

## ULTRASONIC ARRAY DESIGN FOR A 3-D IMAGING

**J. Villazón-Terrazas, A. Ibáñez, David Romero-Laorden, M. Parrilla**

Centro de Acústica Aplicada y Evaluación No Destructiva – CAEND (CSIC), Carretera de Campo Real, km  
0.200, Arganda del Rey, Madrid.

{javier.villazon@csic.es, alberto.ibanez@csic.es, david.romero@csic.es, m.parrilla@csic.es}

### Resumen

Un problema importante en el desarrollo de matrices de 2-D es el elevado número de elementos necesarios para construir aperturas grandes, con el fin de producir imágenes por ultrasonidos de alta calidad. Los últimos avances en tecnologías de fabricación de transductores han hecho posible el diseño de matrices con menos restricciones en la forma y disposición de los elementos. En este trabajo nos proponemos utilizar Algoritmos Evolutivos para optimizar estos parámetros y así obtener *arrays* de ultrasonidos en 2-D grandes, con un bajo número de elementos. De la misma forma, manteniendo un estrecho lóbulo principal y con un nivel bajo de lóbulos de rejilla.

**Palabras-clave:** Optimización, Algoritmos Evolutivos, Campo Acústico, Array.

### Abstract

A major problem in developing 2-D arrays is the large number of elements required for big apertures in order to produce high quality ultrasonic images. Recent advances in transducer technology have made possible to design arrays with fewer restrictions in the shape and layout of elements. In this paper we propose to use Evolutionary Algorithms to optimize these parameters to obtain large 2-D ultrasonic arrays with a low number of elements but maintaining a narrow mainlobe and low grating lobes level.

**Keywords:** Optimization, Evolutionary Algorithms, Acoustic Field, Array.

**PACS no.** 43.35.Yb, 43.35.Zc.

## 1 Introducción

Las imágenes volumétricas por ultrasonidos son objeto de gran interés en los Ensayos No Destructivos (END) y en aplicaciones para diagnóstico médica. La forma más común de generar este tipo de imágenes es utilizando un *array* 2-D. La configuración de un *array* 2-D al igual que el *array* en 1-D, necesita un elevado número de elementos, manteniendo distancias entre ellos no mayores a media longitud de onda ( $\lambda/2$ ), para poder tener una resolución lateral aceptable, y también para evitar los lóbulos de rejilla. Todo esto da lugar a construir un *array* de miles de elementos y con un tamaño muy pequeño [1-2]. Si bien con el paso de los años, las actuales tecnologías de fabricación de transductores

permiten realizar este tipo *array*, los equipos de control electrónico que utilizarán estos transductores, aun siguen siendo costosos de adquirir.

La tecnología de transductores basados en PZT (transductor piezoeléctrico), son utilizados para construir *arrays* con geometrías muy regulares, tanto para la forma de los elementos como para la configuración del *array*. Este tipo de tecnología es muy útil para elaborar *Array* Dispersos, donde el objetivo principal es eliminar elementos de un *array* pleno 1-D ó 2-D. Existen varias estrategias para la eliminación de elementos [3-5], con el fin de mantener la calidad de campo acústico obtenido por el *array* pleno. Otro tipo de trabajos como [6] y [7] se basan en el uso de aperturas complementarias, donde los lóbulos de rejilla de emisión son eliminados con ceros en la apertura recepción y viceversa.

Los transductores capacitivos ultrasónicos micromecanizados (cMUT), aparecieron hace algo más de dos décadas ofreciendo otra alternativa a sistemas basados en transductores piezoeléctricos. La unidad básica de esta tecnología es una celda que se compone básicamente de un electrodo fijo y otro que se encuentra en una micro-membrana flexible [8]. Su funcionamiento es análogo al que presentan los micrófonos de condensador con la diferencia de su pequeño tamaño y su funcionalidad como emisor y receptor. La gran ventaja de esta tecnología es que debido al pequeño tamaño de una celda es posible la construcción de complejas aperturas de *array*. Con esto se puede obtener por ejemplo una mejor resolución para aplicaciones de imagen ultrasónica o desarrollar sistemas más avanzados de imagen 3-D.

El objetivo de este trabajo de investigación es encontrar una configuración de *array* 2-D que sea cuasi-óptima para una aplicación dada, todo esto con la ayuda de los Algoritmos Evolutivos (EA). En la sección 2 se describe la metodología de diseño propuesta. La sección 3 está dedicada a presentar un ejemplo sencillo. Y finalmente, se presentan algunas conclusiones en la sección 4.

## 2 Metodología de Optimización

El diseño de un *array* 2-D es considerado como un proceso donde tendremos que encontrar las posiciones de los  $N$  elementos del *array* dentro de la superficie del transductor (superficie radiante). Dicha configuración deberá aportar un campo acústico aceptable y con las capacidades de focalización, deflexión, nivel de lóbulos laterales y nivel de lóbulos de rejilla adecuados.

Teniendo en cuenta que los algoritmos evolutivos nos ayudaran a resolver este tipo de problemas. La metodología propuesta consta de las siguientes etapas:

1. Definir los requerimientos y restricciones. Los requisitos serán las características las características del campo acústico. Las restricciones nos indicaran los limites que deseamos cumplir, como ser el número de elementos del *array* y las posiciones donde colocarse.
2. Formar un conjunto inicial (población inicial) de configuraciones de *arrays*, que cumplan las restricciones impuestas. Esta población, debe ser codificada de tal manera que sea adecuada para aplicarla en los algoritmos evolutivos. Cada elemento del *array* se modela como un conjunto de celdas elementales (como los propuestos en la tecnología cMUT). Desde un punto de vista acústico cada celda se considera como un emisor y/o receptor puntual. Todas las celdas de cada elemento operaran con la misma fase cuando se consideran como emisores y como sumadores de señal cuando son consideradas como receptores. Utilizando este modelo, cada elemento del sensor esta completamente descrito por una lista de posiciones de sus celdas en un sistema de referencia local, además, un parámetro que indica el estado de activo o inactivo de cada celda puede ser añadido.

- Determinar el *array* que se ajuste a nuestros requerimientos utilizando Algoritmos Evolutivos. Nosotros proponemos el uso del Algoritmo Evolutivo NSGA-II, que encuentra la convergencia necesaria para nuestro problema. Este algoritmo junto con el Simulador de Campo Acústico por la Matriz de Transferencia Monocromática (MTM) [10], hacen que el tiempo de cálculo y de evolución se reduzcan.

En la Figura 1 se muestra el patrón de radiación de un *array* regular con una distancia entre elementos mayor a  $\lambda/2$ . En rojo el lóbulo principal y en azul los lóbulos laterales y de rejilla.

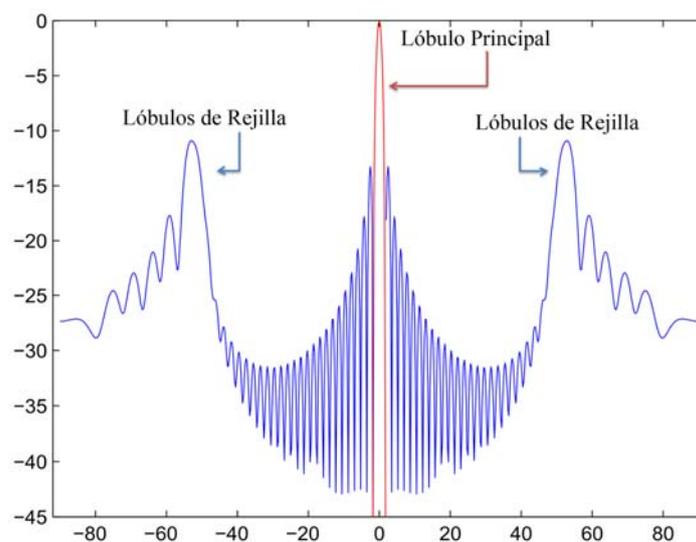


Figura 1. Patrón de radiación de un *array* regular con la distancia entre elementos mayor a  $\lambda/2$

Para mejorar el patrón de radiación se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Mantener y/o disminuir el ancho del haz del lóbulo principal ML (incrementar la resolución lateral).
- Bajar el nivel los lóbulos de rejilla (GL) dentro de la zona de inspección.
- Mejorar el rango dinámico.

Como la posición de los elementos dentro de la superficie radiante depende de múltiples parámetros y en consecuencia existe un gran número de combinaciones posible, los algoritmos evolutivos multiobjetivo son de mucha ayuda para cumplir la configuración de los parámetros descritos anteriormente.

## 2.1 NSGA-II (Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm)

El NSGA-II (Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) es un algoritmo genético multiobjetivo propuesto por Deb [9]. Este algoritmo presenta dos características importantes: (1) garantizar la diversidad durante el proceso de solución y (2) por ser elitista, es decir, solamente considera las mejores soluciones encontradas durante el proceso de búsqueda.

En el NSGA-II inicialmente se crea una población (aleatoria o mediante una técnica de inicialización) de padres  $P_0$ . La población es ordenada de acuerdo a los niveles de no dominancia (ordenamiento de

los frentes de Pareto,  $F_1, F_2, \dots$ ). A cada solución se le asigna una función objetivo de acuerdo a su nivel de no dominancia (donde 1 es el mejor nivel) y se entiende que durante el proceso debe disminuir dicha función. La selección por torneo, el cruce y la mutación son utilizados para crear la población de descendientes  $Q_0$  de tamaño  $N$ , los pasos principales de este algoritmo son mostrados en la Figura 2.b).

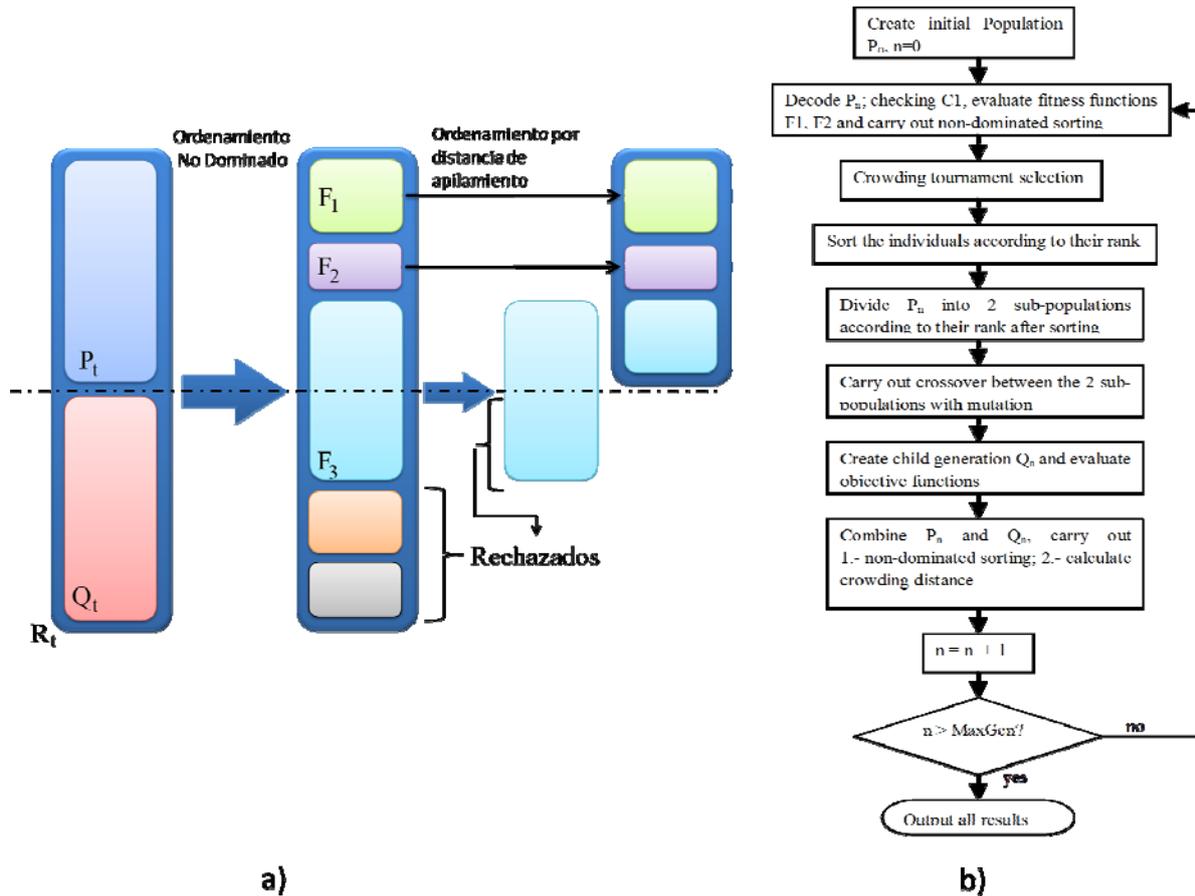


Figura 2. a) Esquema del mecanismo de promoción de individuos del NSGA-II, b) Diagrama de flujo del algoritmo de optimización.

Donde, para una generación  $t$ , la población descendiente  $Q_t$  (de tamaño  $N$ ) es creada en primera instancia usando la población de padres  $P_t$  (tamaño  $N$ ). Después de esto, las dos poblaciones son combinadas para formar  $R_t$  (de tamaño  $2N$ ). Seguidamente, mediante un ordenamiento no dominado, se clasifica la población  $R_t$  en diferentes frentes de Pareto. Aunque esto requiere un mayor esfuerzo, se justifica por el hecho de permitir una verificación global de dominancia entre la población de padres y descendientes. Una vez finalizado el proceso de ordenamiento no dominado, la nueva población es generada a partir de las configuraciones de frentes no dominados. Esta nueva población empieza a ser construida con el mejor frente no dominado  $F_1$ , continúa con las soluciones del segundo frente  $F_2$ , tercero  $F_3$  y así sucesivamente. Como la población  $R_t$  es de tamaño  $2N$ , y solamente existen  $N$  configuraciones que conforman la población descendiente, no todas las configuraciones de

los frentes pertenecientes a la población  $R_i$  podrán ser acomodadas en la nueva población. Los frentes que no pueden ser acomodados desaparecerán.

Cuando se considera el último frente, las soluciones que hacen parte de éste pueden exceder las restantes por acomodar en la población descendiente, la Figura 2.a) muestra dicha situación. En este caso, resulta útil emplear alguna estrategia que permita seleccionar las configuraciones situadas en un área poco poblada (alejada de otras soluciones), para llenar las posiciones restantes de la población descendiente, a cambio de optar por escoger configuraciones aleatorias. Esto puede ser poco relevante en los primeros ciclos generacionales del algoritmo, ya que en esta etapa existen muchos frentes que sobreviven hacia la siguiente generación, pero a medida que el proceso avanza, muchas configuraciones pasan a ser parte del primer frente inclusive haciendo que dicho frente tenga más de  $N$  individuos, por lo que se hace importante que las configuraciones no rechazadas sean de buena calidad y escogidas mediante una metodología que garantice la diversidad. La idea es que siempre se promuevan las configuraciones que aseguren diversidad dentro del mismo frente de Pareto. Cuando la población en su totalidad converge al frente de Pareto óptimo, el algoritmo asegura que las soluciones estén distanciadas una de otra.

## 2.2 Funciones Objetivo y Restricciones

Las funciones objetivo nos servirán para evaluar a los individuos de cada población a lo largo de la evolución, dándoles el valor que caracteriza su adaptabilidad al problema. Por lo tanto, es necesario contar con funciones que describan perfectamente las características que deseamos obtener del *array* ultrasónico.

**F1.** Mantener el lóbulo principal lo más estrecho posible.

$$ML = \min \left( \int_a^b E(x) dx \right) \quad (1)$$

donde  $E(x)$  es el campo acústico obtenido,  $a, b$  son los límites del área del lóbulo principal a un valor de corte igual a -6 [dB].

**F2.** Reducir el nivel de lóbulos de rejilla.

$$GL = \max \left( E(x) - \int_a^b E(x) dx \right) \quad (2)$$

donde, para casos prácticos utilizaremos como nivel a reducir el valor máximo producido por los lóbulos laterales. Algunos trabajos como [11] proponen utilizar el valor producido por la integral de la relación de lóbulos laterales (ISLR).

Como restricciones se presentan dos parámetros a cumplir:

**C1.** El número de canales activos no tiene que ser superior a 128 (en transmisión y en recepción).

**C2.** La distancia entre elementos no debe pasar el umbral asignado por la tecnología de fabricación del transductor.

$$\Delta D = pos_{n+1} - pos_n \quad (3)$$

Donde,  $\Delta D$  es la distancia entre dos elementos vecinos,  $pos_n$  es la posición del elemento dentro de la superficie del transductor.

La codificación de los cromosomas dependerá de dos factores:

1. La posición de los elementos dentro la superficie radiante  $(x_n, y_n)$
2. El valor de ganancia, que será 1 para el caso de ser activo y 0 para inactivo.

### 3 Resultados Experimentales

Nos proponemos diseñar un *array* 2-D formado por 128 elementos ( $N = 128$ ) como máximo, donde los elementos pueden actuar como emisores, receptores o ambos. La forma de los elementos será cuadrada con un valor de lado igual a  $L = \lambda / 2$  (las celdas que conformarán cada elemento serán fijas), los  $N$  elementos estarán distribuidos en una superficie radiante cuadrada de dimensiones  $L_s \times L_s = (35 \times 35) \lambda$ , es decir que el tamaño de la apertura del *array* será igual a  $D = 35 \lambda$ . El campo acústico se calculará a lo largo de una semiesfera con un radio igual a  $r = 200 \lambda$ . Las unidades de medida están expresadas en longitudes de onda ( $\lambda$ ), que nos ayudarán a que nuestros cálculos sean independientes de la frecuencia. Los cálculos de optimización son realizados en onda continua según el método propuesto en [10].

Los elementos en emisión y recepción hacen que la optimización de la apertura sea doble, es decir, una apertura para emisión y otra para recepción. Por lo tanto, para efectos prácticos, el individuo estará formado por un doble cromosoma que puede ser interpretado como un cromosoma de doble longitud. De esta manera garantizamos una optimización de ambas aperturas en un mismo individuo.

La Figura 3 muestra el campo acústico producido por 3 tipos de aperturas distintas pero con el mismo número de elementos.

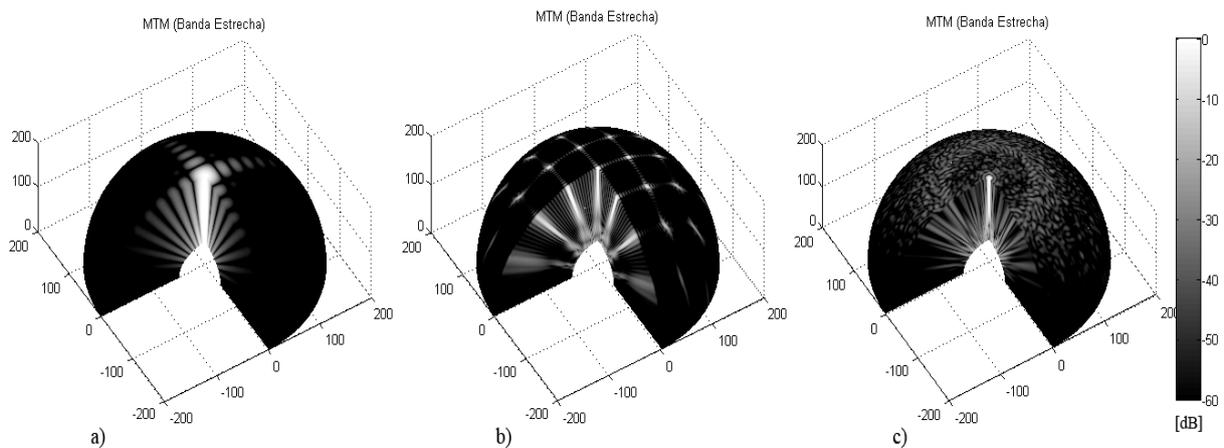


Figura 3. Campo acústico producidos por a) distribución periódica y distancias entre elementos de  $d = \lambda / 2$ . b) distribución a lo largo de la superficie radiante. c) distribución optimizada

La Figura 3.a) muestra el campo acústico producido por un *array* 2-D con una distancia entre elementos de  $d = \lambda / 2$ , donde el ancho del lóbulo principal (resolución lateral) es demasiado ancho como para poder utilizarse en generación de imagen volumétrica. La Figura 3.b) muestra el campo acústico producido por un *array* 2-D cuyos elementos están distribuidos de forma uniforme a lo largo de la apertura radiante, y una distancia entre elementos de  $d = 3\lambda$ , dicha respuesta muestra claramente los lóbulos de rejilla que son destructivos a la hora de generar las imágenes volumétricas. Finalmente, la Figura 3.c) muestra el campo producido por el *array* optimizado, al considerarse aperturas en emisión y recepción distintas los lóbulos de rejilla de emisión se ven eliminados por los de recepción. Por esta razón el nivel de los lóbulos de rejilla bajan un factor de aproximadamente 34.2 [dB].

La configuración del *array* optimizado se muestra en la Figura 4.a) donde los elementos emisores están mostrados como rectángulos azules, y los de recepción como rombos rojos. Debemos tener en cuenta, que la apertura adquiere una distribución circular, muy diferente a la configuración inicial (matricial). El resultado de la optimización dio un total de 95 elementos en emisión y 97 en recepción, donde 65 de los elementos actúan como emisores y receptores.

Durante la optimización del *array*, se utilizó un límite de evolución (convergencia) puesto en 50000 generaciones, y el resultado de la Figura 4.a) es solamente uno de los mejores individuos de la optimización hasta ese punto de evolución.

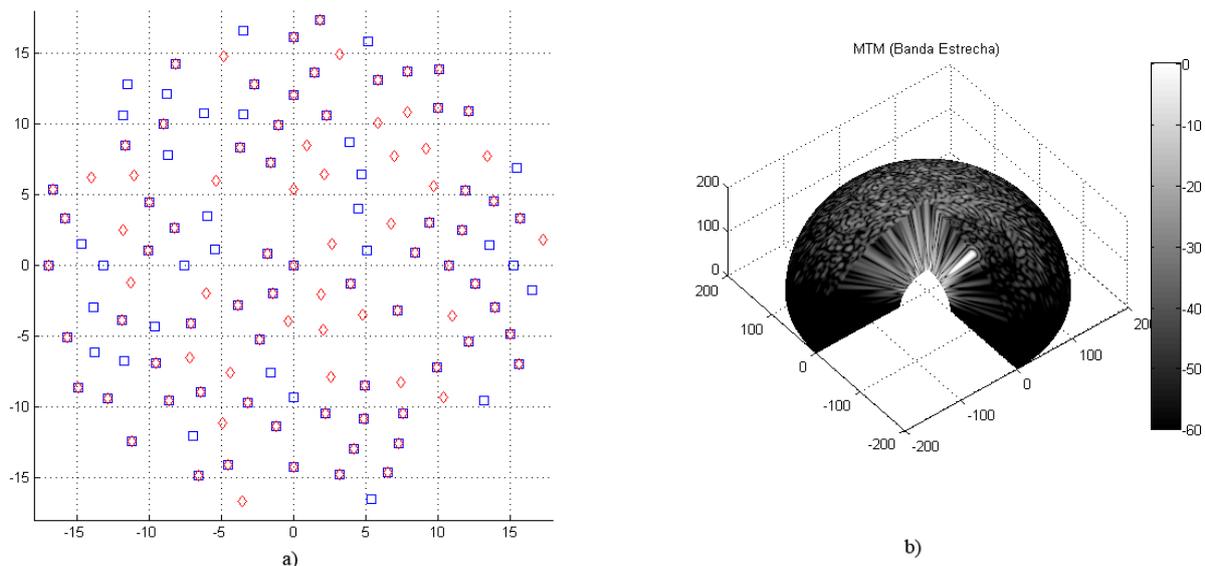


Figura 4. a) Distribución de la apertura en emisión y recepción. b) campo acústico producido por el *array* optimizado focalizando en  $(\varphi = -30^\circ; \theta = 0^\circ)$

La Figura 4.b) muestra el campo acústico producido por el *array* optimizado, deflectado a  $(\varphi = -30^\circ; \theta = 0^\circ)$ , donde el nivel de los lóbulos de rejilla se incrementan pero no en valores que se consideren destructivos para la generación de imagen.

La Tabla 1 muestra los valores de lóbulos de rejilla en distintos ángulos de deflexión, manteniendo la focalización a una distancia de  $r = 200\lambda$  (radio de la esfera).

Tabla 1 – Niveles de lóbulos de rejilla.

Ángulos de deflexión	Nivel de lóbulos de rejilla [dB]
$(\varphi = 0^\circ; \theta = 0^\circ)$	-34.2
$(\varphi = -30^\circ; \theta = 0^\circ)$	-30
$(\varphi = -30^\circ; \theta = -30^\circ)$	-29.8
$(\varphi = 0^\circ; \theta = -35^\circ)$	-28.9

Los valores de la Tabla 1 son obtenidos cuando se deflecta el lóbulo principal en elevación y azimut. Podemos afirmar que mientras más lejos se encuentre el ángulo de deflexión, el nivel de los lóbulos de rejilla se incrementa.

## 4 Conclusiones

La metodología de diseñar aperturas para generación de imagen volumétrica fue evaluada exitosamente. En este caso con la distribución de elementos completos a lo largo de una superficie radiante, y gracias a las actuales tecnologías, este *array* puede ser construido de forma casi inmediata.

El tiempo de evolución, depende de las características de procesamiento del ordenador utilizado. Dicho tiempo puede variar en el mejor de los casos un par de semanas (utilizando ordenadores personales). Sin embargo en caso de utilizar *clusters* de ordenadores, los tiempos podrían reducirse drásticamente, puesto que la computación paralela hace que se puedan evaluar varios individuos simultáneamente.

## Agradecimientos

El presente proyecto está soportado por los proyectos: DPI-2010-19-376 del Ministerio de Hacienda Competitividad de España, y PIE-201150E031 del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

## Referencias

- [1] J-M. Bureau, W. Steichen, and G.Lepail, "A two dimensional transducer array for real-time 3D medical ultrasound imaging" in Proc. IEEE Ultrasound Symp., (Sendai, Miyagi, Japan),pp. 1065-1068, 1998.
- [2] B. Savord, R. Solomon, "Fully sampled matrix transducer for real time 3D ultrasonic imaging," Ultrasonics, 2003 IEEE Symposium on , vol.1, no., pp. 945-953 Vol.1, 5-8 Oct. 2003.
- [3] A. Austeng, S. Holm, P. K.Weber, N. Aakvaag, and K. Iranpour, "1D and 2D algorithmically optimized sparse arrays," in Proc. IEEE Ultrason. Symp., 1997, pp. 1683–1686.
- [4] A. Trucco, "Thinning and weighting of large planar arrays by simulated annealing," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 46, no. 2, pp. 347–355, 1999.
- [5] A. Austeng and S. Holm, "Sparse 2-D arrays for 3-D phased array imaging—Design methods," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 49, no. 8, pp. 1073–1086, 2002.

- [6] G. R. Lockwood, P.-C. Li, M. O'Donnell, and F. S. Foster, "Optimizing the radiation pattern of sparse periodic linear arrays," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 43, no. 1, pp. 7–14, 1996.
- [7] S. S. Brunke and G. R. Lockwood, "Broad-bandwidth radiation patterns of sparse periodic two-dimensional vernier arrays," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 44, no. 5, pp. 1101–1109, 1997.
- [8] O. Oralkan, A.S. Ergun, J.A. Johnson, M. Karaman, U. Demirci, K. Kaviani, T.H. Lee, and B.T. Khuri-Yakub, "Capacitive micromachined ultrasonic transducers: next-generation arrays for acoustic imaging?," *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, vol. 49, no. 11, pp. 1596- 1610, Nov 2002.
- [9] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-II," *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, 2002.
- [10] A. Ibáñez, M. Parrilla, and J. Villazón, "Simulation of ultrasonic continuous wave fields in homogeneous media with soft curved interfaces ", in *9th European Conference on NDT*, Berlin, Germany, sept 2006, p. Th.3.3.1
- [11] Boni, C.; Richard, M.; Barbarossa, S.; , "Optimal configuration and weighting of nonuniform arrays according to a maximum ISLR criterion," *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1994. ICASSP-94., 1994 IEEE International Conference on* , vol.v, no., pp.V/157-V/160 vol.5, 19-22 Apr 1994.