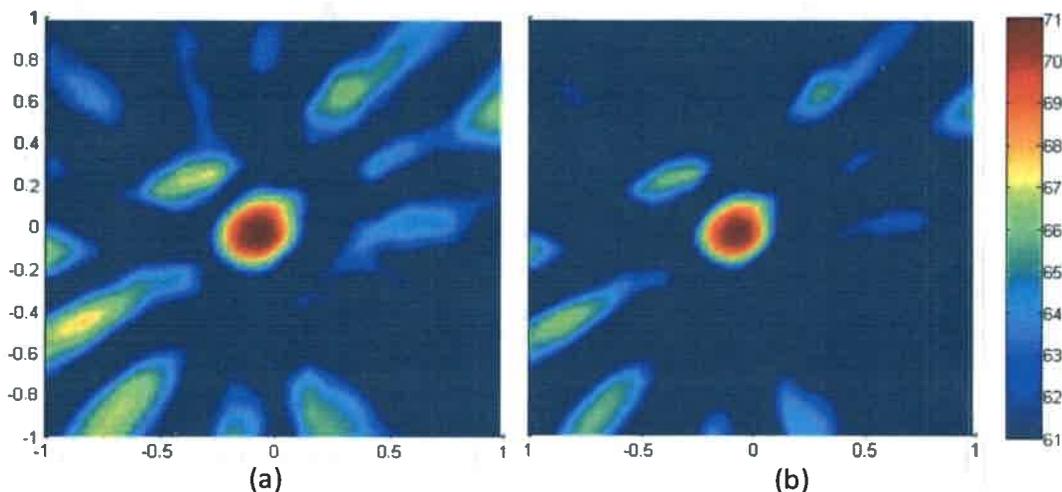


Figura 4-14: (a) Retardo y suma, (b) Retardo y suma sin autocorrelación.

En la Figura 4-15 se muestra la imagen acústica utilizando “acoustic HDR”, la fila superior muestra el mapa de ruido “limpio” y en la segunda fila se observa el mapa remanente, este mapa se utilizaría para detectar la segunda fuente principal. Por lo tanto, comparando la Figura 4-15(c) con la Figura 4-15(d) se observa que la energía debida al ruido propio de los micrófonos se ha reducido, esto se debe a la extracción de la autocorrelación. De esta forma, el algoritmo “acoustic HDR-DR” puede identificar de forma más robusta las fuentes de ruido en situaciones donde la autocorrelación es amplificada como se describe en la sección 2.6.1. El valor extraído correspondiente a la autocorrelación puede ser cuantificado mediante el segundo término de la Ecuación (4.24)

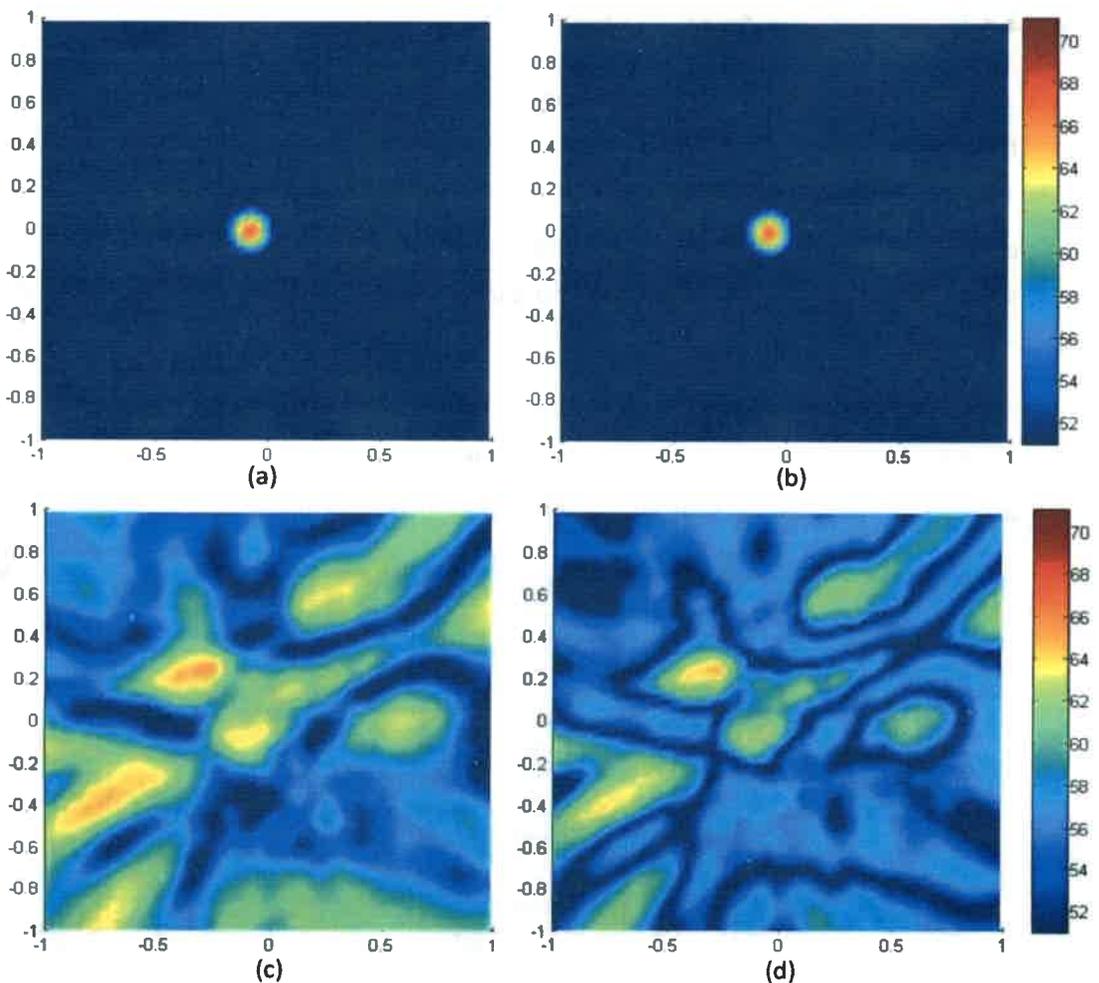


Figura 4-15: (a) HDR, (b) HDR con DR, (c) Mapa remanente de HDR, (d) Mapa remanente de HDR con DR.

4.4.2 Ejemplo con dos fuentes puntuales a diferente amplitud.

En el siguiente ejemplo se destaca la capacidad de HDR y HDR-DR para distinguir dos fuentes puntuales emitiendo ruido blanco a diferentes amplitudes. La fuente 1 esta ubicada en las coordenadas $(x_1, y_1) = (-0.36, -0.04)$ m y emite ruido a 63 dB ref. a 20 $[\mu\text{Pa}]$. La fuente 2 esta ubicada en las coordenadas $(x_2, y_2) = (0.12, -0.04)$ m y emite ruido a 53 dB ref. a 20 $[\mu\text{Pa}]$. Las mismas se encuentran a una distancia de 1 m del arreglo de micrófonos. Este ensayo permitirá comparar los resultados encontrados con “retardo y suma”, “retardo y suma” con remoción de la autocorrelación con lo obtenidos con “acoustic HDR” y “acoustic HDR-DR”.

En la Figura 4-16(a) se muestra la imagen acústica de “retardo y suma” y en la Figura 4-16(b) se observa la reducción en la intensidad de los lóbulos laterales, esta imagen

acústica se realizó con “retardo y suma” sin autocorrelación. Sin embargo la identificación de las fuentes de ruido principales se torna dificultosa. Para mejorar la capacidad de distinguir las dos fuentes utilizaremos las técnicas de HDR y HDR-DR.

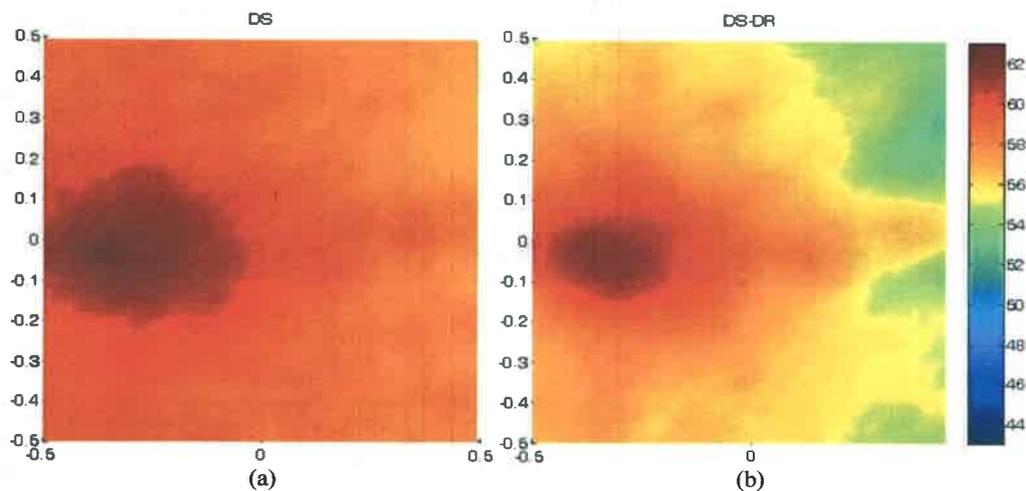


Figura 4-16: (a) Retardo y suma, (b) Retardo y suma sin autocorrelación.

En la Figura 4-17 se muestra la imagen acústica utilizando “acoustic HDR”, la fila superior muestra el mapa de ruido “limpio” y en la segunda fila se observa el mapa remanente. Por lo tanto, comparando la Figura 4-17(c) con la Figura 4-17(d), como en la sección anterior, se observa que la energía debida al ruido propio de los micrófonos se ha reducido, esto se debe a la extracción de la autocorrelación. De esta forma, el algoritmo “acoustic HDR-DR” puede identificar de forma más robusta las fuentes de ruido en situaciones donde la autocorrelación es amplificada como se describe en la sección 2.6.1. El valor extraído correspondiente a la autocorrelación puede ser cuantificado mediante el segundo término de la Ecuación (4.24)

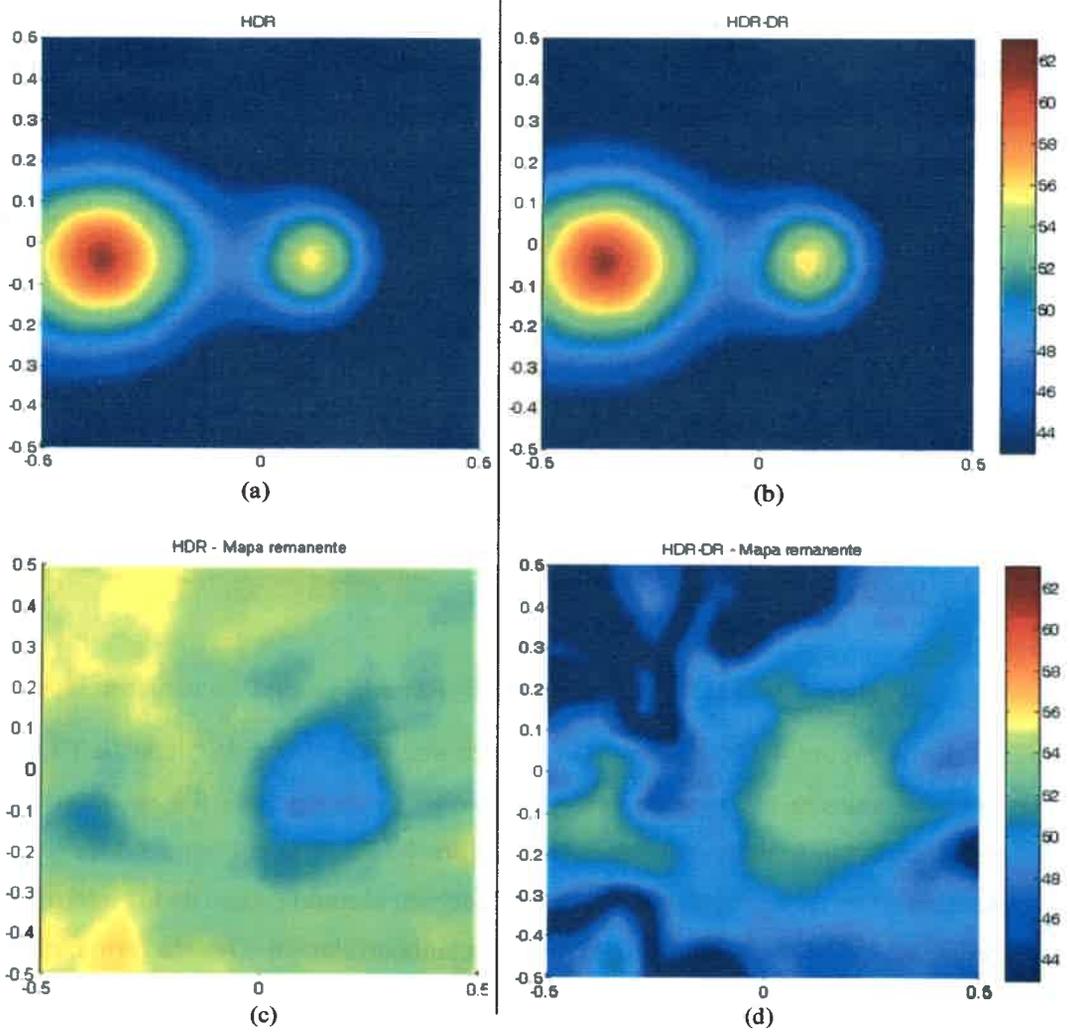


Figura 4-17: (a) HDR, (b) HDR con DR, (c) Mapa remanente de HDR, (d) Mapa remanente de HDR con DR.

5 COMPARACIÓN DE TÉCNICAS Y APLICACIONES EXPERIMENTALES.

5.1 Extracción de ecos de la imagen acústica con “Complex cepstrum” y “Cepstrum editing procedure” (CEP).

Una aplicación del uso del cepstrum es la extracción de ecos en las señales [38]. Estos se presentan convolucionados con la señal directa en el dominio del tiempo. Por lo tanto, esta técnica permitiría separar la señal directa de la señal reflejada en las imágenes acústicas.

5.1.1 Ensayos con “retardo y suma”.

En este análisis se realizaron dos ensayos, el primero fue llevado a cabo con el piso sin tratamiento acústico y en el segundo se incluyó con un absorbente acústico de Poliuretano flexible con un coeficiente de absorción promedio de 0.87 para un espesor de 45 mm [76]. Se colocó una fuente sonora ubicada a una altura de 60 cm con respecto al piso, emitiendo ruido blanco de frecuencia limitada a una distancia relativa a la antena de 2 m. El centro de la antena se ubicó a 1,2 m del suelo. Un esquema de la distribución espacial de la fuente y el arreglo respecto de las paredes y el piso puede ser observado en la Figura 5-1.

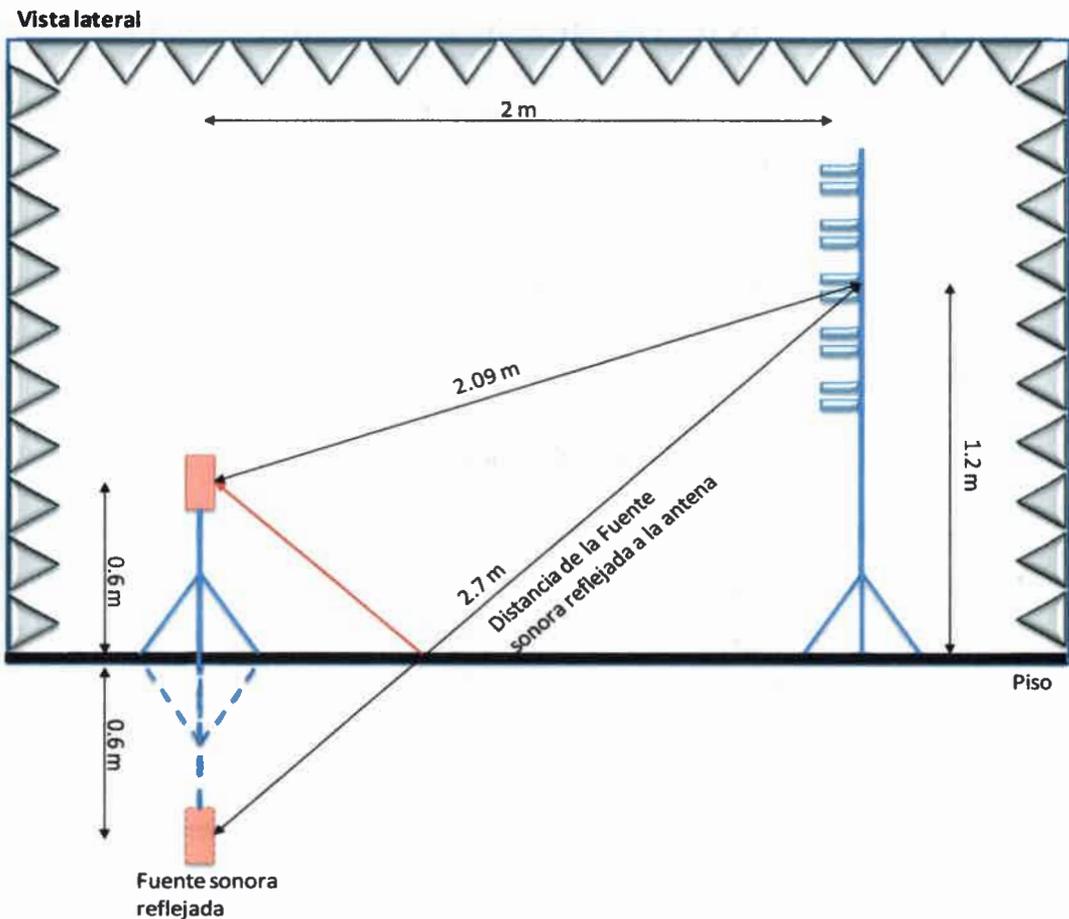


Figura 5-1: Vista lateral del ensayo experimental.

En la Ecuación 5.1 se observa el valor del eco_{medio} en mseg (milisegundo). Donde $r_{directa}$ es la distancia desde la fuente sonora al centro del arreglo de micrófonos, $r_{reflejada}$ es la distancia de la fuente sonora reflejada y c es la velocidad del sonido. Como el arreglo de micrófonos tiene un diámetro de 80 cm el eco_{maximo} será de 2.15 mseg y el eco_{minimo} será de 1.3 mseg.

$$eco_{medio} = \frac{r_{directa} - r_{reflejada}}{c} = \frac{2.7 \text{ m} - 2.09 \text{ m}}{343 \text{ m/seg}} = 1.8 \text{ mseg} \quad (5.1)$$

En la Figura 5-2 se observa la imagen acústica obtenida con la técnica “retardo y suma”. En todos los casos las imágenes se realizan con un rango dinámico de 50 a 55.5 dB ref. a 20 [μPa]. Se observa la posición de la fuente de ruido a 60 cm por debajo del cero ya que la antena se encuentra a una altura de 1,2 m con respecto al piso y a una distancia de -1.8m el reflejo de la fuente de ruido.

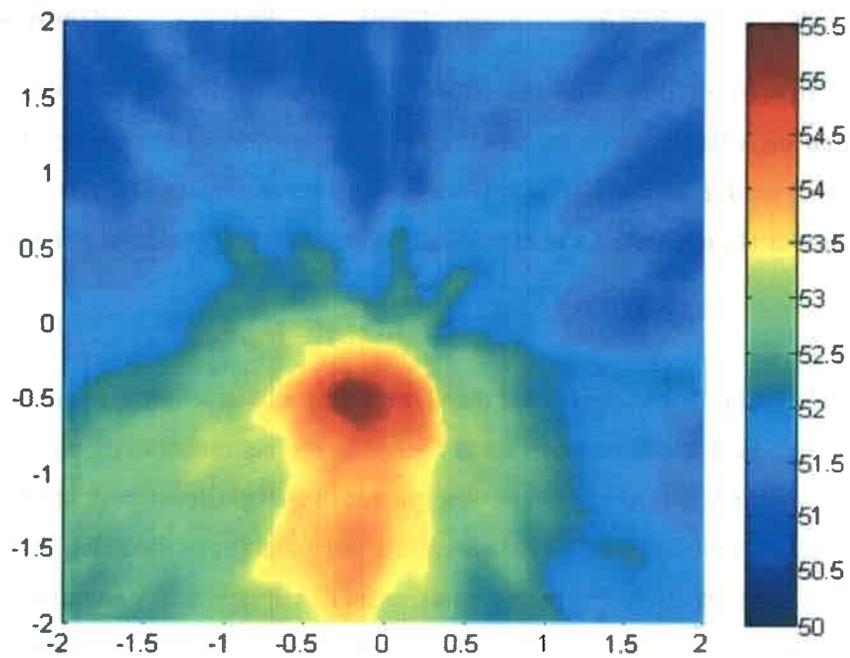


Figura 5-2: Imagen acústica con reflexión.

En la Figura 5-3 se muestra la imagen acústica del segundo experimento. En el cual, se colocó material acústicamente absorbente en el piso para reducir la reflexión. Por lo tanto se detecta solo la fuente de ruido principal.

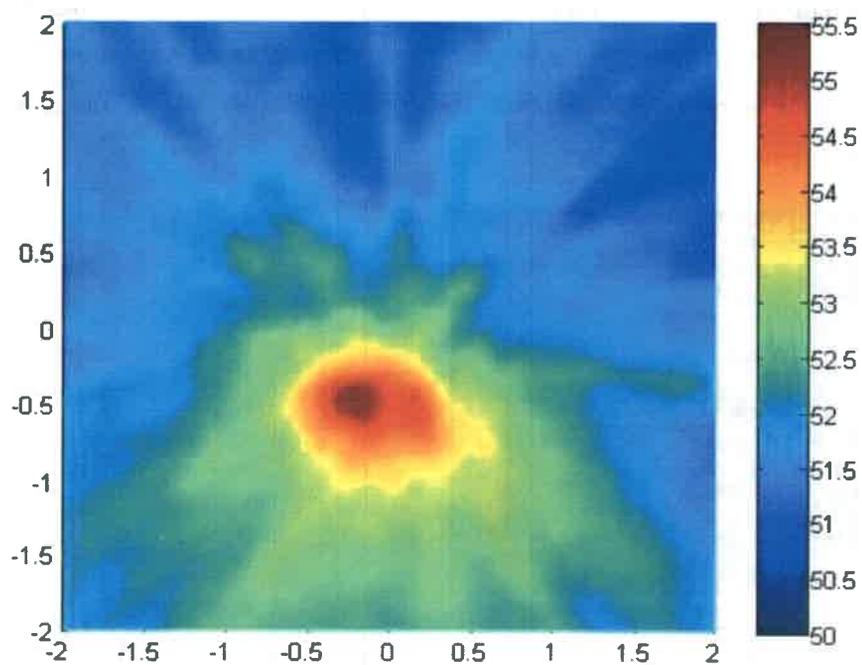


Figura 5-3: “retardo y suma” con material acústicamente absorbente en el piso.

5.1.2 Imagen acústica con “Complex Cepstrum” y filtrado del eco.

Se realizó el filtrado de las señales originales mediante “complex cepstrum” para eliminar las reflexiones en las señales de cada micrófono. Para ello se utilizó la Ecuación 5.1 para calcular el pico de la reflexión en la señal cepstral. Luego, mediante un filtro rectangular (Ecuación 5.2) se eliminó el valor de correspondiente a la reflexión.

$$h(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{si } \tau \in [\tau_a, \tau_b] \\ 0 & \text{de otro modo} \end{cases} \quad (5.2)$$

En la Figura 5-4 se observa el mapa de ruido para las señales filtradas con el “complex cepstrum”. La imagen acústica en la Figura 5-4(a) se muestra con un rango dinámico de 55.5 – 50 dB ref. 20 [μPa] pero se observa que la energía acústica descendió y no se puede apreciar la distribución de fuentes de ruido, por lo tanto, se modificó el rango dinámico a 51 – 48.5 dB ref. 20 [μPa] para visualizar tal distribución. Por lo tanto, se observa en la Figura 5-4(b) que la distribución de las fuentes de ruido no es la correcta. Estos problemas para poder construir el mapa de ruido se atribuyen a la reconstrucción de la fase. En la literatura se encuentran diferentes problemas asociados al procesamiento mediante cepstrum. Childers et al. [77] realizaron un trabajo mostrando los diferentes problemas del procesamiento de datos con cepstrum entre los cuales se encuentra el desenvolvimiento (“unwrapping”) de la fase, “aliasing”, sobre muestreo y el efecto de agregar ceros a la señal. En el caso particular del desenvolvimiento de fase aparecen errores de reconstrucción cuando los componentes de la fase lineal se presentan con solapamientos.

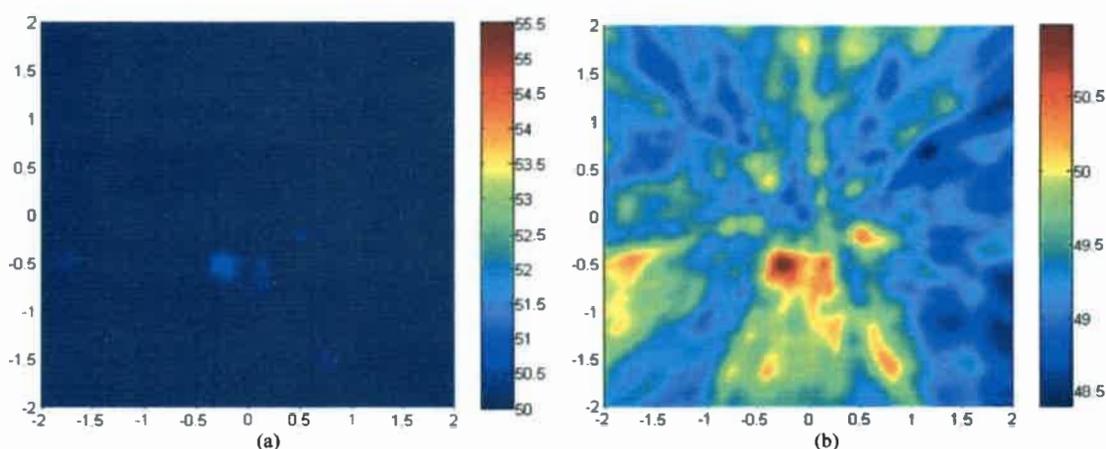


Figura 5-4: “retardo y suma” con “complex cepstrum”. (a)Rango dinámico 55.5 – 50 dB ref. 20 μPa, (b) Rango dinámico 51 – 48.5 dB ref. 20 μPa.

5.1.3 CEP

Luego, se realizó el procesamiento de los datos con CEP. Este proceso permite mantener la fase original de los datos en la señal filtrada pero como se observa en la Figura 5-5 no se observan modificaciones de la magnitud del rango dinámico en comparación con “retardo y suma” original y tampoco se reduce la intensidad de la reflexión de la fuente sonora. Esto es debido a que los datos editados con CEP mantienen la fase original la cual tiene la fase del reflejo convolucionado con la fase de la señal directa. Desafortunadamente, esta alternativa de utilizar la fase original de los datos no se adapta a la formación de la imagen acústica sin reflexión.

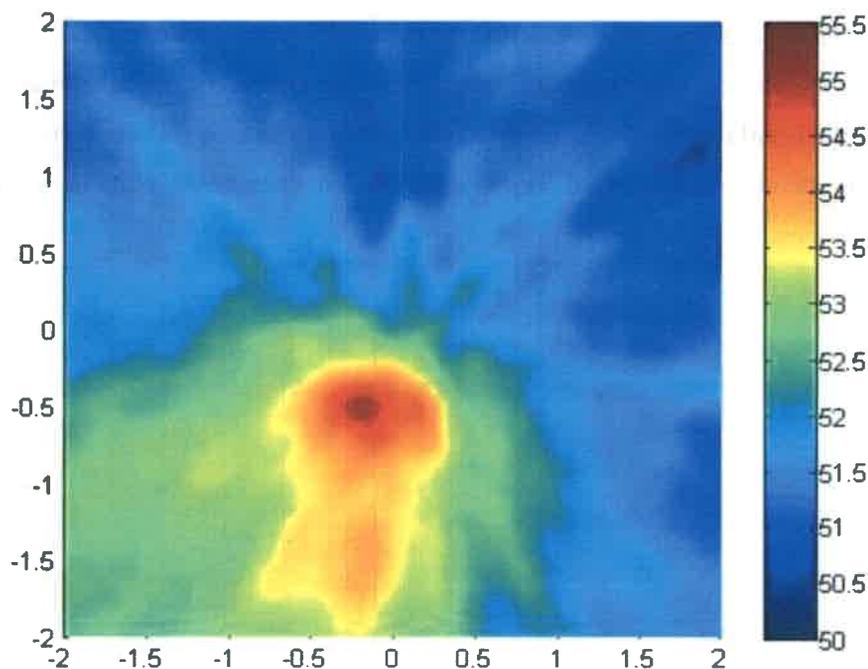


Figura 5-5: “retardo y suma” con “CEP”.

5.1.4 “Complex cepstrum” con fase de la señal sin reflexión.

En el caso de “complex cepstrum” se produce modificaciones en la reconstrucción de la fase con respecto a la original. Esto es sumamente crítico al momento de formar la imagen acústica ya que como se vio anteriormente la fase de cada señal se utiliza para conocer la posición espacial de las fuentes de ruido. Para solucionar este inconveniente se propone la utilización del algoritmo CEP el cual, permite conservar la fase original para reconstruir la señal filtrada pero tampoco se lograron resultados satisfactorios en cuanto a la reducción de la fuente reflejada debido a que la localización de las fuentes sonoras en

las imágenes acústicas se logran mediante la diferencia de fases en las señales de cada micrófono. Entonces se propone utilizar una corrección de la fase en los datos filtrados mediante “complex cepstrum” de acuerdo con la Figura 5-6 para hacer notar la importancia de la fase en la formación de las imágenes acústicas. Esta corrección de fase fue propuesta por Spalt [78] para un arreglo de micrófonos lineales. En esta tesis se trabajó con un arreglo de micrófonos en 2-D con lo que fue necesario extender la metodología para ser usada en imágenes acústicas. Por lo tanto, este tipo de procedimiento puede ser utilizado en casos donde no se pueda colocar material acústicamente absorbente durante el ensayo de medición de imágenes acústicas. Por ejemplo, en un túnel del viento se podrían realizar mediciones con el material acústico absorbente colocado en la sección correspondiente con la ausencia de flujo aerodinámico ($M=0$, número de Mach). Luego, este material es extraído y se realizan las mediciones de la forma usual ($M \neq 0$). De esta forma, las señales sin eco se utilizarán para corregir la fase de los datos y la magnitud de las señales con ecos serán editadas para eliminar las reflexiones.

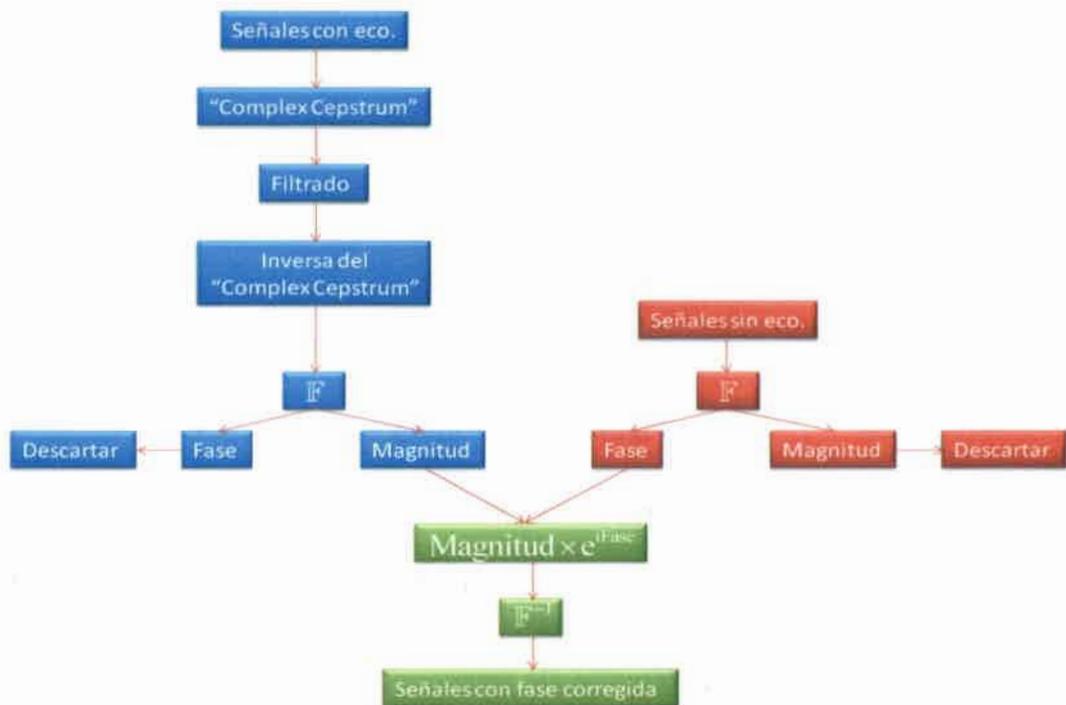


Figura 5-6: corrección de fase en los datos filtrados con “complex cepstrum”

En las Figura 5-7, Figura 5-8 y Figura 5-9 se observan las imágenes acústicas de tres tipos de filtrados. El primero eliminando solo el punto correspondiente al eco de cada

micrófono. En el segundo caso se eliminó un rango de 10 frecuencias cepstrales centrado en la reflexión de cada señal. Y en la tercera se eliminó un rango de 90 frecuencias cepstrales incluyendo la reflexión y sus armónicos en el dominio cepstral. En los tres casos se observa que la eliminación del eco fue satisfactoria y se observa en la última figura una mejora de la imagen acústica ya que se eliminaron también las armónicas correspondientes a los ecos.

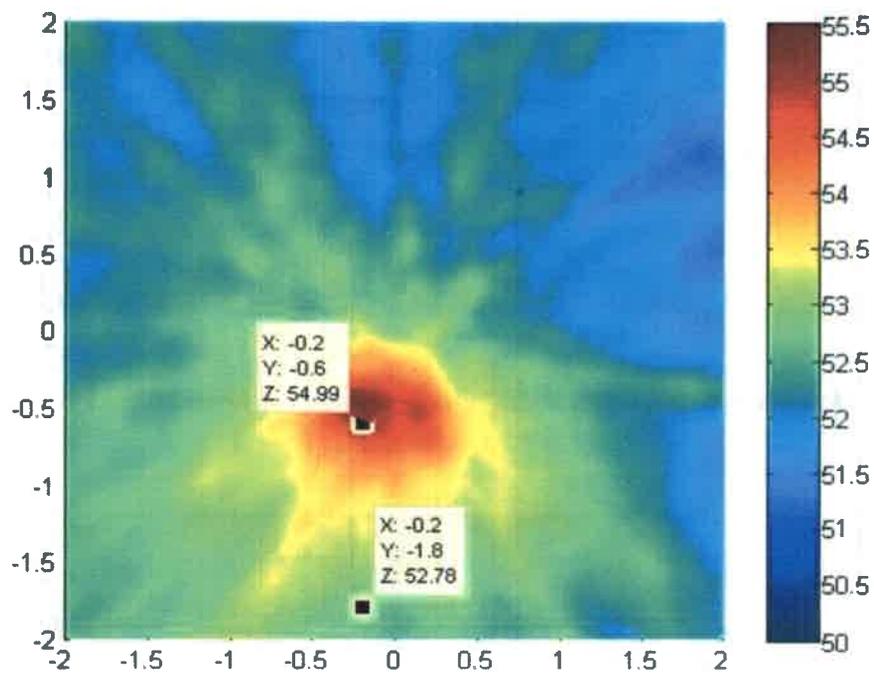


Figura 5-7: “retardo y suma” con “complex cepstrum” filtrando solo el valor del eco y con fase corregida.

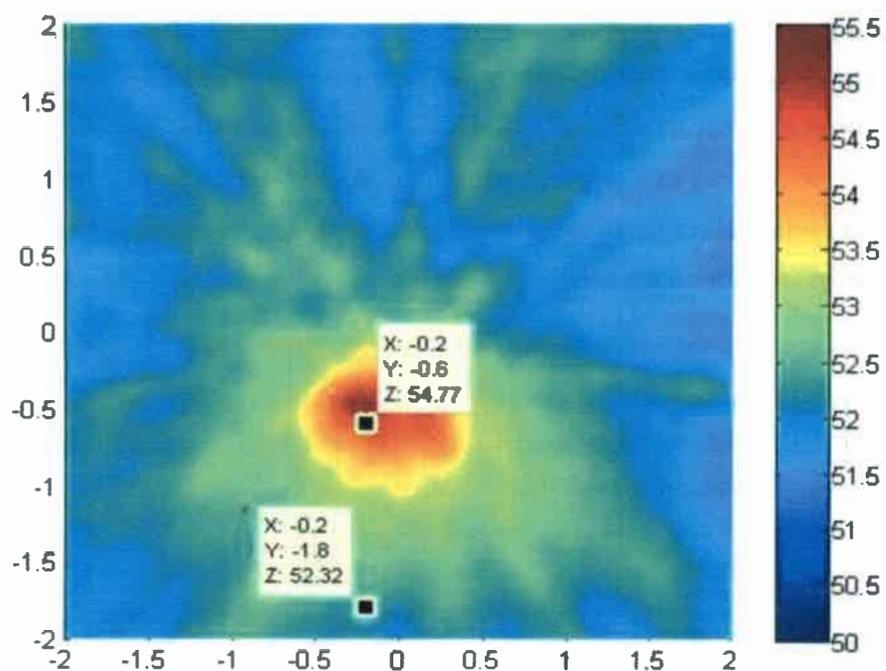


Figura 5-8: “retardo y suma” con “complex cepstrum” filtrando 10 puntos y con fase corregida.

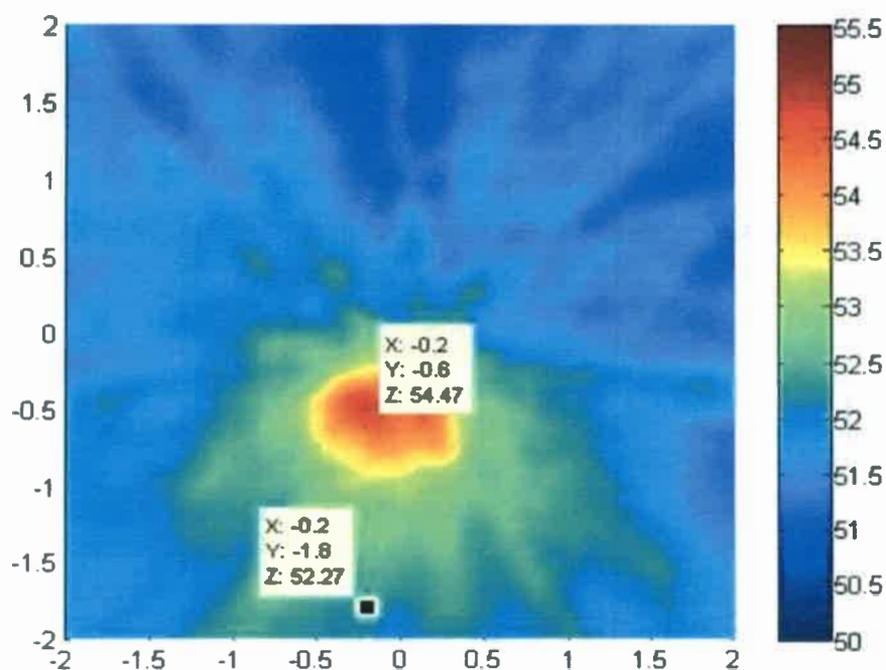


Figura 5-9: “retardo y suma” con “complex cepstrum” filtrando 90 puntos y con fase corregida.

5.1.5 “Acoustic HDR” y “Complex cepstrum” con fase de la señal sin reflexión.

El método “acoustic HDR” comienza a desarrollarse en el año 2010 [81], en este trabajo se propone una forma de extraer de las imágenes acústicas las fuentes principales evidenciando así fuentes de ruido con menor intensidad. También se detallan algunas limitaciones que tiene el método. Una de las cuales es que no se tiene la capacidad de eliminar fuentes correlacionadas como por ejemplo las reflexiones. En este trabajo se propone la utilización de “complex cepstrum” para superar este inconveniente. Por lo tanto, el procedimiento sería utilizar “complex cepstrum” con la corrección de fase para luego con “acoustic HDR- DR” realizar el proceso de extracción de las fuentes principales.

En la Figura 5-10 se observa la imagen acústica resultante de realizar el proceso de “complex cepstrum” con corrección de fase y luego aplicar “acoustic HDR” o “acoustic HDR-DR”. La primera fila corresponde al proceso con “acoustic HDR” y la segunda fila al proceso con “acoustic HDR-DR”. Se observa en la columna de la izquierda la fuente puntual en una imagen acústica “limpia”, en ambos casos el resultado es satisfactorio. En cuanto a los mapas remanentes, con “acoustic HDR” el mapa presenta mayor energía debido a la autocorrelación es por ello que el obtenido con “acoustic HDR-DR” es más “limpio”. Esto es beneficioso para poder seguir detectando las siguientes fuentes de ruido con mayor facilidad ya que permite distinguir las fuentes sonoras del ruido de fondo. La diferencia de energía acústica entre los mapas remanentes de “acoustic HDR” y “acoustic HDR-DR” se puede calcular mediante el segundo término de la Ecuación 4.24.

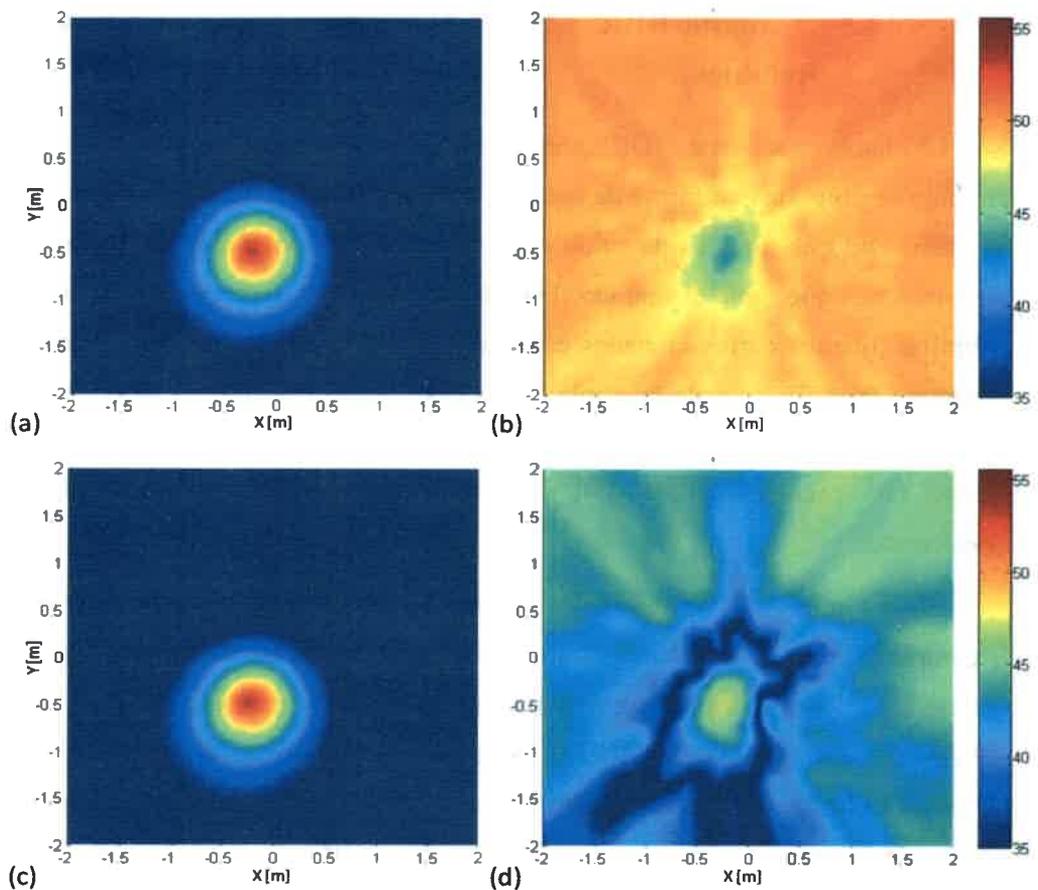


Figura 5-10: (a) “complex cepstrum” con corrección de fase y “acoustic HDR”, (b) mapa remanente de (a), (c) “complex cepstrum” con corrección de fase y “acoustic HDR-DR”, (d) mapa remanente de (c).

5.2 Aplicaciones prácticas de las imágenes acústicas.

5.2.1 Introducción de la máquina a ensayar.

Para realizar el testeo de los algoritmos propuestos se utilizó un banco de pruebas de bombas de engranajes. Este se encuentra ubicado en el Laboratorio de Máquinas Térmicas e Hidráulicas (LMTH) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto. En la Figura 5-11 se puede observar la máquina, los elementos más importantes son la bomba de engranajes y el motor eléctrico (Figura 5-11 (a)). El motor eléctrico es de $\frac{3}{4}$ Hp. La capacidad de este banco de ensayos es la de modificar las condiciones de trabajo de la bomba mediante la apertura o cierre de las válvulas de entrada y salida (Figura 5-11(b)). También consta de una válvula de alivio la cual abre a 9 bar. La bomba se muestra en detalle en la Figura 5-12 en la que se destacan los engranajes

helicoidales doble o chevron.

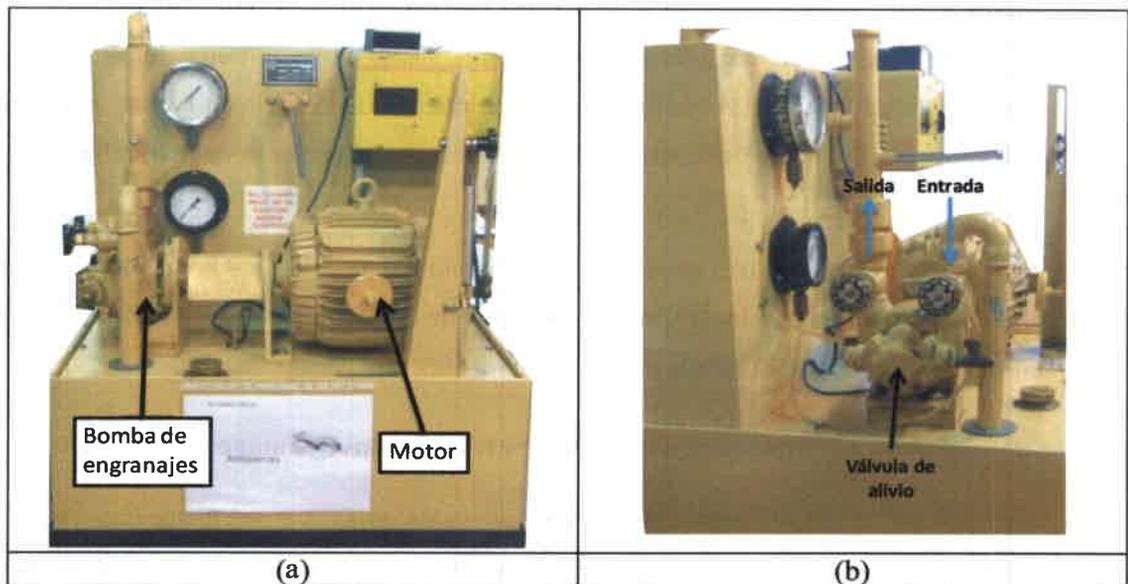


Figura 5-11: (a) Motor y Bomba de engranajes. (b) Entrada y salida de fluido de la bomba con su válvula de alivio.

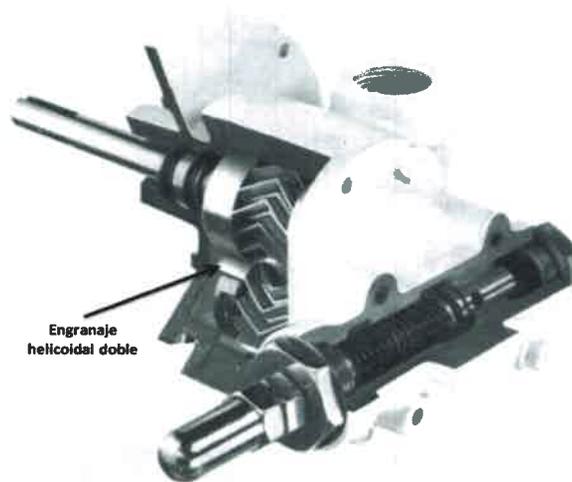


Figura 5-12: Detalle de la forma de los engranajes helicoidales doble.

5.2.2 Procedimiento de prueba de la bomba.

Para comenzar se debe asegurar que las válvulas de entrada y salida estén abiertas completamente. Luego se coloca en marcha el motor a bajas vueltas y se deja recircular para asegurar que las burbujas de aire se escapen. Una vez concluido este proceso se puede colocar el motor en alta velocidad. Las velocidades nominales del motor son 750 o 1500 rpm.

Una vez puesto en régimen el sistema se procede con el cierre de las diferentes válvulas. En primera instancia se comienza por cerrar la válvula de succión a 0.5 vac, 0.75 vac y aprox. 1 vac. Esto provocará un vacío en la entrada de fluido lo que incrementará el ruido de la bomba debido al comienzo de la cavitación, este fenómeno es indeseado por su efecto destructivo, y reducirá el caudal que entrega la bomba.

Luego, se cerró la válvula de descarga lo cual incrementa la presión en la bomba. En este caso se analizaron tres condiciones de presión 2 bar, 5 bar y 9 bar (válvula de alivio abierta). En esta situación el motor trabajará de forma forzada lo cual provocará un aumento de ruido y reducirá la vida útil del mismo.

5.2.3 Comparación de los diferentes métodos de imágenes acústicas.

Para realizar las comparaciones se realizaron los ensayos a una distancia relativa de 1 m entre la máquina y la antena. Se tomaron mediciones de las diferentes condiciones de la máquina. En la Figura 5-13 se observan las dimensiones del mapa de ruido y la ubicación del centro del arreglo de micrófonos.



Figura 5-13: Dimensiones del mapa de ruido y posición del centro del arreglo de micrófonos a 1 m de distancia relativa entre arreglo y máquina.

La Figura 5-14 muestra el mapa de ruido a 600 Hz realizado mediante “beamforming” para la condición de válvulas abiertas de la bomba de engranajes. La escala se encuentra en dB referida al máximo valor de la condición de válvula de succión cerrada a una presión de vacío de 0.5. Se observa que el ruido a esa frecuencia proviene de la bomba.

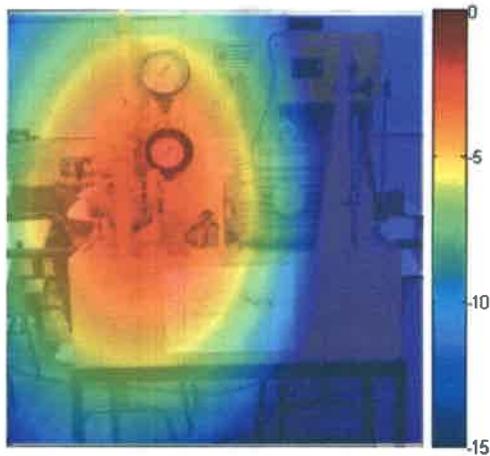


Figura 5-14: Mapa de ruido a 600 Hz con usando “beamforming” con válvulas abiertas.

En la Figura 5-15 se observa diferentes mapas de ruido en el momento que la bomba de engranajes tiene cerrada la válvula de succión a una presión de vacío de 0.5. La Figura 5-15(a) muestra el mapa de ruido para la técnica de “beamforming” a una frecuencia de 600 Hz, localiza la posición de la bomba debido al ruido generado por la cavitación. Para el caso de la Figura 5-15(b) se utilizó la técnica de “robust adaptive beamforming” para una frecuencia de 600 Hz y $\gamma = 0.001$, se observa como se reduce el ruido blanco en el mapa de ruido en comparación con la técnica de beamforming. Luego, en la Figura 5-15(c) se utilizó MUSIC para la misma frecuencia pero debido a los inconvenientes de la técnica, mencionados anteriormente, el mapa de ruido no presenta mejoras en su resolución. Por último, en la Figura 5-15(d) se aplicó la técnica de “retardo y suma” para un intervalo de tiempo de 0.1 seg, se observa que el mapa de ruido es similar a los anteriores con respecto al tamaño del lóbulo principal, esto se debe a que la mayor emisión de energía acústica se encuentra a 600 Hz.

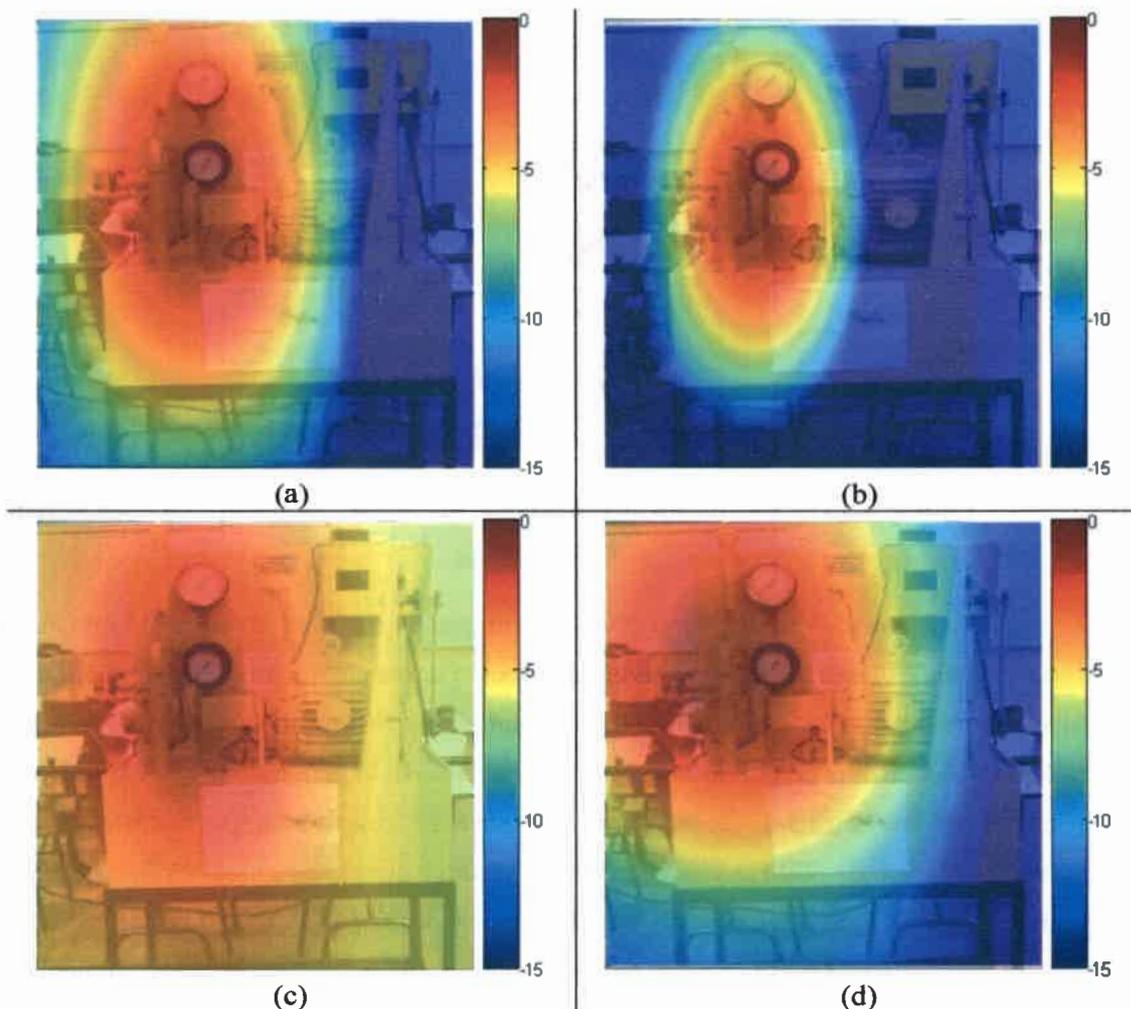


Figura 5-15: (a) “beamforming”, (b) “robust adaptive beamforming”, (c) MUSIC y (d) “retardo y suma”.

En la Figura 5-16(a) se observa un tramo de la señal en el dominio cepstral. En color azul se muestra como se editó el pico de 0.08055 seg. el cual pertenece a la familia de armónicas de la frecuencia de giro del motor ya que $1/0.08055$ es 12.4 Hz (745 rpm). Una vez editada, se vuelve a recuperar la señal en el dominio temporal para realizar “retardo y suma” de la forma usual (Figura 5-16(b)). Este proceso permite eliminar de la señal la familia de frecuencias indeseadas y también es posible deconvolucionarla y evidenciar partes de la señal que se encuentran “escondidas”. En este caso no fue necesario realizar una corrección de fase de los datos recuperados ya que no se afecta la frecuencia de 600 Hz en la cual se encuentra la mayor energía acústica. Por lo tanto, si la familia de frecuencias editadas mediante cepstrum no afecta las fuentes principales de ruido la imagen acústica no tendrá problemas en su formación.

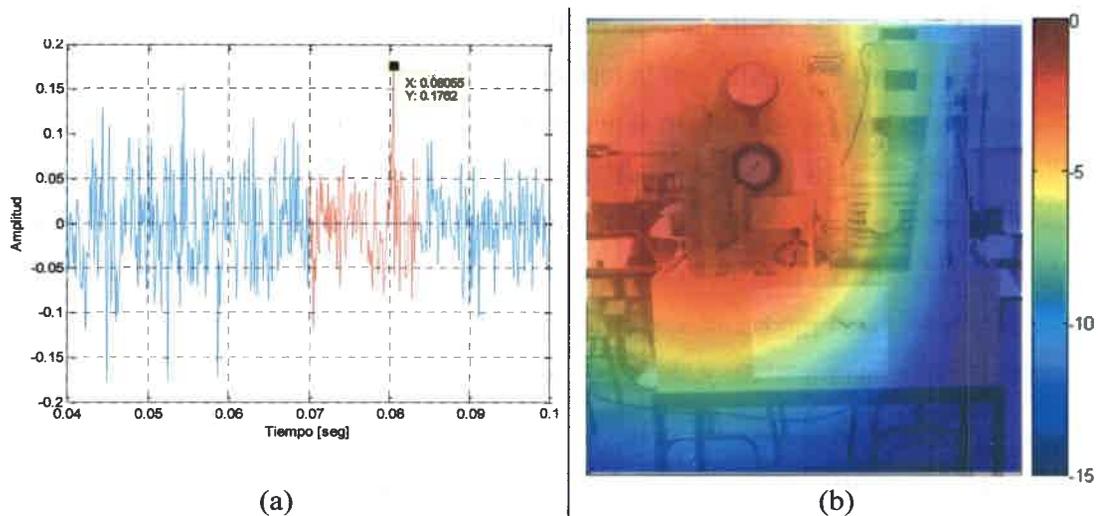


Figura 5-16: (a) Señal en el dominio cepstral (Línea azul =filtrada; Línea roja=original). (b) Imagen acústica mediante “retardo y suma - cepstrum”.

5.2.4 Comparación de “acoustic HDR” y “acoustic HDR-DR” con “retardo y suma”

En la Figura 5-17 se observan dos imágenes acústicas con la técnica de retardo y suma con la máquina funcionando en la condición mencionada en la sección 5.2.3. En el segundo caso se utilizó la técnica pero sin la autocorrelación. En ambos casos se trabajará con las imágenes acústicas cuantificadas en dB ref. $20\mu\text{Pa}$ y su rango dinámico es de 5 dB.

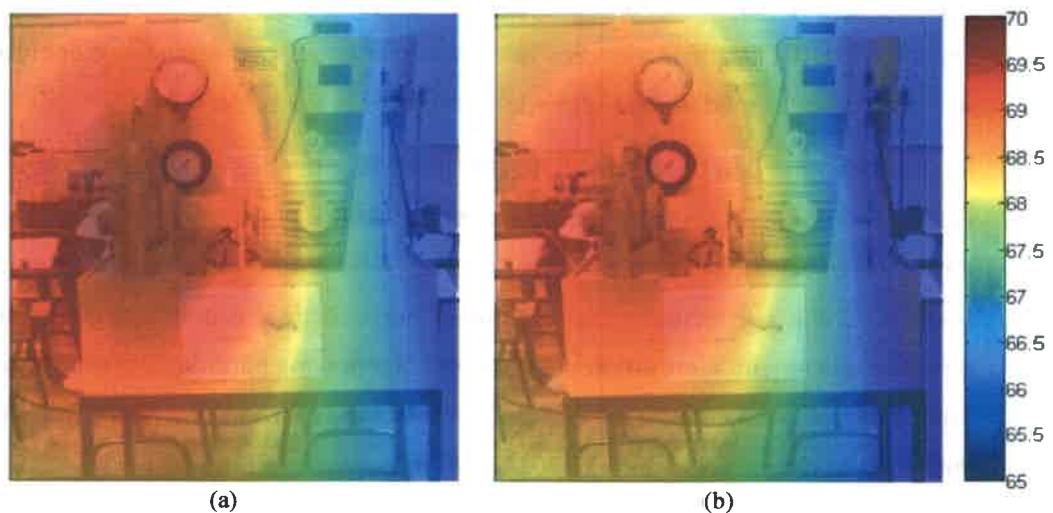


Figura 5-17: (a) Retardo y suma en escala dB ref. $20\mu\text{Pa}$. (b) Retardo y suma sin autocorrelación en escala dB ref. $20\mu\text{Pa}$.

Debido a que mediante esta técnica no se pueden visualizar fuentes de ruido con menor intensidad se utilizará la técnica de “acoustic HDR” y “acoustic HDR-DR” para mejorar la imagen acústica aumentando así el rango dinámico. Los resultados se observan en la Figura 5-18 en la primera fila se muestra el resultado con “acoustic HDR” y en la segunda con “acoustic HDR-DR”. A diferencia de la Figura 5-17 el rango dinámico pasa de 5 dB a 30dB y permite evidenciar fuentes ocultas por los lóbulos laterales de la fuente principal. Para ambos casos se utilizó un $SLSE = 30$ y 10 fuentes extraídas. Se observa el lóbulo mayor a 70 dB y las demás fuentes de ruido entre 60 y 65 dB.

Ahora bien, como se ilustra en la Figura 5-18, comparando “acoustic HDR” y “acoustic HDR-DR” se observa que la distribución de las fuentes no es igual en ambos casos. En el primer caso aparecen 9 fuentes de las 10 extraídas ya que la décima estaba muy por debajo del rango audible. En el segundo caso aparecen solo 8 fuentes, por lo que se puede inferir que la 9ª fuente es debida a la autocorrelación. De esta forma, como el ensayo se realizó en un lugar lo suficientemente grande, es correspondiente utilizar “acoustic HDR-DR” para minimizar la amplificación de la autocorrelación y lograr detectar las fuentes de ruido asociadas a la máquina. La desventaja que presenta el método “acoustic HDR” y “acoustic HDR-DR” es que no elimina las fuentes correlacionadas, como por ejemplo las reflexiones. Por lo tanto, las fuentes de ruido que no se encuentran sobre la máquina deberían ser tomadas como reflexiones.

En cuanto a los mapas remanentes se observa que la energía que queda en el caso de “acoustic HDR” es debida a la autocorrelación ya que el mapa remanente obtenido con “acoustic HDR-DR” tiene menores valores de energía. Esta diferencia de energía acústica se puede calcular mediante el segundo término de la Ecuación 4.24.

El nuevo método “acoustic HDR-DR” permite extender el uso de “acoustic HDR” a situaciones donde la autocorrelación sea amplificada de tal manera que el ruido de fondo de la imagen acústica tenga niveles suficientes como para no poder diferenciar las fuentes sonoras. Como por ejemplo, en mediciones aeroacústicas o donde la distancia entre la máquina y la antena sean suficientes como para tener una pérdida de coherencia de datos, esto produce una reducción de la correlación cruzada en comparación con la autocorrelación ya que esta no contiene información de la fase de los datos.

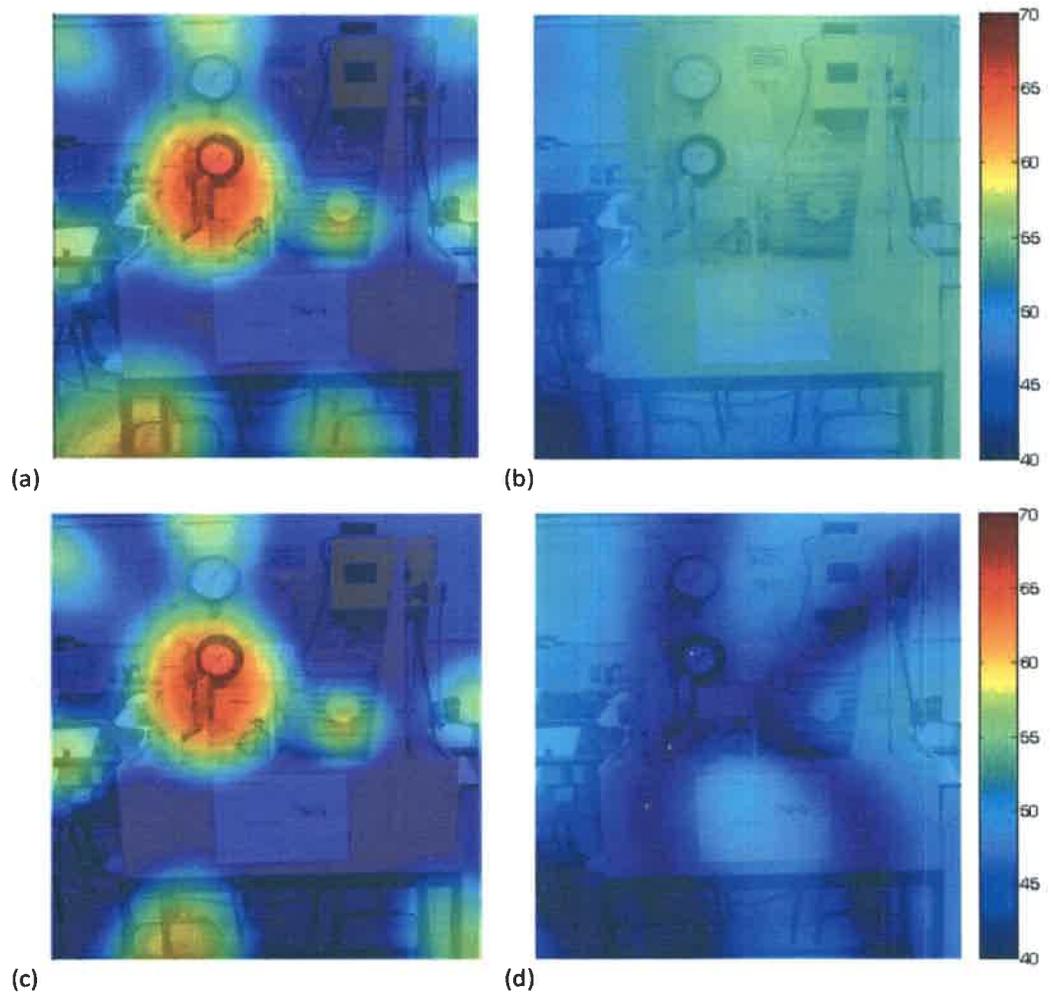


Figura 5-18: (a) Imagen acústica con HDR, (b) mapa remanente de (a), (c) imagen acústica con HDR-DR, (d) mapa remanente de (c)

6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

6.1 Conclusiones

En el presente trabajo de tesis se amplió la capacidad tecnológica para detectar las contribuciones de las distintas partes de las fuentes emisoras al ruido total. Para ello se desarrolló el software necesario y se construyó el hardware correspondiente para lograr tal cometido. Esta tecnología permite la formación de imágenes acústicas las cuales se aplicaron en máquinas rotativas asociando posibles cambios en la intensidad y posición de las fuentes de ruido debido a fallas.

Se realizó una revisión bibliográfica de las diferentes técnicas utilizadas para realizar el pos proceso de datos y de diferentes formas de construcción de la antena en conjunto con su distribución de micrófonos logrando conocer así sus problemáticas, sus ventajas y desventajas.

Para obtener las diferentes contribuciones de la fuente sonora al ruido global se desarrollo una antena con una distribución de micrófonos bidimensional, la bibliografía encontrada propone el parámetro MLL como uno de los más importantes a considerar. Por lo tanto, utilizando Algoritmos Genéticos se obtuvo una distribución de micrófonos optimizada la cual permite reducir los Lóbulos Laterales y aumentar el rango dinámico de la antena de micrófonos, también se tuvo en cuenta en el diseño la facilidad de fabricación del soporte de los sensores de presión.

Se realizaron simulaciones y ensayos experimentales para evaluar el comportamiento de la antena de micrófonos optimizada con respecto a las distribuciones de micrófonos comúnmente conocidas en la literatura. Para lograr ello se implementó un software que permite captar el sonido de la fuente sonora y realizar el post proceso a través de la técnica de "beamforming" convencional.

Los ensayos experimentales se realizaron utilizando parlantes convencionales a distintas frecuencias y posiciones. Se logró determinar la resolución de cada distribución de micrófonos para distinguir dos fuentes cercanas, como así también su rango de frecuencias. Con el arreglo espacial se detectó satisfactoriamente la frecuencia y posición de la fuente emisora.

Se construyó una antena de 35 micrófonos optimizada mediante algoritmos genéticos. Los micrófonos utilizados son de bajo costo y de desarrollo propio. Se construyó también el sistema de adquisición de datos. Una vez obtenidos los datos, se realizaron diferentes

pos procesos mediante técnicas aplicadas a la formación de imágenes acústicas, las cuales fueron implementadas en un software propio.

Se estudiaron diferentes tipos de pos proceso para la formación de mapas de ruido. De este estudio se puede concluir que las técnicas en el dominio de la frecuencia se complementan con la técnica en el dominio del tiempo. En el caso de “beamforming”, se observó la capacidad para distinguir la fuente de ruido emitida por la bomba de engranajes en cavitación. En comparación con “robust adaptive beamforming”, este último presenta la capacidad de mejorar la resolución del mapa de ruido ya que disminuye el efecto del ruido blanco. Con respecto a MUSIC, no se observaron mejoras en el mapa de ruido, esto se debe a la sensibilidad del método. En cuanto a retardo y suma se puede decir que se complementa con los métodos anteriores ya que permite realizar el mapa de ruido de forma global para que luego se profundice el estudio de frecuencias en particular. En el caso de “retardo y suma - cepstrum” se tiene la capacidad de editar la señal para separar familias de armónicas indeseadas y así mejorar el mapa de ruido, la desventaja de esto radica en que se debe tener conocimientos previos del cinematismo de la máquina en estudio para poder realizar la edición correcta. También se extendió el uso de “complex cepstrum” para la eliminación de las reflexiones en los mapas de ruido mediante un arreglo de micrófonos en 2-D. En cuanto a los resultados obtenidos, solo se observa mejora del mapa de ruido si se utiliza la fase de los datos de ensayos sin reflexión lo cual limita el uso de este algoritmo.

Con las técnicas de “acoustic HDR” y “acoustic HDR-DR” se logró aumentar el rango dinámico en las imágenes acústicas, la modificación propuesta de “acoustic HDR-DR” muestra una mejora en la identificación de fuentes de ruido ya que el algoritmo busca fuentes de ruido en un mapa “limpio” y se logró mejorar una de las desventajas de “acoustic HDR” con “complex cepstrum” ya que permite eliminar las reflexiones del mapa de ruido. Sin embargo la utilización de cepstrum se debe realizar con el conocimiento del problema ya que presenta dificultades en la reconstrucción de la fase lo cual es crucial en formación de las imágenes acústicas.

Se desarrollo un pos proceso de datos innovador el cual permite la aplicación de las imágenes acústicas en la detección de fallas en máquinas rotativas. Se analizó la performance de este nuevo algoritmo en situaciones reales con fallas de cavitación en bombas de engranajes validando de esta forma el trabajo realizado en esta tesis.

6.2 Trabajos futuros

Este trabajo forma parte de la etapa inicial de un esfuerzo mayor cuyo objetivo general es el desarrollo de herramientas que permitan detectar fuentes de ruido en tiempo real y predecir fallas en maquinas rotativas.

Se buscará utilizar el hardware desarrollado con la técnica de “Near-Field Acoustic Holography” (NAH). Para lograr esto, se deberán desarrollar algoritmos numéricos para implementar computacionalmente la técnica “Near-Field Acoustic Holography” (NAH). Para lograr este cometido se deben adaptar el algoritmo de NAH para que pueda ser utilizado con una distribución de micrófonos que no es regular. De esta forma se logrará una buena resolución para separar dos fuentes cercanas entre sí a bajas frecuencias.

Entre los principales objetivos que se quieren alcanzar en el futuro se encuentran los siguientes:

- Mediante el Hardware desarrollado se implementará la técnica de detección de fuentes sonoras “Near-Field Acoustic Holography” (NAH). Esta técnica tiene una mejor resolución a baja frecuencia, que complementará las técnicas desarrolladas en este trabajo. NAH permitirá evaluar los ruidos emitidos por estructuras, evidenciando así fuentes vibro-acústicas cuyos fenómenos ocurren a baja frecuencia.
- Aplicar las técnicas desarrolladas en la detección temprana de fallas en máquinas rotativas mediante técnicas de reconocimiento de patrones.
- Micrófonos: cumplimentar normativas correspondientes.
- Utilizar las imágenes acústicas en el estudio de la emisión de ruido en neumáticos (ensayos “pass by”).
- Continuar el desarrollo de “acoustic HDR-DR” para que pueda trabajar en tiempo real y elimine las fuentes asociadas a reflexiones.



REFERENCIAS

- [1] J.J. Christensen and J. Hald, “Beamforming”, Brüel&Kjær Sound&Vibration Measurement A/S, 2004.
- [2] P. Ravetta, “LORE approach for phased array measurements and noise control of landing gears”, Tesis Doctoral, Noviembre 2005.
- [3] International Standard IEC 61400-11: ‘Wind turbine generator systems - Acoustic noise measurement techniques’, 2002-12.
- [4] K. Haddad and V. Benoit, “Understanding the acoustical behavior of a wind turbine by means of acoustic imaging”, First International Meeting on Wind Turbine Noise: Perspectives for Control, Berlin, 2005.
- [5] L. Ziomek, “Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-Time Signal Processing”, CRC Press, ISBN 0-8493-9455-4, 1995.
- [6] D. Döbler, Dr. Ralf Schröder ”Contrast improvement and sound reconstruction of quiet sources using a High Dynamic Range algorithm”, BeBeC 2012.
- [7] L.C. Chow, K. Mau, and H. Remy, “Landing Gears and High Lift Devices Airframe Noise Research,” 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference & Exhibit, 2002, Breckenridge, Colorado. AIAA 2002-2408.
- [8] J. D. Maynard, E. G. Williams, and Y. Lee. “Nearfield acoustical holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH”. Journal of the Acoustical Society of America, 78(4):1395–1413, 1985.
- [9] W. A. Veronesi and J. D. Maynard. “Nearfield acoustical holography (NAH) II. Holographic reconstruction algorithms and computer implementation”. Journal of the Acoustical Society of America, 81(5):1307–1321, 1987.
- [10] R. Steiner and J. Hald. “Near-field acoustical holography without the errors and limitations caused by the use of the DFT”. Journal of Acoustics and Vibration, 6, 2001.
- [11] W. A. Veronesi and J. D. Maynard. “Digital holographic reconstruction of sources with arbitrarily shaped surfaces”. Journal of the Acoustical Society of America, 85:588–598, 1989.

- [12] Z.Wang y S. F.Wu. "Helmholtz Equation-Least-Squaresmethod for reconstructing the acoustic pressure field". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102:2020–2032, 1997.
- [13] A. Sarkissian. "Extension of measurement surface in near-field acoustic holography". *Journal of the Acoustical Society of America*, 115:1593–1596, 2004.
- [14] A. Sarkissian. "Method of superposition applied to patch near-field acoustic holography". *Journal of the Acoustical Society of America*, 118(2):671–678, 2005.
- [15] N. Totaro, C. Sandier, and J.-L. Guyader. "Identify velocity of a complex source with IPTF method". In *Proceedings Fifteenth International Congress on Sound and Vibration*, Daejon, South Korea, 2008.
- [16] P. C. Hansen. "Rank-Deficient and Discrete Ill-Posed Problems: Numerical Aspects of Linear Inversion". Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia (PA), 1998.
- [17] R. J. Hanson. "A numerical method for solving fredholm integral equations of the first kind using singular values". *SIAMJ. Numer. Anal.*, 8(3):616–622, 1971.
- [18] M. Hanke H. W. Engl and A. Neubauer. "Regularization of Inverse Problems". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2000.
- [19] A. Tarantola. "Probabilistic Approach to Inverse Problems". *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology (Part A)*, Academic Press, pages 237–265, 2002.
- [20] B.Ginn, J.J. Christensen, J. Hald, J. Mørkholt, A. Schuhmacher & C. Blaabjerg, "A review of array techniques for noise source location", 10^o International Congress on Sound and Vibration, ICSV10. 7-10 July 2003. Stockholm, Sweden.
- [21] Kinsler, Lawrence E.; Frey, Austin R.; Coppens, Alan B.; Sanders, James V. (1999). "Fundamentals of Acoustics". 4th edition, Wiley.
- [22] R.S. Elliot, "The Theory of Antenna Arrays," *Microwave Scanning Antennas*. R.C. Hansen, ed., Academic Press, 1966.
- [23] W.S. Burdic, "Underwater Acoustic System Analysis", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1984.

- [24] J. Billingsley, "An acoustic telescope," Aeronautical Research Council ARC 35/364. 1974.
- [25] P.T. Soderman, and S.C. Noble, "Directional Microphone Array for Acoustic Studies of Wind Tunnel Models," *Journal of Aircraft*, pp. 169-173, 1975.
- [26] J. Billingsley, R. Kinns, "The acoustic telescope," *Journal of Sound and Vibration*, 48, (1976), pp. 485-510.
- [27] F.R. Grosche, H. Stiewitt, and B. Binder, "On Aero-Acoustic Measurements in Wind Tunnels by Means of a Highly Directional Microphone System," Palo Alto, 1976. AIAA 76-535.
- [28] J.M. Kendall, "Airframe Noise Measurements by Acoustic Imaging," Los Angeles, 1977. AIAA-77-55.
- [29] T.F. Brooks, M.A. Marcolini, and D.S. Pope, "A Directional Array Approach for the Measurement of Rotor Noise Source Distributions with Controlled Spatial Resolution," *Journal of Sound and Vibration*, Volume 112, Number 1, pp. 192-197, 1987.
- [30] J.F. Piet, U. Michel and P. Böhning, "Localization of the Acoustic Sources of the A340 with a Large Phased Microphone array During Flight Tests," 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics conference and Exhibit, Breckenridge, CO, June 2002. AIAA 2002-2506.
- [31] Stefan Oerlemans, L. Broersma, Pieter Sijtsma, "Quantification of airframe noise using microphone arrays in open and closed wind tunnels," Report N° NLR-TP-2007-799, Diciembre 2007. National Aerospace Laboratory NLR.
- [32] D.H. Johnson and D.E. Dudgeon, "Array Signal Processing: Concepts and Techniques", Prentice Hall, New Jersey, 1993.
- [33] J.R. Underbrink and R.P. Dougherty, "Array Design for Non-intrusive Measurement of Noise Sources", *Proceedings of Noise-Con 96*, 757-762, 1996.
- [34] A. Nordborg, J. Wedemann and L. Willenbrink, "Optimum Array Microphone Configuration", *Proceedings of Inter-Noise 2000*.
- [35] J. Hald, J. J. Christensen, "A class of optimal broadband phased array geometries designed for easy construction", *The 2002 International Congress and Exposition on Noise Control Engineering Dearborn, MI, USA. August 19-21, 2002*.

- [36] Kneipfer, R. R., "Sonar Beamforming - An Overview Of Its History and Status", NUWCNL Technical Report 10,003, Naval Undersea Warfare Center Detachment, New London, CT, April 1992.
- [37] Högbom, J. A., "A&A suppl.", 15, 417, 1974.
- [38] Fuller, C. R., Elliot, K. B., Tavakkoli, S., O'Brien, W. F., and Hurst, C. J. "Effects of Representative Distortion and Noise on Wavelet Recovery via the Complex Cepstrum". ICASSP, Tokyo, Japan, 1986.
- [39] Fuller, C. R., Tavakkoli, S., Hurst, C. J., O'Brien, W. F. "Application of the Complex Cepstrum to Locate Acoustic Sources Near Reflective Surfaces". AIAA Journal, Vol. 26, No. 8, 1988, pp. 905-910.
- [40] Ralph O. Schmidt, and Raymond E. Franks, "Multiple Source DF Signal Processing: An Experimental System," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-34. No. 3, March 1986.
- [41] Henry Cox, Robertm Zeskind and Markm Owen, "Robust adaptive beamforming" IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Vol. ASSP-35, pp. 1365-1376. Oct. 1987.
- [42] Thomas F. Brooks, William M. Humphreys, Jr. "A Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources (DAMAS) Determined from Phased Microphone Arrays", 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester, UK, May 10-12, 2004.
- [43] Dougherty, Robert P. (2005). "Extensions of DAMAS and Benefits and Limitations of Deconvolution in Beamforming". 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (26th AIAA Aeroacoustics Conference), AIAA-2005-2961, Monterey, California, USA.
- [44] G. Elias, "Source Localization with a Two-dimensional Focused Array: Optimal Signal Processing for a Cross-shaped Array", Proceedings of Inter-Noise 95, 1175-1178, 1995.
- [45] Pieter Sijtsma, and Robert W. Stoker, "Determination of Absolute Contributions of Aircraft Noise Components using Fly-Over Array Measurements," 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit, Manchester, United Kingdom, May 2004. AIAA 2004-2958.

- [46] Stefan Oerlemans, and Pieter Sijtsma, "Acoustic Array Measurements of a 1:10.6 Scaled Airbus A340 Model," 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit, Manchester, United Kingdom, May 2004. AIAA 2004-2924.
- [47] Robert P. Dougherty, "Advanced Time-domain Beamforming Techniques," 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit, Manchester, United Kingdom, May 2004. AIAA 2004-2955
- [48] Pieter Sijtsma, "CLEAN Based on Spatial Source Coherence", 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (28th AIAA Aeroacoustics Conference), AIAA 2007-3436.
- [49] Gerges, Samir N. Y.; Fonseca, William D.; Dougherty, Robert P. (2009). "State of the Art Beamforming Software and Hardware for Applications". The Sixteenth International Congress on Sound and Vibration - ICSV2009. Kraków, Poland.
- [50] Reinhard u. a. "High Dynamic Range Imaging", S. 187
- [51] Sijtsma, P., "CLEAN based on spatial source coherence", International Journal of Aeroacoustics, Vol. 6, No. 4, pp. 357-374, 2007.
- [52] Patricio A. Ravetta, Ricardo A. Burdisso and Wing F. Ng , "Phased array technology development at Virginia Tech: Application to landing gear noise source identification", Mecánica Computacional Vol. XXIII Bariloche, Argentina, November 2004.
- [53] Patricio Ravetta, Jorge Muract, and Ricardo Burdisso, "Feasibility study of microphone phased array based machinery health monitoring", Mecánica Computacional XXVI, pp. 23-37, Córdoba, Argentina, Octubre 2007
- [54] Dougherty, Robert P. (2009). "Acoustic Phased Array Videos from a Large Construction". 38th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering - Internoise 2009, In09_901, Ottawa, Canada.
- [55] Xun Huang, "Real-time algorithm for acoustic imaging with a microphone array, Published Online 9 April 2009.
- [56] Andreas Lauterbach, Klaus Ehrenfried, Stefan Kröber, Thomas Ahlefeldt and Sigfried Loose, "Microphone array measurements on high-speed trains in wind tunnels" Berlin Beamforming Conference, February 2010.

- [57] Toshiki Kitagawa, "Investigation into inconsistencies between theoretical predictions and microphone array measurements of railway rolling noise" PhD. Thesis University of Southampton, December 2007.
- [58] Alain Schnitt, Lucille Lamotte, Filip Deblauwe, "Source identification inside cabin using inverse methods" Berlin Beamforming Conference, February 2010.
- [59] Luis M. Vicente, "Adaptative array signal processing using the concentric ring array and the spherical array" PhD. Thesis University of Missouri, Mayo 2009.
- [60] H. Siller, M. Drescher, G. Saueressig, R. Lange, "Fly-over source localization on a Boing 747-400" Berlin Beamforming Conference, February 2010.
- [61] Marcel Remillieux, "Aeroacoustic study of a model-scale landing gear in a semi-anechoic wind-tunnel" Master Thesis University of Virginia Tech, March 2007.
- [62] Robert P. Dougherty, "Jet noise beamforming with several techniques" Berlin Beamforming Conference, February 2010.
- [63] S. Oerlemans P. Sijtsma, y B. Mendez Lopez. "Location and Quantification of Noise Sources on a Wind Turbine" J. Sound Vib., 299, 869–883, 2007.
- [64] R.C.Ramachandran, H. Patel y G. Raman. "Localization of wind turbine noise sources using a compact microphone array with advanced beamforming algorithms". Berlin Beamforming Conference, February 2012.
- [65] Hood A. and Pines D.J. "Feasibility of a linear phased acoustic array for health monitoring of gears", Proc. SPIE 4327, Smart Structures and Materials 2001- Smart Structures and Integrated Systems, 270. August 2001.
- [66] Camargo E., Ravetta P., Burdisso R., and Smith A. K., A, "Comparison of Beamforming Processing Techniques for Low Frequency Noise Source Identification in Mining Equipment", Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2009-12194, Lake Buena Vista, Florida, November 2009.
- [67] Eret P. and Meskell C., "Microphone arrays for compressed air leakage detection", 4th Berlin Beamforming Conference, 2012
- [68] Bogert, B.P., Healy, M.J.R. and Tukey, J.W. "The Quefreny Alanysis of Time Series & for Echoes: Cepstrum, Pseudo-Autoco-, variance, Cross-cepstrum and Saphe

Cracking, Proceedings of Symposium on Time Series Analysis”, pp. 209—243. N.Y. 1963.

[69] Oppenheim, A.V., Schafer, R.W. & Stockham, T.G. “Nonlinear Filtering of Multiplied and Convolved Signals”, IEEE Trans. Audio & Electroacoustics, Vol. AU-16, No.3, Sept. 1968.

[70] Konstantin-Hansen H. y Herlufsen,H., “Envelope and Cepstrum Analyses for Machinery Fault Identification”. Sound and Vibration. Mayo 2010

[71] Randall R. B. and Sawalhi N. “A New Method for Separating discrete componenet from a signal”. Sound and Vibration. Mayo 2011.

[72] Oppenheim, A. and Schafer, R. “Discrete-time signal processing”. Prentice-Hall. 1989

[73] Adam, D. and Michailovich, O. “Blind deconvolution of ultrasound sequences using nonparametric local polynomial estimates of the pulse”. IEEE Trans. Biomedical Eng., 49 (2), 118-131. 2002.

[74] Taxt, T. “Comparison of cepstrum-based methods for radial blind deconvolution of ultrasound images”. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., 44 (3), 666-674. 1997.

[75]Case Western University, <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/download-data-file>.

[76]<http://www.farq.edu.uy/joomla/images/stories/acustico/Tablas/Tablas%20de%20Absorc ion.pdf>

[77] Childers, D. G., Skinner, D. P., and Kemerait, R. C. “The Cepstrum: A Guide to Processing”. Proceedings of the IEEE, Vol. 65, No. 10, 1977, pp. 1428-1443.

[78] Taylor B. Spalt ,”Background Noise Reduction in Wind Tunnels using Adaptive Noise Cancellation and Cepstral Echo Removal Techniques for Microphone Array Applications” Thesis of Master of Science in Mechanical Engineering, Hampton, Virginia.

[79] Li J. and Petre S., “Robust adaptive beamforming”, John Wiley, 2006

[80] Van Trees, H. L. “Optimum array processing”, Wiley, 2002

[81] D. Döbler, Dr. Ralf Schröder. "Contrast improvement of acoustic maps by successive deletion of the main sources, BeBeC 2010.

[82] Thomas Mueller (ed.), "Aeroacoustic Measurements", Springer, 2002. ISBN 3-540-41757-5.

ANEXO A

A. SOFTWARE Y HARDWARE

En este anexo, se presenta una descripción general de la herramienta computacional (“Software”) desarrollada para este trabajo de tesis como así también el “Hardware” implementado para poder realizar la adquisición de datos.

1. SOFTWARE

El software está dividido en cinco partes. Las cuales se administran desde la pantalla mostrada en la Figura A-1. En ella, se observan las opciones de: BF video, calibrar micrófonos, adquirir imagen, adquisición de datos y procesamiento de datos. Estas diferentes opciones se desarrollarán a continuación.



Figura A-1: Pantalla principal con diferentes opciones.

a) *BF video.*

Esta opción permite realizar una visualización del mapa de ruido de forma dinámica. Por lo tanto, se puede generar un video con los diferentes mapas de ruido que se forman en un pseudo tiempo real. La Figura A-2 muestra una de las pantallas de usuario para visualizar los datos. Arriba a la izquierda se observa el sector en el cual se va a analizar el mapa sonoro, a su derecha se muestra el video de la zona de estudio. También se puede observar la frecuencia a la cual se reconstruye el mapa sonoro en la gráfica que se encuentra abajo a la izquierda y por último se muestra el generador de funciones el cual

permite reproducir un sonido a través del parlante. Esta sección del software está programada para funcionar solamente con “beamforming” convencional (BF).

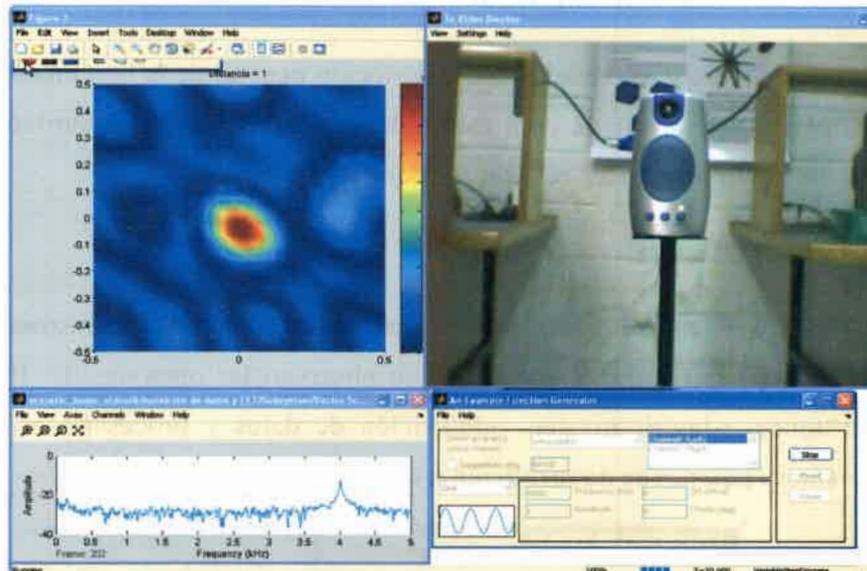


Figura A-2: Visualización de resultados.

Antes de iniciar la medición se deben definir los parámetros con los cuales trabajará el software. En la Figura A-3 se detallan los parámetros necesarios, se requiere la calibración de los micrófonos, la distancia relativa desde la antena al punto de medición, el tamaño de la grilla, su resolución y por último la frecuencia a la cual se realizará el mapa de ruido. Las distancias deben introducirse en metros y la frecuencia en Hertz.

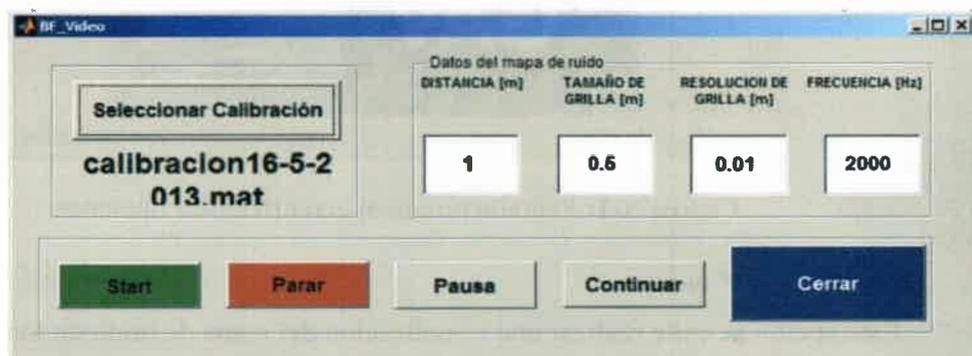


Figura A-3: Parámetros de la medición.

Con esta opción del software el usuario puede realizar mediciones de forma rápida y tener una idea de los focos de ruido de la máquina bajo análisis. De esta forma se puede concentrar en trabajar sobre los focos más críticos ganando tiempo de análisis.

b) Calibrar micrófonos.

Aquí, se realiza la calibración de los micrófonos. Se utiliza un calibrador que emite un tono de 1 kHz a 94 dB. De esta forma se realiza para cada micrófono una medición que se guarda automáticamente si el usuario decide que la medición es correcta (Figura A-4(a) y Figura A-4(b)). Para ello se pueden visualizar los datos de un tramo de la señal y del tiempo de adquisición completo en la pantalla (Figura A-5). Una vez terminado los 35 micrófonos el archivo puede guardarse para ser utilizado durante el pos proceso de datos.

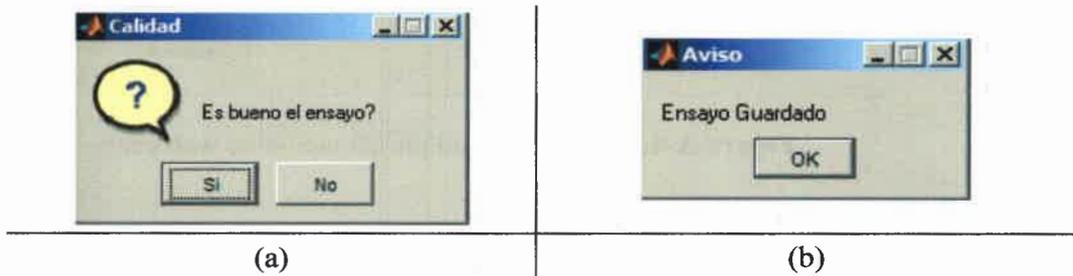


Figura A-4: Calidad de medición.



Figura A-5: Visualización de medidas de micrófonos.

c) Adquirir imagen.

En la Figura A-6 se observa la pantalla de usuario para realiza la toma de fotografía de la máquina que se está midiendo para poder superponerla con el mapa de ruido. A la izquierda se visualiza un video y al presionar el botón TOMAR FOTO se mostrará la imagen a la derecha de la pantalla. En ese momento se despliega la opción de guardar la imagen.



Figura A-6: Video y foto adquirida mediante web cam.

d) Adquisición de datos.

Esta sección se utiliza para realizar las mediciones de ruido de la máquina a analizar. En este caso el software permite seleccionar un micrófono y un tiempo de adquisición. A la izquierda de la pantalla (Figura A-7) se observará la señal del micrófono seleccionado en el dominio del tiempo y a la derecha la señal en el dominio de la frecuencia. Al igual que las secciones anteriores si la medición es satisfactoria el usuario tiene la opción de guardar los datos adquiridos y realizar nuevas mediciones.

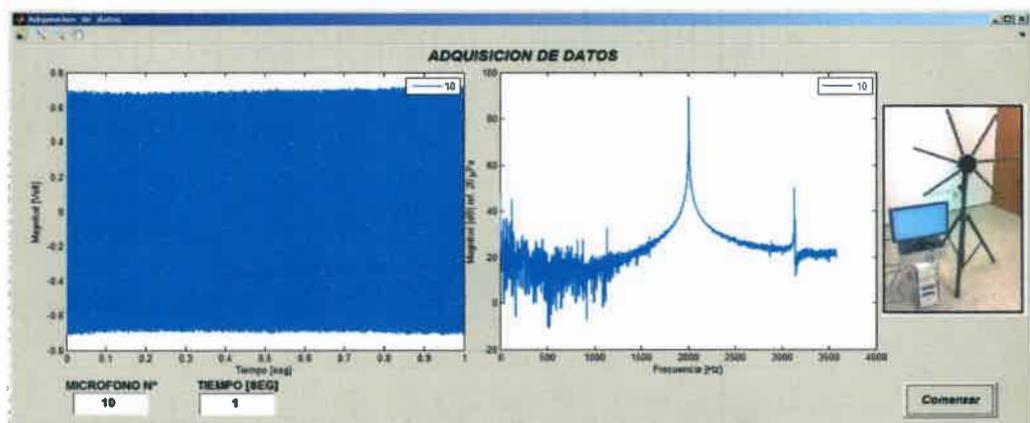


Figura A-7: Visualización de la medición de un micrófono en tiempo y frecuencia.

e) Procesamiento de datos.

En la Figura A-8 se observa la pantalla del software de procesamiento de datos. Primeramente se deben cargar los datos que se adquirieron previamente, la calibración de los micrófonos y la imagen de la máquina a analizar. Luego, se deben setear los parámetros de distancia relativa de la antena a la imagen acústica, el tamaño de la grilla,

su resolución y la frecuencia de la imagen acústica. Al cargar los datos aparecerá abajo a la derecha la señal de un micrófono en el dominio de la frecuencia, esto facilita el trabajo de selección de la frecuencia de estudio. Una vez concluido el seteo se puede proceder a utilizar las diferentes técnicas de pos proceso de datos. Cada técnica está programada para que se puedan introducir los parámetros particulares.

En este caso, se analiza la posición de las fuentes de ruido aeroacústicas emitidas por un ventilador mediante la técnica de “beamforming” convencional. También se dispone de otras técnicas programadas como “MUSIC”, “Robust adaptive beamforming”, “retardo y suma”, “retardo y suma – cepstrum” y “DR-HDR”.

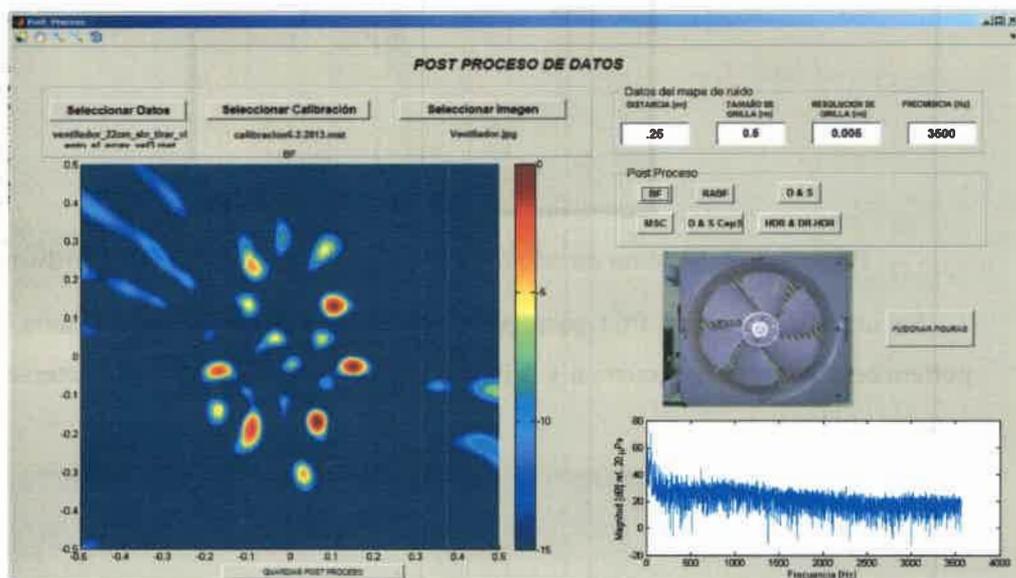


Figura A-8: Sistema de detección de fuentes sonora en funcionamiento (software).

2. HARDWARE

La Figura A-9 muestra el sistema de adquisición y la antena de micrófonos desarrollados. Los sensores de presión utilizados son de bajo costo comparados con los que actualmente se utilizan para este tipo de sistemas. La distribución de 35 sensores de presión se optimizó mediante algoritmos genéticos. En la antena de micrófonos se colocó una cámara web la cual permite visualizar el área donde se reconstruirá la imagen acústica.



Figura A-9: Sistema de adquisición y antena de micrófonos (hardware).

Se utilizó una placa PCI para poder realizar la adquisición de datos. Esta placa pertenece al Grupo de Acústica y Vibraciones, con las siguientes características en los canales analógicos:

Características placa PCI	
<i>Canales Analógicos</i>	40, 80
<i>Canales Single ended</i>	80
<i>Canales Diferenciales</i>	40
<i>Resolución</i>	16 bits
<i>Muestreo</i>	250 kSamples/s
<i>Máximo Voltaje</i>	10 V

La entrada se datos se acondicionó para que la placa pueda distinguir las señales de los micrófonos del ruido electrónico. La placa dispone de 80 canales “single ended” y el muestreo es de 250 kSamples/s esto limita la frecuencia máxima de reconstrucción del

mapa de ruido debido a que se debe multiplexar por la cantidad de canales activos, para nuestro caso 35.

ANEXO B

LISTA DE PUBLICACIONES DEL AUTOR RELACIONADAS CON ESTE TRABAJO

Se presenta la lista de trabajos publicados por el autor y que tiene relación con este trabajo. Los trabajos se encuentran disponibles en el disco compacto que se adjunta a este trabajo.

PUBLICACIONES EN REVISTAS

- O'Brien Ronald, Molisani Leonardo, Burdisso Ricardo, "Detección de fuentes sonoras mediante el uso de imágenes acústicas", *Mecánica Computacional*, ISSN 1666-6070, Vol. 28, págs. 113-121 (artículo completo), 2009. Idioma: Español.
- Zapico Adriana, Molisani Leonardo, O'Brien Ronald, Burdisso Ricardo, "Fault analysis in composed material: A neural net application using acoustical signal", *Mecánica Computacional*, ISSN 1666-6070, Vol. 29, págs. 9679-9685 (artículo completo). 2010 Idioma: Inglés.
- O'Brien Ronald, Molisani Leonardo, Burdisso Ricardo, "Optimización del rango dinámico de antenas acústicas", *Mecánica Computacional*, ISSN 1666-6070, Vol. 30, págs. 4001-4012, 2011. (artículo completo). Idioma: Español.
- O'Brien Ronald, Molisani Leonardo, Burdisso Ricardo, "Detección de fuentes sonoras mediante beamforming y near field acoustic holography", *Mecánica Computacional*, ISSN 1666-6070, Vol. 31, 2012. (artículo completo). Idioma: Español.
- O'Brien Ronald, Molisani Leonardo, Burdisso Ricardo, "Técnicas avanzadas para la detección de fuentes sonoras", *Mecánica Computacional*, ISSN 1666-6070, Vol. 32, págs. 2951-2967, 2013. (artículo completo). Idioma: Español.

TRABAJOS EN CONGRESOS INTERNACIONALES

- Zapico Adriana, Molisani Leonardo, O'Brien Ronald, Burdisso Ricardo, "Fault analysis in composed material: A neural net application using acoustical signal", Congreso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionales en la Ingeniería – CILAMCE 2010, Buenos Aires, 15 a 18 de Noviembre de 2010. (artículo completo). Idioma: Inglés.

- O'Brien Ronald, Molisani Leonardo, Burdisso Ricardo, "Noise source detection using acoustic pictures", ICSV18 2011 – International Congress of Sound and Vibration, Río de Janeiro, Brasil, 10-14 de Julio, 2011. (artículo completo). Idioma: Inglés.

TRABAJOS EN CONGRESOS NACIONALES

- O'Brien Ronald, Molisani Leonardo, Burdisso Ricardo, "Detección de fuentes sonoras mediante el uso de imágenes acústicas", ENIEF 2009 – XVIII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, Tandil, Argentina, 3-6 de Noviembre, 2009. Publicado en actas, ISSN 1666-6070, Mecánica Computacional Vol. XXVIII, págs. 113-121 (artículo completo). Idioma: Español.
- Zapico Adriana, Molisani Leonardo, O'Brien Ronald, Burdisso Ricardo, "Fault analysis in composed material: A neural net application using acoustical signal", MECOM 2010 – XXIX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, Buenos Aires, Argentina, 15-18 de Noviembre, 2010. Publicado en actas, ISSN 1666-6070, Mecánica Computacional Vol. XXIX, págs. 9679-9685 (artículo completo). Idioma: Inglés.
- Zapico Adriana, Molisani Leonardo, O'Brien Ronald, Burdisso Ricardo, Del Real Carlos, Ballesteros Yolanda y Nicolás Ponso, "Diagnostico de fallas en material compuesto de fibra de carbono (CFRP) usando redes neuronales", MACI 2011 – III Congreso Matemática Aplicada, Computacional e Industrial, Bahía Blanca, Argentina, 9-11 de Mayo, 2011 (artículo completo). Idioma: Español.
- O'Brien Ronald, Molisani Leonardo, Burdisso Ricardo, "Detección de fuentes sonoras mediante el uso de imágenes acústicas", MACI 2011 – III Congreso Matemática Aplicada, Computacional e Industrial, Bahía Blanca, Argentina, 9-11 de Mayo, 2011 (artículo completo). Idioma: Español.
- O'Brien Ronald, Molisani Leonardo, Burdisso Ricardo, "Optimización del rango dinámico de antenas acústicas", ENIEF 2011 – XIX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, Rosario, Argentina, 1-4 de Noviembre, 2011. (artículo completo). Idioma: Español.
- O'Brien Ronald, Molisani Leonardo, Burdisso Ricardo, "Detección de fuentes sonoras mediante beamforming y near field acoustic holography", MECOM 2012 –

- Nombre de la Reunión Científica: III Congreso Matemática Aplicada, Computacional e Industrial (MACI 2011)
 Tipo De Reunión Científica: Congreso
 Lugar de Reunión Científica: Bahía Blanca – Argentina
 Año de la Reunión: 2011
 Tipo de participación: Expositor
- Nombre de la Reunión Científica: ICSV18 2011 – International Congress of Sound and Vibration
 Tipo De Reunión Científica: Congreso
 Lugar de Reunión Científica: Río de Janeiro - Brasil
 Año de la Reunión: 2011
 Tipo de participación: Expositor
- Nombre de la Reunión Científica: XIX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF 2011)
 Tipo De Reunión Científica: Congreso
 Lugar de Reunión Científica: Rosario – Argentina
 Año de la Reunión: 2011
 Tipo de participación: Expositor – Key Note Lecture.
- Nombre de la Reunión Científica: XXIX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (MECOM 2012)
 Tipo De Reunión Científica: Congreso
 Lugar de Reunión Científica: Salta – Argentina
 Año de la Reunión: 2012
 Tipo de participación: Expositor.
- Nombre de la Reunión Científica: XX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF 2013)
 Tipo De Reunión Científica: Congreso
 Lugar de Reunión Científica: Mendoza – Argentina
 Año de la Reunión: 2013
 Tipo de participación: Expositor.

Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, Salta, Argentina, 13-16 de Noviembre, 2012. Publicado en actas, ISSN 1666-6070, Mecánica Computacional Vol. XXXI, (artículo completo). Idioma: Español.

- O'Brien Ronald, Molisani Leonardo, Burdisso Ricardo, "Técnicas avanzadas para la detección de fuentes sonoras", ENIEF 2013 – XX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, Mendoza, Argentina, 19-22 de Noviembre, 2013. (artículo completo). Idioma: Español.
- Muract Jorge, Molisani Leonardo, Arechaga Tomás, Jaureguizaharb Leandro, O'Brien Ronald, "Modelo analítico para predicción de ruido generado por la banda de rodadura de neumáticos", ENIEF 2013 – XX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, Mendoza, Argentina, 19-22 de Noviembre, 2013. (artículo completo). Idioma: Español.

PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS, SIMPOSIOS, CONFERENCIAS, ETC.

- Nombre de la Reunión Científica: XVIII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF 2009)
Tipo De Reunión Científica: Congreso
Lugar de Reunión Científica: Tandil – Argentina
Año de la Reunión: 2009
Tipo de participación: Expositor
- Nombre de la Reunión Científica: Asociación de Acústicos Argentinos (AdAA 2009)
Tipo De Reunión Científica: Congreso
Lugar de Reunión Científica: Rosario – Argentina
Año de la Reunión: 2009
Tipo de participación: Participante
- Nombre de la Reunión Científica: XXIX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (MECOM-CILAME 2010)
Tipo De Reunión Científica: Congreso
Lugar de Reunión Científica: Buenos Aires – Argentina
Año de la Reunión: 2010
Tipo de participación: Expositor