

# Aplicación de algoritmos genéticos y recocido simulado a la reconstrucción del diagrama de radiación de antenas

Jesús Ramón Pérez

Dpto. Ing. Comunicaciones. ETSIT  
Universidad de Cantabria  
e-mail : perezjr@unican.es

José Basterrechea

Dpto. Ing. Comunicaciones. ETSIT  
Universidad de Cantabria  
e-mail : basterrj@unican.es

**Abstract-** The performance of different local and global optimisers applied to antenna far-field pattern prediction from planar near-field information is presented. The method proposed replaces the antenna under test by equivalent magnetic surface currents whose components are computed from reference near-field data using an appropriate optimisation technique. From the optimised equivalent model, antenna far-fields can be reconstructed. The Nelder Mead downhill simplex algorithm, along with global optimisers such as genetic algorithms (GA) and simulated annealing (SA) were all investigated and compared. Numerical results demonstrate that hybrid GA outperform local optimisers, classical real and binary encoding GA and SA. Results of near-field to far-field transformation are also included and discussed.

## I. INTRODUCCIÓN

Los métodos teóricos existentes de transformación de campo cercano a campo lejano (CC-CL) han permitido que los sistemas de medida de antenas en campo cercano sobre geometría plana, cilíndrica ó esférica, se conviertan durante las últimas décadas en una alternativa fiable y atractiva a los métodos clásicos de medida de antenas en campo lejano. Básicamente, estas técnicas de medida convierten a campo lejano la energía radiada por la antena y medida en campo próximo, utilizando un método apropiado [1]-[2]. En este trabajo se parte de un modelo equivalente para la antena bajo prueba (ABP) en términos de densidades de corriente magnéticas, cuyos parámetros son sintonizados mediante algoritmos eficientes de optimización a partir de muestras de campo cercano sintetizadas sobre geometría plana. El método demuestra ser una alternativa útil para su aplicación en problemas de transformación CC-CL.

Para abordar el problema inverso propuesto se han utilizado diferentes técnicas de optimización local y global, con objeto de establecer una comparación objetiva y seleccionar el optimizador computacionalmente más eficiente. Como optimizador local se utiliza el algoritmo basado en *simplex* de Nelder Mead [3], de concepción meramente geométrica, sin necesidad de derivadas. El *simplex* se define como un objeto geométrico de  $n+1$  lados

en el espacio  $n$ -dimensional, donde  $n$  representa el número de incógnitas a resolver. El algoritmo genera iterativamente nuevos vértices del *simplex* que reemplazan a los existentes, y hacen que éste se comprima progresivamente entorno a un mínimo ó máximo en el espacio de búsqueda. La naturaleza del algoritmo hace que éste se muestre ineficiente cuando la función de coste a optimizar tiene múltiples óptimos locales que enmascaran a la solución global.

Como alternativa al optimizador local, se emplean diferentes esquemas basados en algoritmos genéticos (AG) de codificación binaria y real [4]. Estas dos variantes comparten el esquema clásico de los AG, utilizando selección por torneo, cruce uniforme (binarios) y convexo (reales), mutación sigilosa y elitismo. Valores entre 0.5 y 0.72 para la probabilidad de cruce y entre 0.05 y 0.15 para la probabilidad de mutación, completan la especificación de los AG. El uso conjunto de poblaciones pequeñas y probabilidades de mutación elevadas, superiores a 0.01 – 0.03 típicamente usadas, ofrece una vía alternativa para preservar la diversidad, evitar convergencias prematuras y, en definitiva, mejorar de forma significativa el rendimiento de los AG [5], reduciendo drásticamente el número de evaluaciones de la función de coste, y con ello el coste computacional. Si se condiciona el rendimiento del método de optimización a su coste computacional, una alternativa razonable son los AG híbridos (AG-H), que combinan el potencial de los AG convencionales para explorar el espacio de soluciones y detectar la región entorno al punto óptimo global, con la rapidez del optimizador local (Nelder Mead), para, una vez allí, descender ó ascender rápidamente hasta la solución óptima. Este menor coste computacional y la posibilidad de analizar ABPs de mayor tamaño, son algunas de las ventajas que presentan los AG-H. Por último, otra técnica de optimización global analizada, que como los AG imita un proceso natural, es el recocido simulado (RS ó SA) [6]. En este método, a partir de una solución inicial, se explora el espacio de soluciones alternando movimientos en la dirección del óptimo con otros que lo alejan para así barrer zonas del espacio aún no exploradas. La convergencia y robustez del método están ligadas al movimiento y perturbación del vector inicial, de acuerdo con el esquema de *temperaturas* utilizado [7], análogo al proceso de recocido de un metal en su búsqueda del equilibrio térmico.

La formulación del método, un estudio comparativo de las técnicas de optimización presentadas utilizando como problema canónico una antena de apertura, así como resultados numéricos que muestran las prestaciones del método al reconstruir el diagrama de radiación de una antena de bocina piramidal, serán objeto de estudio en las siguientes secciones.

## II. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Supongamos una ABP cuya apertura reside sobre una superficie plana, tal y como se muestra en la figura 1. La aplicación del segundo principio de equivalencia bajo ciertas restricciones, permite representar la radiación de la fuente original utilizando un modelo formado por densidades superficiales de corriente magnéticas equivalentes (CME), dispuestas sobre una superficie ficticia  $S_e$ , que contiene a la apertura de la antena [2], de acuerdo con (1).

$$\vec{E}(\vec{r}) = - \iint_{S_e} \vec{M}(\vec{r}') \times \nabla' g(\vec{r}, \vec{r}') ds' \quad (1)$$

Para el caso particular de medida sobre geometría plana, de acuerdo con el sistema de coordenadas propuesto en la figura 1, interesa conocer las componentes tangenciales de campo eléctrico  $E_x$  y  $E_y$ . Este hecho simplifica la formulación, obteniendo dos ecuaciones integrales desacopladas que ligan las componentes de las CME  $M_y$  y  $M_x$ , con las componentes tangenciales de campo  $E_x$  y  $E_y$ , respectivamente [2]. El objetivo se centra en recuperar aquel modelo equivalente, en términos de una aproximación de  $N$  pulsos de corriente 2D, que mejor aproxima la radiación de la fuente, de acuerdo con las muestras de referencia previamente sintetizadas ó medidas en  $K$  puntos discretos, distribuidos sobre un plano  $S_f$ . No obstante, análisis previos revelan que en la optimización de las CME influye la distribución de las muestras de campo cercano, hasta el punto de que si éstas se toman sobre cinco planos describiendo un paralelepípedo abierto enfrente de la apertura de la antena, la mejora en el diagrama recuperado de la fuente es apreciable sobre los lóbulos secundarios, fruto de la información adicional aportada por los planos laterales, superior e inferior [8].

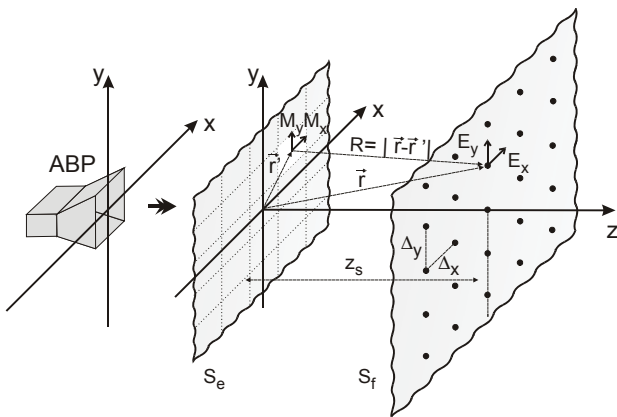


Fig. 1. Configuración geométrica del problema equivalente.

Para ejercer el control de la optimización de las CME, se utiliza una función de coste que mide la calidad de cada solución potencial, llámese vértice para el método de Nelder Mead, individuo de la población en los AG, ó simplemente vector solución en el RS. La función de coste, principal nexo de unión entre el problema físico y la técnica de optimización, influye directamente en el resultado obtenido, y debe elegirse de acuerdo con las características y naturaleza del problema electromagnético a resolver. Para tales efectos, la expresión (2) representa la función de coste a maximizar en los AG, y la variante expuesta en (3) resume la correspondiente función de coste a minimizar con Nelder Mead y SA.

$$C_{AG} = \sum_{k=1}^K \frac{1}{1 + |\vec{E}_k(cc) - \vec{E}_k(V)|^2} \quad (2)$$

$$C_{NM-SA} = K - \sum_{k=1}^K \frac{1}{1 + |\vec{E}_k(cc) - \vec{E}_k(V)|^2} \quad (3)$$

En las ecuaciones (2) y (3),  $V$  representa al vector con las componentes  $M_x$  y  $M_y$  de las CME a optimizar,  $\vec{E}_k(V)$  es el campo eléctrico radiado en cada punto de campo cercano  $k$ , por cada solución potencial  $V$ , y  $\vec{E}_k(cc)$  representa cada muestra de campo cercano utilizada como referencia. A partir del vector  $V$  resultante de la optimización, el diagrama de campo lejano puede recuperarse, para todo punto de la región  $z > 0$ , aplicando de nuevo (1), y con una precisión que depende de la técnica de resolución utilizada, del mallado de las CME del modelo y de las muestras de campo cercano suministradas como información de entrada.

## III. RESULTADOS

Con el objetivo de analizar la validez del método propuesto al utilizar las distintas técnicas de optimización introducidas con anterioridad, se realizaron varias simulaciones con diferentes ABP y excitaciones, obteniendo en todos los casos resultados concluyentes que se resumen en esta sección. A modo de ejemplo, supongamos como problema canónico representativo para comparar la totalidad de los métodos de optimización, el modelado teórico de la radiación de una antena de apertura sobre plano de masa, de dimensiones  $\lambda \times \lambda$ , e iluminada con el modo  $TE_{10}$ . Se utiliza un modelo equivalente para la fuente formado por  $N=4 \times 4$  parches de corriente 2D distribuidos sobre una superficie  $S_e$  de tamaño  $\lambda \times \lambda$ . Las componentes tangenciales del campo eléctrico radiado por la apertura fueron sintetizadas teóricamente en  $K=1801$  puntos, uniformemente espaciados  $\lambda/2$  sobre cinco planos [8]. Si se fija como criterio para establecer la comparación el coste computacional requerido para alcanzar un cierto error residual  $E$ , a partir del cual la incidencia sobre los campos radiados es despreciable, la tabla 1 resume el rendimiento de cada método. A la vista de estos resultados, y como era previsible, dada la naturaleza del problema, se puede concluir que el optimizador local Nelder Mead no alcanza el umbral impuesto a las técnicas de

optimización global, aunque los tiempos de CPU sean comparables a los del resto de métodos utilizados. Sin embargo, los AG-H reales  $[R]$  y, principalmente binarios  $[B]$ , fruto de la utilización conjunta de los AG y del optimizador local, superan ampliamente al resto de métodos investigados. Adicionalmente, puede observarse como los AG de codificación binaria son, desde el punto de vista computacional, más eficientes que sus homónimos reales, debido a que el espacio de búsqueda es mucho más pequeño al estar limitado por el número de bits utilizado para representar cada parámetro [9].

Tabla 1. Rendimiento de los distintos métodos de optimización al modelar la radiación de una antena de apertura. Simulaciones realizadas con procesador AMD a 1400 MHz.

Método	$E = C_{NM-SA}$	$E = K - C_{AG}$	CPU (sg)
Nelder Mead	$4.5 \times 10^{-4}$	-	560
AG real	-	$7 \times 10^{-5}$	688
AG binario			426
AG-H real $[R]$			375
AG-H binario $[B]$			158
RS	$7 \times 10^{-5}$		621

La interpretación gráfica de los resultados de las simulaciones resumidas en la tabla 1, se muestra en la figura 2. En este caso, para establecer un eje de abscisas unificado que permita comparar la evolución de todos los métodos, se toma como referencia el número de llamadas ó evaluaciones de la función de coste. Por simple inspección sobre la gráfica, podemos concluir que el método de Nelder Mead exhibe una convergencia inicial muy rápida, seguida de un estancamiento progresivo, efecto propio de la caída en el entorno de una solución local. Los AG clásicos, reales y binarios, tienen un comportamiento aceptable, y el curso de la evolución generacional hace pensar que se preserva la diversidad en la población, con ausencia de convergencia prematura. Los AG-H, real  $[R]$  y binario  $[B]$ , parten de sus homónimos clásicos y conmutan al optimizador local cuando la solución ya no es susceptible de experimentar una mejora significativa y ésta se encuentra próxima al punto óptimo esperado. Este efecto aparece en las gráficas en forma de transiciones bruscas en la evolución del error, que marcan el fin de los AG y el lanzamiento del optimizador local. La mejora obtenida con los AG-H es significativa, motivada por la rapidez con la que el optimizador local explora el espacio de soluciones, restringido prácticamente al entorno de la solución de partida facilitada por los AG. Para el problema inverso que nos ocupa, también se debe resaltar la manifiesta superioridad de los AG de codificación binaria sobre aquellos de codificación real, al restringir el espacio de soluciones, inherente a la codificación binaria de los parámetros; conclusión no extrapolable como norma a otras aplicaciones de modelado electromagnético. En el otro extremo se encuentra el recocido simulado, robusto en su proceso de búsqueda del óptimo global, pero que requiere un número excesivo de evaluaciones de la función de coste, hasta siete veces superior al de los AG-H binarios para alcanzar el mismo error residual.

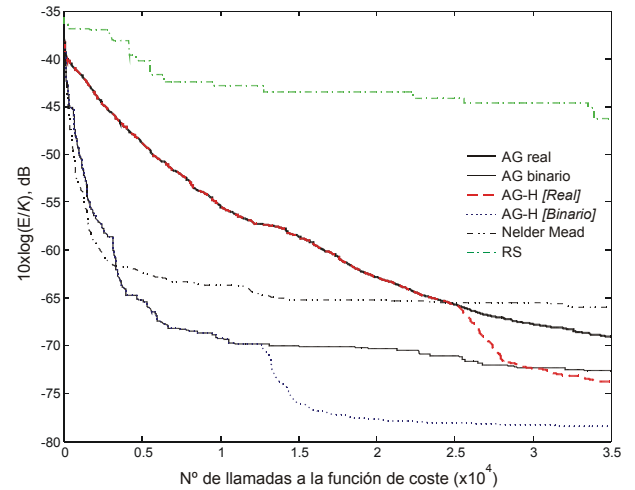


Fig. 2. Comparación de los métodos de optimización tomando como referencia el número de evaluaciones de la función de coste.

Una vez se ha demostrado con un problema patrón que las técnicas de optimización global, y en particular los AG-H, ofrecen el mejor rendimiento para su aplicación en el método de transformación CC-CL propuesto; se presentan a continuación resultados teóricos de transformación de campo para una antena de bocina piramidal con el máximo de radiación no dirigido a lo largo de su eje, y utilizando AG-H y RS como las herramientas de optimización del modelo equivalente de la ABP. Las dimensiones de la apertura de la bocina ( $a_1 \times b_1$ ) y guía de ondas ( $a \times b$ ), así como los ángulos de apertura  $\psi_e$  y  $\psi_h$ , son respectivamente:  $a_1 = 5\lambda$ ,  $b_1 = 4.235\lambda$ ,  $a = \lambda/2$ ,  $b = \lambda/4$ ,  $\psi_e = 35.3^\circ$  y  $\psi_h = 38.6^\circ$ . En este caso, las dimensiones de la antena hacen necesario utilizar un modelo equivalente de parches de corriente más denso para representar de forma adecuada las CME, y por lo tanto, al aumentar el número de incógnitas del problema, debe hacerse lo mismo con la población inicial utilizada para lanzar los AG-H, cuidando a su vez el punto de inserción del optimizador local. En definitiva, se utiliza un modelo equivalente para la fuente formado por  $N = 17 \times 17$  parches de corriente uniformemente distribuidos sobre la superficie  $S_e = 5\lambda \times 4.235\lambda$  que contiene a la apertura de la antena. Se consideran poblaciones de 200 y 500 individuos para los AG-H reales  $[R]$  y binarios  $[B]$ , respectivamente. El optimizador local basado en el método de Nelder Mead se lanza después de transcurridas 1000 y 500 generaciones de los AG reales  $[R]$  y binarios  $[B]$ , respectivamente. En lo referente a la técnica de RS, se utiliza un único vector que representa a una posible solución potencial con los valores de las 578 incógnitas a optimizar. El esquema utilizado para hacer evolucionar este vector [7], condicionará la precisión del resultado. En ambos casos, las componentes de campo cercano utilizadas como referencia en la optimización fueron sintetizadas teóricamente en  $K = 3169$  puntos,  $\lambda/2$  equiespaciadas sobre cinco planos.

En la figura 3 se muestran los resultados de la reconstrucción del diagrama de radiación obtenidos con los AG-H y RS. Aunque no de forma definitiva, el diagrama 3D recuperado permite concluir que las tres variantes utilizadas para optimizar las CME ofrecen resultados satisfactorios.

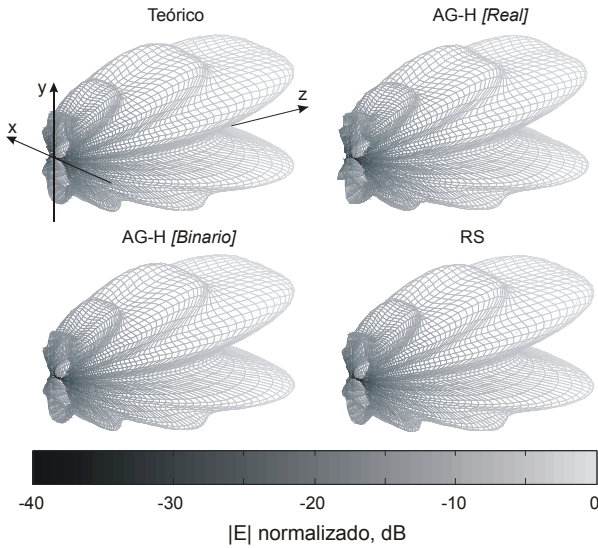
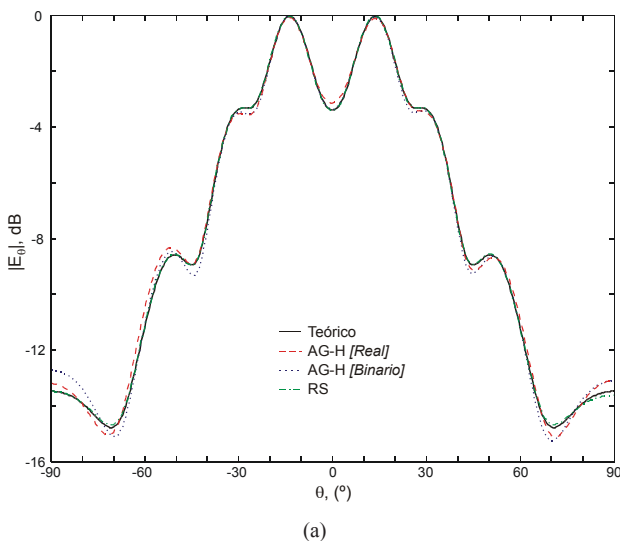


Fig. 3. Diagrama de radiación en 3D de la antena de bocina piramidal normalizado respecto al máximo, recuperado con distintos métodos globales de optimización.

Para mostrar con mayor grado de detalle las diferencias de precisión alcanzadas con los AG-H y el RS, la figura 4 muestra la amplitud y fase de la componente fundamental del diagrama de radiación recuperada para el plano E ( $\phi=90^\circ$ ). A la vista de los resultados, se puede concluir que los tres métodos de optimización global reproducen fielmente el diagrama de la antena. No obstante, los errores de ajuste más significativos, atribuidos, tal y como puede deducirse de la figura 4(a), a los AG-H de naturaleza binaria, pueden encontrar justificación en el número de bits utilizado para codificar la excitación de cada parche. Si el número de niveles de discretización es pequeño, el AG llega a la zona del óptimo global más rápidamente, pero puede descartar otras zonas próximas que representen a una solución potencialmente mejor, y a la que el optimizador local sea después incapaz de llegar. Aumentar el número de bits paliaría esta carencia, pero ralentizaría el proceso, de ahí la necesidad de buscar un compromiso que permita aceptar una solución como correcta con el menor coste computacional.



(a)

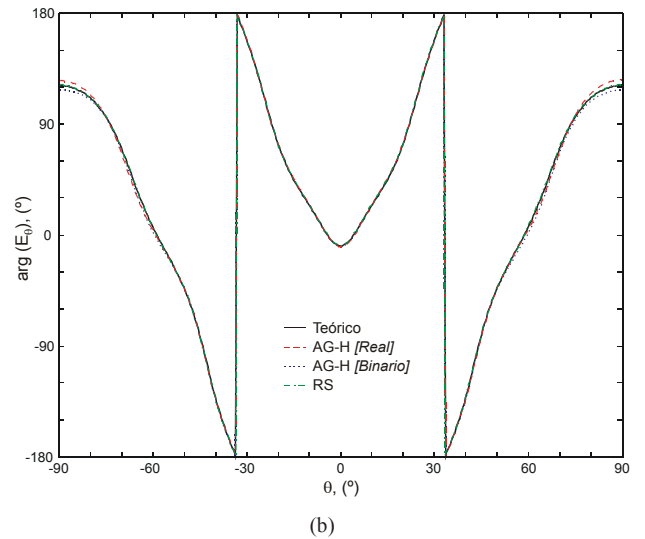


Fig. 4. Diagrama de radiación de la antena reconstruido. Resultados para el plano E, corte  $\phi=90^\circ$ . (a)  $|E_0|$ . (b)  $\text{Arg}(E_0)$ .

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un método de transformación CC-CL sobre geometría plana, aplicado a la caracterización de la radiación de antenas. Se ha analizado el rendimiento de distintas técnicas aplicadas a la optimización del modelo equivalente de fuente basado en CME. Descartados los métodos de optimización local por su falta de precisión, así como los AG convencionales por el elevado coste computacional, los mejores resultados, tal y como se ha mostrado, se obtienen con los AG-H binarios, sin descartar la técnica de RS, robusta en la búsqueda del máximo si se afinan adecuadamente sus parámetros.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la beca AP2001-1325 de la Secretaría de Estado de Educación y Universidades

#### REFERENCIAS

- [1] J.J.H. Wang, "An examination of the theory and practices of planar near-field measurement", IEEE Trans. On Ant. and Propag., Vol. 36, no.6, pp. 746-753, 1988
- [2] P. Petre and T.K Sarkar, "Planar near-field to far-field transformation using an equivalent magnetic current approach", IEEE Trans. On Ant. and Propag., Vol. 40, no.11, pp. 1348-1356, 1992
- [3] J.A. Nelder and R. Mead, "A simplex method for function minimization", Computer Journal, Vol. 7, no.4, pp.308-313, 1965
- [4] Y. Rahmat-Samii and E. Michielssen, "Electromagnetic optimization by genetic algorithms", New York: John Wiley & Sons, 1999
- [5] R.L. Haupt and S.E. Haupt, "Optimum population size and mutation rate for a simple real genetic algorithm that optimizes array factors", ACES Journal, Vol. 15, no.2, pp.94-102, 2000
- [6] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt and M.P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", Science, Vol. 220, no.4598, pp.671-680, 1983
- [7] A. Corana, M. Marchesi, C. Martini and S. Ridella, "Minimizing multimodal functions of continuous variables with the simulated annealing algorithm", ACM Trans. On Mathematical Software., Vol. 13, no.3, pp. 262-280, 1987
- [8] J.R. Pérez and J. Basterrechea, "Analysis of different GA strategies applied to antenna far-fields reconstruction from planar acquisition", Microw. and Optical Tech. Letters, Vol. 39, no.5, pp. 422-426, 2003
- [9] R.L. Haupt and Y.C. Chung, "Optimizing backscattering from arrays of perfectly conducting strips", IEEE Ant. and Propag. Magazine, Vol. 45, no.5, pp.26-33, 2003