

---

# DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UN SUBARRAY PARA UNA ANTENA DE RANURAS DE COMUNICACIONES POR SATÉLITE

---

Lácides Ripoll Solano, Diego Pardo Santos y Manuel Sierra Pérez

## RESUMEN

*Este trabajo presenta el diseño, simulación y construcción de un subarray demostrador de una antena de ranuras resonantes para comunicaciones por satélite. El subarray se diseñó empleando una herramienta de software basada en la síntesis de Taylor de un parámetro. El análisis es basado en modelos del factor de array y de apertura. El diseño final del subarray y el análisis directo se com-*

*paró con el análisis de onda completa mediante el software CST® Microwave Studio. Se realizaron simulaciones de Monte Carlo del subarray, donde se tuvieron en cuenta errores de modelado, errores sistemáticos y aleatorios resultantes del proceso de fabricación. Las mediciones del prototipo dieron resultados satisfactorios validando la herramienta implementada.*

## Introducción

Las ranuras en guías de ondas son un tipo importante de antenas de microondas con numerosas aplicaciones en sistemas de comunicaciones y radar, debido a su gran capacidad de potencia, alta eficiencia, poco peso, estructura compacta y bajos lóbulos laterales. Lo anterior se suma a que pueden resistir radiación, altas temperaturas y vibración, los cuales son requisitos para aplicaciones aeroespaciales (Rengarajan, 2001, 2009; Sekretarov *et al.*, 2010). Las ranuras fueron utilizadas como elementos radiantes en guías rectangulares desde mediados del siglo pasado, destacando los trabajos pioneros de Watson (1946) y de Stevenson (1948). Posteriormente R.S. Elliott desarrolló una serie de métodos para el diseño de estas antenas (Elliott y Kurtz, 1978; Elliott, 1983, 1988). A partir de entonces este tipo de antenas ha sido estudiado por diversos investigadores.

Un factor importante para el desarrollo de estas antenas es que las técnicas de modelamiento electromagnético han avanzado lo suficiente para permitir el diseño de estos arrays en un solo paso sin necesidad de iteraciones en el proceso de desarrollo. Para la exactitud de los diseños de los diagramas de radiación es necesario controlar la amplitud y la fase de la excitación de las ranuras (Tsunoda y Goto, 1986). En el estudio de Mosqueda *et al.* (2009) se diseñó una antena de ranuras en array empleando los polinomios de Chebyshev; se simuló diferentes condiciones para la antena pero no se compararon los resultados con ningún software de simulación ni con mediciones de un prototipo de dicha antena. En el presente trabajo se lleva a cabo el diseño, la simulación y la construcción de un subarray de una antena de ranuras en guía de onda, utilizando Taylor de un parámetro para obtener el nivel de

lóbulo primario a secundario (NLPS) deseados. Se toma un caso particular de diseño que se compara, tanto con las simulaciones obtenidas del software CST® Microwave Studio como con las mediciones obtenidas de la construcción de un prototipo de dicho subarray. Previo a la construcción se realizan simulaciones de Monte Carlo donde se tienen en cuenta errores de fabricación, sistemáticos y aleatorios.

Para este prototipo se implementó una forma común de array de ranuras en guía de onda, que consiste en un conjunto de ranuras longitudinales cortadas en la pared ancha de una guía de onda rectangular. Al alimentar esta guía con el modo dominante  $TE_{10}$  fluye corriente sobre las paredes y cuando se desplazan las ranuras una distancia con respecto al eje de la guía, los flujos de corrientes son interceptados y esto excita las ranuras, produciéndose la radiación. Los arrays resonantes son diseñados para operación

*broadside* y para obtener dicha radiación todas las ranuras deben ser excitadas en fase, lo que se consigue espaciando las ranuras  $0,5\lambda_g$ , donde  $\lambda_g$  es la longitud de onda en la guía, y alternando su ubicación alrededor del eje central de la guía.

Los arrays planos de ranuras en guías de onda (SWAA) pueden ser construidos colocando varios arrays lineales, uno al lado del otro. En el Grupo de Radiación de la Universidad Politécnica de Madrid se desarrolla un SWAA para comunicaciones por satélite conformado por subarrays lineales, como el tratado en el presente trabajo. El SWAA, operará en la banda de 29,5-31,5GHz con una ganancia  $>30\text{dBi}$ , un ancho del haz de  $4,2^\circ$  en ambos planos y un ancho de banda fraccional de 5%. Se utilizará una distribución de corrientes asociada a un diagrama de Chebyshev de 20dB. La antena será de  $170 \times 170\text{mm}$ , constituida por  $24 \times 24$  ranuras y teniendo en cuenta que la

---

## PALABRAS CLAVE / Antena de Guía de Ondas Resonantes / Array de Antenas / Ranuras en Guía de Ondas / Síntesis de Taylor /

Recibido: 10/02/2014. Modificado: 10/04/2015. Aceptado: 13/06/2015.

**Lácides Ripoll Solano.** Ingeniero Eléctrico, Universidad del Norte, Colombia. Magister en Telecomunicaciones, Universidad de los Andes, Colombia. Máster y candidato al doctorado en Tecnologías y Sistemas de Comunicaciones, Universidad

Politécnica de Madrid (UPM), España. Docente, Universidad del Norte (Uninorte), Colombia. Dirección: Departamento de Eléctrica y Electrónica, Uninorte. Km. 5, Vía Puerto Colombia. Barranquilla, Colombia. e-mail: lripoll@uninorte.edu.co

**Diego Pardo Santos.** Licenciado en Física, Universidad de Salamanca, España. Máster en Cosmología y Física de Partículas, Universidad de Salamanca, España. Máster y Doctor en Tecnologías y Sistemas de Comunicaciones, UPM, España.

**Manuel Sierra Pérez.** Ingeniero y Doctor Ingeniero de Telecomunicación, UPM, España. Profesor, UPM, España.

# DESIGN, SIMULATION AND TEST OF A RESONANT SLOT ANTENNA SUBARRAY FOR SATELLITE COMMUNICATIONS

Lácides Ripoll Solano, Diego Pardo Santos and Manuel Sierra Pérez

## SUMMARY

This paper presents the design, simulation and test of a resonant slot antenna subarray for satellite communications. The subarray design was done employing a software tool based on Taylor's one-parameter synthesis. The analysis was based on the array factor and aperture models. The final subarray design and the direct analysis was compared with

CST<sup>®</sup> Microwave Studio full wave analysis. Monte Carlo simulations of the array were carried out to account for modeling errors, as well as systematic and random errors resulting from the manufacturing process. The prototype's evaluation measurements give satisfactory results and validate the implemented tool.

# PROJETO, SIMULAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UMA ANTENA SUBARRAY DE FENDAS PARA COMUNICAÇÃO POR SATÉLITE

Lácides Ripoll Solano, Diego Pardo Santos e Manuel Sierra Pérez

## RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto, simulação e construção de uma antena subarray de fendas ressonantes para comunicação por satélite. A subarray foi desenhada usando uma ferramenta de software com base na síntese de Taylor de um parâmetro e a análise foi baseada nas matrizes e modelos de abertura. O desenho final da subarray e a análise direta com

base no modelo de matrizes foi comparado com análises de onda completa CST<sup>®</sup> Microwave Studio. Simulações de Monte Carlo da subarray foram realizados levando-se em conta erros de modelagem, sistemáticos e aleatórios resultantes do processo de fabricação. As medições do protótipo apresentaram resultados satisfatórios validando a ferramenta utilizada.

separación entre ranuras es de 7,031mm se requerirán 48 subarrays lineales de 12 ranuras cada uno, para un total de 576 ranuras. La forma de alimentación se ha planteado mediante guías de onda en un estrato inferior acopladas a las guías radiantes mediante acoplos por ranuras.

## Descripción General del Sistema

A continuación se describe de forma general la herramienta implementada utilizando MATLAB<sup>®</sup> para la síntesis del array de ranuras en guía de onda. En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo para el diseño del array.

### Información de entrada

Los requerimientos impuestos para la realización de la síntesis son: 1) número de ranuras que se desean en el array; 2) frecuencia de operación, la cual será importante para encontrar las dimensiones y separación de las ranuras, y adicionalmente para la selección de la guía de onda adecuada; y 3) nivel de lóbulo

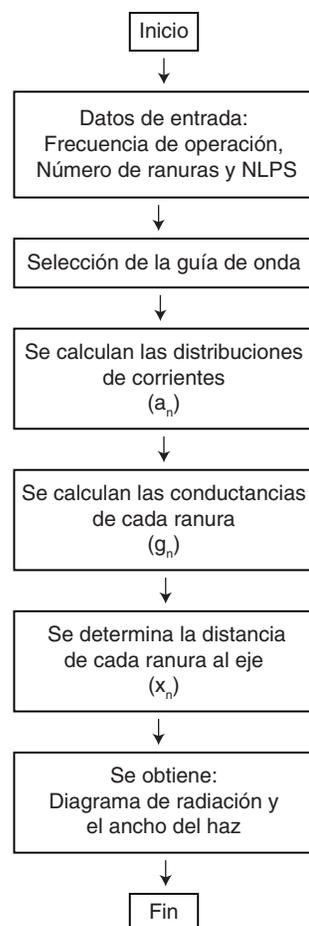


Figura 1. Diagrama de flujo del algoritmo de diseño del array.

primario a secundario (NLPS) requerido.

Generación de los coeficientes de excitación ( $a_n$ ). Para la generación de los coeficientes se utiliza el método de Taylor de un parámetro, el cual se basa en una transformación de los polinomios de Chebyshev y obtiene la distribución de corrientes a partir de un cambio de variable en la función de Bessel de primer orden (Balanis Constantine, 1997).

Obtención de las dimensiones físicas del array (desplazamiento de las ranuras  $x_n$ ). Se fundamenta en su equivalente eléctrico, representado por conductancias ( $g_n$ ) que se calculan utilizando la ecuación

$$g_n = Ka_n^2 \quad (1)$$

donde K es una constante a determinar. Para radiar toda la potencia de entrada disponible, se debe cumplir que la conductancia de entrada equivalente del array,  $g_e$ , sea igual a 1, cumpliéndose que

$$K \sum_{n=1}^N a_n^2 = 1 \quad (2)$$

En Collin y Zucker (1961) se demostró que las ranuras pueden ser modeladas como admitancias complejas en paralelo, donde la conductancia normalizada de una ranura longitudinal cortada en una guía de onda operando en el modo TE<sub>10</sub> viene dada por

$$g = 2,09 \frac{\lambda_g a}{\lambda b} \cos^2 \frac{\pi \lambda}{2\lambda_g} \sin^2 \frac{\pi x_1}{a} \quad (3)$$

donde  $\lambda$ : longitud de onda en el espacio libre,  $\lambda_g$ : longitud de onda en la guía,  $x_1$ : desplazamiento desde el eje de la guía, a y b: ancho y alto de la guía de onda rectangular. Con la Ec. 3 se calcula el desplazamiento ( $x_1$ ) de cada ranura del array.

Con este procedimiento se determinan todas las dimensiones del array, quedando solo pendiente el ancho de las ranuras (w), pero ésta no es una medida crítica, dado que no se encontraron diferencias apreciables en la radiación para valores desde  $\frac{\lambda}{400}$  hasta  $\frac{\lambda}{40}$ . Para este proyecto se tomó un valor

de  $w=1\text{mm}$  (Mosqueda *et al.*, 2009).  
*Diagrama de radiación.* Finalmente, se puede calcular el campo eléctrico total radiado por el array, el cual viene dado por

$$E(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) \sum_{n=1}^N a_n e^{jk_r x_n} \quad (4)$$

donde los coeficientes  $a_n$  son los de excitación y  $f(\theta, \varphi)$  es el campo eléctrico radiado por un solo elemento del array, que en este caso es una ranura de  $\frac{\lambda}{2}$ , equivalente a un dipolo de igual longitud (Mosqueda *et al.*, 2009).

### Resultados

Este ítem se desarrolla en cuatro partes, en la primera se simula un caso para el array utilizando la herramienta implementada en MATLAB®, en la segunda se valida este resultado comparando el caso con el obtenido con el simulador CST® Microwave Studio, en la tercera se realizan simulaciones de Monte Carlo y finalmente, en la cuarta, el caso escogido se confronta con las mediciones obtenidas de un prototipo del subarray.

#### Simulación con la herramienta implementada en Matlab

Se realiza la simulación del array, bajo las siguientes condiciones (Figura 2): frecuencia de operación: 12GHz, NLPS: 20dB, número de ranuras: 11, ancho de ranura  $w$ : 1mm, longitud de ranura:  $\frac{\lambda}{2}$ , guía de onda: WR-75, distribución de corrientes: Taylor de un parámetro.

La Tabla I muestra la distribución de corriente, conductancias

TABLA I  
 DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE, CONDUCTANCIAS NORMALIZADAS, ANCHO DEL HAZ Y SEPARACIÓN DE RANURAS PARA UN ARRAY DE 11 ELEMENTOS CON NLPS DE 20 dB (F= 12GHz)

Ranuras	NLPS= 20dB	$g_n$	$x_n$ (mm)
1	1,0000	0,0195	0,9510
2	1,5466	0,0465	1,4790
3	2,0659	0,0830	1,9920
4	2,4936	0,1209	2,4250
5	2,7749	0,1498	2,7180
6	2,8730	0,1606	2,8210
7	2,7749	0,1498	2,7180
8	2,4936	0,1209	2,4250
9	2,0659	0,0830	1,9920
10	1,5466	0,0465	1,4790
11	1,0000	0,0195	0,9510

Ancho del haz= 8,29°.

normalizadas, ancho del haz y separación de ranuras para un array de 11 elementos con NLPS de 20dB (f: 12GHz).

#### Validación utilizando el software CST® Microwave Studio

Se toman las mismas condiciones del ítem anterior para la validación utilizando el software CST® Microwave Studio. El subarray está basado en una guía de onda de dimensiones interiores de 19,05mm de ancho y 9,5mm de alto, con una distancia entre ranuras adyacentes de  $0,5\lambda_g$ , que para la frecuencia de operación de 12GHz es de 16,6mm. La última ranura está a una distancia del borde cortocircuitado de 24,897mm (Figura 3).

#### Estudio de tolerancia

Previo a la construcción del subarray se realizó un

estudio de tolerancias basado en el método de Monte Carlo para verificar que la tolerancia que presenta la fresadora permite cumplir los parámetros de diseño impuestos al subarray en el momento de la fabricación.

Asumiendo que los coeficientes de excitación ideales, tanto en amplitud como en fase son  $a_n$  el diagrama de radiación deseado ( $FA_{deseado}$ ) para un array lineal se expresa como

$$FA_{deseado}(\theta) = \sum_{n=1}^N a_n e^{jn.k.d.\cos\theta} \quad (5)$$

donde  $a_n$  coeficientes de excitación ideales,  $d$ : separación entre los elementos,  $k$ : número de onda del espacio libre, y  $\theta$ : ángulo con respecto al eje del array. Si existe un error en amplitud y fase en los coeficientes de excitación ( $\epsilon e^{j\alpha}$ ), el diagrama de radiación se distorsiona. Para errores aleatorios linealmente independientes tanto en amplitud como en fase, el diagrama de radiación se expresa como

$$FA_{error}(\theta) = \sum_{n=1}^N a_n \epsilon_n e^{j\alpha_n} e^{jn.k.d.\cos\theta} \quad (6)$$

donde  $\epsilon_n$  y  $\alpha_n$  representan los errores en amplitud y fase, respectivamente.

Para la realización de las simulaciones se desprecian los siguientes errores (Bailin y Ehrlich, 1953):

a) Variaciones en la impedancia del array, dado que es insensible a diferentes errores longitudinales y posicionales.

b) Cambio en la fase debido a aleatoriedad en el desplazamiento transversal de las ranuras, por ser un error de segundo orden comparado al

cambio en la fase debido a variaciones en la longitud de las ranuras.

c) El ancho de las ranuras, dado a que no se encontraron diferencias apreciables en la radiación para valores desde  $\frac{\lambda}{400}$  hasta  $\frac{\lambda}{40}$ .

Por tanto, solo se tendrán en cuenta los siguientes tres tipos de errores para las simulaciones de Monte Carlo:

a) Variación en la amplitud debido a la aleatoriedad en el desplazamiento transversal de las ranuras.

b) Variación en la fase debido a la aleatoriedad en la separación de las ranuras.

c) Variación en la fase debido a la aleatoriedad en la longitud de las ranuras.

#### Simulaciones de Monte Carlo

La Figura 2 muestra el esquema del subarray de ranuras, que es utilizado para las simulaciones, las cuales fueron realizadas bajo las siguientes condiciones: frecuencia de operación=12 GHz;  $w$ = Ancho de la ranura=1mm;  $L$ =longitud de diseño de la ranura=  $\frac{\Phi}{2}$ ;  $m$ = Número de simulaciones=30; Número de ranuras=11; NLPS=20 dB; Tolerancia de los tres tipos de error =  $\pm 0.1$  mm; Distribución de corriente= Taylor de un parámetro.

En la Figura 4, se muestran 30 diagramas de radiación obtenidos de simulaciones de Monte Carlo para el plano de  $\theta = 90^\circ$ , donde se observa un caso crítico en el deterioro del NLPS deseado.

La Figura 5 muestra el promedio de las simulaciones anteriores con sus respectivas desviaciones (STD) estándar,

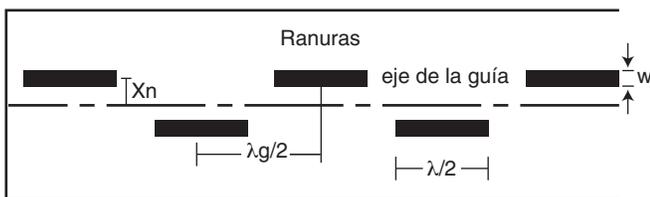


Figura 2. Esquema del subarray de ranuras en guía de onda.

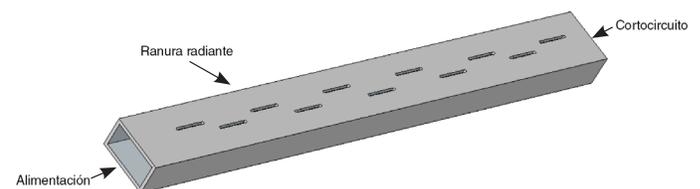


Figura 3. Subarray simulado en CST®.

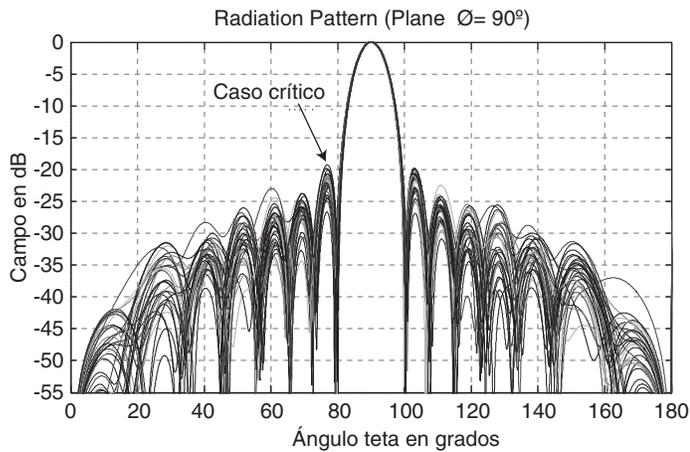


Figura 4. Diagrama de radiación para 30 simulaciones de Monte Carlo ( $\Theta = 90^\circ$ ).

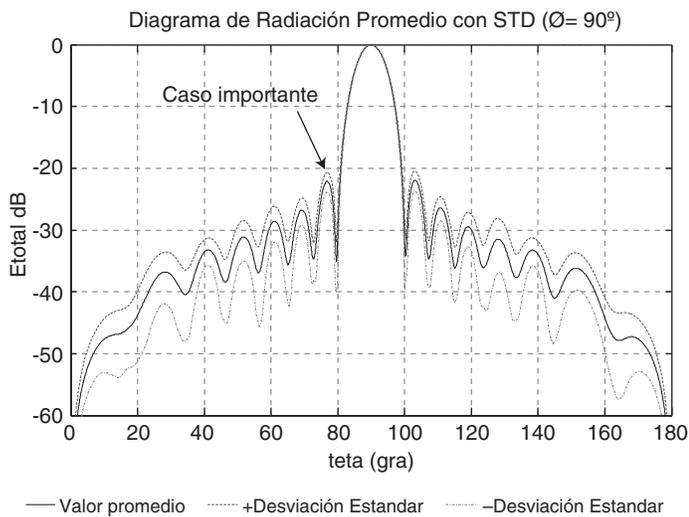


Figura 5. Diagrama de radiación promedio de las simulaciones con desviaciones estándar ( $\Theta = 90^\circ$ ).

observándose que el punto importante para la cuantificación del deterioro del NLPS está a una desviación estándar por encima de la media, el cual está por debajo del nivel de diseño deseado. Ello demuestra que utilizar una fresadora con una tolerancia de  $\pm 0,1\text{mm}$  debería ser adecuado para la fabricación del array.

#### Construcción y medidas del array

El caso simulado con MATLAB® y con el CST® Microwave Studio se construyó utilizando una guía de onda WR-75 de cobre. Para el corte de las ranuras se utilizó un sistema de fresado que presenta una tolerancia en la

posición y la longitud de las ranuras de  $\pm 0,1\text{mm}$ .

La Figura 6 muestra el subarray construido y montado en el soporte para iniciar las medidas de radiación en la cámara anecoica del Grupo de Radiación de la Universidad Politécnica de Madrid. Las medidas fueron realizadas para 12GHz utilizando un analizador vectorial. La alimentación se realizó con una sección de guía de ondas que utiliza una transición de cable coaxial.



Figura 6. Subarray construido.

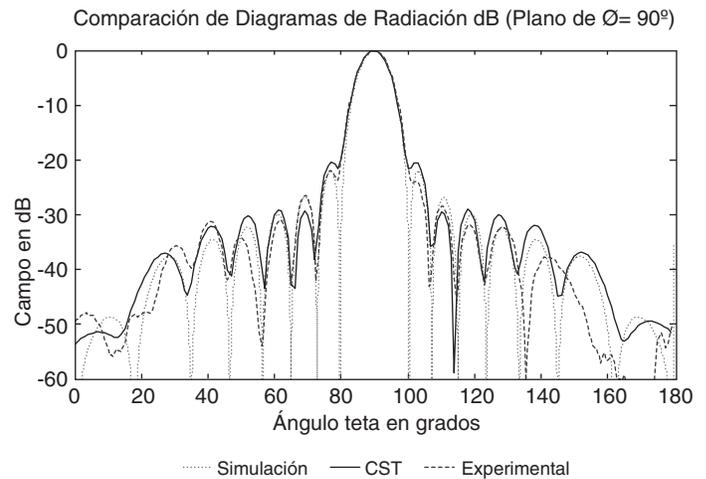


Figura 7. Diagrama de radiación simulado en Matlab®, obtenido con el CST® y el experimental ( $\Theta = 90^\circ$ ).

La Figura 7 muestra la comparación entre los diagramas de radiación simulado con MATLAB®, simulado con el CST® Microwave Studio y el obtenido experimentalmente. Se aprecia que las tres señales se siguen, presentando caídas en los mismos ángulos de radiación, principalmente en los primeros lóbulos, determinando así que el grado de similitud de dichos resultados es lo suficientemente bueno como para darlos por válidos.

Para la medición del coeficiente de reflexión en dB ( $S_{11}$ ) se utiliza un analizador de redes vectorial. La Figura 8 muestra el coeficiente de reflexión en dB ( $S_{11}$ ), tanto el simulado

(CST® Microwave Studio) como el obtenido experimentalmente. Se encuentra una diferencia a 12GHz, -34dB con el CST y -10,775dB con el experimental, debido a errores sistemáticos en el proceso de fabricación.

#### Conclusiones

En este trabajo se ha descrito el diseño de un subarray de ranuras en guía de onda, el cual fue validado con el software CST® Microwave Studio y con mediciones de radiación realizadas en cámara anecoica.

Se desarrolló una herramienta implementada en MATLAB® para el diseño de antenas lineales de ranuras en

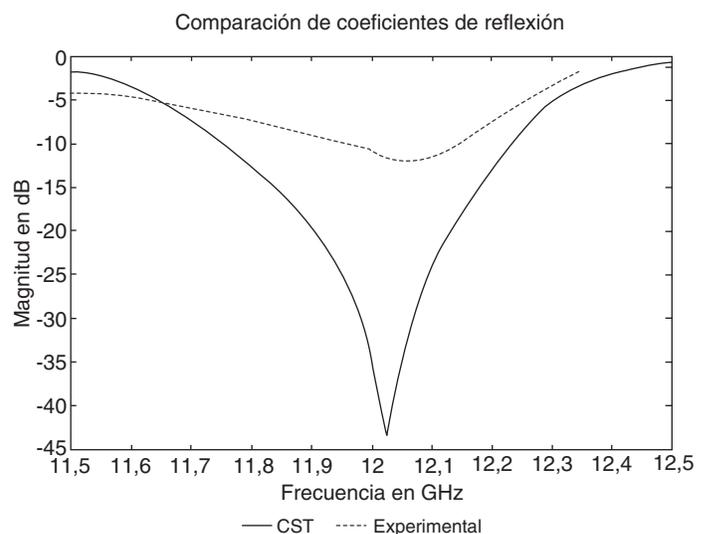


Figura 8. Coeficiente de reflexión en dB obtenido con el CST® y el experimental.

guía de onda, con resultados satisfactorios, teniendo en cuenta que a la frecuencia de diseño seleccionada (12GHz), las mínimas variaciones en las dimensiones de la antena cambian significativamente sus parámetros. Se encontró que el criterio de diseño de Taylor de un parámetro, es apropiado cuando se requieren arrays directivos y lóbulos secundarios decrecientes.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Grupo de Radiación de la

E.T.S.I.T. de la Universidad Politécnica de Madrid su constante apoyo y asesoramiento para la realización de las medidas en la cámara anecoica, y reconocen la financiación obtenida del proyecto Terasense (Consolider CSD-2008-0068) y del proyecto Crocante (TEC2008-06736-C03).

#### REFERENCIAS

Bailin L, Ehrlich M (1953) Factors affecting the performance of linear arrays. *Proc. IRE* 41: 235-241.

Balanis C A (1997) *Antenna Theory*. Wiley. EEUU. pp. 362-364.

Collin R, Zucker F (1961) *Antenna Theory*. Part I. McGraw-Hill. Nueva York, EEUU. pp. 587-601.

Elliott R (1983) An improved design procedure for small arrays of shunt slots. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 31: 48-53.

Elliott R (1988) The design of waveguide-fed slot arrays. In Lo YT, Lee SW (Eds.) *Antenna Handbook*. Van Nostrand Rheinhold. Nueva York, EEUU. pp. 907.

Elliott R, Kurtz L (1978) The design of small slot arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 26: 214-219.

Mosqueda MA, Castillo RC, Oleksiy P (2009) Diseño de antenas de ranura resonante para su aplicación en redes WiFi. *Científica* 13: 45-52.

Rengarajan S (2001) Advances in waveguide-fed slot arrays. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)* 11-17, pp. 1-4.

Rengarajan S (2009) A tutorial on design and analysis of waveguide-fed slot array antennas. *Appl. Electromagnetics Conference (AEMC)* 14-16, pp. 1-2.

Sekretarov S, Vavriv D, Shevtsova L (2010) Slotted waveguide antenna arrays for airborne radars. *18<sup>th</sup> Int. Conf. on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON)* 14-16, pp. 1-4.

Stevenson A (1946) Theory of slots in rectangular waveguides. *J. Appl. Phys.* 19, pp. 24-38.

Watson W (1946) Resonant slots. *Inst. Elec. Eng.* 93 (IIIa): 141-711.