

OPTIMIZACION DEL RANGO DINAMICO DE ANTENAS ACUSTICAS

Ronald J. O'Brien^a, Leonardo Molisani^a and Ricardo Burdissio^b

^a*Grupo de Acústica y Vibraciones (GAV), Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nac. N° 36 Km 601, 5800 Río Cuarto, Argentina, e-mail: robrien@ing.unrc.edu.ar, lmolisani@ing.unrc.edu.ar.*

^b*Vibration and Acoustics Laboratories, 153 Durhan Hall, Virginia Tech, Blacksburg, VA, 24061-0238, USA, rburdiss@vt.edu, <http://www.val.me.vt.edu>*

Palabras Claves: imágenes acústicas, beamforming, Máximo Lóbulo Lateral, algoritmos genéticos

Resumen. Debido al incremento de la contaminación acústica en la población y medio ambiente las regulaciones son cada vez más exigentes con respecto a los niveles máximos de emisión. Los niveles máximos de emisión se establecen en forma global. Por lo tanto es necesario determinar que partes de la fuente emisora contribuyen principalmente al ruido total, para así establecer estrategias de control de emisión. En este trabajo se realiza el diseño optimizado de una antena acústica. Donde se consideran los principales parámetros de diseño. La antena acústica está constituida por un arreglo espacial de sensores de presión. La distribución de los sensores de presión está relacionada implícitamente con el rango dinámico de la antena. Esta relación se observa a través del Máximo Lóbulo Lateral (MLL). Mediante algoritmos genéticos se optimizó el parámetro MLL de la antena acústica. La técnica de imágenes acústicas es utilizada en este esfuerzo comparando distintas distribuciones de sensores de presión, obteniéndose resultados satisfactorios entre simulaciones y experimentos. Con la antena acústica optimizada se obtienen los principales puntos de emisión de las fuentes de ruido. Realizando control sobre los puntos de emisión de las fuentes es posible cumplimentar las exigencias de las normas sobre regulaciones sonoras emitidas hacia el medioambiente.

INTRODUCCION

En este esfuerzo se mide y analiza "el flujo de energía acústica de una máquina o fuente sonora a su entorno". De esa manera se obtiene información sobre "qué partes de la misma, irradian más ruido y cómo lo hacen", lo cual a su vez permite adoptar medidas preventivas más eficaces que la mera protección individual de quien está expuesto a un ruido excesivo. El desarrollo de este trabajo "pretende establecer un método para localizar los focos de ruido en máquinas complejas". La obtención de Imágenes acústicas es una técnica de medición que permite establecer un ranking de las zonas más ruidosas y hacer una "fotografía acústica" de cada una de ellas. De esta manera se visualizan los puntos desde donde se irradia una mayor energía sonora (Kinsler, 1999). "Estas imágenes suministran la información indispensable sobre las medidas correctoras para disminuir la emisión de ruido".

El arreglo de micrófonos (antena acústica) o comúnmente llamado "Phased Array" se basa en la idea de que un número de micrófonos es colocado con un patrón conocido delante de un frente de onda emitido por un campo sonoro. Una de las ventajas es que al incrementar el número de micrófonos mejora de manera considerable la relación señal-ruido. El arreglo de micrófonos utiliza la correlación cruzada entre los micrófonos y tiene la habilidad de separar ruidos incoherentes en el campo acústico (Ziomek, 1995).

La capacidad de detectar fuentes de ruido (Mueller, Allen y Blake, 2007) producidas por partes mecánicas móviles y ruido aerodinámico permitirá tomar los recaudos necesarios para cumplir con regulaciones, normas de emisión de ruido y control de ruido (Christensen y Hald, 2004), (Chow, Mau y Remy, 2002). La primera aplicación de un arreglo de micrófonos bidimensional (2D) para realizar mediciones en aeronáutica fue realizada por Brooks. Donde usó por primera vez un arreglo de sensores de presión 2D, para la cual utilizó la técnica Retraso y Suma en el dominio de la frecuencia. Con el paso de los años se fueron mejorando los algoritmos para la detección de fuentes sonoras, en 1974 Högbom (1974) desarrolló "CLEAN" usando la deconvolución de las imágenes emitidas por los radio astrónomos, desde allí se adaptó para el uso en imágenes acústicas. Dougherty and Underbrink usaron un arreglo 2D en el año 86, implementando la técnica convencional de Beamforming. En el año 1987 Cox desarrollo el algoritmo "Robust Adaptive Beamforming" (Cox, Zeskind y Owen, 1987), esta técnica permite reducir el ruido blanco no correlacionado. Los algoritmos aplicados a la técnica Beamforming más recientes son "DAMAS" (Brooks y Humphreys, 2004), "LORE" (Ravetta, Burdisso y Ng, 2006) y "CLEAN-SC" (Sijtsma, 2007), los cuales logran detectar y separar fuentes con mejor resolución que el Beamforming Convencional.

La supresión de los lóbulos laterales en el mapa acústico de Beamforming es una de las claves en el proceso de identificación de fuentes sonoras. Con motivo de reducir esto se desarrolló la técnica "DAMAS" (Brooks y Humphreys, 2004) anteriormente mencionada. En esta técnica los autores modelan la matriz espectral cruzada y realizan un proceso inverso para obtener el nivel de presión sonora de las fuentes. Debido a que la matriz espectral cruzada no es invertible se debe resolver el problema mediante una técnica numérica de iteración la cual insume mucho tiempo de cálculo. La técnica se siguió desarrollando luego por Dougherty (2009) pero también tiene limitaciones numéricas.

Otra 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 sensores de presión. Para reducir los grandes lóbulos laterales se debe romper la regularidad del arreglo de micrófonos, para ello se utilizan distribuciones aleatorias. Esto incrementa el rango dinámico de la antena suprimiendo la aparición de fuentes fantasmas (Johnson y Dudgeon, 1993). Se han realizado una variedad de geometrías de antenas acústicas las cuales no son aleatorias. Éstas tienen un rango dinámico determinado con un bajo nivel de

lóbulos laterales, y se basa su diseño en espirales logarítmicas concéntricas (Underbrink y Dougherty, 1996) y espirales de Arquímedes (Nordborg, Wedemann y Willenbrink, 2000). J. Hald y J. J. Christensen (2002) propusieron una optimización de los máximos lóbulos laterales a partir de la técnica MiniMax. En este trabajo se utilizó una optimización a partir de la utilización de Algoritmos Genéticos. Entre las ventajas de esta metodología se encuentra la posibilidad de utilizar dominios no continuos y ajustar la cantidad de factores que sean necesarios incluir en el proceso de optimización.

A continuación se presentarán diferentes conceptos que se utilizarán a lo largo del trabajo. En primera instancia se definirá la resolución de la antena de micrófonos, por esto se entiende la habilidad de una distribución de micrófonos para poder distinguir entre 2 fuentes que están cerca una de otra. Cuando se hace foco en el campo lejano la resolución se define como el mínimo ángulo que separa a dos fuentes. En cambio cuando se aplica esta técnica en el campo cercano la resolución se define como la distancia mínima que separa dos fuentes (Christensen y Hald, 2004).

$$R = \frac{z \alpha \lambda}{D} \quad (1)$$

Donde z es la distancia desde el arreglo de micrófonos hasta el plano donde queremos evaluar el nivel de ruido, λ es la longitud de onda de la frecuencia a la cual se va a evaluar el ruido, D es el diámetro del arreglo de micrófonos y α tiene un valor de 1.22 para una apertura circular y de 1 para una apertura lineal.

El arreglo permite detectar la posición y frecuencia de una fuente sonora con buena resolución en un cierto rango de apertura. Desde el centro del arreglo de micrófonos se tienen 30° grados de apertura en la dirección positiva y negativa. La apertura usada en el arreglo bidimensional se muestra en la Figura 1.

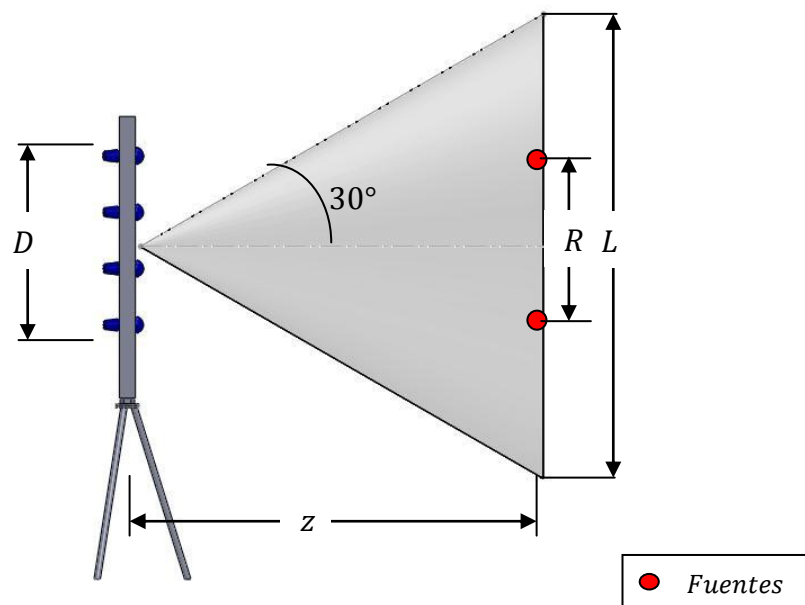


Figura 1: Cobertura de la distribución de micrófonos con buena resolución a una distancia z .

Por lo tanto la expresión que permite calcular el diámetro de apertura en función de la distancia a la cual se obtiene el mapa de ruido es:

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

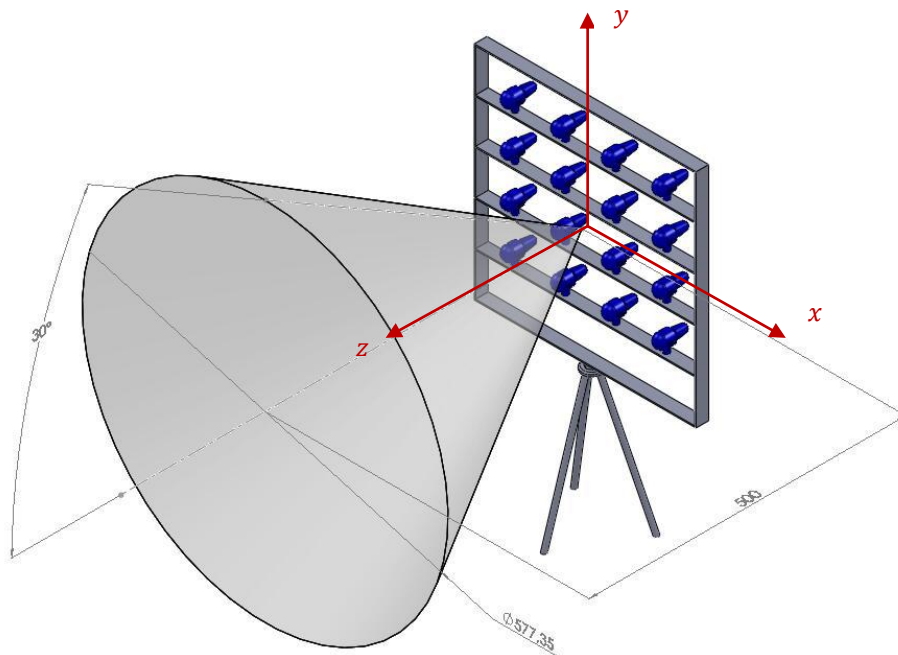


Figura 2: Sistema de coordenadas cartesianas ubicadas en la antena. Como ejemplo se muestra el tamaño de la superficie a una distancia de 500 mm.

1 TECNICA BEAMFORMING CONVENCIONAL

El propósito de esta sección es presentar los conceptos físicos y vocabulario sobre el Beamforming Convencional. Esta técnica es utilizada para realizar el post proceso de los datos adquiridos mediante los diferentes arreglos de micrófonos.

La técnica de Beamforming Convencional presupone un monopolo como fuente sonora emitiendo en cada punto de una grilla de escaneo que encierra la fuente de ruido a analizar. La ecuación que gobierna la emisión de un monopolo puede derivarse a partir de la ecuación de onda en tres dimensiones (3) dada por

$$\nabla^2 p(r, \theta, \alpha, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(r, \theta, \alpha, t)}{\partial t^2} \quad (3)$$

El Laplaciano ∇^2 puede escribirse en coordenadas esféricas y asumiendo que la presión acústica p tiene solo variación espacial en la dirección radial, la ecuación (3) puede ser simplificada a 1 dimensión. La solución de la ecuación diferencial (3) es la ecuación de onda para un monopolo.

$$p(r, t) = \underbrace{\frac{F_1}{r}}_{\text{prop. (+)}} (r - ct) + \underbrace{\frac{F_2}{r}}_{\text{prop. (-)}} (r + ct) \quad (4)$$

Asumiendo que no existe reflexión, en la ecuación (4) F_2 es cero. Para un monopolo $F_1 = A e^{i(\omega t - kr)}$, entonces,

$$p(r, t) = \frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr)} \quad (5)$$

En la ecuación (5) r representa la distancia desde el punto donde se asume la fuente monopolo hasta la posición del correspondiente micrófono, $p(r, t)$ 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.

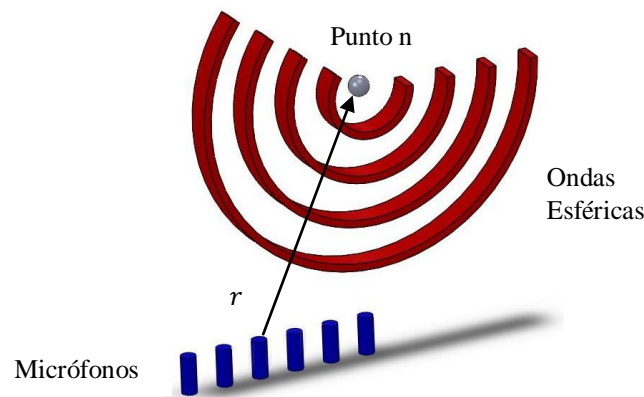


Figura 3: Esquema de la medición de un arreglo lineal con respecto a un punto de la grilla.

Luego, asumiendo ondas esféricas, la presión acústica en un punto n , de una grilla en la que el espacio es subdividido, se puede calcular conociendo la ubicación de los micrófonos y la del punto a considerar, como se observa en la Figura 3. El retardo de fase en cada micrófono permite escribir la contribución de la presión acústica total en el punto de interés mediante la siguiente ecuación,

$$P_n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m^* p_m \quad (6)$$

Donde * significa complejo conjugado, w_m es el factor de ponderación de la señal utilizado para representar en nivel de presión en el punto m , p_m es la presión en el dominio de la frecuencia del micrófono m .

Acomodando la ecuación (6) de manera vectorial.

$$P_n = \frac{\vec{w}^\dagger \vec{P}}{M} \quad (7)$$

En la ecuación anterior \vec{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 retraso de fase.

Asumiendo que para una fuente monopolo en campo libre las componentes del vector de propagación del arreglo están dadas por la función de Green definida en la ecuación (8).

$$C_m(x_n) = \frac{e^{-ikr_m}}{4\pi r_m} = \frac{e^{-ik|\vec{r}_n - \vec{r}_m|}}{4\pi |\vec{r}_n - \vec{r}_m|} \quad (8)$$

En la cual r_m es la distancia Euclidea desde el micrófono m hasta el punto de la grilla n . Para maximizar la salida del Beamforming, el vector de propagación es elegido paralelo al vector dirección.

$$\vec{w} = \frac{\vec{C}}{\|\vec{C}\|} \quad (9)$$

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

El valor eficaz (ve) de la presión acústica.

$$ve = \frac{p p^\dagger}{2} \quad (10)$$

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

$$B_n(r, f) = \frac{w_n^\dagger \vec{p} \vec{p}^\dagger w_n}{2M^2} = \frac{w_n^\dagger \text{CSM} w_n}{M^2} \quad \text{con } \dagger: \text{Hermitiano} \quad (11)$$

Donde CSM representa la matriz espectral cruzada (“Cross Spectral Matrix”). 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

$$\text{CSM}_{ij} = \frac{p_i(f)p_j^*(f)}{2} \quad (12)$$

$$\text{CSM}_{ii} = \frac{p_i(f)p_i^*(f)}{2} \quad (13)$$

La matriz dada por la ecuación (13) contiene el auto espectro de las señales y la ecuación (12) contiene el espectro cruzado fuera de la diagonal principal. Luego, cada punto de la grilla es evaluado con la ecuación (11), 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 una lista de valores que al graficarlos nos permiten observar el mapa de ruido de la zona en unidades de energía. Y cuantitativamente los puntos de emisión de ruido son ubicados y caracterizados. Para mayor detalle de la técnica consultar (Ravetta, Burdisso y Ng, 2006).

2 TECNICA RETRASO Y SUMA

Mediante el Beamforming un receptor puede discriminar entre diferentes señales incidentes, dependiendo de cuál sea la localización espacial de las mismas. La técnica de Beamforming expresada en el dominio del tiempo se denomina Retraso y Suma, en la literatura se la conoce como “Delay and Sum” (Christensen y Hald, 2004). Para comenzar consideraremos una distribución de M micrófonos en las coordenadas r_m ($m=1,2,\dots,M$) del plano $x - y$ como lo indica la Figura 4. Cuando se aplica este método a la presión p_m medida por cada micrófono se está atrasando y sumando individualmente cada señal.

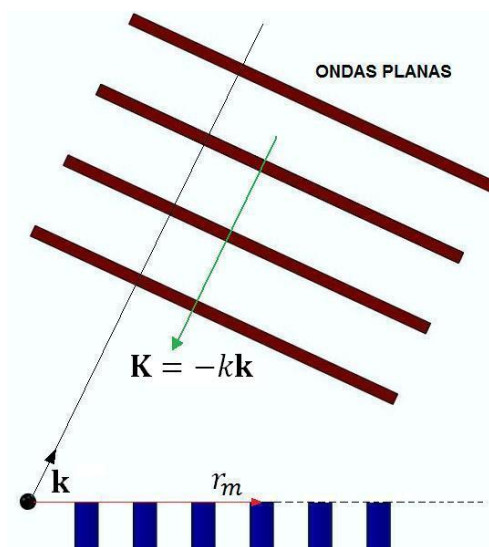


Figura 4: Arreglo de micrófonos haciendo foco en la dirección de las ondas planas que se propagan desde el campo lejano.

$$b(\mathbf{k}, t) = \sum_{m=1}^M w_m p(t - \Delta_m(\mathbf{k})) \quad (14)$$

Donde w_m es un vector de pesos aplicados individualmente a cada micrófono, el retardo Δ_m 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 retrasan en tiempo las ondas planas que inciden de la dirección \mathbf{k} antes de ser sumadas. Por lo tanto el cálculo del tiempo de retraso se puede calcular geoméricamente como,

$$\Delta_m = \frac{\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_m}{c} \quad (15)$$

Aquí c representa la velocidad del sonido. Las señales que arriban desde el campo lejano pero que no provienen de la dirección seleccionada no se sumaran constructivamente. Por lo tanto se logra hacer foco en una dirección determinada y privilegiar la dirección que nos interesa.

En el dominio de la frecuencia la salida del Beamforming se expresa de la siguiente manera

$$B(\mathbf{k}, \omega) = \sum_{m=1}^M w_m P_m(\omega) e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_m} \quad (16)$$

En la ecuación (16) ω es la frecuencia angular, $\mathbf{K} = -k\vec{\mathbf{k}}$ es el vector número de onda de la onda incidiendo desde la dirección $\vec{\mathbf{k}}$ en la cual el arreglo de micrófonos está enfocándose y $k = \omega/c$ es el número de onda. Implícitamente en la ecuación (16) existe un factor igual a $e^{i\omega t}$. El arreglo de micrófonos es enfocado en la dirección $\vec{\mathbf{k}}$. Idealmente es deseable solamente lleguen ondas en esa dirección para obtener una perfecta localización del ruido. Para investigar cuanto afectan las ondas que llegan de otras direcciones es menester darles un número de onda distinto denominado \mathbf{K}_o . De esta forma se investiga cómo influyen las ondas que “indeseadas” arriban al arreglo de micrófonos. De acuerdo con la ecuación (16) la salida del Beamforming será,

$$B(\mathbf{k}, \omega) = P_o \sum_{m=1}^M w_m e^{i(\mathbf{K} - \mathbf{K}_o) \cdot \mathbf{r}_m} = P_o W(\mathbf{K} - \mathbf{K}_o) \quad (17)$$

La función $W(\mathbf{K})$ se denomina “Array Patern”.

$$W(\mathbf{K}) = \sum_{m=1}^M w_m e^{i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}_m} \quad (18)$$

El “Array Patern” está definido enteramente por la distribución espacial de micrófonos. En el caso de $w_m = 1$, existe una distribución de pesos uniforme. La distribución espacial de micrófonos se realiza en el plano $x - y$, por lo tanto no habrá micrófonos colocados en la coordenada z , de esa forma el “Array Patern” de la distribución de micrófonos es independiente de K_z . De manera que se considera solamente el “Array Patern” en el plano número de onda (K_x, K_y) , esto es la proyección del vector numero de onda sobre el plano $x - y$. En la ecuación (18) se observa mayor sensibilidad del arreglo de micrófonos en la dirección \mathbf{K} en el cual se obtiene el Lóbulo Principal, en otras direcciones se presentan los llamados Lóbulos Laterales, estos influyen la medida del Lóbulo Principal produciendo falsos picos en el mapa acústico.

La ecuación (17) contiene información sobre la estructura de Lóbulos Laterales para todas las direcciones de propagación y para todas las frecuencias. De acuerdo con la ecuación (17)

la longitud de \mathbf{K} y \mathbf{K}_0 está definida mediante el número de onda k y pueden tener direcciones opuestas, esto significa que $|\mathbf{K} - \mathbf{K}_0| \leq 2k = 4\pi f/c$ por lo tanto a una frecuencia f solo una sección del “Array Patern” podrá ser visible. De esta forma es posible calcular el valor de la frecuencia máxima a la que llegará la distribución de micrófonos elegida. La Figura 3 muestra una parte del “Array Patern” para una geometría dada.

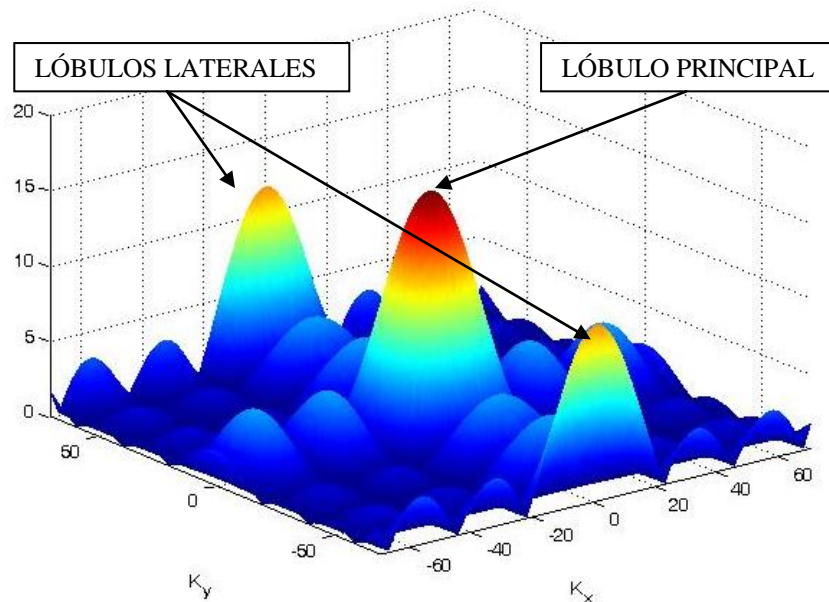


Figura 5: “Array patern” correspondiente a la distribución de micrófonos pertenecientes a la Figura 4

Al aumentar el valor de los lóbulos laterales estos pueden confundirse con fuentes sonoras, por lo que a este fenómeno se lo suele llamar fuentes fantasmas (Christensen y Hald, 2004). La relación entre los lóbulos laterales y el lóbulo principal definen el rango dinámico perteneciente a la distribución de micrófonos, 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 denomina relación señal – ruido,

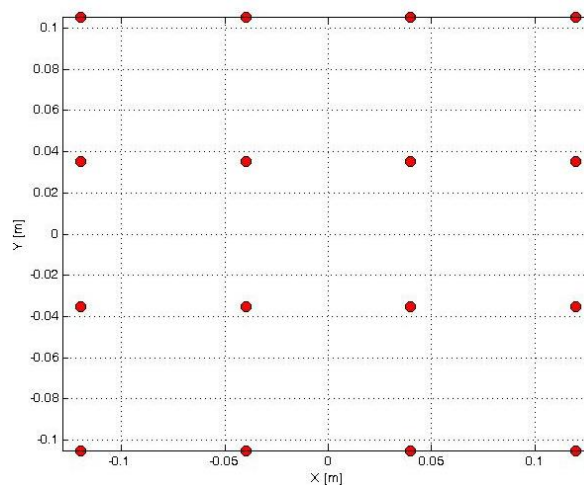


Figura 6: Ejemplo de una distribución de 16 micrófonos (●) en forma regular.

En la ecuación (18) se observa mayor sensibilidad del arreglo de micrófonos en la

dirección K en el cual se obtiene el Lóbulo Principal, en otras direcciones se presentan los Lóbulos Laterales, estos influyen la medida del Lóbulo Principal produciendo errores por falsas medidas en el mapa acústico. Una buena distribución de micrófonos se caracteriza por tener un bajo Máximo Lóbulo Lateral (MLL) relativo al Lóbulo Principal. Definiremos ahora el perfil patrón del arreglo de micrófonos,

$$W_p(K) = 10 \text{ Log}_{10} \left(\frac{\max_{|K| < K} |W(K)|^2}{M^2} \right) \quad (19)$$

Ahora a partir del perfil dado por la ecuación (19) se define el Máximo Lóbulo Lateral (MLL),

$$\text{MLL}(K) = 10 \text{ Log}_{10} \left(\frac{\max_{K_{min}^0 < |K| \leq K} |W(K)|^2}{M^2} \right) \quad (20)$$

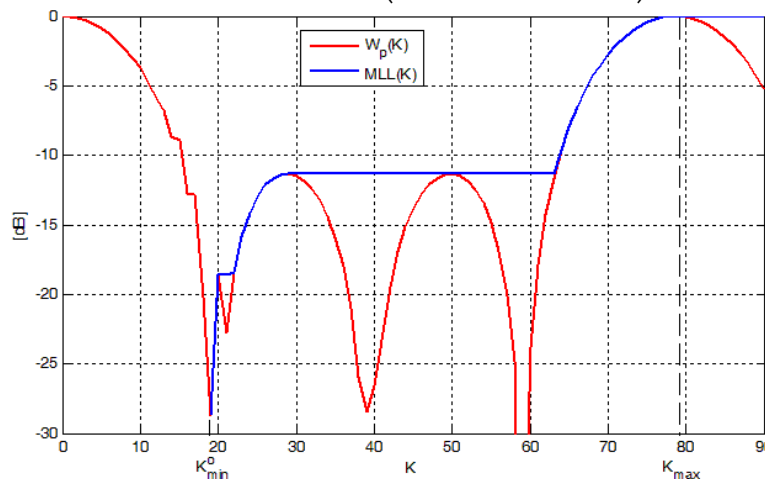


Figura 7: Comparación entre MLL(K) y $W_p(K)$

Donde K_{min}^0 está descrita mediante la ecuación (21) en la cual D está definido en la Figura 1 y α mediante la ecuación (1) y f_{min}^0 la frecuencia mínima que puede distinguir el arreglo de micrófonos.

$$K_{min}^0 = \alpha \frac{2\pi}{D} = \frac{2\pi f_{min}^0}{c} \quad (21)$$

La Figura 7 muestra la comparación entre el perfil patrón del arreglo de micrófonos y el Máximo Lóbulo Lateral, también se obtiene la información de la frecuencia máxima y mínima para la cual se puede utilizar el arreglo de micrófonos.

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 (aliasing espacial). El Máximo Lóbulo Lateral (MLL) define el rango dinámico de la distribución de micrófonos y su habilidad para separar fuentes que llegan de distintas direcciones. El MLL es un parámetro importante a tener en cuenta en el diseño de una distribución de micrófonos.

3 OPTIMIZACIÓN MÁXIMO LÓBULO LATERAL MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS.

Para realizar el diseño de la distribución espacial de micrófonos de manera controlada se

optó por la alternativa de optimización numérica mediante Algoritmos Genéticos. Específicamente se optimizó el rango dinámico de la antena de micrófonos a través de la minimización de los Máximos Lóbulos Laterales (MLL).

$$\min_{r_m} MLL(K) \quad K < K_{max} \quad (22)$$

Donde K_{max} determina la frecuencia máxima alcanzada mediante la distribución de micrófonos propuesta. Para realizar el proceso de optimización se decidió el uso de Algoritmos Genéticos (AG) ya que estos se adaptan muy bien a la resolución de problemas discontinuos, no diferenciables, estocásticos y altamente no lineales. Los AG son utilizados en el diseño optimizado de estructuras, en el diseño de topologías, mejoras aerodinámicas, etc. Los AG permiten resolver problemas con y sin restricciones a través del proceso de selección natural similar a la selección biológica. Para ello los AG se basan en tres reglas para formar las generaciones de individuos y así seleccionar el individuo más apto,

- Selección, escoge los individuos más aptos, llamados padres, y los envía a la siguiente generación.
- Cruce, combina dos padres para formar un hijo y enviarlo a la siguiente generación.
- Mutación, aplica cambios aleatorios a los padres para formar hijos.

Los AG se diferencian de los algoritmos de optimización clásicos en dos puntos.

Algoritmos Clásicos	Algoritmos Genéticos
Generan un solo punto en cada iteración. La secuencia de puntos se aproxima a la solución óptima.	Generan una población de puntos en cada iteración. El mejor punto es el que aproxima a la solución óptima.
Para seleccionar el siguiente punto en la secuencia lo hace de forma determinística.	Selecciona la siguiente población de forma aleatoria.

La forma en que se introduce la función a optimizar en los AG es a través de la función fitness. También se tuvo en cuenta que las coordenadas de cada micrófono no se solapen con las demás y que la distribución de micrófonos se realice sobre un área determinada. La técnica de algoritmos genéticos fue utilizada para optimizar la distribución de micrófonos de la antena prototipo de 16 canales los cuales están distribuidos de manera estocástica.

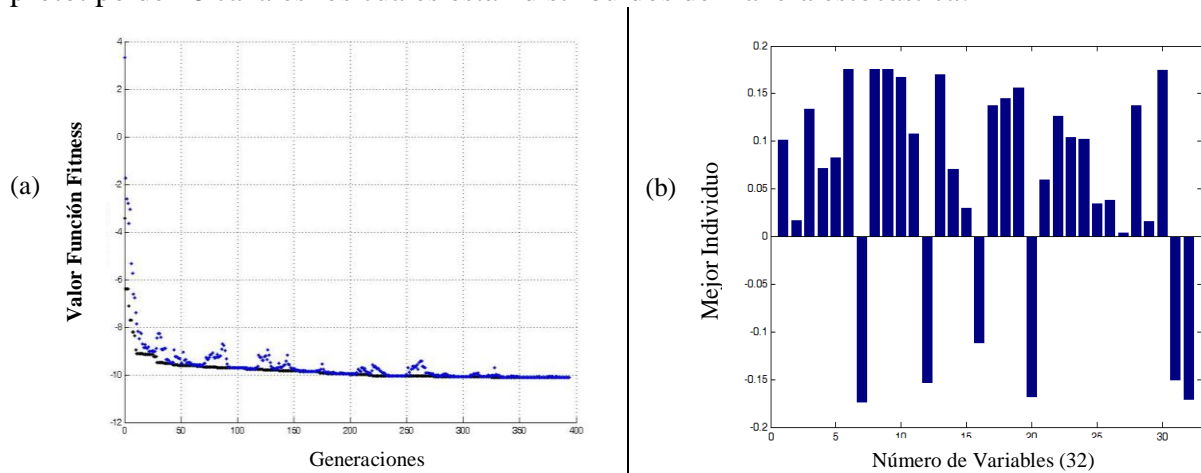


Figura 8: a) Se observa la cantidad de generaciones y b) los valores para cada variable.

La Figura 8(a) muestra la cantidad de generaciones utilizadas en la optimización para la función de fitness propuesta, la cual tiene como propósito la minimización de la ecuación (20) a partir de distintas distribuciones de los sensores de presión (variables). En la Figura 8(b) se observan las variables utilizadas con su valor final correspondiente. Los valores tomados por las variables que tiene el problema, son las coordenadas $x - y$ de cada micrófono, en nuestro caso son 16 por lo tanto tenemos 32 coordenadas. 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 $1e-10$.

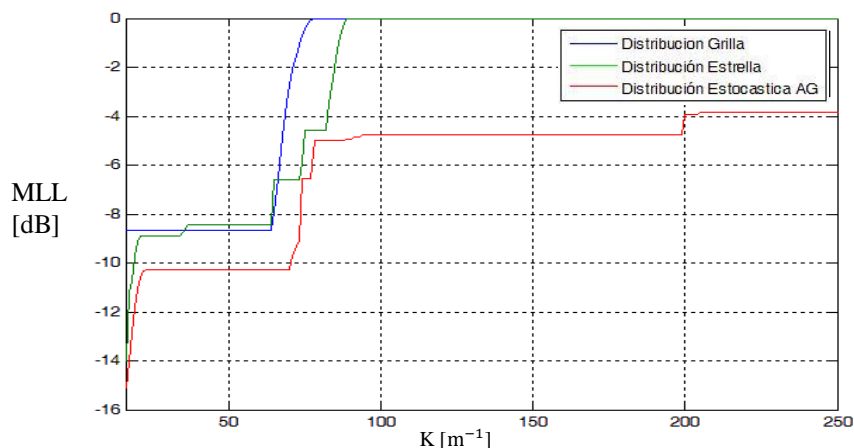


Figura 9: MLL en función del K (número de onda) para 3 tipos de distribución de micrófonos.

La Figura 9 muestra el valor de MLL para cada tipo de distribución espacial de micrófonos propuesta. Como se observa, se logra disminuir los Lóbulos Laterales en gran medida y de esa forma evitamos obtener mediciones falsas.

Debido a que el AG trabaja de forma estocástica la distribución de micrófonos final no tendrá un patrón definido y por lo tanto la construcción del soporte se hace dificultosa. En el diseño de la antena de 80 canales se optó por realizar 10 barras de 8 sensores de presión cada uno, esto permite una distribución de micrófonos optimizada con una mayor facilidad de construcción.

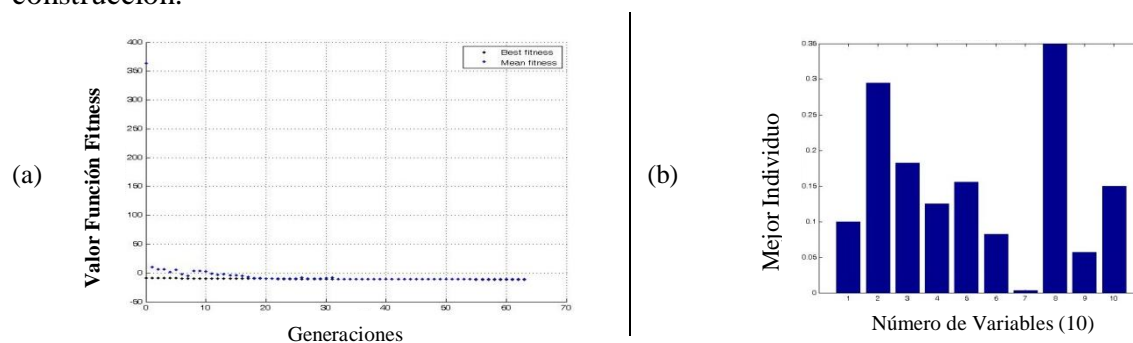


Figura 10: a) Se observa la cantidad de generaciones y b) los valores para cada variable.

La Figura 10(a), como en el caso anterior, muestra la cantidad de generaciones utilizadas en la optimización para la función de fitness propuesta y en la Figura 10(b) se observan las variables utilizadas con su valor final correspondiente. En este caso los valores tomados por las variables que tiene el problema, son las coordenadas radiales de solamente 8 micrófonos, las variables 9 y 10 se utilizan para darle el grado de libertad a la barra de salir de la dirección radial. En comparación con la optimización anterior esta necesita menor cantidad de Generaciones (Figura 10(a)) por lo tanto menor tiempo de procesamiento computacional. 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 $1e-10$.

4 OPTIMIZACIÓN Y DISEÑO.

Para corroborar los resultados de la optimización se simuló un campo de presiones como el que se originaría por la ubicación de las fuentes en la [Figura 11](#) y luego se comparó con resultados experimentales. El campo de presiones simulado se introdujo al programa que realiza Beamforming. La fuente simulada consistió en un monopolo emitiendo a una frecuencia de 3 kHz en las coordenadas (0, 0, 1) y se agregó otra fuente monopolo en las coordenadas (-1.2, 0, 0) a la misma frecuencia pero desfasada con respecto a la fuente anterior en $\pi/4$, por lo tanto la señal será tipo incoherente y no correlacionada. Esta fuente de interferencia se agregó para poder evaluar cómo influye una fuente que está fuera del área que cubre la antenna en la medición del ruido.

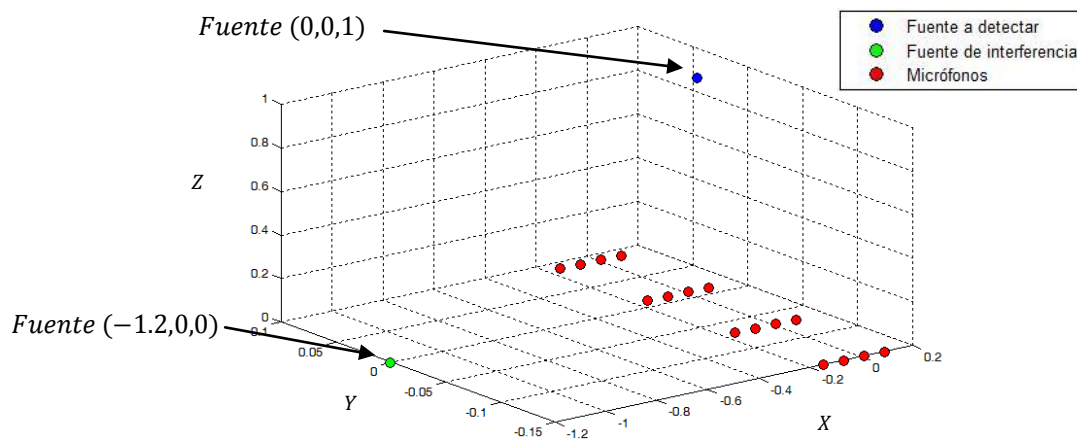


Figure 11. Posición de las fuentes relativo a la distribución de micrófonos.

La [Figura 12](#) muestra los resultados de las simulaciones y experimentos para los distintos tipos de distribución de micrófonos a una frecuencia de 3 kHz. La [Figura 12\(b\)](#) muestra las simulaciones que se realizaron a partir del campo acústico mencionado anteriormente. En ambos casos se observa que la Distribución de micrófonos en Grilla produce un desplazamiento hacia la izquierda de la verdadera fuente de ruido. Esto es debido a que el espaciado entre los micrófonos debe ser menor a la mitad de la longitud de onda de la frecuencia a la cual se quiere construir el mapa de ruido. Por lo tanto en el caso de la Distribución Grilla $d = 0.07 \text{ m}$ y la frecuencia máxima es 2450 Hz. En el caso de la Distribución Estrella la frecuencia máxima es de 3 kHz, pero la fuerte influencia de la forma en estrella produce medidas falsas. En el caso de la Distribución AG la frecuencia máxima es de 6800 Hz. Comparando experimentalmente los resultados obtenidos con la simulación se observa que la distribución de micrófonos obtenida mediante la optimización utilizando Algoritmos Genéticos es la que permite disminuir la influencia de los Lóbulos Laterales y evitar así la presencia de fuentes falsas.

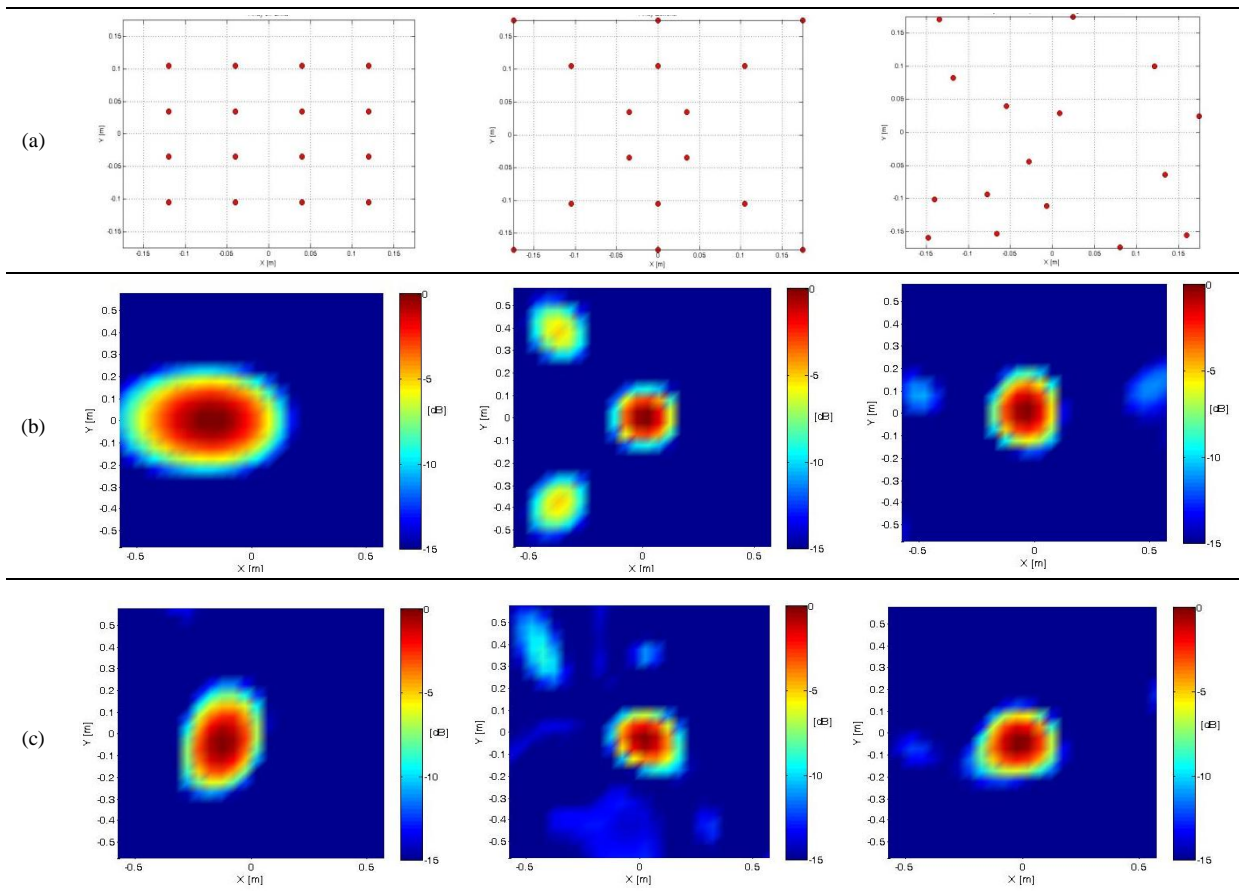
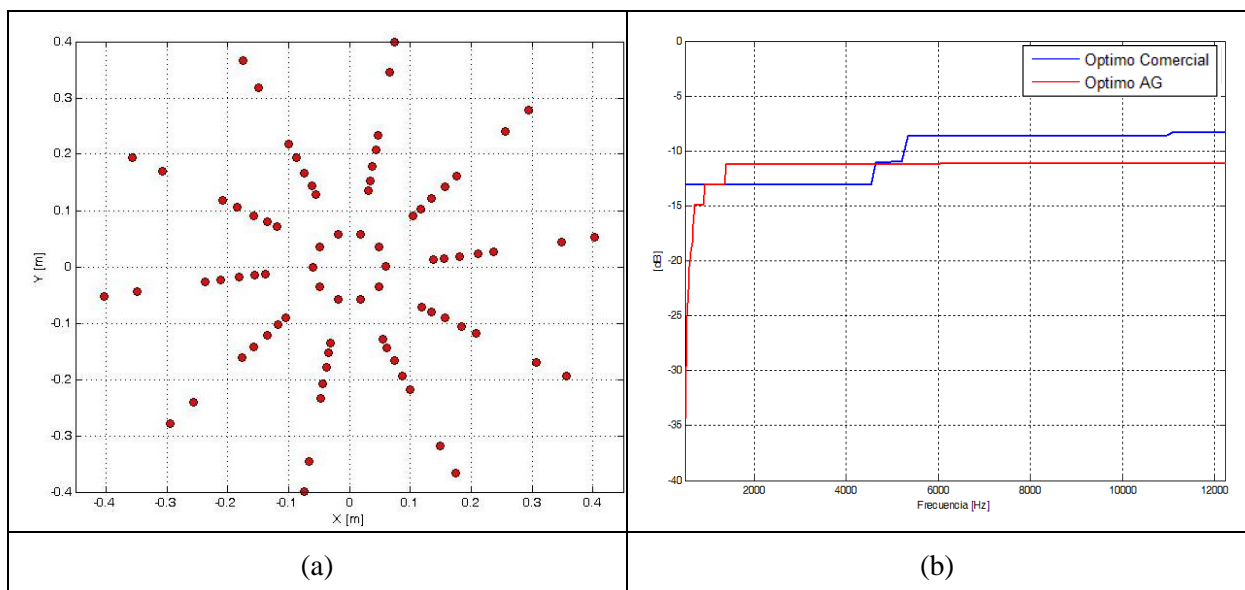


Figure 12. (a) Distintos arreglos de sensores y las comparaciones de las (b) simulaciones con los (c) resultados experimentales.

La Figura 13 muestra el diseño de una distribución de micrófonos de 80 canales mediante el uso como optimizador de Algoritmos Genéticos, para ello se colocaron 8 sensores de presión en cada spot y se los distribuyo uniformemente sobre los 360°. Un aspecto importante a tener en cuenta en la construcción de la antena es su facilidad de transporte.



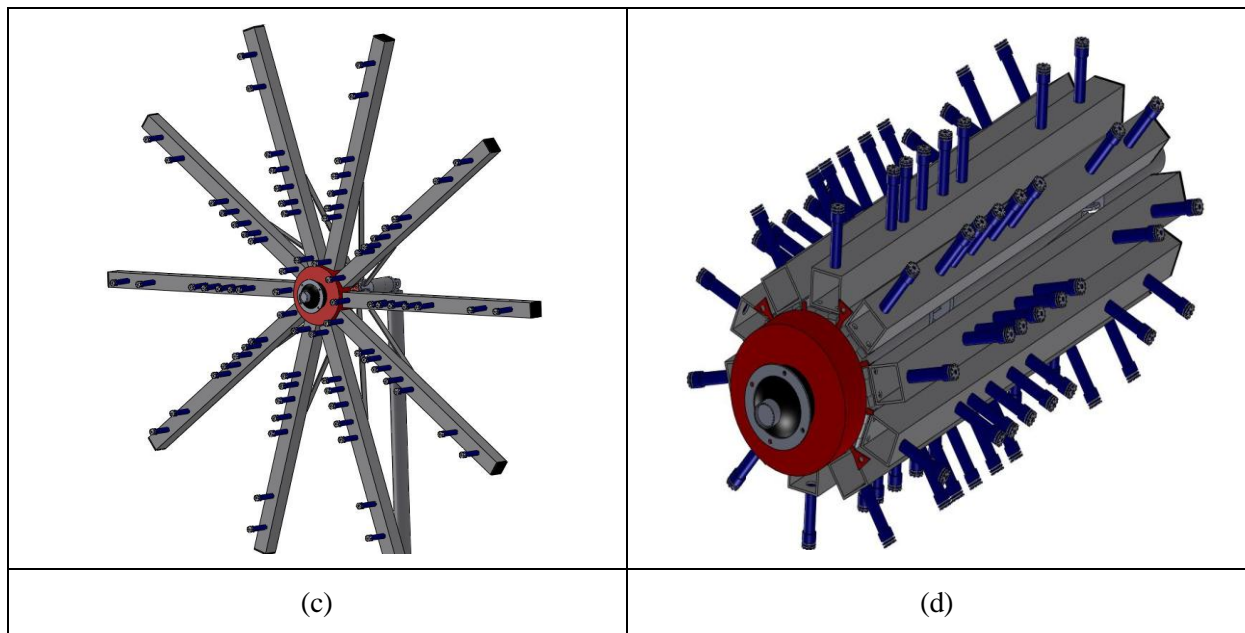


Figura 13. (a) Distribución de micrófonos optimizada mediante algoritmo genético. (b) Comparación MSL Comercial vs. Optimización GA. (c) Diseño de antena mediante GA y (d) antena dispuesta para ser transportada.

En la Figura 14(a) se observan los diferentes tipos de distribución espacial de micrófonos, incluyendo la distribución optimizada mediante los Algoritmos Genéticos. Nuevamente se realizaron simulaciones a partir del campo acústico anteriormente mencionado. Comparando los resultados obtenidos con la simulación se observa que la distribución de micrófonos obtenida mediante la optimización utilizando Algoritmos Genéticos nuevamente es la que permite disminuir la influencia de los Lóbulos Laterales y evitar así mediciones incorrectas.

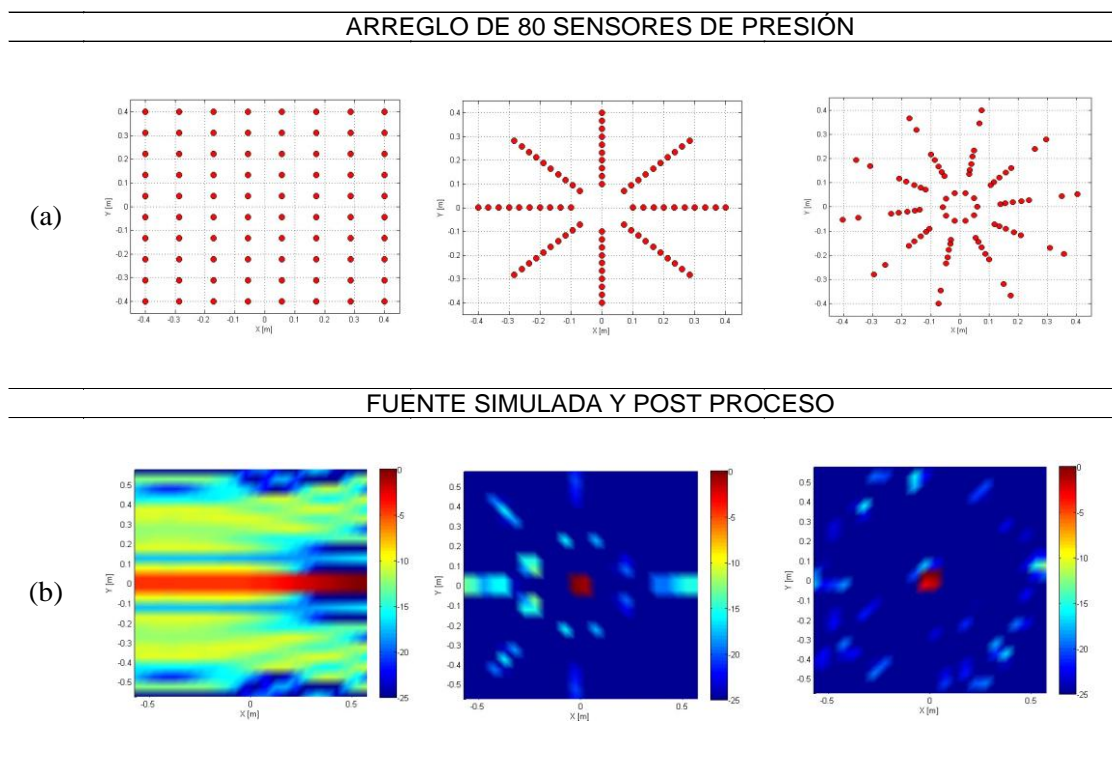


Figura 14. (a) Distintos arreglos de 80 sensores de presión y las comparaciones de las (b) simulaciones con el mismo campo de presiones anteriormente mencionado.

Con respecto a las características del arreglo de micrófonos de 80 sensores optimizado es de destacar el aumento en resolución, ya que el diámetro D del arreglo de micrófonos es mayor al de los arreglos anteriores. El rango de frecuencias de trabajo de la antena es mostrado en la [Figura 13\(b\)](#), comienza en 530 Hz y finaliza en 12000 Hz.

5 CONCLUSION

Se evaluaron diferentes alternativas de distribuciones espaciales de micrófonos. Mediante la utilización de Algoritmos Genéticos se realizó una optimización de la distribución espacial de micrófonos para antenas de 80 y 16 sensores respectivamente.

La herramienta implementada permite obtener el “Array Patern” de una distribución de micrófonos al igual que sus valores de MLL, por lo tanto se obtienen las características a la cual la antena de micrófonos es funcional para reconstruir el mapa de ruido. De esa forma se obtuvo una herramienta de diseño optimizado de antenas acústicas minimizando el efecto del MLL en el mapa acústico.

Se logró así el diseño de una antena de 80 sensores con facilidad de ser transportada y de poner en condiciones de operación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación aportada por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica a través del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCyT) – Código del Proyecto 2183.

REFERENCIAS

- 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*.
- 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.
- J.J. Christensen and J. Hald, Beamforming, *Briuel&Kjrer Sound&Vibration Measurement NS, 2004*.
- 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*.
- Dougherty, Robert P. “Acoustic Phased Array Videos from a Large Construction”. *38th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering - Internoise 2009, In09_901, Ottawa, Canada*.
- 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.
- Högbom, J. A., *A&A suppl., 15, 417, 1974*.
- D. H. Johnson and D. E. Dudgeon, *Array Signal Processing: Concepts and Techniques, Prentice Hall, New Jersey, 1993*.
- Kinsler, Lawrence E.; Frey, Austin R.; Coppens, Alan B.; Sanders, James V. (1999). “*Fundamentals of Acoustics*”. 4th edition, Wiley.
- Thomas J., Mueller, Christopher S., Allen, William K., Blake, *Aeroacoustic Measurements, Springer Verlag, ISBN-13: 978-3540417576, 2007*.

- A. Nordborg, J. Wedemann and L. Willenbrink, Optimum Array Microphone Configuration, *Proceedings of Inter-Noise 2000*.
- Patricio A. Ravetta, Ricardo A. Burdisso and Wing F. Ng, "Noise Source Localization and Optimization of Phased Array Results (LORE)", *12th AIAA/CEAS Aeroacoustics, Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference), Cambridge, Massachusetts, 8 - 10 May 2006*.
- Pieter Sijtsma, "CLEAN Based on Spatial Source Coherence", *13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (28th AIAA Aeroacoustics Conference), AIAA 2007-3436*.
- J. R. Underbrink and R. P. Dougherty, Array Design for Non-intrusive Measurement of Noise Sources, *Proceedings of Noise-Con 96, 757-762, 1996*.
- L. Ziomek, *"Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-Time Signal Processing"*, CRC Press, ISBN 0-8493-9455-4, 1995.