



Algoritmos Genéticos: una solución para la optimización del Reflector Parabólico

Carlos Santos Rodríguez, Ana Teresa Aday Martínez

RESUMEN / ABSTRACT

Los Algoritmos Genéticos (AG) son una nueva herramienta matemática basada en los principios evolutivos y de selección natural, estos se han convertido en una alternativa novedosa para resolver con eficiencia problemas propios de diferentes tipos de antenas. El impacto de los AG sobre el campo del electromagnetismo llega hasta los sistemas de radiación parabólica. Este material explota la capacidad multiobjetivo de estos algoritmos en la optimización de la eficiencia de abertura de los reflectores parabólicos simples. Para ello se trabaja con los criterios de dos autores destacados en el estudio de las antenas. En la optimización se emplean la Herramienta Algoritmos Genéticos y Búsqueda Directa del *software* MATLAB 7.8.0 y el *software* para el análisis de reflectores GRASP9 SE.

Palabras claves: Optimización, AG, función de aptitud, reflector parabólico, eficiencia de abertura, directividad.

Genetic algorithms (GA) is a new mathematical tool based on the principles of evolution and natural selection, these have become a novel alternative for efficiently solving problems of different types of antennas. The impact of GA on the field of electromagnetism, reaches the parabolic radiation systems. This project exploits the multiobjective capacity of these algorithms in optimization of the aperture efficiency of simple parabolic reflectors. This project will work with the criteria of two prominent authors in the study of the antennas. In the optimization, the Genetic Algorithms and Direct Search tool of MATLAB 7.8.0 software and the software for the analysis of reflectors GRASP9 SE are used.

Key words: Optimization, GA, fitness function, parabolic reflector, aperture efficiency, directivity.

Genetic Algorithms: a solution for Parabolic Reflector's Optimization.

INTRODUCCION

Las antenas reflectoras, en una forma u otra, han sido utilizadas desde el descubrimiento de la propagación por onda electromagnética. Una de las más empleadas son las del tipo reflector parabólico, que en la actualidad se utilizan en los campos más variados. El fino arte de diseñarlas, analizarlas y optimizarlas constituye un gran reto para la ingeniería; para ello no existe una estrategia definida, pero sí se tienen referencias del uso de métodos analíticos y en otros casos numéricos. El empleo de estos métodos implica, en muchas ocasiones, demoras e inexactitud en la optimización. Por otra parte los AG pueden emplearse como una vía efectiva de solución a problemas donde los algoritmos tradicionales no son capaces de obtener una respuesta óptima.

A través de la historia, la naturaleza ha sido una fuente inagotable de inspiración para el desarrollo científico técnico, el cual a su vez ha contribuido a una mejor comprensión de la misma. Los AG están inspirados en la evolución natural, y la mayoría de los organismos evolucionan a través de dos procesos primarios: la selección natural y la reproducción. Los principios fundamentales de la selección natural fueron formulados por Darwin¹, antes del descubrimiento de los mecanismos genéticos. Los fundamentos básicos de los AG fueron propuestos por primera vez por Holland², investigador matemático de la Universidad de Michigan. Su aplicación se ha extendido en áreas como la robótica, el control de procesos, la planificación, el reconocimiento de patrones y del habla, entre otras, demostrando así su versatilidad. Recientemente, se han hecho muy populares en el campo de las aplicaciones electromagnéticas.

ALGORITMOS GENÉTICOS

A partir de los principios propuestos por Holland², surgieron un sinnúmero de definiciones provenientes de diferentes fuentes. Entre las más actuales y acertadas se encuentra la que presenta Randy L. Haupt³, la que plantea:

“El algoritmo genético (AG) es una técnica de optimización y búsqueda basada en los principios de genética y selección natural. Un AG permite que una población compuesta por muchos individuos evolucione bajo reglas de selección específicas hacia un estado que maximice su aptitud”.

Los AG trabajan sobre una población de individuos, cada uno de ellos representa una posible solución al problema que se desea resolver. Todo individuo tiene asociado una aptitud de acuerdo a la medida en que representa la solución potencial al problema a solucionar (en la naturaleza el equivalente sería una medida de la eficiencia del individuo en la lucha por los recursos). El funcionamiento genérico de un AG puede apreciarse en el pseudocódigo que se muestra en la Figura 1.

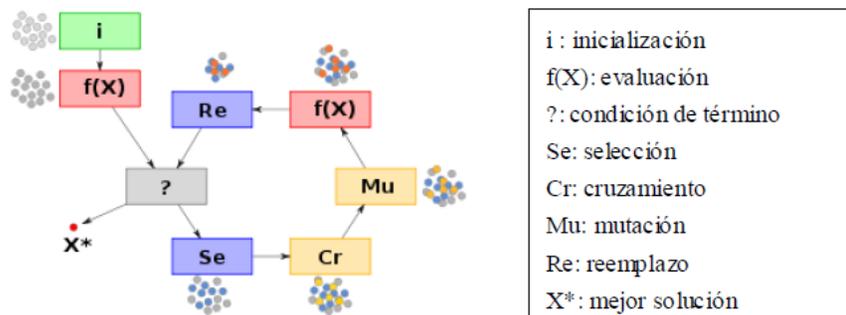


Figura 1. Pseudocódigo de un AG simple.

Una generación se obtiene a partir de la anterior por medio de los operadores de reproducción. Existen dos tipos: Cruce y Copia, el primero consiste en el emparejamiento entre dos individuos denominados padres y el segundo es el traspaso total del material genético de un individuo hacia la próxima generación. Otro operador muy importante en el proceso reproductivo es la mutación, que suele combinarse con el operador de cruce. Una vez generados los nuevos individuos se realiza la mutación con una cierta probabilidad P_m . Este proceso finaliza cuando se alcanza alguno de los criterios de parada fijados. Los más usuales suelen ser:

- Los mejores individuos de la población representan soluciones suficientemente buenas para el problema que se desea resolver.
- La población ha convergido. Cuando esto ocurre la media de aptitud de la población se aproxima a la aptitud del mejor individuo.
- Se ha alcanzado el número de generaciones máximo especificado.

OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO

En la cotidianidad raramente se experimenta el privilegio de optimizar una única y perfecta solución de una función de aptitud. Una de las bondades que brindan los AG es su capacidad para la resolución de problemas multiobjetivos. Estos son particularmente útiles para conocer las especificaciones de algunos sistemas cuyo diseño resulta complejo, conflictivo, y por lo general matemáticamente complicado.

El conjunto de soluciones a un problema de optimización multiobjetivo consiste en los vectores tales que todas sus componentes no puedan ser mejoradas simultáneamente. En fuentes bibliográficas referentes a los AG⁴, esto se define como el concepto de Optimización Pareto, y el conjunto de soluciones es conocido como el Conjunto Óptimo Pareto o frente del Pareto.

El primer intento de un algoritmo de optimización multiobjetivo fue el AG evaluador de vector (VEGA, por sus siglas en inglés), introducido por Schaffer⁵ en 1984. En vez de encontrar la totalidad del frente del Pareto, VEGA frecuentemente encontraba grupos de soluciones a lo largo del frente. El avance posterior más significativo en este campo fue el concepto de ordenamiento no dominado y compartimentación de aptitud, introducido por Goldberg⁶. El ordenamiento no dominado y la compartimentación

de aptitud son utilizados para juzgar a los miembros de la población por un parámetro simple de aptitud, relacionado con su dominio sobre otros miembros del espacio de solución, así como su proximidad a estos. Estos conceptos incentivaron una búsqueda que condujera a diferentes versiones de AG con ordenamiento no dominado. Este tipo de optimización ha sido aplicada a diversos problemas de diseño, incluyendo algunos en el campo del electromagnetismo.

Desde que se introdujo el AG con ordenamiento no dominado, se han implementado muchos AG multiobjetivos. Una técnica de optimización multiobjetivo, el Algoritmo Evolutivo de Pareto Sólido (SPEA, por sus siglas en inglés), desarrollado por Zitzler y Thiele⁷, se ha convertido en un algoritmo de particular interés debido a su simplicidad y efectividad. Así como los algoritmos con ordenamiento no dominado, el SPEA también evalúa los individuos por medio de un valor de aptitud único, al cual denominan "solidez"; sin embargo, esta solidez no está basada en los valores de aptitud de los individuos o la proximidad con otros miembros, sino únicamente en el dominio de unos miembros de la población sobre otros. Este algoritmo considera que un individuo A domina a otro B, cuando el valor de aptitud de A supera al de B. Los principios que rigen el funcionamiento de este algoritmo son muy similares a los empleados por el AG multiobjetivo implementado por la herramienta de MATLAB que se utilizó en la optimización propuesta en este material.

APLICACIÓN DE LOS AG EN LAS ANTENAS REFLECTORAS

Para el diseño de antenas reflectoras se ha logrado introducir el uso de los AG en pequeña medida. Las funciones de aptitud de este tipo de antenas tienden a un tiempo prolongado en su cómputo, comparado con otras como las de un arreglo lineal para fungir de alimentador. Sin embargo se han utilizado los AG para conformar el haz de un arreglo de alimentadores en malla⁸ y para encontrar la forma del haz óptima para dar cobertura a una zona geográfica específica con una antena reflectora satelital⁹.

Los AG han sido utilizados asimismo para minimizar el nivel de lóbulos laterales de un reflector curvo alimentado por una antena Yagi-Uda¹⁰. La función de aptitud desarrollada fue el Código Electromagnético Numérico (NEC, por sus siglas en inglés), y puede ser invocada desde MATLAB. La misma acepta varios parámetros de diseño de la antena Yagi-Uda mientras mantiene la antena reflectora constante.

Se tienen referencias del empleo de un AG para optimizar la ganancia y la polarización cruzada del patrón de un reflector doble Cassegrain desplazado¹¹. Otra idea para sintetizar la forma del haz de un reflector empleando AG, se basó en variar la forma del haz con el objetivo de producir un patrón con máxima ganancia sobre el territorio de Brasil¹². Igualmente han aparecido varios documentos con evidencia del uso de AG para optimizar arreglos reflectores de microcinta. Estos consisten en un parche de microcinta dispuesto de forma tal que produzca el patrón de dispersión deseado, debido a una fuente incidente como puede ser una antena bocina. Parámetros como el ancho de banda¹³ y el nivel de lóbulos laterales¹⁴ han sido optimizados.

REFLECTOR PARABÓLICO

El origen de la antena con reflector se remonta a 1888, en el laboratorio de Heinrich Hertz; este demostró experimentalmente la existencia de las ondas electromagnéticas que habían sido predichas por Maxwell. Desde entonces, las antenas con reflector parabólico han sido ampliamente aplicadas a diferentes sistemas radiotécnicos tales como: las comunicaciones, la radio localización y el sondeo espacial. Esto se debe a que permiten obtener características direccionales de haces muy estrechos y a la ventajosa relación entre sus propiedades técnicas y el costo de fabricación.

En la Tesis Doctoral de Gerardo M. Llizo¹⁵ se puede encontrar una definición bastante acertada del principio de funcionamiento de las antenas con reflector parabólico:

"La onda irradiada por el excitador incide sobre la superficie metálica del reflector, por lo que en la misma aparecen corrientes eléctricas superficiales inducidas. Dichas corrientes existen no solamente en la superficie del reflector dirigida hacia el excitador, sino también en la posterior o zona de sombra de la antena. El campo creado por la antena en cualquier punto circundante es el resultado de la superposición del campo incidente (del excitador) y el campo producido por la radiación secundaria de las corrientes inducidas en la superficie del reflector".

El análisis de este tipo de antena se realiza mediante la aproximación que proporcionan diferentes métodos generales (como la Óptica Geométrica, la Óptica Física y la Teoría Geométrica de la Difracción y sus variantes más avanzadas), conocidos como Métodos de Altas Frecuencias, unido al empleo de métodos específicos (Método de la Distribución de Campos en la Abertura, Método de la Distribución de las Corrientes Inducidas y Método del Paraboloide Equivalente); cuya combinación permite lograr la solución del problema interno de la antena, a partir de las cuales se determinan sus propiedades de radiación.

GEOMETRÍA DEL REFLECTOR PARABÓLICO

Un reflector parabólico se obtiene de la rotación de una función parabólica sobre su eje focal. La Figura 2 muestra la geometría de la parábola generadora de un reflector parabólico.

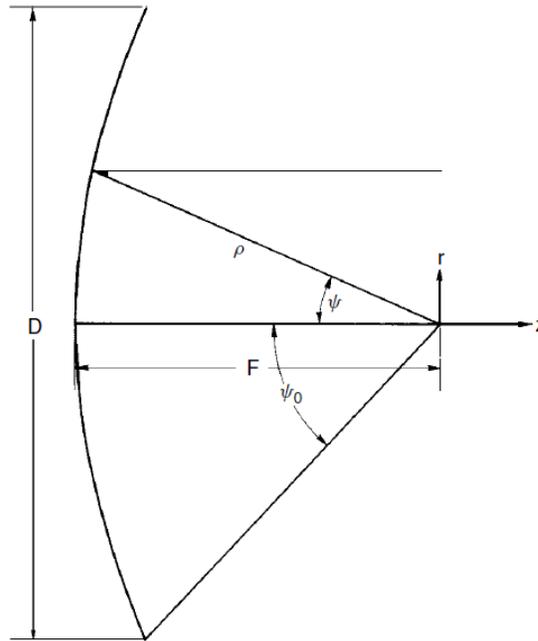


Figura 2. Geometría del reflector parabólico.

El reflector parabólico transforma la onda esférica radiada por el alimentador localizado en su foco, en una onda plana. Las ecuaciones para la superficie del reflector son:

$$\text{Coordenadas rectangulares: } r^2 = 4f(f + z) \quad (1)$$

$$\text{Coordenadas polares: } \rho = \frac{f}{\cos^2(\psi/2)} \quad (2)$$

Donde f es la longitud del foco, D el diámetro, ρ la distancia del foco a un punto de la superficie del reflector, y ψ el ángulo de la trayectoria desde el foco a cualquier punto de la superficie del reflector, medido con respecto al eje z . La profundidad del reflector desde el borde exterior hasta su centro es:

$$z_0 = D^2/16f \quad (3)$$

La relación foco/diámetro (f/D) permite analizar con más conveniencia el reflector. La mitad del ángulo subtendido del reflector ψ_0 , se relaciona con f/D mediante:

$$\psi_0 = 2 \tan^{-1} \frac{1}{4f/D} \quad (4)$$

Orientando el patrón del excitador fuera del centro del paraboloide de forma tal que la geometría del excitador quede fuera de la proyección de la abertura del paraboloide, se eliminan algunos de los problemas que presentan los reflectores de simetría circular,

entre ellos las pérdidas por bloqueo y el desacople. Sin embargo, como desventaja se tiene que la polarización cruzada aumenta.

La Figura 3 ilustra la geometría del reflector con excitación desplazada. Este reflector se obtiene a partir de una sección cónica de un paraboloides (Figura 3).

El paraboloides convierte las ondas esféricas radiadas desde el foco en una onda plana que se mueve en paralelo con su eje. Para reducir el desbordamiento, se dirige el alimentador hacia el centro del reflector, manteniendo el centro de fase del alimentador coincidente con el foco del reflector.

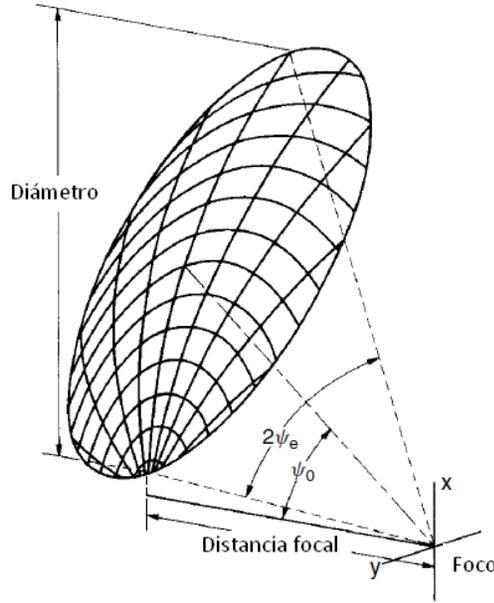


Figura 3. Geometría del reflector parabólico con excitación desplazada.

El ángulo desde el eje de la parábola hasta el centro del cono del reflector es ψ_0 , y $2\psi_e$ es el ángulo subtendido del reflector sobre esta línea central. Teniendo el diámetro D del plano de apertura y la altura H desde el centro del reflector hasta el eje de la parábola, se obtiene el desplazamiento del borde inferior:

$$D' = H - D/2. \quad (5)$$

A partir de estos parámetros se determina el ángulo desde el centro del cono hasta el eje del paraboloides:

$$\psi_0 = \arctan \frac{16fH}{16f^2 + D^2 - 4H^2} = \arctan \frac{2f(D+2D')}{4f^2 - D'(D+D')} \quad (6)$$

La mitad del ángulo del cono define el borde:

$$\psi_e = \arctan \frac{8fD}{16f^2 + 4H^2 - D^2} = \arctan \frac{2fD}{4f^2 + D'(D+D')} \quad (7)$$

DIRECTIVIDAD Y EFICIENCIA DE ABERTURA

En el diseño de antenas reflectoras, la directividad y la eficiencia de abertura constituyen parámetros significativos. Dos de los autores más prominentes en el estudio de las antenas, son Constantine A. Balanis y Thomas A. Milligan. A continuación se presentan las características más importantes del análisis que cada autor realiza sobre estos parámetros tan importantes en el desempeño de cualquier antena, además se presentan las correspondientes ecuaciones.

- **Estudio realizado por Balanis sobre la directividad y le eficiencia de abertura:**

La directividad y la eficiencia de abertura presentan una estrecha dependencia del patrón de alimentación primario $G_f(\theta', \phi')$ y la razón foco/diámetro (f/d) o el ángulo $2\theta_0$ del reflector. Para simplificar el análisis, se asume que el patrón de alimentación $G_f(\theta', \phi')$ es circularmente simétrico (no una función de ϕ') y que $G_f(\theta') = 0$ para $\theta' > 90^\circ$.

En sus estudios, Balanis¹⁶ demostró que la directividad de la antena en la dirección frontal puede escribirse mediante la ecuación:

$$D_0 = \frac{16\pi^2}{\lambda^2} f^2 \left| \int_0^{\theta_0} \sqrt{G_f(\theta')} \tan\left(\frac{\theta'}{2}\right) d\theta' \right|^2 \quad (8)$$

La distancia focal está relacionada con el ángulo subtendido y el diámetro de abertura d por:

$$f = \left(\frac{d}{4}\right) \cot\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \quad (9)$$

Entonces (8) se convierte en:

$$D_0 = \left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)^2 \left\{ \cot^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \left| \int_0^{\theta_0} \sqrt{G_f(\theta')} \tan\left(\frac{\theta'}{2}\right) d\theta' \right|^2 \right\} \quad (10)$$

El factor $(\pi d/\lambda)^2$ es la directividad de una abertura de fase constante iluminada uniformemente; la parte restante constituye la eficiencia de abertura definida como:

$$\epsilon_{ap} = \cot^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \left| \int_0^{\theta_0} \sqrt{G_f(\theta')} \tan\left(\frac{\theta'}{2}\right) d\theta' \right|^2 \quad (11)$$

Se puede notar, examinando (11), que la eficiencia de abertura es una función del ángulo subtendido (θ_0) y del patrón de alimentación $G_f(\theta')$ del reflector. Para facilitar el análisis, se suelen asumir sistemas de alimentación con patrones simétricos, centros de fase alineados, componentes de campo sin polarización cruzada, ausencia de bloqueo y sin errores aleatorios en la superficie. Cuando se asumen estas condiciones, los dos factores principales que contribuyen a la eficiencia de abertura son la eficiencia de desbordamiento (fracción de la potencia total radiada por el alimentador que se desborda) y la eficiencia de iluminación (uniformidad de la distribución de amplitud del patrón de alimentación sobre la superficie del reflector). A causa de que estas pérdidas dependen principalmente del patrón de alimentación, debe asumirse un compromiso entre ellas. Se pueden obtener eficiencias de desbordamiento muy altas mediante patrones de haces estrechos con lóbulos secundarios pequeños a expensas de una eficiencia de iluminación muy baja. Los valores más elevados de eficiencia de abertura están en el orden del 82-83%.

- **Estudio realizado por Milligan sobre la directividad y le eficiencia de abertura:**

Para Milligan¹⁷, la directividad de las antenas reflectoras se define como:

$$directividad = 10 \log \left[\left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 (D_r^2 - D_b^2) \right] + SPL(dB) + ATL(dB) + PEL(dB) + XOL(dB) \quad (12)$$

En la expresión, D_r es el diámetro del reflector y D_b es el diámetro de la obstrucción causada por el alimentador. Los términos expresados en dB corresponden a las eficiencias de desbordamiento (en inglés *spillover*), de iluminación (en inglés *taper*), de errores de fase y de polarización. Cada una de estas eficiencias se considera pérdidas. De igual manera que en el caso precedente, para hacer más simple el análisis se asume el alimentador con las mismas características, y en consecuencia las eficiencias de desbordamiento e iluminación pasan a ser los factores de más peso.

Con el objetivo de realizar una compensación entre el desbordamiento y la iluminación, primeramente se debe establecer una tendencia del patrón de excitación. Para ello se usa el patrón aproximado $\cos^{2N}(\psi/2)$. Despreciando cualquier bloqueo central, se halla la eficiencia de desbordamiento y la disminución de amplitud:

$$SPL = 1 - u^{2(N+1)} \quad (13)$$

$$ATL = \frac{4(N+1)(1-u^N)^2}{N^2[1-u^{2(N+1)}]} \cot^2 \frac{\psi_0}{2} \quad (14)$$

En las que $u = \cos(\psi_0/2)$ y $N = taper(dB)/20 \log(anchodelhaz_{taper(dB)}/4)$.

Se combinan las ecuaciones (13) y (14), y se traza su combinación para encontrar el ancho de haz para mínima pérdida. Con haces estrechos, se escapa poca potencia de excitación fuera del borde del reflector, pero el reflector no se ilumina de forma adecuada o sobre el mismo pueden incidir, al mismo tiempo, el lóbulo principal y uno o más lóbulos secundarios. Aumentando el ancho del haz mejora la iluminación, pero aumenta el desbordamiento. Los picos de eficiencia ocurren cuando el ángulo subtendido del reflector coincide aproximadamente con el ancho del haz de excitación de 10dB, y para un reflector con relación foco/diámetro de 0.5, está en 79.56%. Pequeños cambios en el ancho del haz cerca de los picos no tienen ningún efecto práctico sobre la ganancia del reflector.

APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DEL AG MULTI OBJETIVO

Para cumplir con el propósito de optimizar la eficiencia de apertura de la antena con reflector parabólico, se utilizó la Herramienta Algoritmos Genéticos y Búsqueda Directa del *software* MATLAB 7.8.0 sobre una PC *Genuine Intel(R) Centrino Duo CPU* T2250 a 1.73GHz. Se le prestó especial atención al método utilizado por la herramienta, la cual trabaja siempre minimizando, por lo que las funciones de aptitud del proceso de optimización, utilizarán el mecanismo inverso para lograr maximizar la eficiencia.

Como se explicó en secciones anteriores, cuando se asume un conjunto de condiciones para el sistema de alimentación en análisis de este tipo de antena, los dos factores de mayor peso en la eficiencia de apertura son el desbordamiento y la iluminación de la superficie reflectora. En el diseño de la antena parabólica resulta de gran importancia llegar a un compromiso acertado entre estos parámetros, debido a que con haces de alimentación estrechos se escapa poca potencia de excitación fuera del borde del reflector, pero el reflector no se ilumina completamente. De igual manera, aumentando el ancho del haz mejora la iluminación, pero aumenta el desborde.

A partir de esta característica, se decidió la utilización de una herramienta que fuera capaz de lograr un consenso entre las eficiencias de desbordamiento y de iluminación. El AG Multiobjetivo es precisamente una herramienta que permite realizar esta función, encontrando numéricamente, en un tiempo significativamente corto y con alta precisión, un valor donde se maximicen ambas eficiencias por medio de parámetros de entrada paralelos.

En secciones anteriores se describió la metodología de análisis para el tema de la directividad y la eficiencia de apertura de los autores Balanis y Milligan. Para obtener valores óptimos en la eficiencia de apertura, se diseñaron funciones de aptitud que trabajaran con las ecuaciones propias de cada autor y se realizaron las corridas correspondientes.

Matemáticamente la eficiencia de apertura de la antena con reflector parabólico depende de la geometría del reflector y el alimentador, las variables independientes del proceso de optimización se escogieron en consecuencia con ello. Para describir la geometría del reflector se utilizó la relación foco/diámetro, y para el alimentador se verificó las particularidades de cada autor. Para el caso de Balanis se designó como variable independiente el factor n del alimentador tipo *cosn* que utiliza en su análisis; mientras que para Milligan se escogió como variable independiente el ancho del haz de 10dB, del alimentador tipo Haz Gaussiano que emplea su metodología de análisis. Para más detalles sobre los alimentadores mencionados, se pueden consultar las bibliografías de cada autor.

En las Tablas 1 y 2 se pueden observar los resultados correspondientes a cinco de las mejores corridas en orden ascendente, seleccionadas a partir del punto en el Frente del Pareto donde las eficiencias se asemejan más y son mayores. Estos valores se obtuvieron mediante un estudio estadístico variando parámetros como: tamaño de la población, función de creación, selección, reproducción, mutación, cruce y migración.

Tabla 1. Corridas con mejores valores de aptitud (Balanis).

Corrida	Relación f/d	Factor n del alimentador	Número de iteraciones	Eficiencia de desbordamiento	Eficiencia de iluminación
41	0.397	2.286	114	0.937	0.882
69	0.37	2	102	0.948	0.872
42	0.385	2.02	275	0.934	0.887
59	0.379	2	150	0.939	0.883
62	0.382	2	112	0.936	0.886

Tabla 2. Corridas con mejores valores de aptitud (Milligan).

Corrida	Relación f/d	Ángulo del ancho del haz (grados)	Número de iteraciones	Eficiencia de desbordamiento	Eficiencia de iluminación
11	0.582	91.689	107	0.921	0.869
32	0.581	94	120	0.911	0.879
8	0.6	91.45	142	0.91	0.88
18	0.6	90.707	156	0.914	0.877
10	0.596	91.574	120	0.913	0.878

Para el primer caso (Balanis) se obtuvo la mejor corrida (62) con un tamaño de la población de 80 individuos, una función de selección por torneo y tamaño del torneo de 6 competidores, fracción de cruce de 0.95, función de cruce 1 punto de cruce y mutación uniforme. El reflector tendrá una relación foco/diámetro de 0.382 y un factor n del alimentador de 2, para eficiencias de desbordamiento y de iluminación de 0.936 y 0.886 respectivamente, lo que da como resultado una eficiencia de abertura de 82.93%, muy cercano al límite teórico, propuesto por el autor. La Figura 4 muestra el Frente de Pareto para esta corrida.

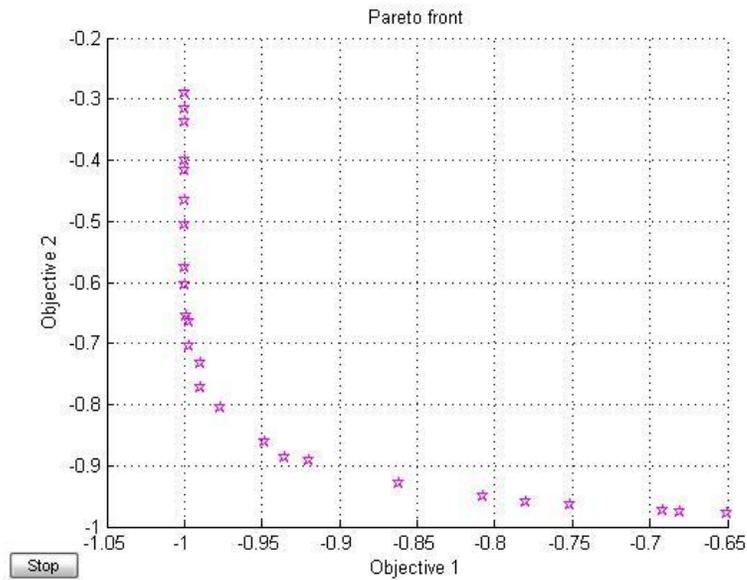


Figura 4. Frente del Pareto para Corrida #62 (Balanis).

Para el segundo caso (Milligan) se obtuvo la mejor corrida (10) con un tamaño de la población de 115 individuos, una función de selección por torneo y tamaño del torneo de 5 competidores, fracción de cruce de 0.65, función de cruce intermedia y mutación uniforme. Aquí las eficiencias de desbordamiento y de iluminación fueron de 0.913 y 0.878 respectivamente; estas se obtuvieron con una relación foco/diámetro de 0.596 y con un ángulo del ancho del haz de 10 dB igual a 91.574° . Con esto se demuestra que los picos de eficiencia ocurren cuando el ángulo subtendido del reflector coincide aproximadamente con el ancho del haz de excitación de 10dB. Se obtiene además una eficiencia de apertura de un 80.16%. La Figura 5 muestra el Frente de Pareto para esta corrida.

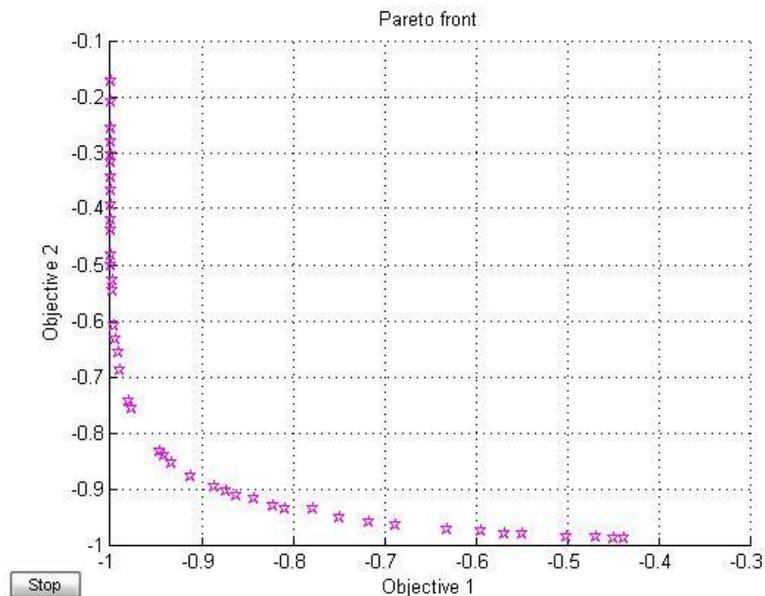


Figura 5. Frente del Pareto para Corrida #10 (Milligan).

En las Figuras 4 y 5 el objetivo número 1 corresponde a la eficiencia de desbordamiento y el 2 a la de iluminación, también se puede observar como si una de las eficiencias se hace mayor, con la otra ocurre lo contrario.

SIMULACIÓN DEL REFLECTOR

Se simuló un reflector parabólico para la banda Ka con frecuencia de operación de 30GHz y cuyo diámetro no excediera los 500mm, utilizando un diseño con excitación desplazada para evitar los problemas de los reflectores con simetría circular antes mencionados. El diseño puede ser utilizado para comunicaciones satelitales en la referida banda de frecuencia. Para este propósito se utilizó el *software* de análisis de reflectores GRASP9 en su versión estudiantil (Student Edition), que se puede encontrar de forma gratuita en Internet. Para el análisis no se cuenta con la versión completa, pero la versión estudiantil cubre las necesidades de esta sección del material. Este *software* se escogió debido a su recomendación en la bibliografía consultada^{15,17}. Se utilizan de igual forma los resultados obtenidos en las mejores corridas realizadas, para uno y otro caso.

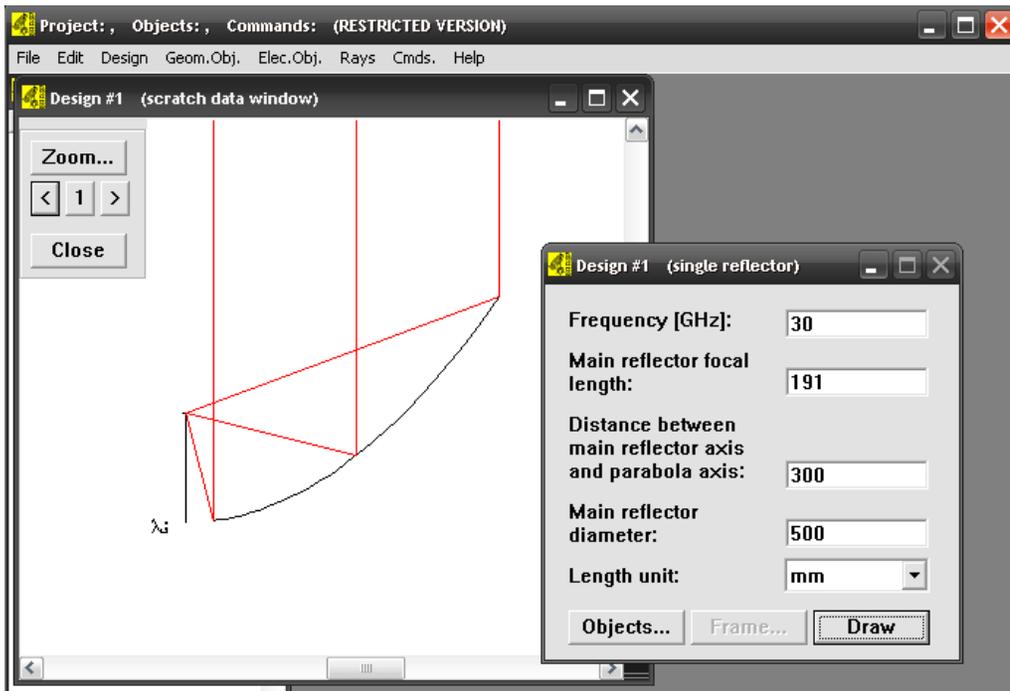
GRASP9 (*General Reflector Antenna Software Package*, versión 9), es una potente herramienta de análisis de reflectores, diseñada por Ingenieros Consultantes de la compañía productora de antenas TICRA (electromagnetic radiation), radicada en Copenhague, Dinamarca.

El *software* constituye una herramienta muy versátil, es capaz de trabajar con varias configuraciones de antenas utilizadas para aplicaciones satelitales. Este puede calcular la radiación electromagnética de sistemas que contienen múltiples reflectores y arreglos de alimentadores. Los métodos de análisis que tiene implementado GRASP9 son Óptica Física, Teoría Física de la Difracción, Óptica Geométrica combinada con Teoría Geométrica de la Difracción y Teoría Geométrica de la Difracción para reflectores múltiples.

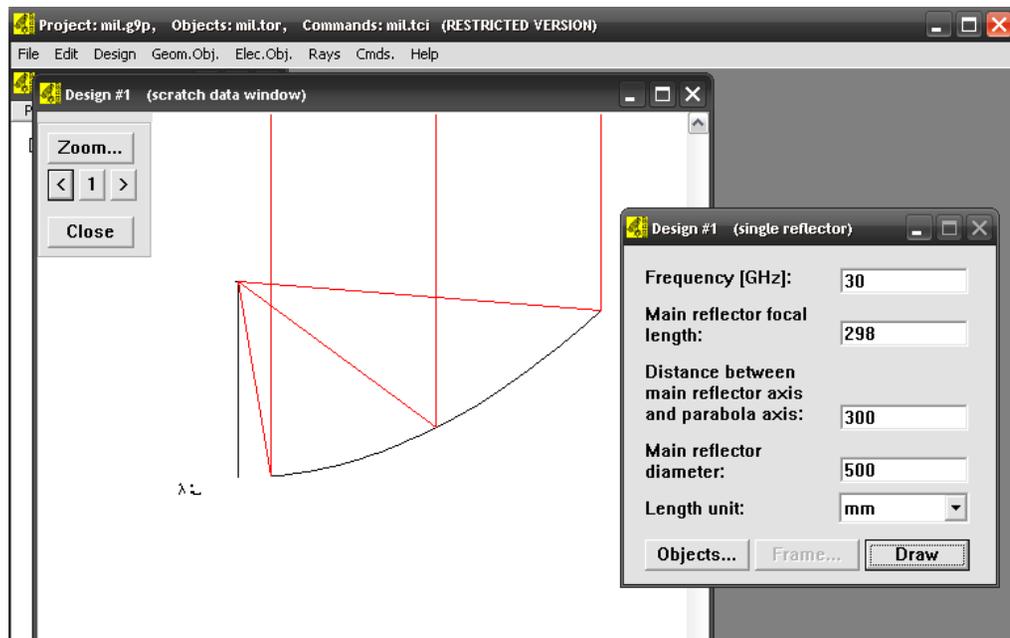
Para el uso del *software* GRASP9 se necesita definir los parámetros siguientes:

- Frecuencia de trabajo: 30GHz.
- Distancia focal del reflector principal: 191mm (500mm*0.382 en el primer caso) y 298mm (500mm*0.596 en el segundo caso).
- Distancia entre el eje del reflector principal y el eje de la parábola: 300mm (escogida por recomendación del *software*).
- Diámetro del reflector principal: 500mm.

La Figura 6 muestra los parámetros de diseño y una vista del plano de desplazamiento del reflector para cada caso.



(a)



(b)

Figura 6. Parámetros de diseño y vista del plano de desplazamiento (a) Balanis, (b) Milligan.

La geometría de los reflectores resultantes de introducir estos parámetros en el *software* se observa en la Figura 7:

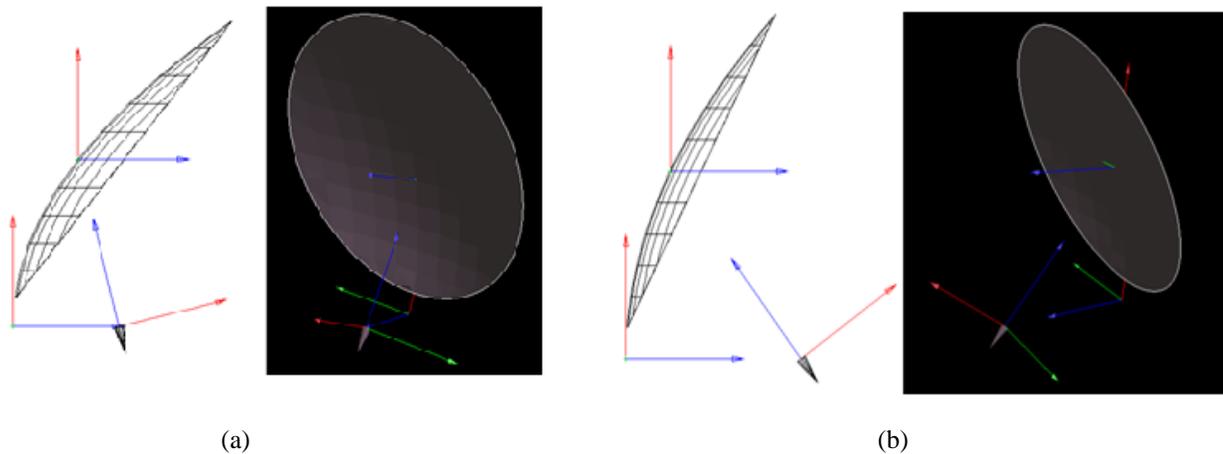


Figura 7. Geometría del reflector (a) Balanis, (b) Milligan.

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CON GRASP9 (SE)

Para obtener el patrón de radiación de la antena y analizar sus características se introducen los parámetros del alimentador. En el primer caso se necesita realizar una aproximación del alimentador que asume en su estudio Balanis (*cosn*) al empleado en el *software* el Haz Gaussiano, obteniéndose:

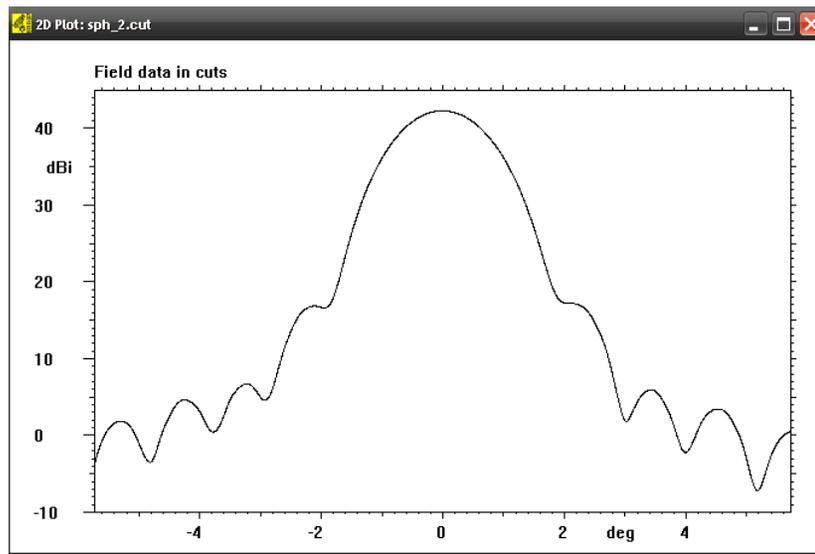


Figura 8. Campo co-polar en el plano E.

Bajo estas condiciones solo se analizará la directividad máxima. La misma tiene un valor de 42.75dBi aproximadamente.

En el caso de las simulaciones para el reflector resultante de la metodología de análisis propuesta por Milligan, no resulta necesario realizar aproximación alguna con el alimentador, obteniéndose:

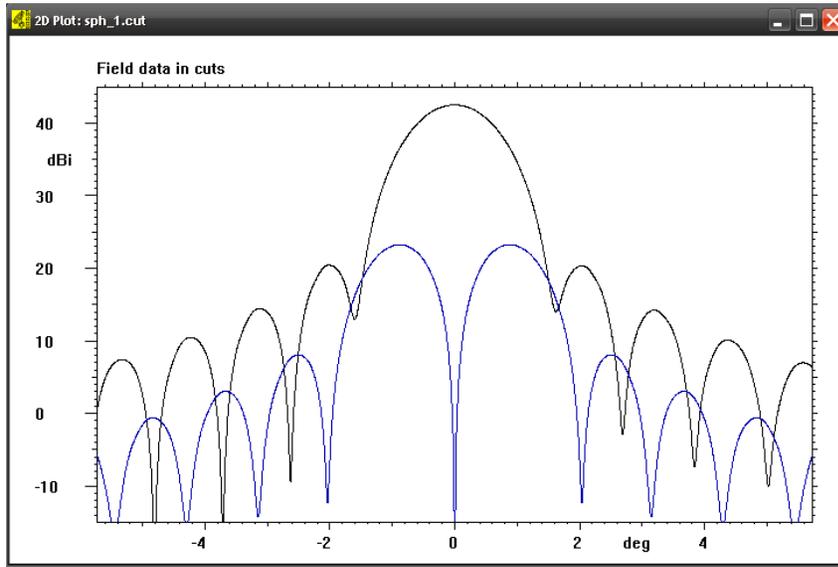


Figura 9. Campos co-polar (negro) y cross-polar (azul) en los planos E y H respectivamente.

El reflector tiene una directividad de 42.5dBi, y el nivel máximo del primer lóbulo lateral es de 20.5dBi, por lo que está a -22dBi con respecto al lóbulo principal. El nivel máximo de polarización cruzada en el plano H es de 23dBi (-19.5dBi con respecto al lóbulo principal).

Realizando una comparación de estos resultados con las especificaciones técnicas de una antena comercial con prestaciones óptimas, de la compañía *Skyware Global*¹⁸, se verifica el correcto desempeño de las antenas diseñadas. En este análisis se debe tener en cuenta que la antena comercial utilizada como referencia trabaja en la misma banda de frecuencia que las diseñadas, sin embargo, los valores no fueron medidos exactamente en 30GHz. Además el reflector tiene un diámetro de 690mm, es decir, 190mm más que los reflectores utilizados en los diseños. Estas atenuantes no impiden comparar los valores obtenidos con los de este sistema. La Figura 10 expone algunas de las características de radiación de la antena empleada como punto de comparación.

69cm Ka-Band RxTx Antenna System		
RF Performance		
Operating Frequency	TX	29.50 - 30.00 GHz
	RX	19.20 - 20.20 GHz
Polarization	TX	Circular, RH or LH
	RX	Circular, LH or RH
Gain ¹ ±0.3 dB	TX	44.8 dBi @ 29.75 GHz
	RX	41.2 dBi @ 19.70 GHz
3 dB Beamwidth	TX	0.7° @ 29.75 GHz
	RX	1.1° @ 19.70 GHz
Sidelobe Envelope (Tx, Co-Pol dBi)		
	100 λ/D < θ < 20°	29 - 25 Log θ dBi
	20° < θ < 26.3°	-3.5 dBi
	26.3° < θ < 48°	32 - 25 Log θ dBi
	48° < θ < 180°	-10 dBi (Typical)
Antenna Cross-Polarization (within 1dB b/w)		>22 dB

Figura 10. Parámetros de trabajo del reflector *Skyware Global* de 690mm.

Si se observan los valores resaltados, se puede notar la similitud con los resultados obtenidos en la simulación.

CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que con el empleo de la Herramienta Algoritmos Genéticos y Búsqueda Directa del *software* MATLAB 7.8.0 se logra la optimización multiobjetivo de la eficiencia de apertura del reflector parabólico simple. A partir de los resultados obtenidos en la optimización de la eficiencia de apertura, se simuló un reflector simple para 30GHz, con excitación desplazada. La simulación en el *software* GRASP9 se realizó para los reflectores resultantes de haber programado funciones de aptitud que trabajaran de forma independiente con las metodologías de análisis propuestas por Balanis y Milligan, en ambos casos con resultados positivos y similares, producto de haber obtenido valores de eficiencias de apertura cercanos a los límites teóricos propuestos por ellos. De igual manera, la investigación realizada arrojó que en los centros, organismos e instituciones del país, donde se ha realizado de forma continua el estudio y desarrollo de los sistemas de radiación parabólica, no han sido utilizados los AG. Estos no garantizan la solución óptima del problema, sin embargo, este documento evidencia que es posible hallar soluciones satisfactorias, en un tiempo y con una exactitud superiores a otros algoritmos de optimización.

REFERENCIAS

1. DARWIN, C.: *The origin of the species*. Londres, Inglaterra 1859.
2. HOLLAND, J. H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ed. MIT Press. Michigan, Estados Unidos 1975.
3. HAUPT, R. L., HAUPT, S. E.: *Practical Genetic Algorithms*. pp. 22. Ed. John Wiley. Hoboken, New Jersey 2004.
4. MAN, K. F., TANG, K. S., KWONG, S.: "Genetic Algorithms: Concepts and Applications" en *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. IEEE, 1996.

5. **SCHAFTER, J. D.:** *Multiple Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms*, Vanderbilt University, Estados Unidos 1984.
6. **GOLDBERG, D. E.:** *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Ed. MA: Addison-Wesley. New York, Estados Unidos 1989.
7. **ZITZLER, E., THIELE, L.:** *An Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization: The Strength Pareto Approach*, Instituto Federal Suizo de Tecnología, Zurich 1998.
8. **SHIMIZU, M.:** "Pattern tuning of defocus array-fed reflector antennas" en *Proc IEEE AP-S Symp*, Vol. 4, pp. 2070-2073. IEEE, 1998.
9. **VALL-LLOSSERA, M., RIUS, J. M., RIUS, N., CADAMA, A.:** *Design of single-shaped reflector antennas for synthesis of shaped contour beams using genetic algorithms*. pp. 358-361. Ed. Microw. Opt. Technol. 2000.
10. **LU, Y., CAI, X., GAO, Z.:** "Optimal design of special corner reflector antennas by the real-coded genetic algorithm" en *Proc. Asia-Pacific Microwave Conf.* pp. 1457-1460. IEEE, 2000.
11. **BARKESHLI, K., MAZLUMI, F., AZADEGAN, R.:** "The synthesis of offset dual reflector antennas by genetic algorithms" en *Proc IEEE AP-S Symp*, Vol. 1, pp. 670-673. IEEE, 2002.
12. **AVILA, S. L., CARPES, W. P., VASCONCELOS, J. A.:** "Optimization of an offset reflector antennas using genetic algorithms" en *IEEE Trans. Magn*, Vol. 2, pp. 1256-1259. IEEE, 2004.
13. **KURUP, D. G., HIMDI, M., RYDBERG, A.:** *Design of an unequally spaced reflectarray*. pp. 33-35. Ed Anten. Wireless Propag. Lett. 2003.
14. **ZICHT, R. E., MUSSETTA, M., PIRINOLI, P., OREFICE, M.:** "Frequency response of a new genetically optimized microstrip reflectarray" en *Proc IEEE AP-S Symp*, Vol. 1, pp. 173-176. IEEE, 2003.
15. **LLIZO, G. M. G.:** Aumento de la efectividad de iluminación en Antenas de Doble Reflector, Tesis de Doctorado, Centro de Post Grado "Adriana Corcho" MININT, La Habana, Cuba, 2008.
16. **BALANIS, C. A.:** *Antenna Theory, Analysis and Design*. 3^{era} ed., Ed. John Wiley. New Jersey, Estados Unidos 2005.
17. **MILLIGAN, T. A.:** *Modern Antenna Design*. 2^{da} ed., Ed. John Wiley. New Jersey, Estados Unidos 2005.
18. *69cm RXTX Ka Band Antenna System Specifications*, Skyware Global, 2011.

AUTORES

Carlos Santos Rodríguez, Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Instituto de Meteorología INSMET, Loma de Casablanca, La Habana, Cuba.

e-mail: carlos.santos@insmet.cu

Ana Teresa Aday Martínez, Ingeniera en Telecomunicaciones y Electrónica, Empresa de Generación Distribuida de Ciudad Habana GEDICH, UNE, Av. del Puerto, La Habana, Cuba.

e-mail: ana@gedich.une.cu