



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE  
TELECOMUNICACIÓN DE MADRID

PROYECTO FIN DE CARRERA

DISEÑO DE REFLECTARRAYS IMPRESOS  
DE BANDA ANCHA

-RESUMEN-

**Autor:** José Agustín Zornoza Ramírez

**Nº. de colegiado:** 9536

**Tutor:** José Antonio Encinar Garcinuño

**Lugar de realización:**

Departamento E.T.C.

E.T.S.I. de Telecomunicación, U.P.M.

**Fecha de lectura:** 7 de Octubre de 1999

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	2
2. ESTUDIO EN BANDA ESTRECHA .....	3
2.1. Distribución de fase requerida .....	3
2.2. Estructuras periódicas planas infinitas.....	4
2.3. Diseño de reflectarrays .....	5
2.3.1. Metodología de diseño del plano reflector.....	5
2.3.2. Parámetros característicos de un reflectarray .....	6
2.4. Programas empleados y desarrollados .....	7
2.5. Estudio de reflectarrays. Diseños realizados .....	7
2.5.1. Características deseables en las estructuras periódicas.....	7
2.5.2. Distribución de los parches en la superficie reflectora .....	8
2.5.3. Validación del método .....	9
2.5.4. Diseños realizados .....	9
2.5.4.1. Reflectarray circular de 41.2 cm. de diámetro.....	9
2.5.4.2. Reflectarray elíptico de eje mayor 1.7 m.....	10
3. ESTUDIO EN BANDA ANCHA.....	11
3.1. Desarrollo teórico .....	11
3.2. Programas desarrollados .....	12
3.3. Resultados: diseños optimizados .....	12
3.3.1. Reflectarray circular de 41.2 cm. de diámetro.....	13
3.3.2. Reflectarray elíptico de eje mayor 1.7 m.....	14
4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN .....	14
4.1. Conclusiones.....	14
4.2. Líneas futuras de investigación.....	14
5. REFERENCIAS.....	14
6. PUBLICACIONES RELACIONADAS.....	15
6.1. Internacionales .....	15
6.2. Nacionales.....	15

## 1. INTRODUCCIÓN

Una antena reflectarray o reflectarray propiamente dicho, está constituido por un alimentador y un reflector. Dicho simplemente de este modo, la novedad en este nuevo tipo de antenas no es tal ya que las antenas parabólicas se constituyen con los mismos elementos. La característica principal e innovadora de los reflectarrays radica en el reflector, el cual está formado por un array de elementos radiantes (a diferencia de los reflectores metálicos parabólicos) [1].

Por su propia definición, las antenas reflectarrays combinan las mejores características de los reflectores y los arrays. Por un lado la alimentación de cada uno de los elementos radiantes que forman el array es llevada a cabo con un alimentador y no con líneas de transmisión convencionales (alimentación empleada en los arrays de fase). De esta forma evitamos la complejidad de la red de alimentación que por otro lado podría introducir elevadas pérdidas y desplazamientos de fase. Por otro lado con la tecnología impresa empleada actualmente en la realización de los elementos radiantes, el reflector es una superficie plana (dos dimensiones) frente a la superficie parabólica (tres dimensiones) de los paraboloides. Gracias a esto, se reduce enormemente la complejidad mecánica y el volumen de la antena.

La base del funcionamiento de las antenas reflectarrays radica en que cada uno de los elementos del array que forman el reflector deben rerradiar la energía proveniente de la bocina alimentadora con un desfase que se ajuste de forma apropiada para que el haz del campo reflejado quede enfocado en una determinada dirección.

Actualmente, los reflectarrays impresos [2] están llegando a ser una tecnología madura en aplicaciones tales como antenas receptoras de televisión, donde pueden sustituir a los reflectores parabólicos y estar presentes en el diseño de un edificio. Por otro lado son una futura alternativa a los complejos reflectores conformados empleados en aplicaciones espaciales debido, entre otras razones, a que emplean herramientas de fabricación reutilizables y baratas, pueden ser plegadas [3] con vistas al despegue y desplegadas posteriormente, pueden diseñarse conforme a la estructura que las soporta [4] y los elementos reflectores pueden soportar circuitos de microondas para controlar el haz reflejado [5].

A pesar de presentar características eléctricas favorables en cuanto al nivel de polarización contrapolar, presentan poco ancho de banda y ganancia variable con la frecuencia, aspecto éste último desfavorable de cara a ser empleados en determinadas aplicaciones espaciales.

En el presente proyecto se trata de mejorar la respuesta en frecuencia que presentan las antenas reflectarray basadas en tecnología impresa con metalizaciones rectangulares de tamaño variable [6], mediante el empleo de métodos de optimización. Para ello, se realiza previamente un diseño a una única frecuencia basado en una estructura periódica plana multicapa (se han caracterizado las estructuras de una, dos y tres capas). El diseño se realiza ajustando las dimensiones de los parches rectangulares para conseguir una distribución de fase progresiva en la superficie del reflectarray, para las dos polarizaciones ortogonales del campo incidente. El procedimiento de diseño se basa en una rutina iterativa de búsqueda de ceros que emplea un método de análisis basado en el método de los momentos. Posteriormente se realiza un ajuste fino,

elemento a elemento, de todas las dimensiones mediante una rutina de optimización (empleo del método de Fletcher-Powell) con objeto de cumplir las especificaciones de fase en una banda de frecuencias.

Los reflectarrays estudiados tienen dos tamaños: uno circular de 41 centímetros, del que se han realizado varios diseños, y otro elíptico cuyo eje mayor mide 170 centímetros. En ambos casos han tenido como referencia las especificaciones eléctricas básicas de la antena transmisora Hispasat Iberia:

- Banda de frecuencias: 11.7-12.2 GHz
- Polarización: dual (H y V)
- Nivel de polarización contrapolar: 35 dB
- Variación de la ganancia con la polarización: 0.2 dB
- Variación de la ganancia con la frecuencia: 0.2 dB

## 2. ESTUDIO EN BANDA ESTRECHA

### 2.1. Distribución de fase requerida

Las antenas reflectarrays consiguen que los rayos reflejados por cada uno de los elementos del array de parches radien en la misma dirección. Considerando el sistema de referencia de la figura-1a, se tiene que la distribución de fase de un campo que radie en una dirección determinada  $(\theta_0, \varphi_0)$  viene dada por la expresión,

$$-K_0 \sin \theta_0 \cos \varphi_0 x - K_0 \sin \theta_0 \sin \varphi_0 y = -K_{x0}x - K_{y0}y$$

mientras que la distribución de fase del campo reflejado por el reflectarray es,

$$-K_0 \cdot d_l + \underline{|\rho(x_l, y_l)|} = -K_0 \cdot \sqrt{(x_l - X_f)^2 + (y_l - Y_f)^2 + Z_f^2} + \underline{|\rho(x_l, y_l)|}$$

donde  $\underline{|\rho(x_l, y_l)|}$  representa la fase del coeficiente de reflexión del parche cuyo centro se encuentra en las coordenadas  $(x_l, y_l)$  y,  $d_l$  es la distancia que recorre el rayo incidente desde el alimentador hasta el parche genérico  $l$ -ésimo de la superficie plana reflectora.

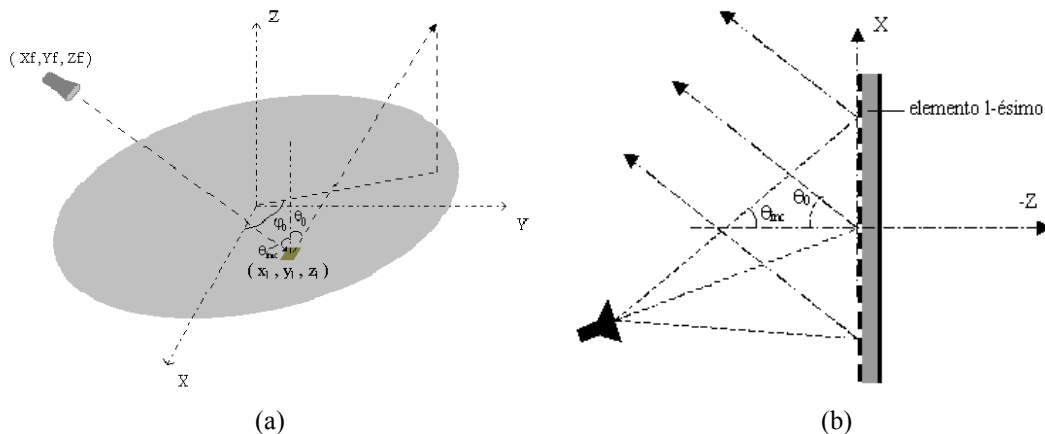


Figura-1. (a) Sistema de referencia empleado. (b) Esquema del funcionamiento de un reflectarray.

Para conseguir que el rayo reflejado se dirija en la dirección deseada como se representa en la figura-1b se impone la igualdad de las dos expresiones. De dicha igualdad se obtiene el valor que debe tener la fase del coeficiente de reflexión para cada uno de los parches impresos que forman el array.

$$|\rho(x_l, y_l) = K_0 [d_l - (x_l \cos \varphi_0 + y_l \sin \varphi_0) \sin \theta_0]$$

La fase necesaria en cada parche (dependiente de su posición y del ángulo de reflexión) se consigue variando las dimensiones. Debido al alto factor de calidad  $Q$  de los parches impresos, pequeñas variaciones de tamaño en longitudes cercanas a la de resonancia producen grandes variaciones en la fase del coeficiente de reflexión.

El análisis de cada uno de los parches se realiza tomando la aproximación de periodicidad local. Ésta consiste en considerar cada uno de los elementos del array rodeado de un entorno periódico con parches de su misma dimensión, de tal modo que se calcula la fase del coeficiente de reflexión en función del lado del parche como si de una estructura periódica se tratara. La estructura periódica se estudia empleando un método de onda completa.

## 2.2. Estructuras periódicas planas infinitas

Aunque el estudio de los reflectarrays se basa en la estructura periódica plana infinita, ni la estructura empleada es periódica ni las dimensiones de la misma son ilimitadas. Sin embargo, considerar el supuesto de que cada elemento del array de parches está rodeado por parches iguales a éste en un entorno suficientemente grande (condición de periodicidad local), ofrece resultados fiables para estructuras finitas eléctricamente grandes y con un número de celdas de repetición suficientes. En el modelo considerado de array infinito se tienen en cuenta todos los acoplos entre elementos. Es más, se ha comprobado que los resultados teóricos coinciden con los resultados empíricos experimentales.

El método empleado para la caracterización de las estructuras periódicas es una técnica que calcula de forma eficiente la matriz de dispersión generalizada de un interfaz dieléctrico con metalizaciones periódicas soportada sobre capa metálica (ver figura-2). Dicho método ha sido desarrollado por Wan y Encinar [7]. La técnica empleada se basa en el método de los momentos en el dominio espectral. Este método asume que inciden múltiples armónicos de Floquet sobre la estructura periódica en lugar de una onda plana y calcula directamente la matriz de dispersión generalizada para cualquier geometría que tenga metalizaciones periódicas, por lo que se caracteriza no sólo por su eficiencia sino que también por su flexibilidad. Presenta la ventaja adicional de poder tratar estructuras periódicas multicapa considerando cada una de las capas por separado para posteriormente globalizar el comportamiento de todas ellas empleando rutinas de enlace entre las distintas capas.

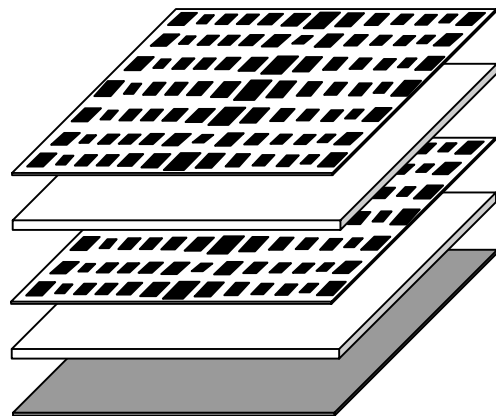


Figura-2. Estructura multicapa analizada.

Si se representa en una gráfica la fase del coeficiente de reflexión de los parches en función de su tamaño, se obtiene una curva denominada curva tamaño-fase. En las figuras 3a y 3b se representan las curvas tamaño-fase para el caso de una y dos capas respectivamente. A la vista de las figuras se observa que a mayor número de capas mayor margen de fase y pendiente menos pronunciada, características ambas deseables para cubrir por un lado el margen de fases de  $360^\circ$  necesario y para reducir por otro lado la sensibilidad a los errores de tolerancia. Este comportamiento es comprensible si se tiene en cuenta que al existir más de una capa, existe también más de una resonancia (parches de diferentes capas presentan diferente tamaño), por lo que el margen de fases se puede teóricamente duplicar y la pendiente suavizar si se escoge una relación de tamaños entre parches de diferente capa adecuado.

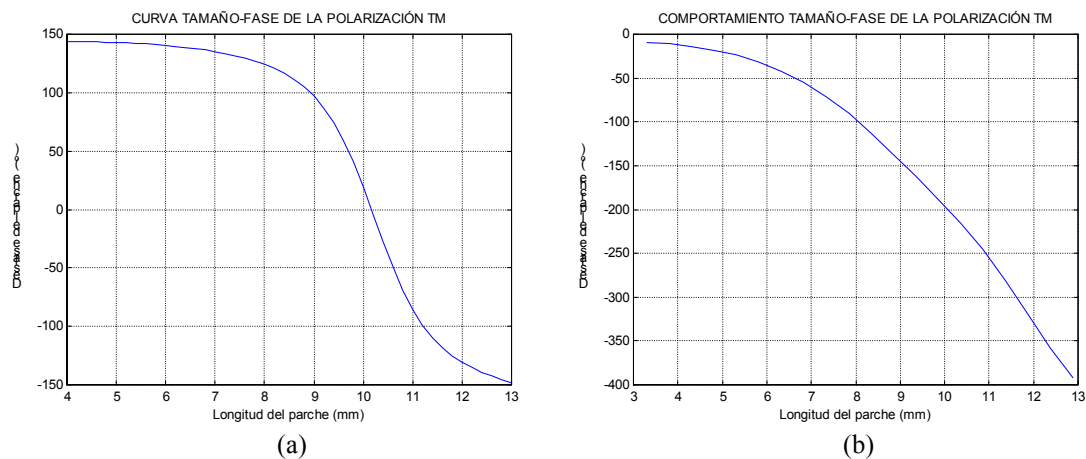


Figura-3. Estructuras periódicas infinitas. Parches cuadrados. Variación de las dos dimensiones. Célula periódica 14 mm.,  $f=11.95$  GHz, dieléctrico (1.05,-0.0011). Incidencia normal. (a) **Una capa** de espesor 1.2 mm. (b) **Dos capas** de espesor 3.0 mm cada una. Relación entre parches de distintas capas ( $r_1$ ) 0.7.

## 2.3. Diseño de reflectarrays

### 2.3.1. Metodología de diseño del plano reflector

Para el diseño de la superficie reflectora (array de parches impresos) se necesitan una serie de datos de partida, como son la posición del alimentador y las dimensiones del reflector plano (dentro de éste se incluye el tamaño de la célula periódica). Con estos datos se calculan el ángulo de incidencia del campo proveniente del alimentador (se considera un foco puntual) y la fase objetivo del coeficiente de reflexión, para cada uno de los elementos que forman el array de parches.

La fase necesaria para que el campo reflejado lo haga en la dirección deseada denominada objetivo, se calcula para las polarizaciones TE (transversal eléctrico) y TM (transversal magnético). En cada elemento del array de parches incide un campo procedente del alimentador (bocina) con componentes de campo en  $x$  y en  $y$ . Empleando parches rectangulares, la fase de la componente en  $x$  se controla con la dimensión del parche en el eje  $x$  y la fase de la componente en  $y$  con la longitud del parche en el eje  $y$ . Este hecho es interesante de cara a conseguir controlar de forma independiente dos polarizaciones en el caso de trabajar con polarización dual o circular, sin por ello aumentar la polarización cruzada. Para no aumentar la polarización cruzada y controlar de forma independiente dos polarizaciones duales, el alimentador debe estar situado en

el plano XZ y cada una de las polarizaciones transmitidas debe presentar sólo componente en y (o en x) y en z y la otra en x (o en y) y en z.

Inicialmente se hará un diseño independiente para cada una de las polarizaciones TE y TM. Para llevar a cabo el mismo, se calculan parches cuadrados primero para TE y posteriormente para TM, de tal forma que se obtenga la fase objetivo para cada polarización. A continuación se toman como resultado aquellos parches rectangulares formados con los lados de cada uno de los cuadrados anteriormente calculados. El método empleado para calcular las dimensiones de los cuadrados para cada una de las polarizaciones se basa en calcular una cota superior y otra inferior a la dimensión buscada, para luego mediante la técnica de *False Position* [8] refinar la búsqueda y encontrar un valor muy próximo al buscado, y que por supuesto, está situado entre las dos cotas previamente calculadas.

### 2.3.2. Parámetros característicos de un reflectarray

Los parámetros característicos o básicos de un reflectarray son: a) dimensiones de la superficie reflectora; b) posición del alimentador; c) tamaño de célula periódica. Se calculan a partir de una serie de valores de partida especificados por la aplicación que se quiera conseguir. Estos son la frecuencia central de diseño ( $f_0$ ), la dirección de radiación ( $\theta_0$ ) y la directividad de la antena (D).

Antes de explicar cómo se calculan los parámetros cabe hacer un par de aclaraciones. Por un lado se ha situado el foco alimentador en el plano XZ y, por otro lado se ha considerado que la coordenada  $\phi_0$  del campo reflejado es nula siempre.

El reflector es una superficie plana y elíptica cuyos semiejes mayor y menor se relacionan con el coseno del ángulo de reflexión. Sus valores se calculan a partir de la directividad y de la dirección de reflexión.

Con la posición del foco alimentador se busca que el frente de fases de la onda reflejada sea lo más plano posible. En la figura-4 es claro que nunca podrá ser plano completamente (caso de paraboloide), pero sí se puede obligar a que en los extremos del reflectarray la distancia que recorre la onda desde el alimentador hasta el mencionado frente de fases sea igual en ambos casos. Se acotan lo más posible las diferencias de fase entre los distintos elementos del reflectarray y se facilita el posterior diseño y optimización.

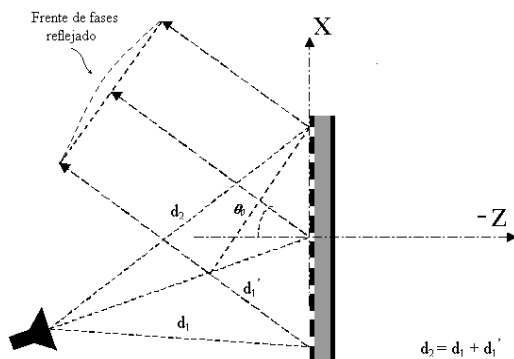


Figura-4. Diseño de reflectarrays.

Conocida la posición del foco, el tamaño de la célula periódica  $a$  queda delimitado por la condición de propagación de sólo el armónico fundamental de Floquet ( $\frac{a}{\lambda} \leq \frac{1}{1 + |\sin(\theta_{incmax})|}$ ).

Conviene que el tamaño de la célula periódica no sea pequeño ya que cuanto menor sea, peor será el aislamiento contrapolar entre parches contiguos.

## 2.4. Programas empleados y desarrollados

Todos los programas empleados han sido desarrollados en el lenguaje de programación *Fortran*. Los programas de dos capas han sido desarrollados en el Departamento de Electromagnetismo y Teoría de Circuitos de la U.P.M. mientras que durante el proyecto se han implementado los programas para tres capas y mejorado los ya existentes para dos.

A continuación se citan los más importantes:

- *FASE3F*: calcula las curvas que relacionan la fase del coeficiente de reflexión con la longitud del lado de los parches cuadrados de la capa inferior de una estructura periódica formada por dos capas. Las curvas se calculan para tres frecuencias, la de diseño o central y dos extremas (inferior y superior), de forma que se pueda observar el comportamiento de la estructura periódica en una banda de frecuencias.
- *REFLT2D*: realiza el diseño de los reflectarrays a una frecuencia calculando las dimensiones de los parches de cada una de las capas para una polarización dual (polarización en  $x$  y en  $y$ ).

## 2.5. Estudio de reflectarrays. Diseños realizados

### 2.5.1. Características deseables en las estructuras periódicas

Las características que debe cumplir una estructura periódica sobre la que se basa el diseño de un reflectarray son:

- 1) Curvas tamaño-fase con carácter lineal en un rango de fases superior a  $360^\circ$  para asegurar que se sigue cumpliendo el margen a otras frecuencias distintas a la de diseño (bueno para el ancho de banda).
- 2) Pendiente de la curva ('recta') suave dentro del margen de fase requerido. Se evitan cambios bruscos de fase para pequeñas variaciones de los parches debidas a errores de tolerancia y a posibles dilataciones.
- 3) El margen de fases de  $360^\circ$  se tiene que cumplir para el caso de ángulo de incidencia (del campo incidente sobre el reflectarray proveniente de la bocina) más oblicuo, al menos en la frecuencia central de diseño. Se asegura así que cualquier parche del reflectarray produce una variación de fase de  $360^\circ$ . La característica anterior implica que el margen de fases a la frecuencia central tiene que ser mayor de  $360^\circ$ , como consecuencia de la respuesta de las estructuras periódicas a la variación del ángulo de incidencia.
- 4) Curvas tamaño-fase a distintas frecuencias paralelas entre sí y lo más juntas posible. Se favorece así la posterior optimización a otras frecuencias.

Para conseguir estas características, se deben escoger valores de espesor de capa dieléctrica y de relación entre parches de diferentes capas adecuados. Después de un riguroso estudio paramétrico de las estructuras periódicas de 2 y 3 capas se ha llegado a los siguientes valores:



- estructuras de dos capas
  - Espesor de cada capa de dieléctrico ( $\epsilon$ ):  $\lambda/8$
  - Relación entre parches de diferente capa ( $r_1$ ): **0.7**
- estructuras de tres capas
  - $\epsilon$  : de  $\lambda/12$  a  $\lambda/9$  (aprox.)
  - Relación entre parche intermedio e inferior ( $r_2$ ): **0.75**
  - Relación entre parche superior e inferior ( $r_3$ ): **0.5**

Todos los valores presentados se han calculado para una frecuencia central de 11.95 GHz. Los valores pueden no ser extrapolables a otras especificaciones de trabajo.

### 2.5.2. Distribución de los parches en la superficie reflectora

La distribución de los parches dentro de un reflectarray se puede entender con la ayuda de la figura-5a. En ésta, se compara el comportamiento de un reflector parabólico y de un reflector plano equivalente, para el caso en que las distancias extremas (reflexión en los extremos de los reflectores) al frente de fases de la onda reflejada sean iguales. Con esta configuración no sólo se obtiene un frente de fases lo más lineal posible, sino que además es buena para el comportamiento del reflectarray en una banda de frecuencias.

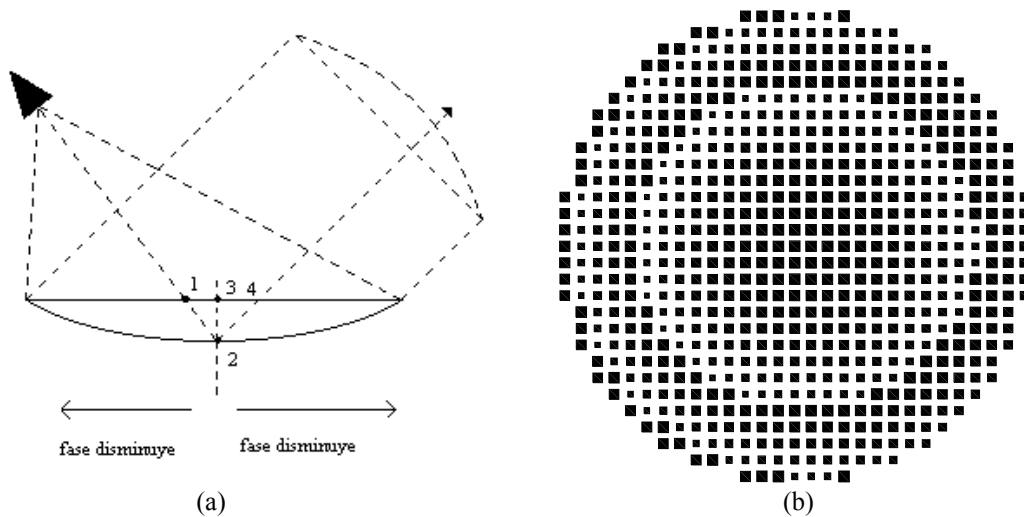


Figura-5. (a) Comparación de paraboloide y reflector plano. (b) Máscara impresa con zoning.

En la figura-5a el punto 1 es la posición del reflectarray donde la fase a compensar es mayor puesto que la diferencia de caminos entre la parábola y el reflectarray es máxima (tramo 1-2-4). Para el resto de elementos la diferencia a compensar es menor. Debido a que para tamaños de antena grandes, la diferencia de distancias aumenta, ésta puede llegar a ser mayor que la longitud de onda del campo reflejado. En ese caso, la fase a compensar sufre un salto de  $360^\circ$  que a su vez se traduce en un cambio brusco de los tamaños de los parches como se aprecia en la figura-5b. Pasan de ser pequeños a ser grandes. Este fenómeno no deseable se conoce como *zoning* y es inevitable cuando se trabaja con antenas de tamaño suficientemente grande (todos los casos de interés). No es deseable ya que para el comportamiento en frecuencia no es bueno que existan diferencias grandes de tamaño entre parches consecutivos. Para evitar lo más posible el *zoning* se obliga a que en el punto de máxima diferencia de caminos el parche sea grande.

### 2.5.3. Validación del método

El procedimiento de diseño empleado ha sido validado con anterioridad construyéndose un prototipo [9]. En la figuras 6a y 6b se muestra una foto del mismo y la comparación de los diagramas de radiación teóricos y medidos.

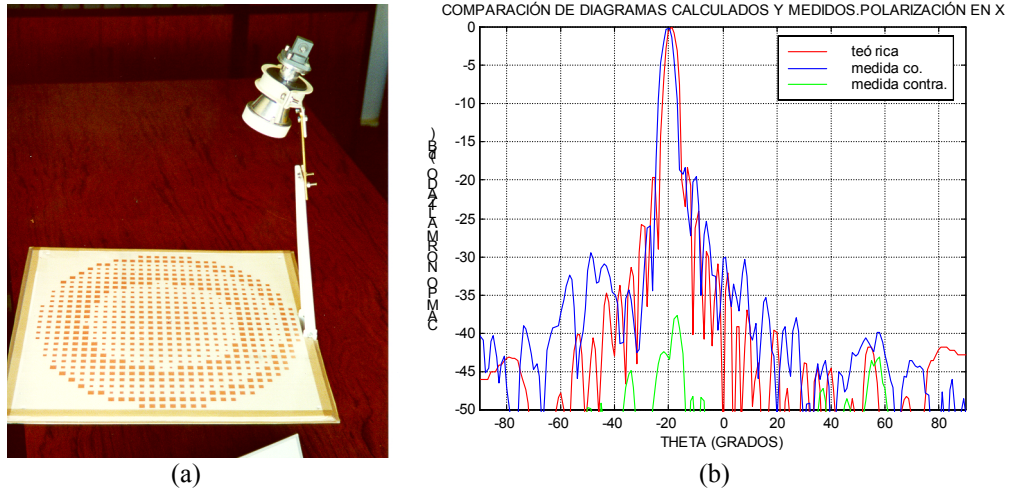


Figura-6. (a) Prototipo construido. (b) Comparación de la teoría y las medidas.

### 2.5.4. Diseños realizados

Se presentan dos reflectarrays de diferente tamaño y forma. El primero de ellos es un reflector circular de diámetro algo mayor de 40 cm. En este caso se analizan dos diseños. El segundo reflectarray diseñado es elíptico de eje mayor 170 cm.

En el primer caso se realizarán diseños de dos y tres capas, mientras que el segundo (antena grande) sólo se diseñará para 3 capas.

La banda (B) escogida para ver el comportamiento a otras frecuencias es un 10% la frecuencia de diseño. Así se tiene que  $\Delta f = B/2 = 600$  MHz y las frecuencias extremas son:

- frecuencia superior  $\rightarrow 11.95 + 0.6 = 12.55$  GHz
- frecuencia inferior  $\rightarrow 11.95 - 0.6 = 11.35$  GHz

#### 2.5.4.1. Reflectarray circular de 41.2 cm. de diámetro

CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO	
Frecuencia central de diseño (GHz)	11.95
Número de células unitarias (X x Y)	29x29
Tamaño de la célula periódica (mm.)	14.0
Dimensión mayor del reflector (cm.)	41.18
Situación del foco (cm.) (Xf,Zf)	( -13.4 , 34.0 )
Espesor del reflector (mm.)	6.0
Dirección de radiación (°) ( $\theta_0$ )	19

Diseño de 2 capas con  $r_1=0.73$

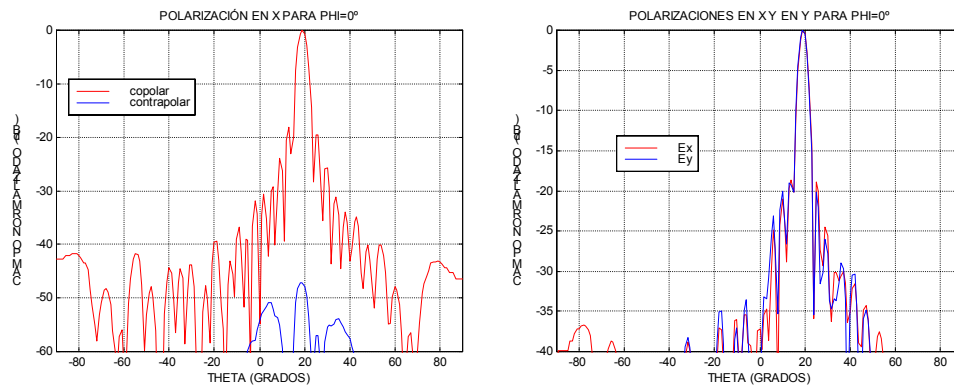


Figura-7. Diagramas de radiación de reflectarray circular de 41.2 cm. con 2 capas.

Diseño de 3 capas con  $r_2=0.75$  y  $r_3=0.5$

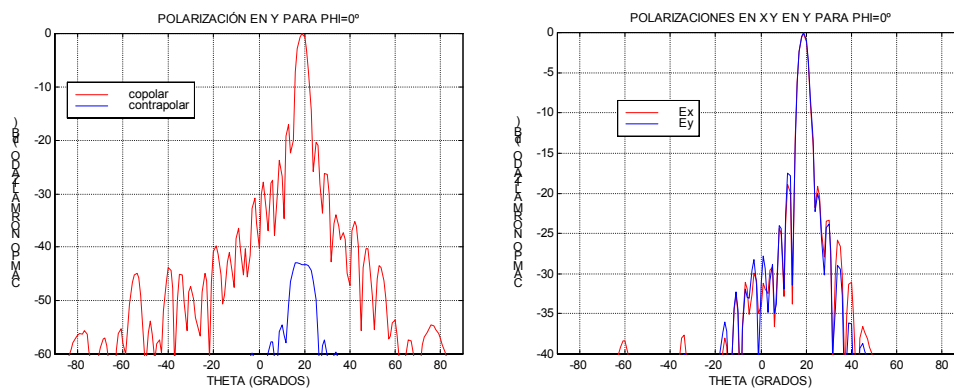


Figura-8. Diagramas de radiación de reflectarray de 41.2 cm. con 3 capas.

2.5.4.2. Reflectarray elíptico de eje mayor 1.7 m.

CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO	
Frecuencia central de diseño (GHz)	12.0
Número de células unitarias (X x Y)	119x112
Tamaño de la célula periódica (mm.)	14.2
Dimensión mayor del reflector (cm.)	169
Situación del foco (cm.) (Xf,Zf)	( -43.4 , 126 )
Espesor del reflector (mm.)	9.42
Dirección de radiación (°) ( $\theta_0$ )	19

Diseño de 3 capas con  $r_2=0.75$  y  $r_3=0.5$

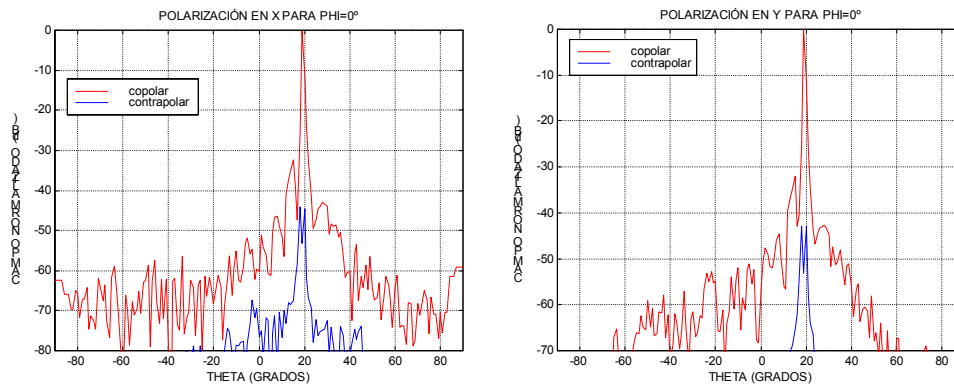


Figura-9. Diagramas de radiación de reflectarray elíptico de 1.7 m. de eje mayor.

Viendo las figuras 7 y 8 referidas al reflectarray circular de 41 cm. se aprecia como las componentes contrapolares radiadas se encuentran en todo momento por debajo de -40 dB, tanto al emplear dos como tres capas. Además, se comparan los diagramas de radiación de las dos polarizaciones y se observa que las diferencias en el lóbulo principal son ínfimas. De la figura 9 se concluye que para el reflectarray elíptico de eje mayor 1.7 m. las contrapolares en ambas polarizaciones se encuentran también por debajo de -40 dB.

En las frecuencias extremas de la banda de estudio tanto la contrapolar como la variación de la ganancia con la polarización se degradan en ambos diseños, pero a pesar de su empeoramiento la respuesta sigue siendo aceptable.

### 3. ESTUDIO EN BANDA ANCHA

#### 3.1. Desarrollo teórico

El comportamiento de los reflectarrays es bueno sólo en el caso de que se trabaje cerca de la frecuencia central de diseño. Para el caso de una banda de frecuencias, se produce un notable empeoramiento en la respuesta de la ganancia en frecuencia. El resto de parámetros no varían y si lo hacen siguen estando en márgenes bastante buenos (el caso de la polarización contrapolar).

Se han realizado diseños de reflectarrays teniendo en cuenta una única frecuencia en su realización. Primero se calcula la fase objetivo necesaria del coeficiente de reflexión para cada parche y luego mediante la aproximación de periodicidad local, se calcula el tamaño del parche necesario de tal forma que se consigue la fase buscada. Con este método se obtienen antenas cuyo comportamiento es muy bueno en una banda de frecuencias reducida, pero se degrada de forma importante para una banda de frecuencias más amplia (útil de cara a aplicaciones de comunicaciones por satélite).

Si se cambia la frecuencia lo hará del mismo modo la fase requerida para cada uno de los parches, de tal forma que todos ellos reflejen el campo incidente en la misma dirección. Al variar la fase requerida se variará también el tamaño del parche, por lo que se obtendrá una configuración de parches totalmente distinta a la que se obtenía para la frecuencia inicial. Además, para más dificultad, la variación de fase experimentada por cada parche es diferente como consecuencia de la variación de la frecuencia, ya que las distancias de los parches al alimentador no son iguales por encontrarse situados en una superficie plana (condición que sí se cumple en paraboloides). La degradación de la antena será mayor a medida que la frecuencia probada se encuentre más alejada de la frecuencia inicial de diseño.

Mediante el empleo de métodos de búsqueda de mínimos se pretende imponer la condición de fase a varias frecuencias distintas. Se pretende conseguir que los parches configurados inicialmente para una frecuencia concreta, varíen sus dimensiones tal que en una banda de frecuencias centrada en la de diseño inicial el comportamiento global del reflectarray mejore.

Tras probar el método de la tangente (o de Newton-Raphson [8]) sin conseguir buenos resultados, se prueba con métodos de búsqueda de mínimos en funciones multivariable debido a que tanto en el caso de dos capas como en el de tres, las variables

a optimizar son cuatro (las cuatro dimensiones de los parches situados en distintas capas) y seis (se introduce una capa más) respectivamente. La función a minimizar se define como la suma de los errores de fase cuadráticos de cada una de las polarizaciones  $x$  e  $y$  en cada una de las frecuencias a optimizar.

Los métodos de búsqueda de mínimos en funciones multivariable permiten optimizar para un conjunto de frecuencias (el método de Newton-Raphson sólo permite dos frecuencias), consiguen un ajuste fino de las variables y buscan mínimos locales, no absolutos (ceros de la función). Se pueden clasificar dependiendo de si calculan las derivadas primeras o no. Los primeros presentan la ventaja de ser más rápidos y serán los que se empleen. Dentro de estos existe una subdivisión:

- Métodos de gradiente conjugado: requieren almacenar varias veces  $N$  valores. Pertenecen a este tipo los algoritmos de Fletcher-Reeves y de Polak-Ribiere.
- Métodos quasi-Newton o de métrica variable: requieren almacenar  $N^2$  valores. Dentro de ellos se engloban el algoritmo de Davidon-Fletcher-Powell, llamado a veces simplemente de Fletcher-Powell, y el algoritmo de Broyden-Fletcher-Goldfard-Shanno.

Se emplearon inicialmente los algoritmos de Polak-Ribiere y de Fletcher-Powell [8], pero posteriormente se empleó exclusivamente el algoritmo de Fletcher-Powell porque aunque ambos optimizaban igual, éste último requería de menor tiempo de cálculo en sus subrutinas.

### 3.2. Programas desarrollados

Todos los programas empleados para conseguir la optimización de los diseños iniciales de reflectarrays han sido desarrollados en el lenguaje de programación *Fortran*, de tal forma que se consigue desarrollar el diseño completo de una antena reflectarray con una única aplicación, ganando en comodidad a la hora de afrontar el diseño.

Dentro de los programas usados en las optimizaciones se encuentran por un lado el programa *OPTIM2D\_PyR* y por otro lado el programa *OPTIM2D\_FyP*. Ambos son parecidos y se diferencian únicamente en la rutina de búsqueda de mínimos empleada. El primero de ellos emplea el algoritmo de Polak-Ribiere mientras que el segundo emplea el algoritmo de Fletcher-Powell.

### 3.3. Resultados: diseños optimizados

En los diseños optimizados se han presentado sólo los diagramas de radiación a varias frecuencias en torno al haz principal puesto que el aspecto verdaderamente importante a conseguir es mejorar la respuesta de los reflectarrays para un ancho de banda amplio. El resto de parámetros prácticamente no sufren cambios importantes después de la optimización. También se muestran las variaciones de la ganancia con la frecuencia en forma de tablas para los diseños estudiados.

Los diseños presentados son el resultado de optimizar los anteriores reflectarrays diseñados a una frecuencia. Aunque antes de optimizar son los reflectarrays de dos capas los que presentan mejor respuesta en frecuencia, a la vista de la tabla-1, se observa que después de la optimización la variación de la ganancia con la frecuencia es más estable cuando se emplean 3 capas.

3.3.1. Reflectarray circular de 41.2 cm. de diámetro

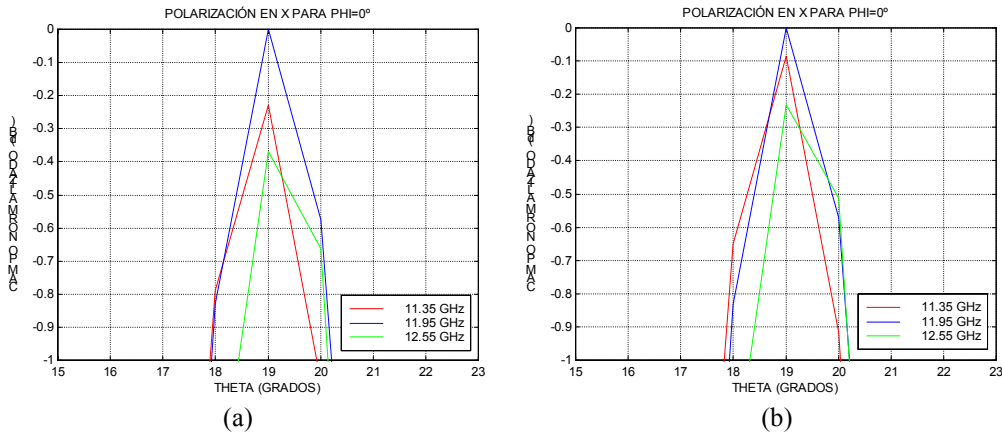


Figura-10. Diseños optimizados para polarización x: (a) 2 capas. (b) 3 capas.

PERDIDA DE GANANCIA RESPECTO A LA FRECUENCIA CENTRAL (11.95 GHZ)		DISEÑO CON FOCO DESCENTRADO			
		2 CAPAS		3 CAPAS	
		inicial	optimizado	inicial	optimizado
Frecuencias (GHz)	12.55	<b>0.52</b>	<b>0.37/0.40</b>	<b>0.45</b>	<b>0.24</b>
	11.35	<b>0.38</b>	<b>0.24</b>	<b>0.2/0.27</b>	<b>0.08/0.1</b>

Nota: Cuando aparecen dentro de una casilla dos valores separados por /, indica que el primero es la polarización x y el segundo la polarización y. Cuando sólo aparece uno, es el mismo valor para los dos.

Tabla-1. Variación de la ganancia con la frecuencia para reflectarray circular de 41.2 cm.

Variación en el diseño mediante una modificación de la coordenada x de la posición del foco ( $X_f = -11.6$  cm.). Se estudia sólo la estructura de 3 capas observando que se comporta mejor que el caso anterior (ver figuras 10 y 11 y tabla-2).

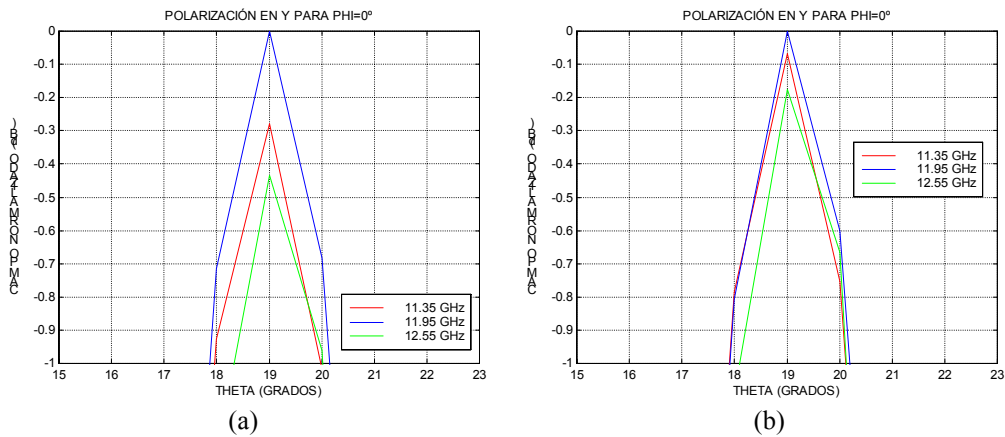


Figura-11. Variante del diseño de 3 capas. Polarización y: (a) sin optimizar. (b) optimizado.

PERDIDA DE GANANCIA RESPECTO A LA FRECUENCIA CENTRAL (11.95 GHZ)		DISEÑO CON FOCO DESCENTRADO (3C.)			
		Diseño		Variante del diseño	
		inicial	optimizado	inicial	optimizado
Frecuencias (GHz)	12.55	<b>0.45</b>	<b>0.24</b>	<b>0.44</b>	<b>0.17</b>
	11.35	<b>0.2/0.27</b>	<b>0.08/0.1</b>	<b>0.3</b>	<b>0.07</b>

Tabla-2. Variación de la ganancia con la frecuencia para los diseños de 3 capas de 41.2 cm.

### 3.3.2. Reflectarray elíptico de eje mayor 1.7 m.

PERDIDA DE GANANCIA RESPECTO A LA FRECUENCIA CENTRAL (11.95 GHZ)		DISEÑO DE 1.7 M. ( 3C.)			
		Polarización X		Polarización Y	
		inicial	optimizado	inicial	optimizado
Frecuencias (GHz)	12.45	<b>3</b>	<b>2.25</b>	<b>3</b>	<b>2</b>
	11.45	<b>2.5</b>	<b>1.75</b>	<b>2.5</b>	<b>1.5</b>

Tabla-3. Variación de la ganancia con la frecuencia para reflectarray elíptico de 1.7 m.

A la vista de las tablas 2 y 3 se puede concluir que:

- Para el reflectarray de 40 cm. de diámetro, la mejora introducida en el mejor de los casos (variante del diseño) es **inferior en todo momento a 0.3 dB**. Para el diseño elíptico de 170 cm. de eje mayor, las mejoras obtenidas oscilan entre **0.75 y 1 dB**, dependiendo de la polarización estudiada ( $x$  o  $y$  respectivamente).
- Es cierto que la mejora obtenida no soluciona del todo el inconveniente de la respuesta en frecuencia de la ganancia del reflectarray grande, ya que a pesar de que se mejora 1 dB, sigue siendo insuficiente (2.25 dB para la polarización en  $x$  a la frecuencia 12.45 GHz). Pero lo que también es indudable es que esta línea de investigación puede seguir llevándose a cabo para obtener mejores prestaciones de las obtenidas en el presente proyecto.

## 4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

### 4.1. Conclusiones

- Se ha diseñado reflectarrays a una frecuencia central.
- Optimización posterior de los diseños para una banda de frecuencias.
- Se ha introducido una tercera capa que mejora la respuesta en frecuencia tras la optimización.
- Para reflectarrays grandes la mejora obtenida en banda no es muy grande por lo que sólo se puede pensar en ellos como alternativa a los reflectores en aplicaciones de banda moderada. (DBS-5% de banda).

### 4.2. Líneas futuras de investigación

- Aplicación de otros métodos de optimización para mejorar más la respuesta en frecuencia.
- Diseño de reflectarrays de haz conformado.

## 5. REFERENCIAS

- [1] D. G. Berry, R. G. Malech W. A. Kennedy, 'The Reflectarray Antenna', IEEE Trans. on Antennas and Propagat., Vol. AP-11, 1963, pp.646-51.
- [2] R. E. Munson, H. A. Haddad, J. W. Hanlen, 'Microstrip Reflectarray for Satellite Communications and RCS Enhancement or Reduction', patente US4684952, August 1987

- [3] D. Pilz, W. Menzel, 'Folded Reflectarray Antenna', Electronics Letters, 30 April 1998, Vol. 34, No. 9, p. 832-3.
- [4] J. Huang, 'Capabilities of Printed Reflectarray Antennas', International Symposium 1996, Boston, p. 131-4.
- [5] J. R. Profera, E. Charles, 'Active Reflectarray Antenna for Communication Satellite Frequency Re-use', patente US5280297, Enero 1994.
- [6] D. M. Pozar, T. Metzler, 'Analysis of a Reflectarray Antenna Using Microstrip Patches of Variable Size', Electronic Letters, 15th April 1993, Vol. 29, No. 8, pp. 657-8.
- [7] Wan and J. A. Encinar, 'Efficient Computation of Generalized Scattering Matrix for Analyzing Multilayered Periodic Structures', IEEE Trans. Antennas and Propagation., Vol. 43, No. 11, Nov. 1995, pp.1233-42.
- [8] 'Numerical Recipes. The art of Scientific Computing, (Fortran Version)'. William H. Press, Brian P. Flannery, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling. Ed. Cambridge. 1989
- [9] J. A. Encinar, J. Vasal'lo, 'Diseño, construcción y medida de un reflectarray. Comparación con un reflector parabólico', URSI'98, XIII Simposium Nacional, Pamplona, 2 pg.

## 6. PUBLICACIONES RELACIONADAS

### 6.1. Internacionales

Autores: José A. Encinar Garcinuño, J. Agustín Zornoza Ramírez  
Título: Design and development of multilayer printed reflectarrays for dual polarisation and bandwidth enhancement  
Tipo de participación: póster  
Congreso: AP 2000  
Publicación: Proceeding of Millennium Conference on Antennas & Propagation  
Fecha y lugar de celebración: del 9 al 14 de abril del 2000 en Davos, Suiza

---

Autores: José A. Encinar Garcinuño, J. Agustín Zornoza Ramírez  
Título: Design and development of multilayer printed reflectarrays  
Tipo de participación: presentación  
Congreso: 2<sup>nd</sup> Confer. on Academic and Industrial Cooperation in Space Research, ESA  
Publicación: Actas del Congreso  
Fecha y lugar celebración: del 15 al 17 de noviembre del 2000 en Graz, Austria

---

Autores: J. Agustín Zornoza Ramírez, José A. Encinar  
Título: Multi-layer printed reflectarrays as an alternative to shaped reflectors  
Congreso: 24th ESTEC Antenna Workshop on Innovative Periodic Antennas: Photonic Bandgap, Fractal and Frequency Selective Structures  
Fecha y lugar de celebración: 31 de mayo al 1 de junio del 2001 en Noordwijk, Holanda

### 6.2. Nacionales

Autores: J. Agustín Zornoza Ramírez y José Antonio Encinar Garcinuño  
Título: Diseño de reflectarrays impresos multihaz y de haz conformado  
Tipo de participación: presentación  
Congreso: URSI 2000  
Publicación: Actas del Congreso  
Fecha y lugar de celebración: del 13 al 15 de septiembre del 2000 en Zaragoza, España