

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

**“DISEÑO DE LENTES HEMISFÉRICAS EXTENDIDAS
PARA ANTENAS PLANAS EN EL RÉGIMEN DE
MILIMÉTRICAS Y SUBMILIMÉTRICAS”**

JAVIER ANCICU VERGARA
RAMÓN GONZALO GARCÍA
Pamplona, 14 Septiembre 2010

RESUMEN

En este proyecto se presenta un método para estudiar lentes dieléctricas con geometría hemisférica extendida para el rango de las milimétricas y submilimétricas. Esta aproximación consiste en obtener los campos radiados de una antena a través de un simulador electromagnético (CST o HFSS) y usarlas como entradas en un programa de creación propia (basado en lenguaje MATLAB) que utiliza una técnica de trazado de rayos para resolver el problema. Con esta aproximación se reduce el tiempo de computación y el uso de recursos de manera significativa. Además, permite el uso de diferentes antenas, y con pequeñas modificaciones, el uso de diferentes geometrías de lentes. Los resultados son comparados con las publicaciones de diferentes autores.

Posteriormente se realiza un estudio teórico y simplificado de un Imaging array para comprobar hasta que punto es factible realizar escáneres utilizando una configuración consistente en un array de 9 elementos y una lente dieléctrica con geometría hemisférica extendida.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2. ANALISIS DE LA LENTE HEMISFÉRICA	5
INTRODUCCIÓN TEÓRICA	5
COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA	12
PROPUESTA DE LENTE TIPO DOBLE FOCO	30
CAPÍTULO 3. IMAGING ARRAY	34
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	44
REFERENCIAS	46

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los campos de investigación actual sobre el que se está trabajando en el área de las antenas es la construcción de arrays de antenas capaces de ser usados como escáneres en distintas bandas frecuenciales. Para continuar con el avance en ese proyecto se hace necesario el estudio de algunos problemas concretos a los que se enfrenta, como son la necesidad de aumentar la directividad de las antenas de cara a la construcción del sistema detector completo, el desarrollo de un simulador adecuado a las frecuencias de trabajo, o el posicionamiento de las antenas en el array para obtener un escaneo adecuado a las características requeridas por el problema.

Con el fin de obtener mejores resultados en el diagrama de radiación de antenas planas, tales como el aumento de directividad, gausicidad y reducción de la radiación trasera, las lentes dieléctricas han sido uno de los elementos más utilizados, especialmente en el rango de las milimétricas y submilimétricas [1]-[6]. A estas frecuencias, los sustratos disponibles para antenas planas tienen un espesor muy elevado en términos de longitud de onda. Esto provoca pérdidas de potencia ya que se generan modos no deseados en el sustrato [7]. Al utilizar una lente dieléctrica como sustrato, estos modos no son generados debido a la geometría de la misma.

La forma ideal de una lente dieléctrica es la elipsoidal [2]-[3], sin embargo, su dificultad a la hora de construirla hacen que no sea práctica. Una lente elíptica se puede aproximar por una lente hemisférica extendida, lo cual, unido a su facilidad de fabricación, la convierten en la geometría de lente más utilizada.

Para diseñar este tipo de antenas, se pretende combinar la potencia de computación que ofrecen los simuladores electromagnéticos actuales (como CST o HFSS) con las técnicas de trazado de rayos y física óptica convencionales. El problema de diseñar antenas planas con lentes dieléctricas reside en que el tamaño de la lente dieléctrica, en longitudes de onda, es muy elevado (del orden de $7\lambda \sim 15\lambda$) en comparación con la antena. Por ello simular la estructura entera (antena + lente dieléctrica) llevaría un tiempo de cómputo muy elevado y, en algunos casos, el problema sería inabordable.

Para hacerse una idea de la diferencia de tamaños al tratar con este problema, se ha realizado una simulación de un dipolo con una lente hemisférica. Los valores de la lente son los que se utilizarán más adelante para validar los resultados. Se hace patente en las siguientes figuras la enorme diferencia existente entre la antena y la lente.

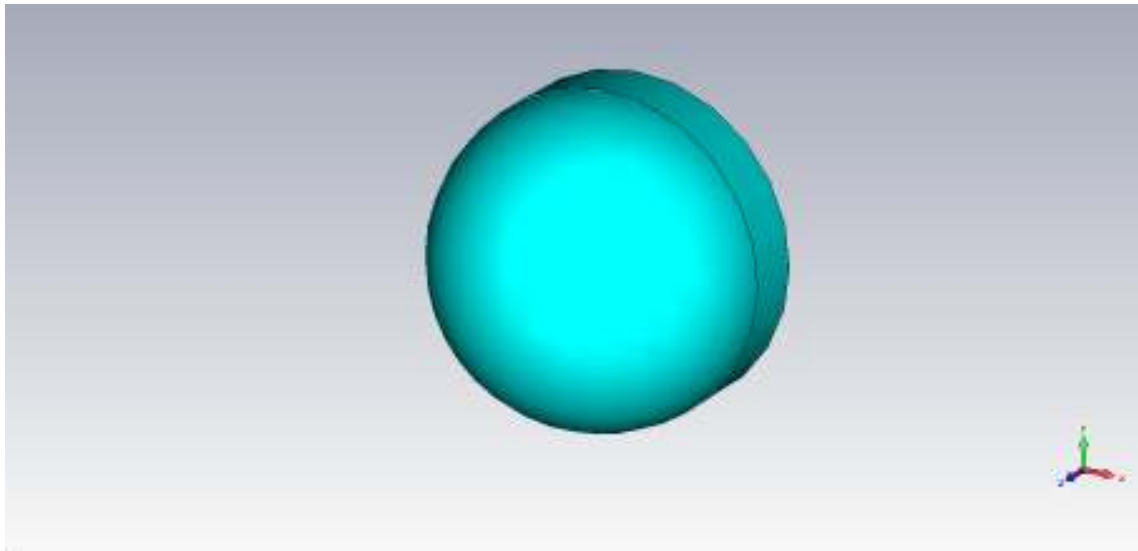


Fig. 1 Lente hemisférica extendida, vista frontal.

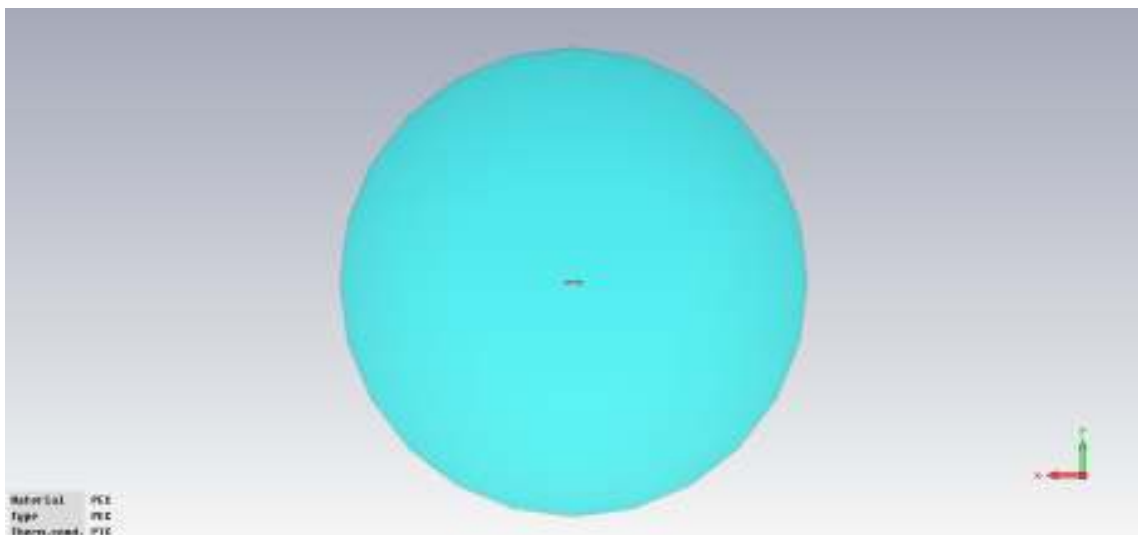


Fig. 2 Lente hemisférica extendida, vista trasera.

Como dato curioso, comentar que para realizar esta simulación en CST, el programa necesita resolver, para un mallado de 10 líneas por longitud de onda, a una frecuencia de 600 GHz, 68.607.432 celdas. A partir de los 6 millones de celdas, la memoria de un ordenador actual es incapaz de terminar los cálculos requeridos.

Uno de los objetivos del presente trabajo consiste en describir el proceso de obtención del diagrama de radiación de una antena plana cuando se utiliza como sustrato una lente dieléctrica hemisférica extendida y comparar los resultados obtenidos con los presentados en diversos artículos. Dicho método consiste en obtener los campos radiados por una antena plana cuando se tiene un dieléctrico infinito mediante un simulador electromagnético convencional y, a partir de ellos y utilizando conceptos de trazado de rayos y física óptica convencional obtener las corrientes inducidas en la superficie de la lente. Con dichas corrientes se calculará el diagrama de radiación a partir de las fórmulas de radiación de apertura [8]

Una vez obtenido el diagrama de radiación correspondiente al sistema completo antena-lente, llega el momento de estudiar el comportamiento conjunto de varias antenas en array. Para ello, se realizará un estudio conocido como Imaging array, basado en el escaneo de una imagen utilizando como detectores las distintas antenas del sistema, y observando los resultados obtenidos.

Este documento está estructurado en cinco capítulos.

El primer capítulo es esta breve introducción donde se exponen los objetivos y la estructura del proyecto.

El segundo capítulo, *Análisis de la lente hemisférica*, explica en profundidad los conceptos teóricos necesarios para la construcción del programa capaz de calcular los campos radiados por el sistema antena-lente, así como la comparación de los resultados obtenidos con los resultados aportados por los distintos artículos en los que se basa este proyecto. Se propondrá también un nuevo tipo de lente tipo doble foco.

El tercer capítulo, *Imaging Array*, explica este concepto en profundidad y las conclusiones obtenidas de dicho estudio.

El cuarto y último capítulo, *Conclusiones y líneas futuras de investigación*, se exponen las conclusiones obtenidas a lo largo del proyecto y se valoran los

resultados obtenidos. Además se plantean nuevas líneas de investigación a las que este PFC sirve de punto de partida.

CAPÍTULO 2. ANALISIS DE LA LENTE HEMISFÉRICA

INTRODUCCIÓN TEÓRICA

Este capítulo expone los conceptos necesarios para la obtención de los diagramas de radiación del sistema compuesto por una antena (o array de antenas) y una lente hemisférica.

Una antena plana que utiliza como sustrato una lente dieléctrica con una permitividad relativa elevada radia la mayor parte de la potencia hacia el sustrato obteniéndose un diagrama de radiación unidireccional [1]. Una manera de solucionar este problema es integrar la antena en un sustrato muy fino, normalmente menos de $0.02 \lambda_d$ para dipolos y $0.04 \lambda_d$ para antenas de apertura. El problema es que en el rango de las milimétricas y las submilimétricas, este sustrato se vuelve demasiado fino y frágil. Un método apropiado que elimina los modos del sustrato, sin este tipo de inconvenientes, es colocar la antena en una lente dieléctrica. La constante dieléctrica de la lente es la misma que la de la oblea sobre la que se coloca la antena. De esta forma se consigue que la antena radie la mayor parte de su energía en el lado dieléctrico, haciendo el diagrama unidireccional. Además, el uso de lentes dieléctricas es una solución interesante, por que además de eliminar el problema comentado, puede aumentar la directividad y proporciona rigidez mecánica y estabilidad térmica.

Existen varias posibilidades de geometría para la lente. Puede ser hemisférica, hiperhemisférica o elipsoidal. El estudio de estas lentes para su uso en el campo de las antenas ha terminado por extender el uso del tipo hemisférico, tanto por sus propiedades como por su sencillez de construcción [1].

La lente está formada por una semiesfera de radio R con un bloque cilíndrico de longitud L . (Fig. 1) La antena plana que alimenta el sistema se colocará en la parte inferior de la lente dieléctrica, con un desplazamiento respecto al origen que viene dado por dx y dy .

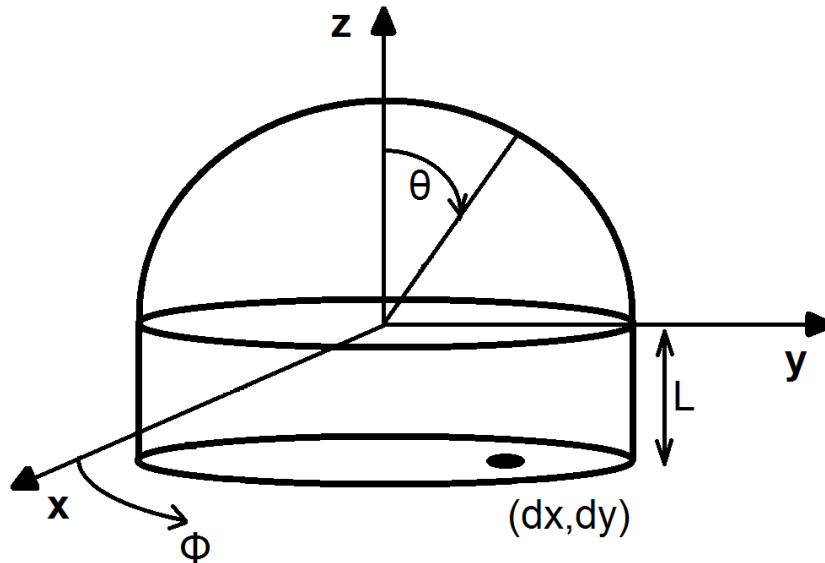


Fig. 3 Lente hemisférica extendida.

Las antenas hemisféricas extendidas satisfacen la condición del seno, lo cual garantiza ausencia de coma circular, y no tienen aberraciones circulares. Esto implica que si un sistema óptico está diseñado tal que todos los rayos estén enfocados a un punto, se puede incluir una lente hemisférica extendida al sistema y los rayos seguirán enfocados al mismo punto [1].

Con esta lente se consigue incrementar la ganancia de la antena plana y el diagrama de radiación obtenido se adapta bien a un sistema de haz gaussiano. El parámetro que más influye en la directividad del sistema es la longitud del bloque cilíndrico (L) tal y como se demostrará en los siguientes apartados. Esto se debe a que la antena se debería colocar en el foco de la lente elíptica, pero en este caso la lente es hemisférica y hay que añadir un bloque cilíndrico para que coincida con el foco de la lente elíptica equivalente.

El método usado para hallar los campos radiados por el sistema completo antena-lente empieza con el trazado de rayos desde un punto (posición de la antena) con dirección igual a la dirección de propagación. A partir de ahí se aplican técnicas de física óptica y se obtienen las corrientes superficiales de la lente para, a partir de ellas, obtener el diagrama de radiación. Siempre y cuando la distancia entre la antena y cualquier punto de la superficie de la lente sea elegida para satisfacer las

condiciones de campo lejano, la antena puede ser tomada como un punto desde el cual salen dichos rayos.

El primer paso es descomponer el campo en sus componentes TE y TM en la interfaz lente-aire utilizando las fórmulas de los coeficientes de reflexión y transmisión, cuando se incide sobre un dieléctrico con permitividad ϵ_r [8]:

$$\Gamma_{TE} = \frac{\sqrt{\epsilon_R} \cos \theta_i - \sqrt{1 - \epsilon_R \sin^2 \theta_i}}{\sqrt{\epsilon_R} \cos \theta_i + \sqrt{1 - \epsilon_R \sin^2 \theta_i}} \quad (1)$$

$$\tau_{TE} = 1 + \Gamma_{TE} \quad (2)$$

$$\Gamma_{TM} = \frac{\sqrt{\epsilon_R} \sqrt{1 - \epsilon_R \sin^2 \theta_i} - \cos \theta_i}{\sqrt{\epsilon_R} \sqrt{1 - \epsilon_R \sin^2 \theta_i} + \cos \theta_i} \quad (3)$$

$$\tau_{TM} = (1 + \Gamma_{TM}) \frac{\cos \theta_i}{\sqrt{1 - \epsilon_R \sin^2 \theta_i}} \quad (4)$$

donde ϵ_r es la constante dieléctrica del material de la lente, θ_i es el ángulo de incidencia respecto de la normal de la superficie de la lente, y Γ y τ son los coeficientes de reflexión y transmisión para las polarizaciones de TE y TM.

Una vez los campos eléctricos y magnéticos han sido definidos, se calculan las densidades de corriente equivalente eléctrica y magnética fuera de la superficie de la lente [2]:

$$\bar{J}_s = \hat{n} \times \bar{H} \quad (5)$$

$$\bar{M}_s = -\hat{n} \times \bar{E} \quad (6)$$

donde \hat{n} es la normal a la interfaz. En campo lejano, las componentes θ y ϕ del campo eléctrico son:

$$E_{\theta} \cong -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r}(L_{\phi} + \eta N_{\theta}) \quad (7)$$

$$E_{\phi} \cong +\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r}(L_{\theta} + \eta N_{\phi}) \quad (8)$$

donde N y L son definidas como:

$$N = \iint_S J_s e^{jkr' \cos \psi} ds' \quad (9)$$

$$L = \iint_S M_s e^{jkr' \cos \psi} ds' \quad (10)$$

donde s' es la superficie exterior de la lente, r' es la distancia desde el origen del sistema de coordenadas a las corrientes eléctricas y magnéticas equivalentes, r es la distancia desde el origen al punto de observación y ψ es el ángulo entre r y r' .

La superficie de la lente dieléctrica hemisférica, excepto la parte inferior, es dividida en 4 regiones [9] mostradas en la Fig. 4. La superficie circular esta compuesta por las regiones 1 y 2, mientras que el cilindro inferior esta compuesto por las regiones 3 y 4. Cabe destacar que estas regiones, al igual que la estructura de la lente, tiene simetría de revolución respecto al eje z. Las distintas regiones son descritas a continuación:

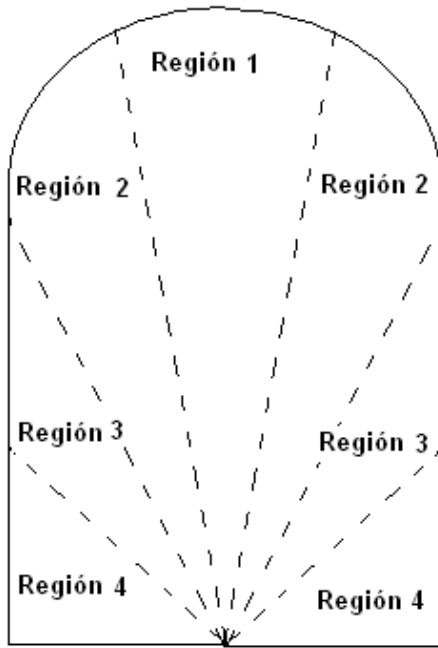


Fig. 4 a)

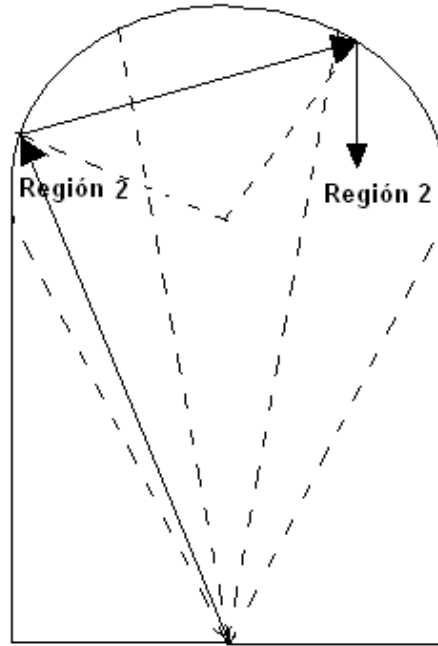


Fig. 4 b)

Fig. 4 a) Lente hemisférica extendida dividida en regiones
 Fig. 4 b) Rayo reflejado dentro de la lente hemisférica extendida

Región 1

Esta región es la principal responsable de la radiación en campo lejano y de hecho, la única que se tiene en cuenta en los cálculos simplificados que se realizan [9]. En esta región, los rayos del origen son parcialmente reflejados, y parcialmente transmitidos en la separación entre el dieléctrico y el aire. De la geometría de la Fig. 1, se saca la siguiente relación entre θ y θ_{in} .

$$R \sin(\theta_{in} + \theta) = [R \cos(\theta_{in} + \theta) + L] \tan \theta \quad (11)$$

Donde $\theta_{in} = \theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}\right)$, que es el ángulo crítico de reflexión total, y el límite entre la región 1 y 2.

Región 2

En esta región, los rayos procedentes del origen son totalmente reflejados en la interfaz dieléctrico-aire. Como se muestra en la Fig. 2 b), los rayos que iluminan directamente la región 2 son totalmente reflejados y vuelven a ser reflejados más veces en la superficie hemisférica antes de volver a la sección cilíndrica. Y aunque los campos en la separación dieléctrico-aire en la región 2 no son cero, son campos evanescentes que contribuyen muy poco a la radiación en campo lejano.

Región 3

De manera similar a la región 2, en esta zona ocurre el fenómeno de la reflexión total. Los rayos reflejados contribuyen de manera significativa a la radiación final del sistema. Sin embargo, la antena que alimenta al sistema suele ser diseñada para que emita principalmente hacia las regiones 1 y 2, encontrándonos con nulos de radiación en esta dirección.

Región 4

Cuando el ángulo θ crece por encima del límite de la región 3 (marcado dicho límite por el ángulo límite en el que se refleja todo rayo incidente), parte del rayo se transmite, y parte se refleja. Al igual que en la región 3, la iluminación por parte de la antena es demasiado pequeña para que la aportación de esta región al resultado final sea significativo.

Un tema al que hay que prestarle atención es el comportamiento del sistema ante el desalineamiento respecto al origen de coordenadas. Este es un aspecto a tener en cuenta dado que el sistema que se intenta estudiar se compone de un array colocado en una lente. Esto hace que nos encontremos con antenas fuera del origen de coordenadas, y se hace necesario un estudio más exhaustivo del comportamiento de la lente ante este hecho.

En primer lugar, se define la superficie normal a la lente:

$$\hat{n} = \cos \theta \cos \phi \hat{x} + \cos \theta \sin \phi \hat{y} + \sin \theta \hat{z} \quad (12)$$

Se define el trazado del rayo dentro de la lente:

$$\mathbf{v} = (x_s - dx)\hat{x} + (y_s - dy)\hat{y} + (z_s - dz)\hat{z} \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{v}/|\mathbf{v}| \quad (14)$$

Donde (x_s, y_s, z_s) son las coordenadas de la superficie y (dx, dy, dz) . Los vectores que definen las componentes del campo eléctrico que inciden en los planos paralelo y perpendicular son:

$$\mathbf{P}_\perp = \hat{\mathbf{n}} \times \hat{\mathbf{v}} \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_\perp = \mathbf{P}_\perp / |\mathbf{P}_\perp| \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_\parallel = \hat{\mathbf{P}}_\perp \times \hat{\mathbf{v}} \quad (17)$$

Así, el valor de las componentes paralela y perpendicular del campo eléctrico en el interior de la esfera son:

$$E_{\Phi d} = E_d \cdot \hat{\mathbf{P}}_\perp \quad (18)$$

$$E_{\alpha d} = E_d \cdot \hat{\mathbf{P}}_\parallel \quad (19)$$

Donde E_d es el campo eléctrico en la parte interior de la lente. El campo eléctrico fuera de la lente se deriva de lo siguiente:

$$E_x = E_{\Phi d} T_\perp (\hat{x} \cdot \hat{\mathbf{P}}_\perp) + E_{\alpha d} T_\parallel \times [(\hat{x} \cdot \hat{\mathbf{P}}_\parallel) \cos(\psi_{tr} - \psi_i) - (\hat{x} \cdot \mathbf{v}) \sin(\psi_{tr} - \psi_i)] \quad (20)$$

$$E_y = E_{\Phi d} T_\perp (\hat{y} \cdot \hat{\mathbf{P}}_\perp) + E_{\alpha d} T_\parallel \times [(\hat{y} \cdot \hat{\mathbf{P}}_\parallel) \cos(\psi_{tr} - \psi_i) - (\hat{y} \cdot \mathbf{v}) \sin(\psi_{tr} - \psi_i)] \quad (21)$$

$$E_z = E_{\Phi d} T_\perp (\hat{z} \cdot \hat{\mathbf{P}}_\perp) + E_{\alpha d} T_\parallel \times [(\hat{z} \cdot \hat{\mathbf{P}}_\parallel) \cos(\psi_{tr} - \psi_i) - (\hat{z} \cdot \mathbf{v}) \sin(\psi_{tr} - \psi_i)] \quad (22)$$

$$\mathbf{E} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} + E_z \hat{z} \quad (23)$$

Donde ψ_i y ψ_{tr} son los ángulos de incidencia y transmisión, y T_\perp y T_\parallel son los coeficientes de transmisión perpendicular y paralelo de la separación lente-aire. El camino del rayo fuera de la lente viene dado por:

$$s_x = v_x \cos(\psi_{tr} - \psi_i) + (\hat{x} \cdot \mathbf{P}_\parallel) \sin(\psi_{tr} - \psi_i) \quad (24)$$

$$s_y = v_y \cos(\psi_{tr} - \psi_i) + (\hat{y} \cdot \mathbf{P}_\parallel) \sin(\psi_{tr} - \psi_i) \quad (25)$$

$$s_z = v_z \cos(\psi_{tr} - \psi_i) + (\hat{z} \cdot P_{II}) \sin(\psi_{tr} - \psi_i) \quad (26)$$

Y de aquí se deriva el campo magnético fuera de la esfera:

$$H = \hat{s} \times E \quad (27)$$

A partir de aquí, los campos lejanos son calculados siguiendo el mismo procedimiento que en el caso de estar la lente centrada. Cabe destacar que el procedimiento es similar al utilizado, pero el sistema de coordenadas cambia para ajustarse al problema.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Ahora que se dispone del programa capaz de realizar de manera rápida los cálculos, hay que comparar los resultados que se obtienen con el programa con otros validados de manera tanto teórica como práctica. Para ello, se compararán los resultados obtenidos en el programa con resultados conocidos, como pueden ser situaciones simples, o artículos en los que se basa este proyecto.

Un primer acercamiento se realiza probando a radiar una lente de radio infinito (solamente posee la parte cilíndrica) con una onda plana excitando la lente. Al no necesitar una antena muy pequeña en el sistema, este se puede simular sin problemas en los simuladores comerciales actuales. Los resultados obtenidos se presentan de la siguiente manera: En primer lugar, se muestra el resultado obtenido por el simulador CST. A continuación el gráfico obtenido por el programa realizado en este proyecto.

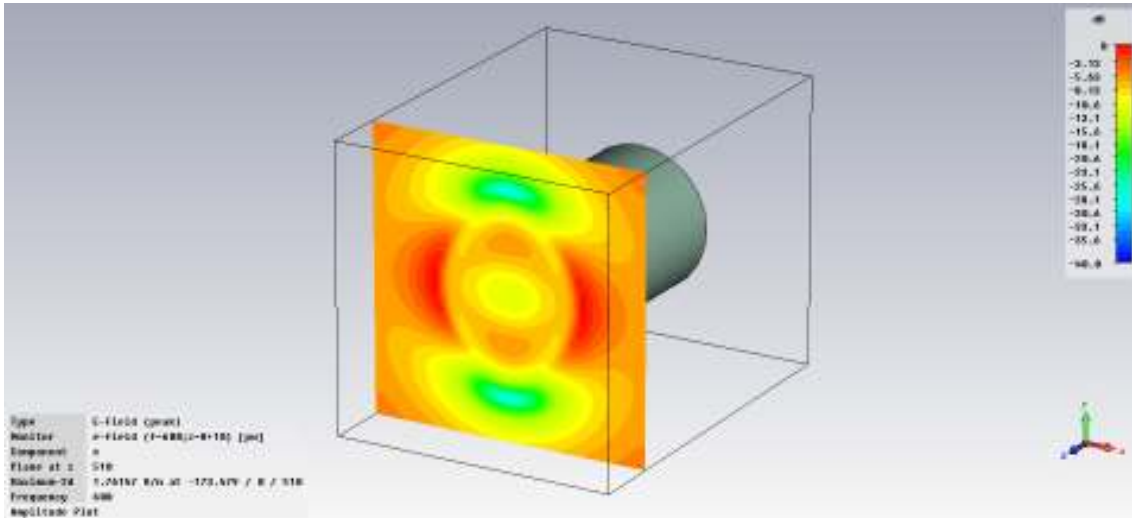


Fig. 5 Componente x del campo eléctrico de una onda plana atravesando la lente hemisférica. CST

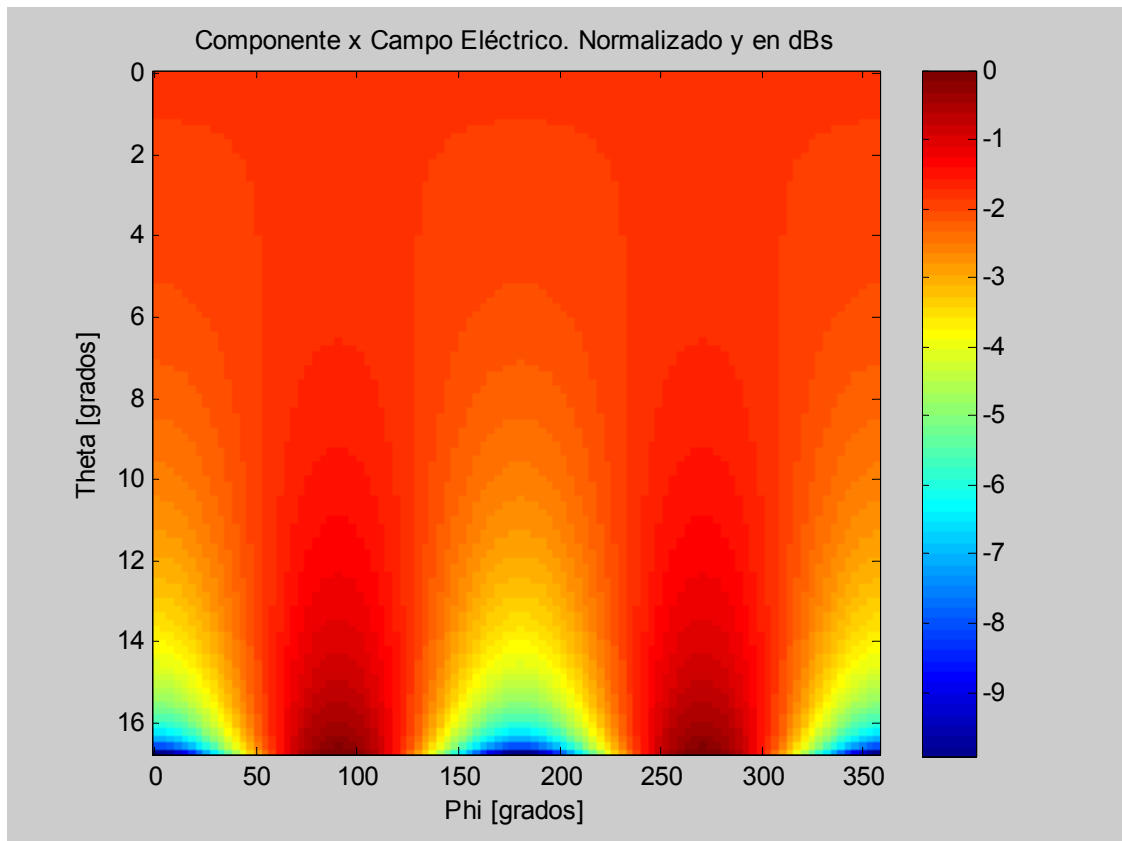


Fig. 6 Componente x del campo eléctrico de una onda plana atravesando la lente hemisférica obtenido por el programa (en cartesianas).

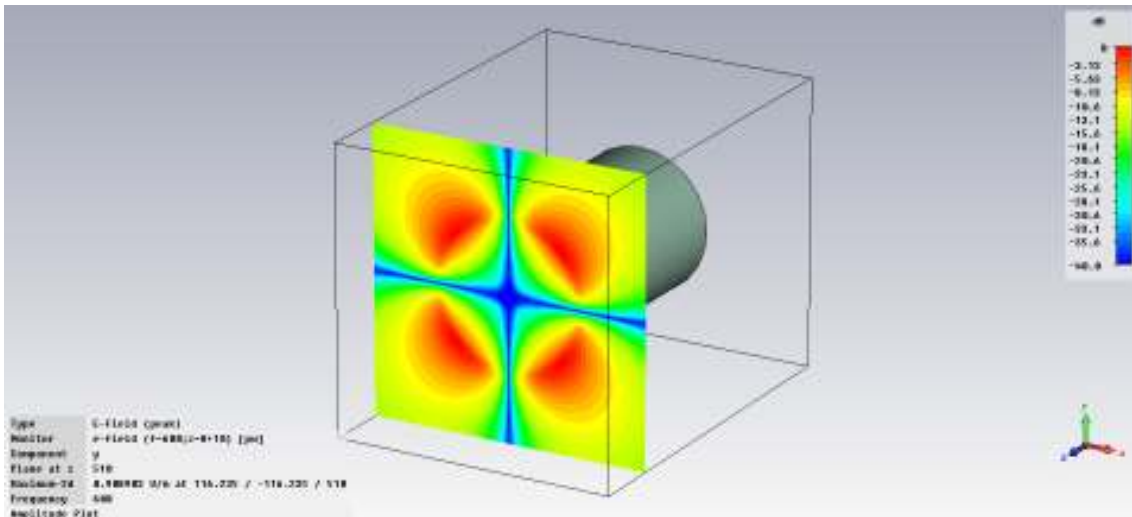


Fig. 7 Componente y del campo eléctrico de una onda plana atravesando la lente hemisférica. CST

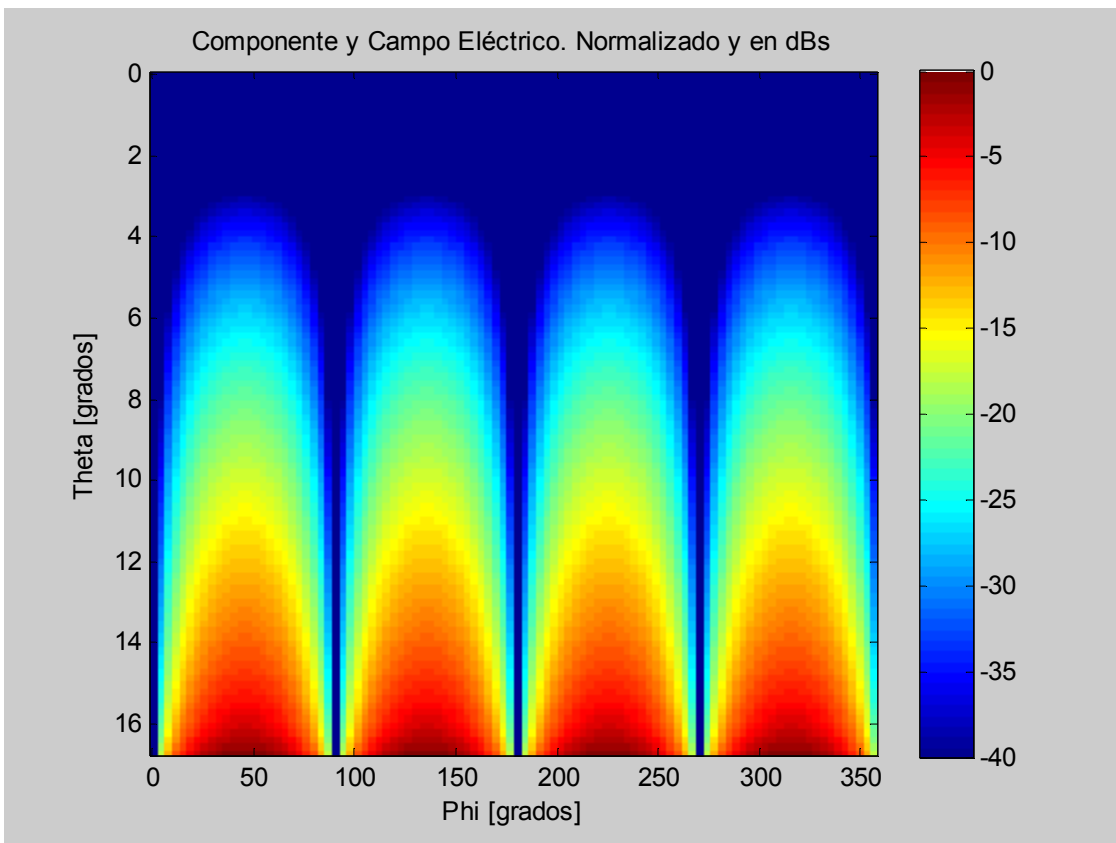


Fig. 8 Componente y del campo eléctrico de una onda plana atravesando la lente hemisférica obtenido por el programa (en cartesianas).

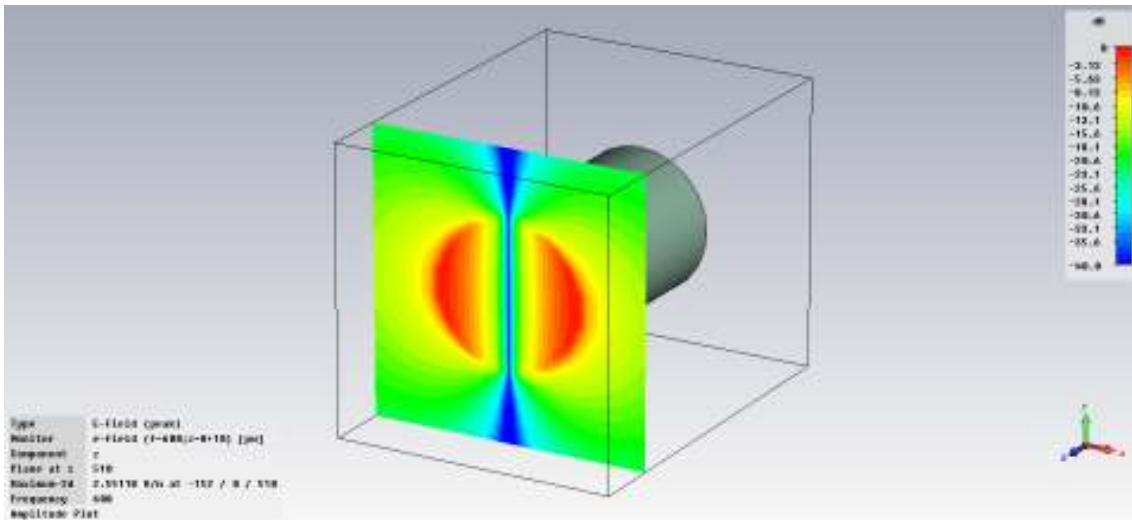


Fig. 9 Componente z del campo eléctrico de una onda plana atravesando la lente hemisférica. CST

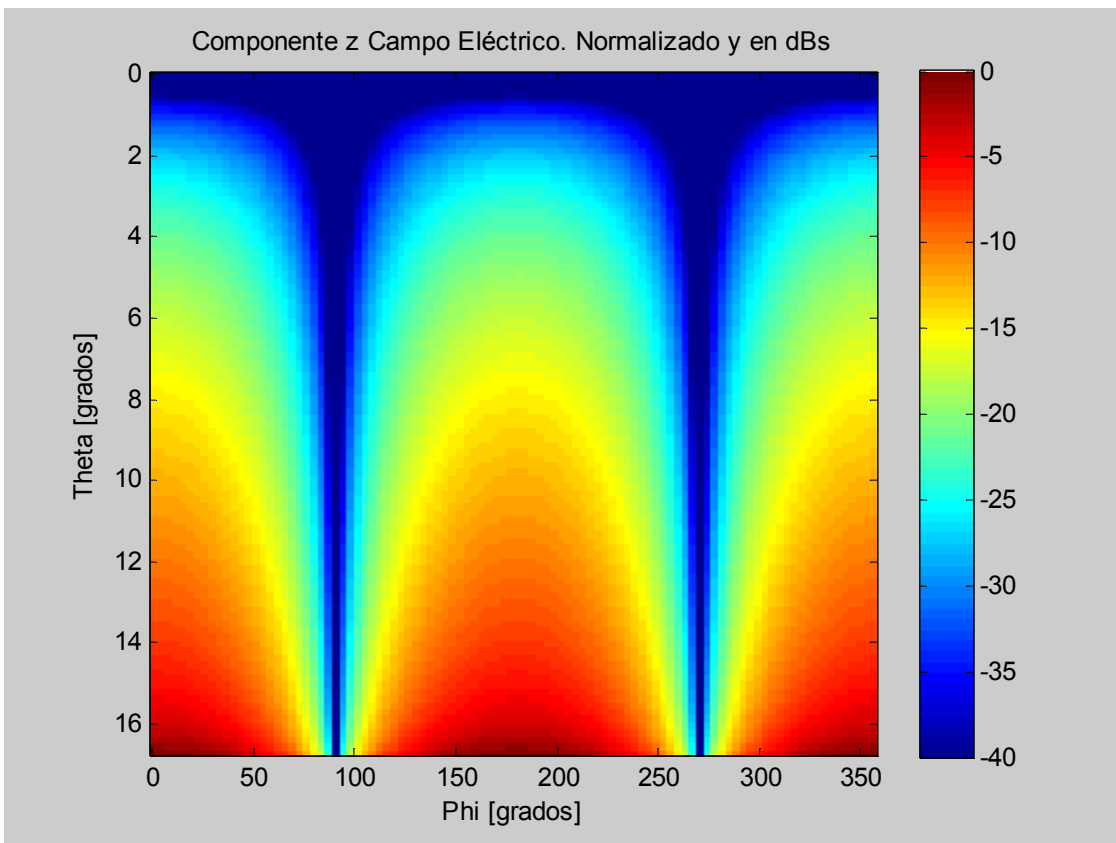


Fig. 10 Componente z del campo eléctrico de una onda plana atravesando la lente hemisférica obtenido por el programa (en cartesianas).

Como se puede observar, los resultados obtenidos son prácticamente idénticos, encontrándonos los nulos y los máximos colocados en los mismos lugares.

El siguiente sistema a replicar ha sido la antena y lente que se encuentra en [10]. Dicho sistema corresponde a una antena plana del tipo log-espiral trabajando a 600GHz. Se ha diseñado con CST una antena con las mismas dimensiones que las indicadas en [10] y se ha colocado sobre un dieléctrico infinito. Los valores correspondientes de la lente son: $R=6.35\text{mm}$ y $L=2.4\text{mm}$. La permitividad del dieléctrico es 11.7 (silicio). En la Fig. 11 se muestran los resultados obtenidos por el artículo, y en la Fig. 12, las del programa. Se obtiene un ancho de haz a 10 dBs de 2.22° y una directividad de 35.85dBs, siendo estos valores idénticos a los obtenidos en [10].

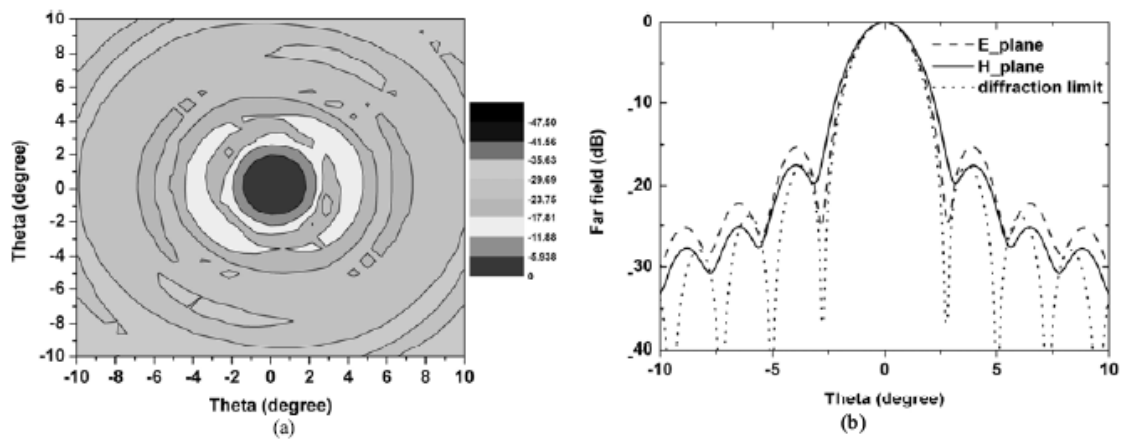


Fig. 11 Antena log-espiral a 600 GHz con lente hemisférica extendida. Valores obtenidos en el artículo [10] a) Diagrama de radiación para dos cortes y b) Diagrama de radiación en función del ángulo ϕ

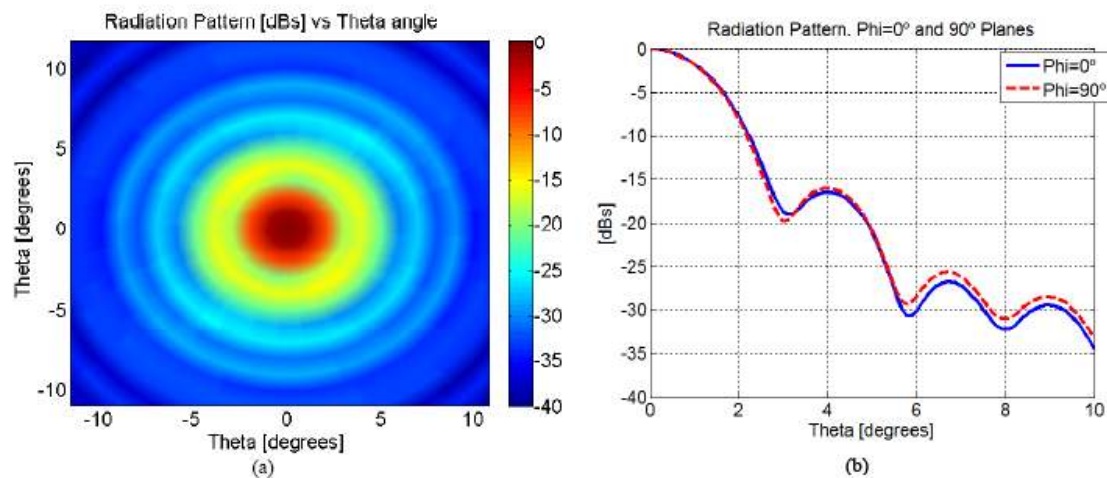
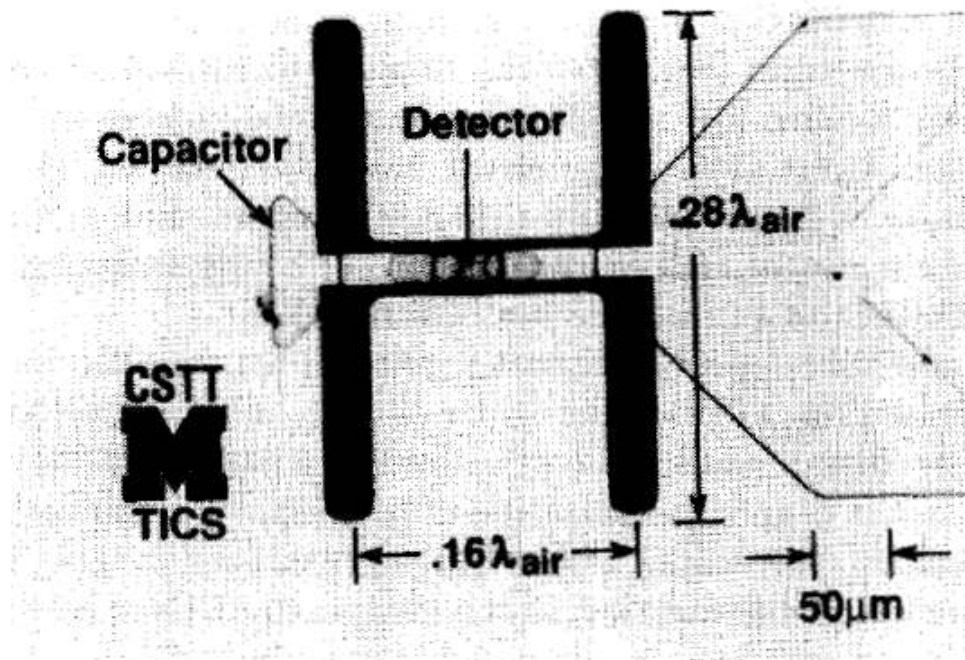


Fig. 12 Antena log-espiral a 600 GHz con lente hemisférica extendida. Valores obtenidos por el programa propuesto a) Diagrama de radiación en función del ángulo ϕ y b) Diagrama de radiación para dos cortes

Quedan patentes a simple vista las similitudes existentes entre los valores obtenidos en dicho artículo, y los obtenidos por el programa desarrollado en este proyecto.

La siguiente demostración del funcionamiento del programa se lleva a cabo comparando los resultados obtenidos en [1]. En este caso se tiene una antena del tipo double-slot operando a 246 GHz. Se tiene una lente hemisférica de radio 6.85mm y permitividad relativa de 11.7 (silicio).

Se pondrán como ejemplos los casos en los que la longitud del bloque posee unas longitudes de 2400 y 2600 μm . Cabe destacar que los resultados no son exactamente iguales dada la imposibilidad de replicar exactamente la antena utilizada en [1], por falta de datos en su descripción en el artículo. Los datos de que disponemos son aparte de los mencionados, las siguientes imágenes:



(a)

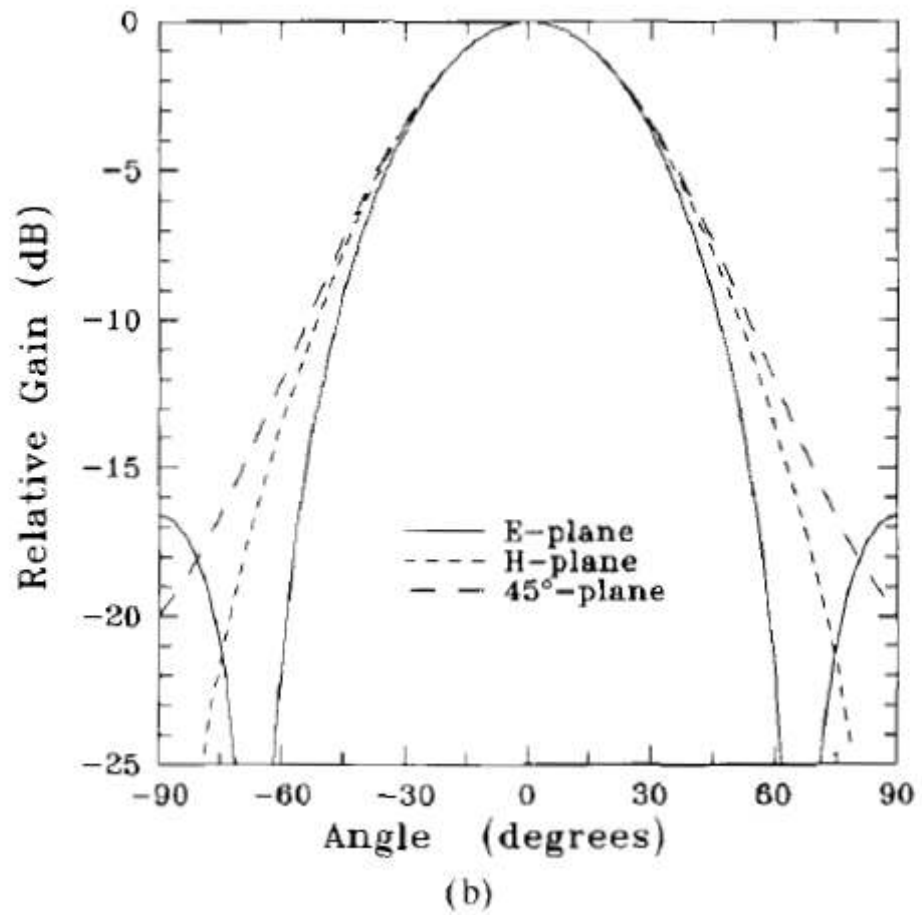
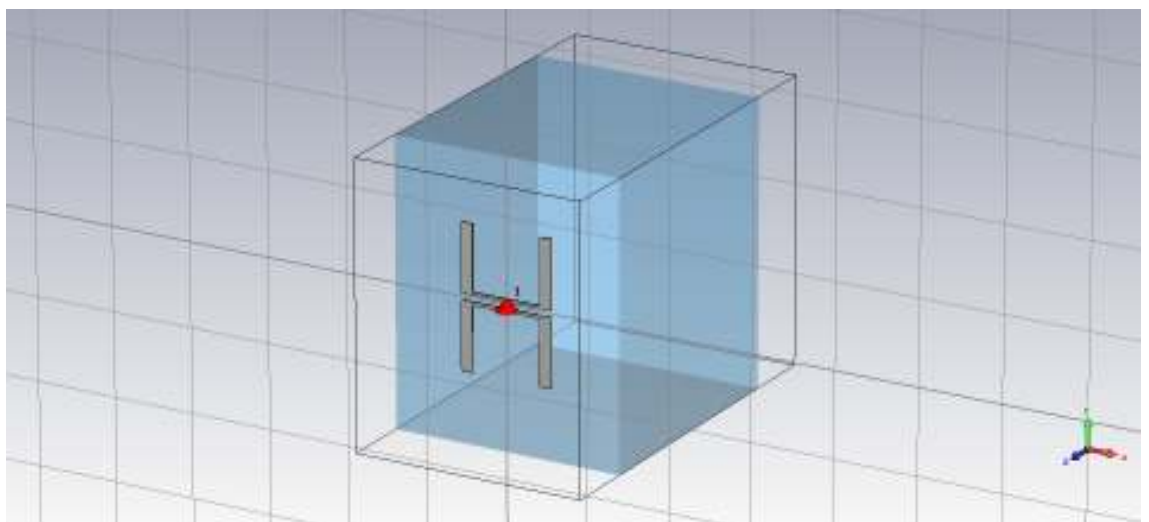
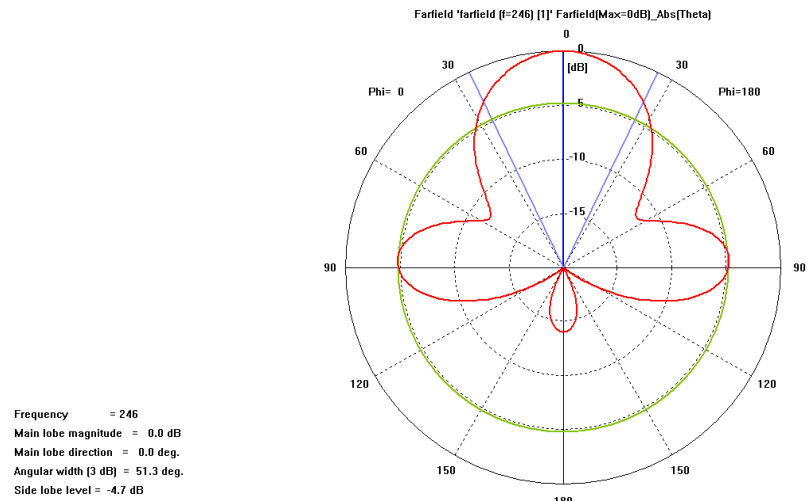


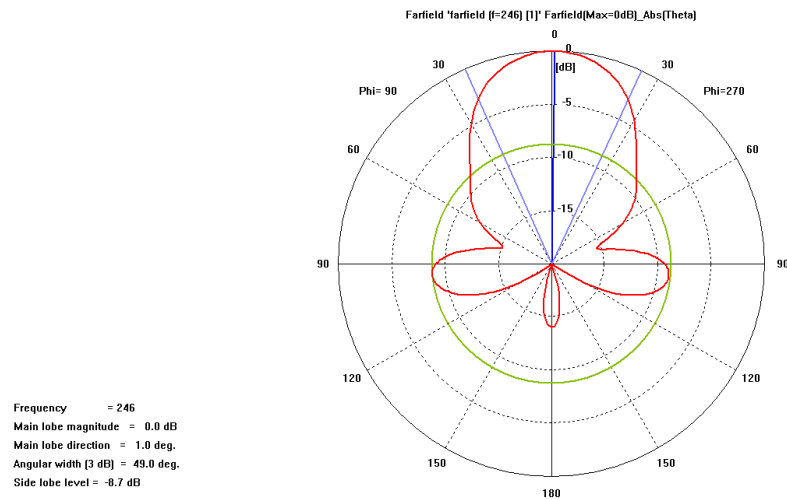
Fig. 13 a) la antena tipo double-slot utilizada en [1] y b) el diagrama de radiación en dieléctrico de silicio (permitividad de 11.7)



a)



b)



c)

Fig. 14 a) la antena tipo double-slot replicada para la comprobación y el diagrama de radiación en dieléctrico de silicio (permitividad de 11.7) . b) plano E y c) plano H

Se puede observar de los diagramas expuestos que no se ha conseguido del todo replicar la antena, con lo que se puede esperar una cierta divergencia entre los resultados obtenidos en [1], y los obtenidos por el programa, aunque las diferencias son pequeñas como para encontrarse con deferencias importantes entre unos resultados y otros.

Estas diferencias probocarán un aumento de los lóbulos secundarios debido a que el sistema lente-antena no se encuentra en el límite óptimo de eficiencias de spillover y taper.

La eficiencia de spillover (o desbordamiento) es un efecto que se produce en las antenas con reflectores. Aunque nuestro sistema no es un reflector, si que se comporta de manera similar (transmitiendo la señal que llega a una superficie en lugar de reflejandola, siendo el límite de nuestra superficie el ángulo de Brewster). Al iluminar desde el foco la superficie de la lente las ondas radiadas inciden en la superficie de la misma. Parte de la potencia es reflejada debido a la diferencia de índices de refracción. La eficiencia de spillover es la relación entre la potencia que se transmite por la lente, y la potencia total radiada.

La eficiencia de taper es medida de lo cerca que se encuentran la iluminación recibida por la lente de ser uniforme. Si se ilumina de manera completamente uniforme, la eficiencia será 1. Conforme nos alejamos de esa iluminación, dicha eficiencia disminuye.

Evidentemente, es imposible mantener ambas eficiencias en un valor alto, al estar ambas basadas en conceptos contrarios. Si tenemos una eficiencia de taper alta, estamos iluminando la apertura de manera casi uniforme. Pero para ello, hay que emitir gran parte de la potencia fuera de la zona de interés, lo que deja la eficiencia de spillover muy baja. Y si por el contrario conseguimos emitir casi toda la potencia en la zona de interés, se iluminará dicha zona de manera muy alejada de la uniforme.

Así, se llega a una solución de compromiso como se observa en la siguiente gráfica.

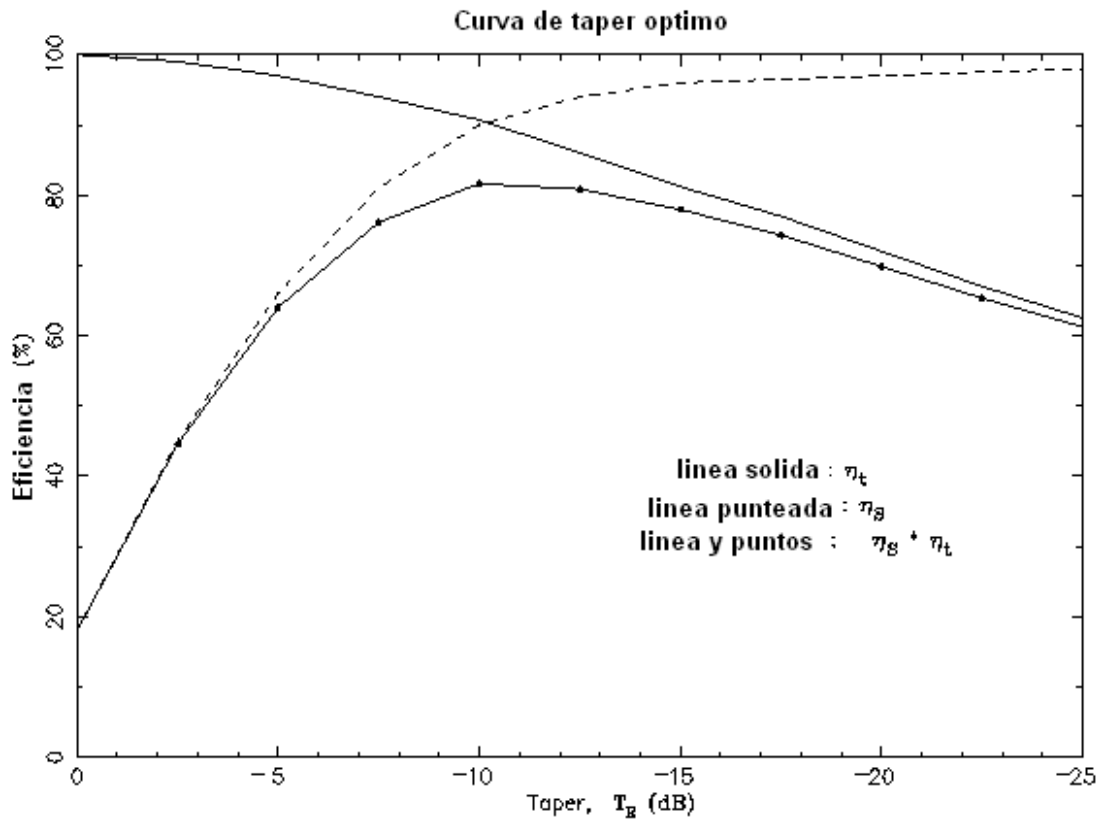


Fig. 15 eficiencias de iluminación y de spillover en función del taper. El taper óptimo es aproximadamente -11dB

Como consecuencia de no conseguir esos 11 dB de diferencia, no estamos iluminando la lente de manera óptima, por lo que aumentará el nivel de los lóbulos secundarios.

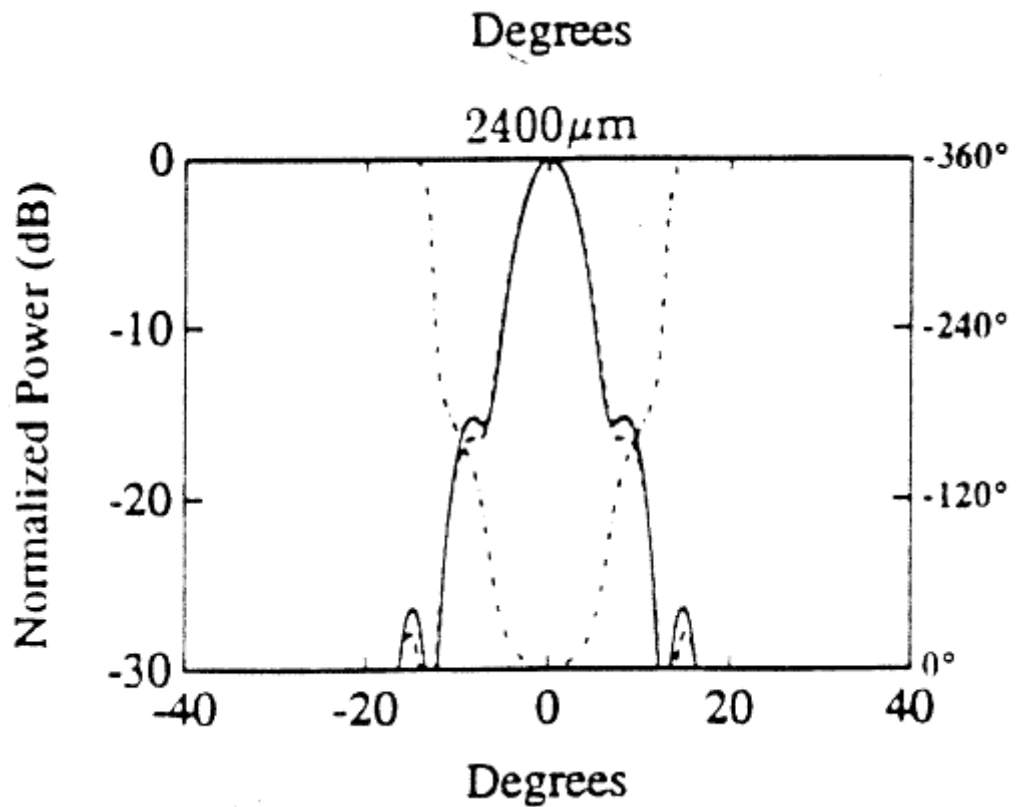


Fig. 16 diagramas de radiación en el plano E y H, y fase en el plano E a 246 GHz con una extensión de 2400 μm conseguido en [1]. La línea de puntos corresponde a la fase.

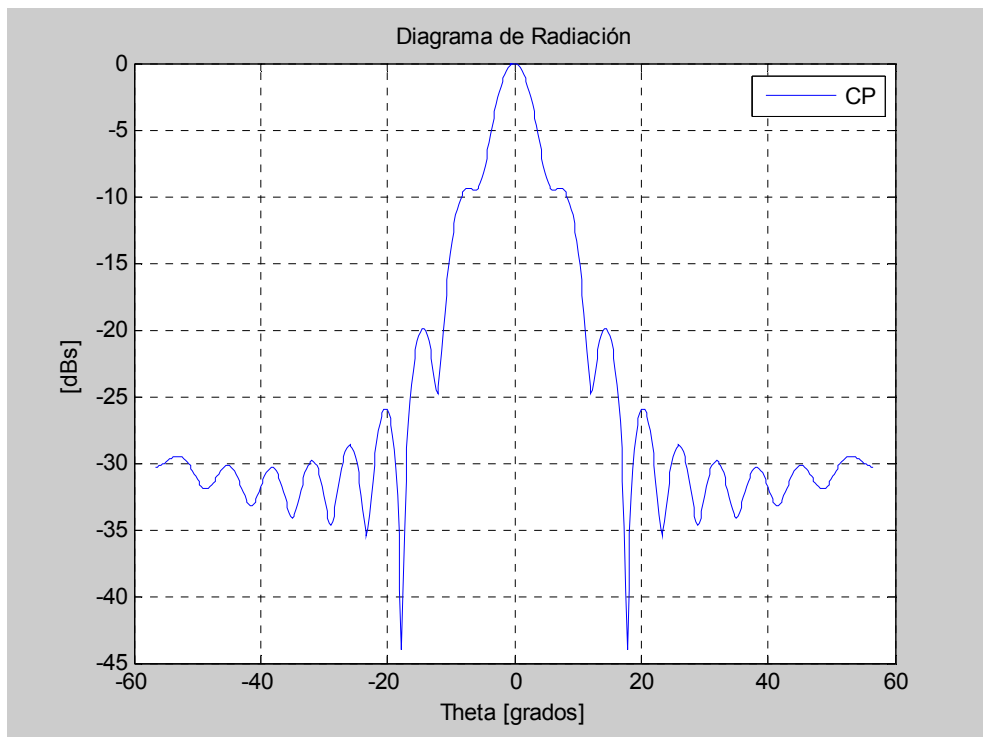


Fig. 17 diagrama de radiación en el plano E y a 246 GHz con una extensión de 2400 μm conseguido por el programa.

Se observa un cierto crecimiento de los lóbulos secundarios (ya se ha explicado la razón), si bien se encuentran en los mismos ángulos que en el diagrama anterior.

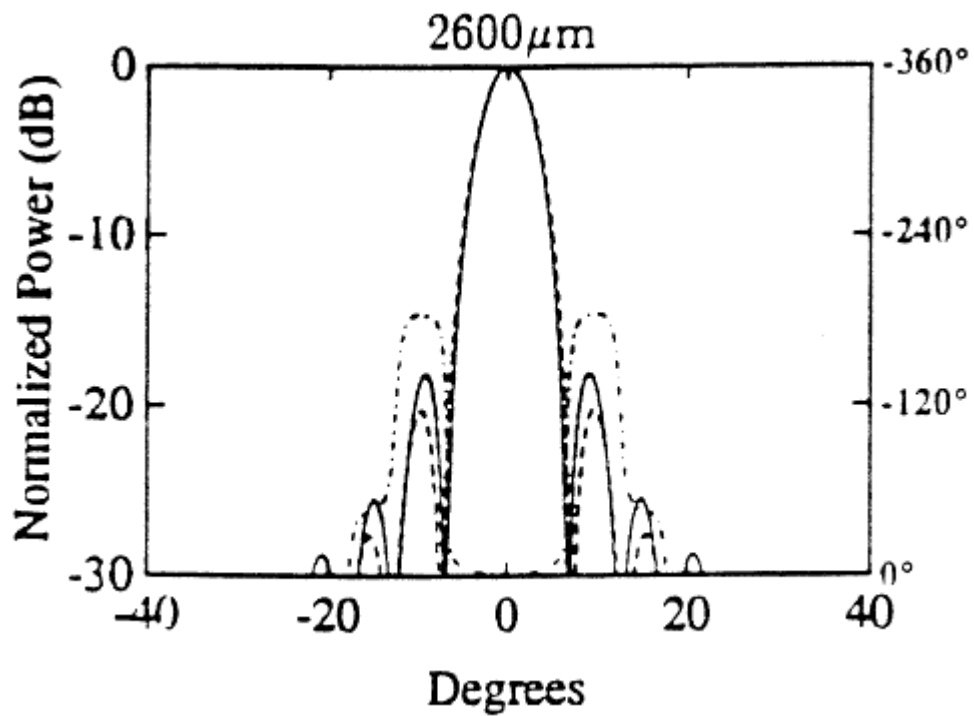


Fig. 18 diagramas de radiación en el plano E y H, y fase en el plano E a 246 GHz con una extensión de 2600 μm conseguido en [1]. La línea de puntos corresponde a la fase.

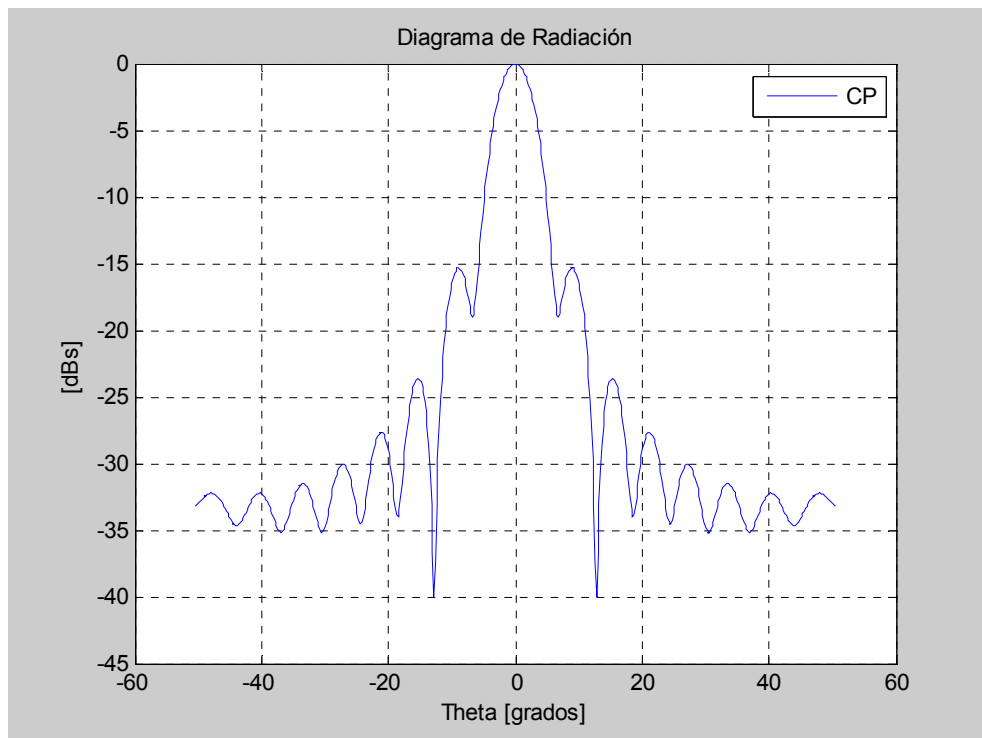
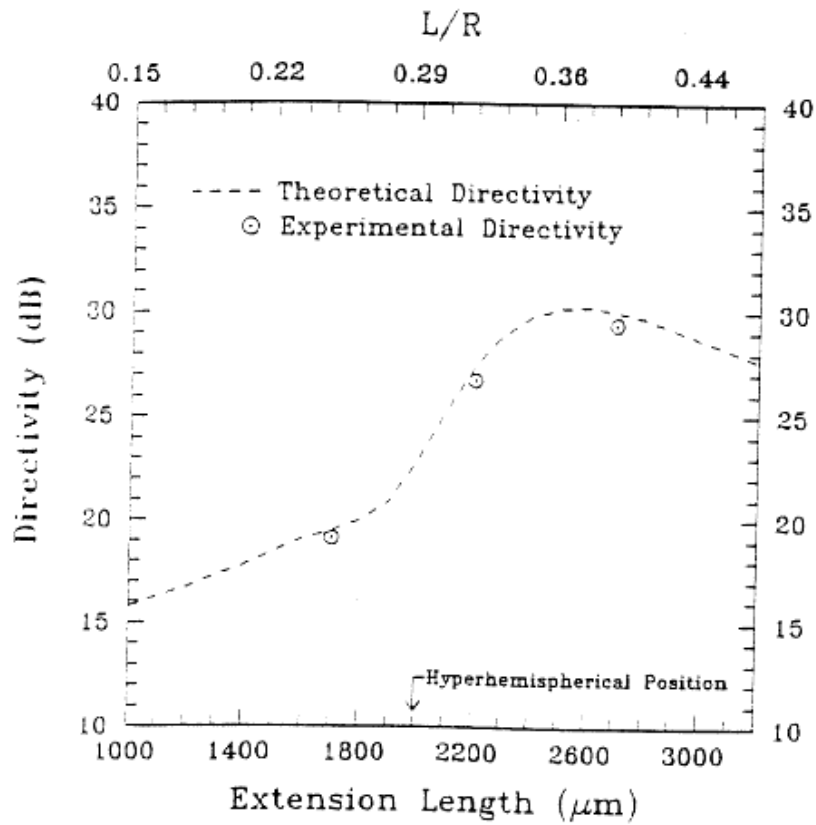


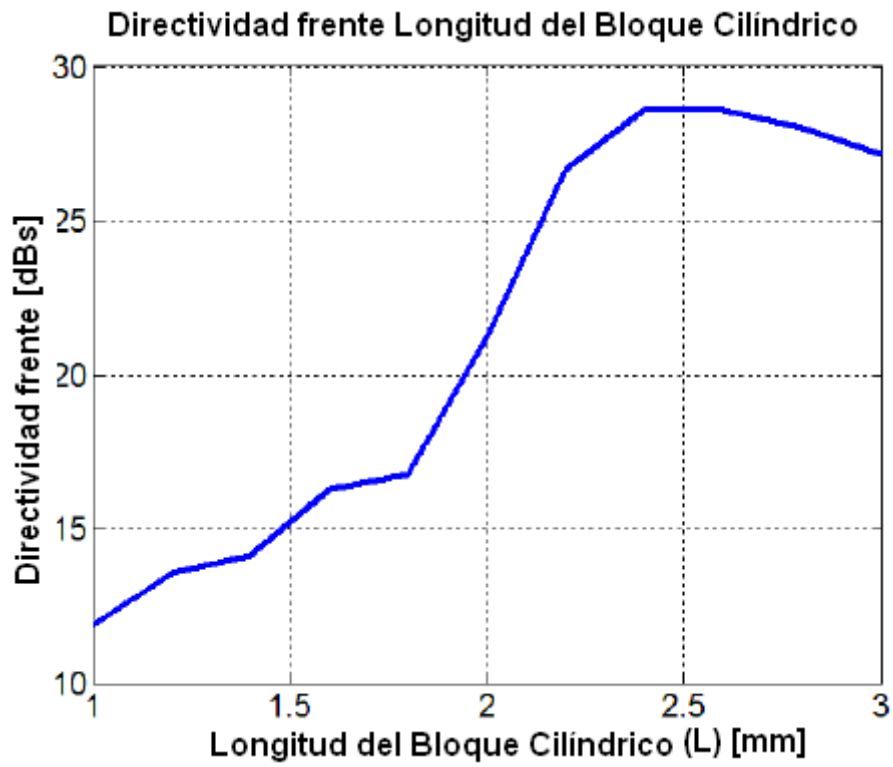
Fig. 19 diagrama de radiación en el plano E y a 246 GHz con una extensión de 2600 μm conseguido por el programa.

Al igual que en el caso anterior, a parte de un pequeño crecimiento de los lóbulos secundarios, no se aprecian cambios significativos entre ambos diagramas.

Se mostrará a continuación la variación de la directividad en función de la longitud del bloque cilíndrico L (Fig. 19).



a)



b)

Fig. 20 Directividad de la antena double-slot a 246 GHz con lente dieléctrica hemisférica extendida en función de la longitud del bloque cilíndrico. a) resultado de [1] . b) resultado del programa propuesto

Se observa la similitud entre ambas gráficas tanto en tendencias como en valores.

INTERFAZ DEL PROGRAMA

Una vez implementados los cálculos en MATLAB, se dispone de la siguiente interfaz gráfica (Fig. 20) para realizar el estudio de los resultados que se necesitan.

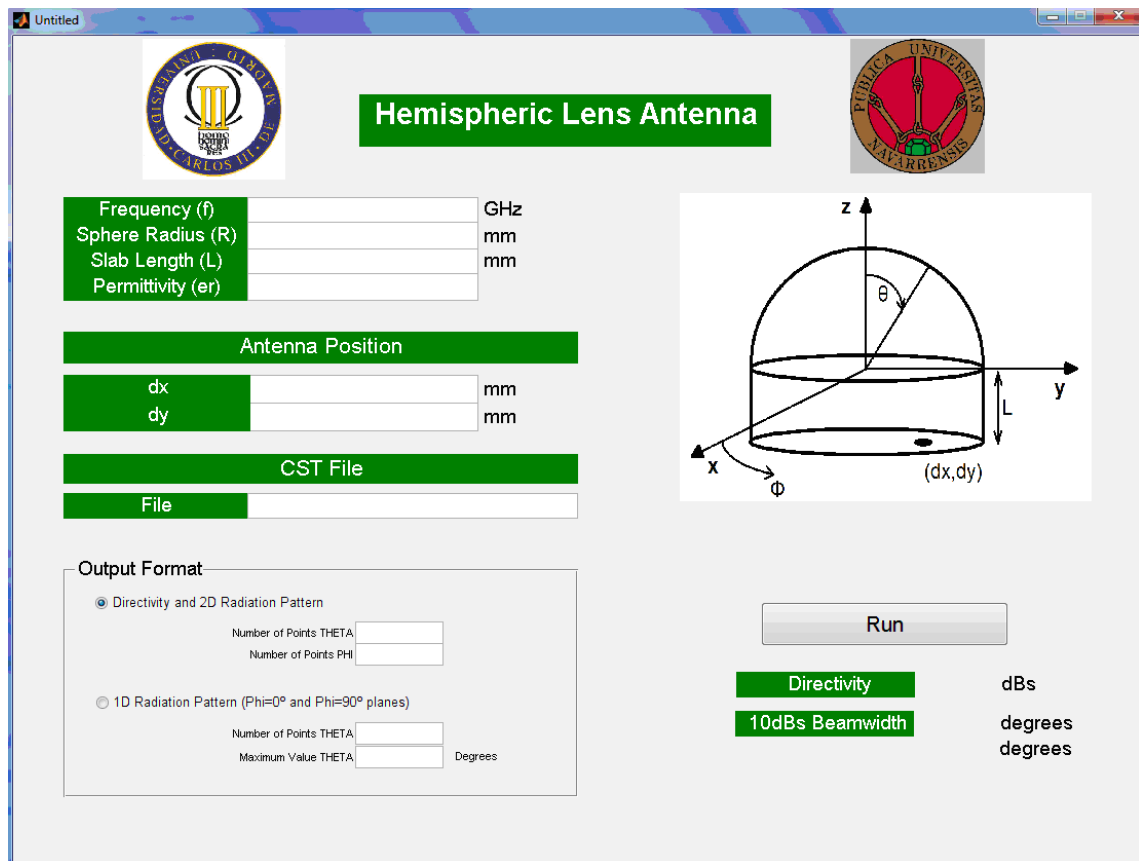


Fig. 21 Interfaz del programa

Las variables que se le pueden introducir al programa son:

- Frequency (f): Es la frecuencia a la que opera la antena, en GHz.
- Sphere Radius (R): Es el radio (en mm.) de la semiesfera que compone la lente
- Slab Length (L): Es la altura del cilindro que compone la lente
- Permittivity (er): Es la permitividad de la lente
- dx: distancia en mm. de desplazamiento de la antena respecto al origen de coordenadas en dirección del eje x.
- dy: distancia en mm. de desplazamiento de la antena respecto al origen de coordenadas en dirección del eje y.

- File: Es el nombre del fichero CST que se introduce al programa. Este fichero es la simulación de la antena (o array de antenas) que se quieren simular.
- Output Format: Aquí se podrá elegir entre tener el diagrama de radiación en 2D o en 1D. En ambos casos, es necesario introducir cuantos puntos se desea que tenga el gráfico en Theta. Si se escoge el diagrama de radiación en 2D, habrá que introducir también el número de puntos de Phi que se desea que tenga el diagrama. Si se escoge 1D, se escoge el valor máximo de Theta que queramos en el diagrama. Los diagramas que nos da el programa son los cortes $\varphi=0^\circ$ y $\varphi=90^\circ$.
- Sin importar el formato de salida del diagrama de radiación, el programa nos da como resultado la directividad del sistema, así como el ancho de haz a 10 dB.

A continuación se mostrará como afecta un cambio en uno de los campos al resultado obtenido. Tomaremos como base el sistema ya mencionado de la antena log-espiral a 600 GHz, con una lente de $R=6.35\text{mm}$ y $L=2.4\text{mm}$. La permitividad del dieléctrico es 11.7 (silicio). Vemos otra vez el diagrama de radiación para los valores de desplazamiento nulo.

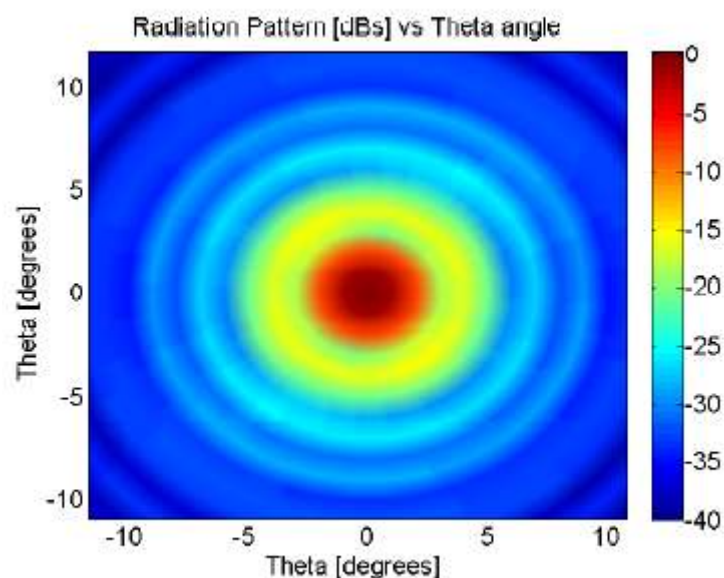


Fig. 22 Diagrama de radiación en función del ángulo φ de la antena log-espiral a 600 GHz con lente hemisférica extendida para los valores $R=6.35\text{mm}$, $L=2.4\text{mm}$, $\epsilon_r=11.7$, $dx=0\text{mm}$, $dy=0\text{mm}$, number of points THETA=181, number of points PHI=91

El valor de f no va a ser cambiado, ya que eso implica cambiar de antena que lo alimenta, y con ella todo el diagrama de radiación. Veremos como afecta en primer lugar el cambio de R sobre el sistema

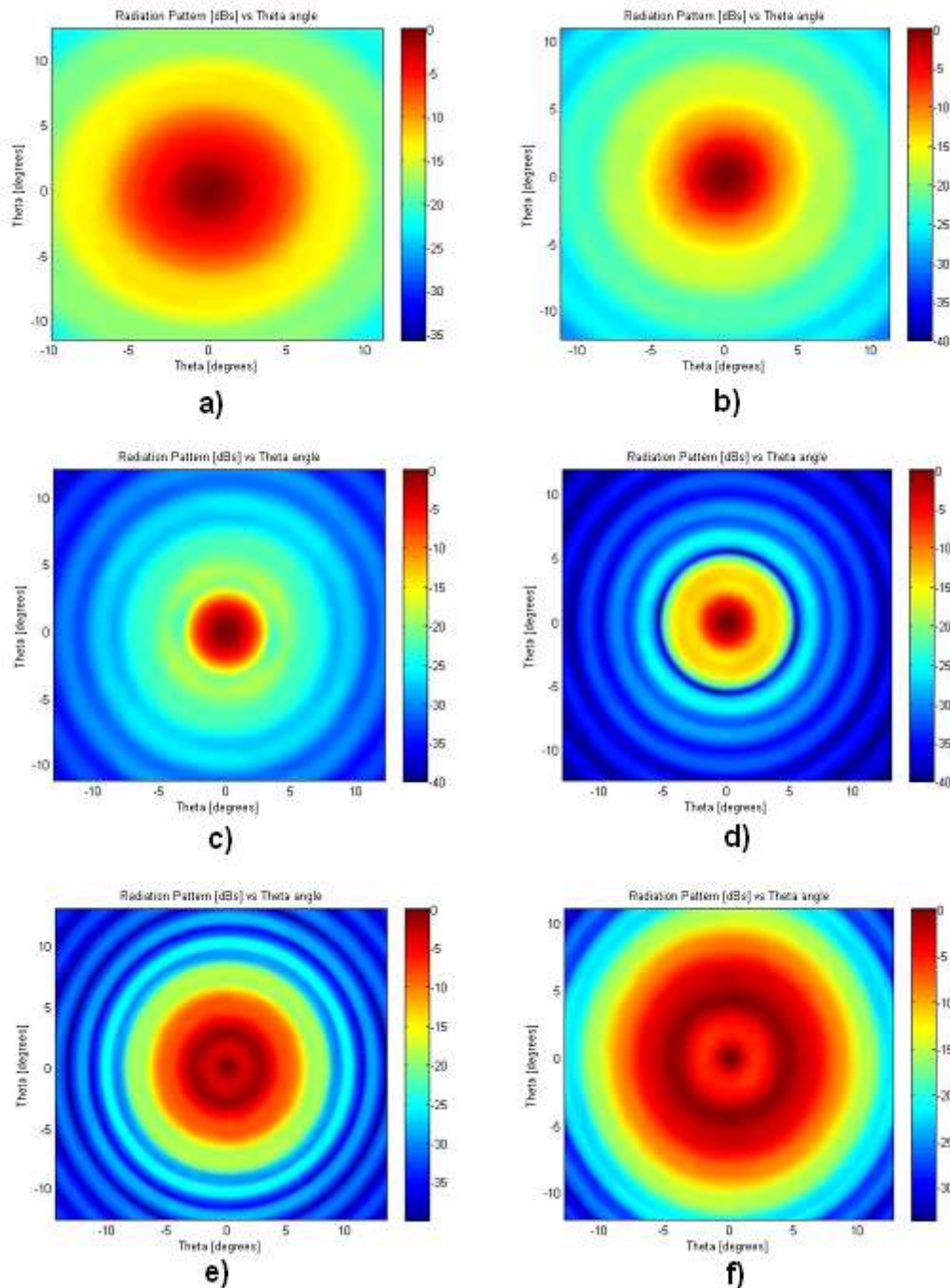


Fig. 23 Diagrama de radiación en función del ángulo φ de la antena log-espiral a 600 GHz con lente hemisférica extendida para los valores $L=2.4\text{mm}$, $\epsilon_r=11.7$, $dx=0\text{mm}$, $dy=0\text{mm}$, number of points THETA=181, number of points PHI=91. a) $R=5\text{mm}$ b) $R=5.5\text{mm}$ c) $R=6\text{mm}$ d) $R=6.5\text{mm}$ e) $R=7\text{mm}$ f) $R=7.5\text{mm}$

Se observa como el valor de R afecta de manera clara a la directividad del sistema, encontrándose el máximo de la misma en 6.35mm (entre los valores c) y d)), que es el valor propuesto en el artículo. Como se mostrará a continuación, con el valor de L ocurre algo similar, si bien el cambio es aún más abrupto. Cabe destacar que en el primer caso ($L=1.5\text{mm}$), el ángulo comprendido no es entre $\pm 10^\circ$, si no $\pm 40^\circ$. Al igual que en el caso anterior, el valor óptimo de L es el valor que aparece en el artículo e igual a 2.4mm

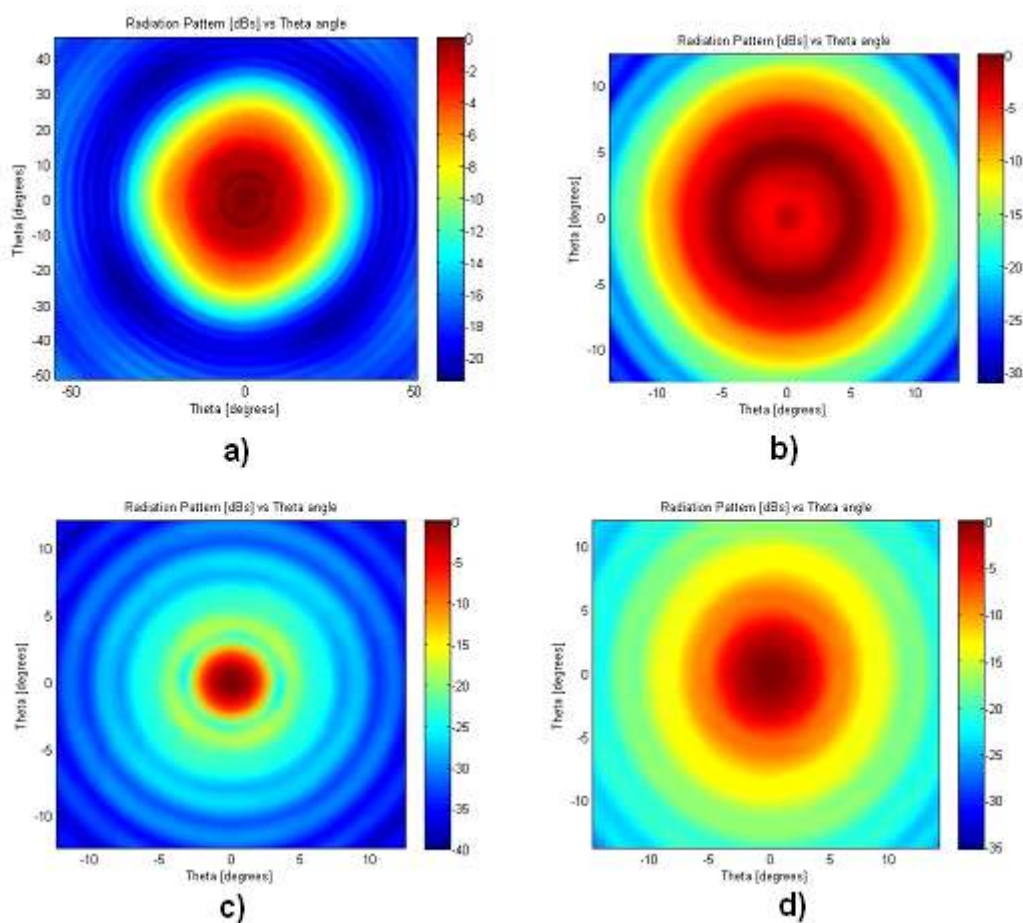


Fig. 24 Diagrama de radiación en función del ángulo φ de la antena log-espiral a 600 GHz con lente hemisférica extendida para los valores $R=6.35\text{mm}$, $\epsilon_r=11.7$, $dx=0\text{mm}$, $dy=0\text{mm}$, number of points THETA=181, number of points PHI=91. a) $L=1.5\text{mm}$ b) $L=2\text{mm}$ c) $L=2.5\text{mm}$ d) $L=3\text{mm}$

Si el elemento que se modifica es el número de puntos en THETA y PHI, lo que ocurre, como es lógico, es que el diagrama pierde resolución, y es más difícil precisar los cambios graduales de la potencia radiada.

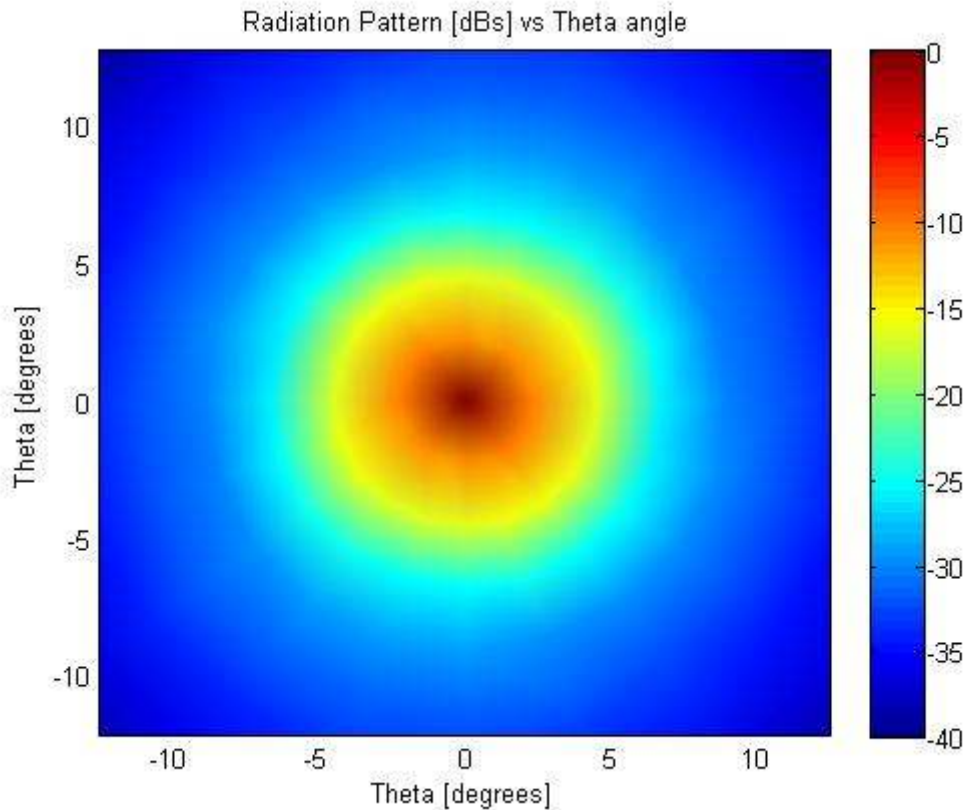


Fig. 25 Diagrama de radiación en función del ángulo ϕ de la antena log-esprial a 600 GHz con lente hemisférica extendida para los valores $R=6.35\text{mm}$, $L=2.4\text{mm}$, $\epsilon_r=11.7$, $dx=0\text{mm}$, $dy=0\text{mm}$, number of points THETA=41, number of points PHI=21

Por último, si se modifica el valor del campo dx o dy , modificamos la posición de la antena respecto a la lente. Para ver más en profundidad este efecto, ver el capítulo 4 *Imaging Array*.

PROPUESTA DE LENTE TIPO DOBLE FOCO

Un diseño de lente alternativo es el de la lente tipo doble foco. En esta lente, en la zona superior de la parte esférica de la lente se coloca una lente fina, de un índice de refracción diferente al del resto de la lente hemisférica. (Fig. 25). Cabe destacar que la lente colocada en la parte superior de la hemisfera, geoméricamente hablando, no es otra cosa que colocar un plano de simetría a una altura H , y replicar la superficie que queda por encima del mismo.

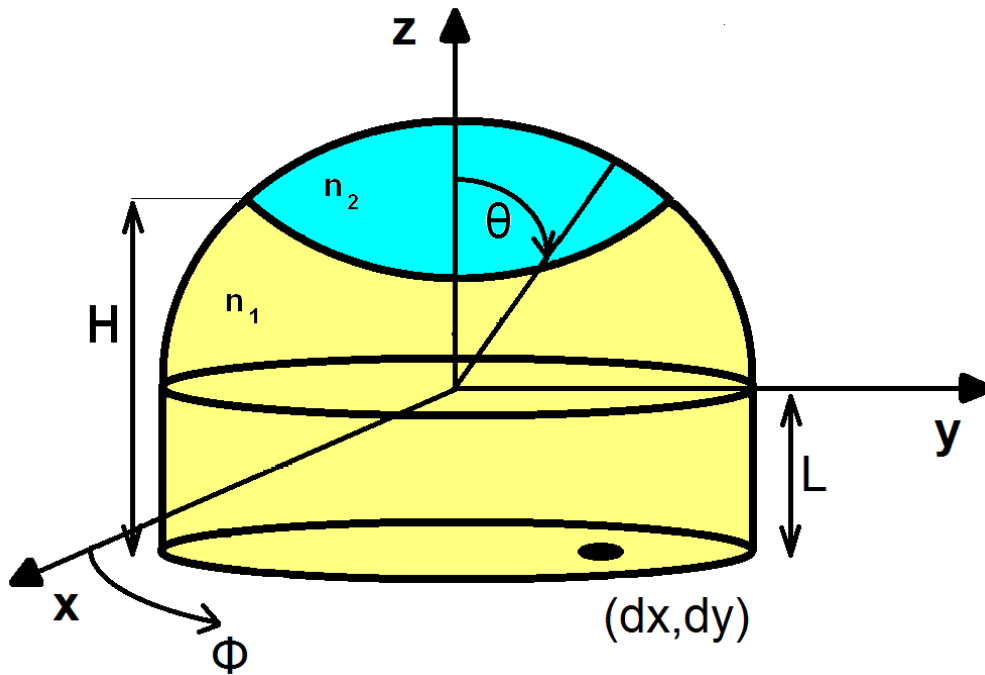


Fig. 26 Lente hemisférica de doble foco.

En esencia, el comportamiento teórico es igual al de la lente de tipo hemisférico, con la diferencia de que los rayos que inciden en la interfaz entre las superficies con índice de refracción n_1 y n_2 , son desviados siguiendo la ley de Snell en función de dichos índices. Así, las corrientes equivalentes generadas en la superficie exterior de la lente cambian, modificando así los campos generados por las ecuaciones (1)-(27).

Este pequeño cambio produce cambios en el diagrama de radiación de manera sustancial. Así, si observamos el diagrama de radiación para una lente hemisférica de doble foco, varía enormemente en función del valor de ϵ_1 y ϵ_2 . Se deja para trabajos futuros la optimización de los valores que consiguen una directividad máxima. Se utilizará una antena tipo Bowtie a 1 THz para las comprobaciones.

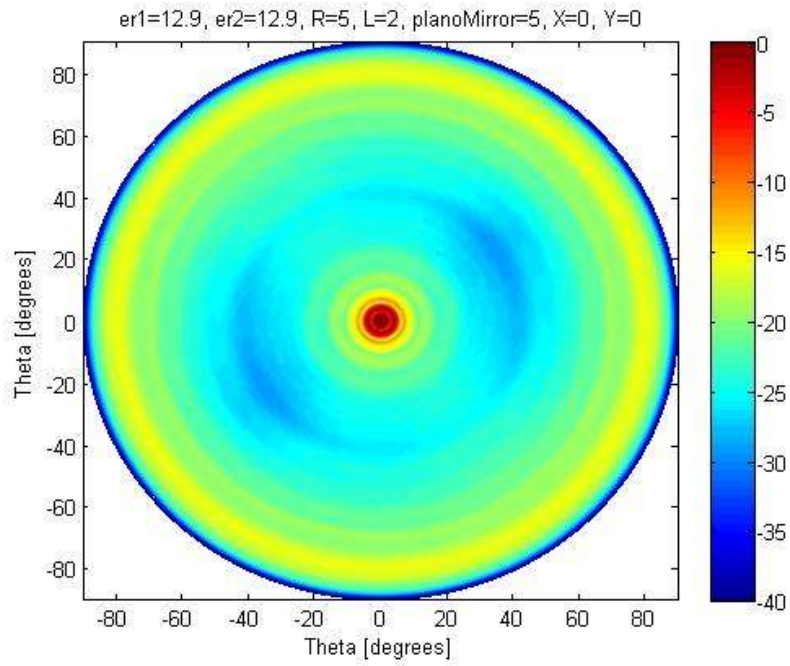


Fig. 27 Diagrama de radiación con lente hemisférica de doble foco con índices de refracción iguales

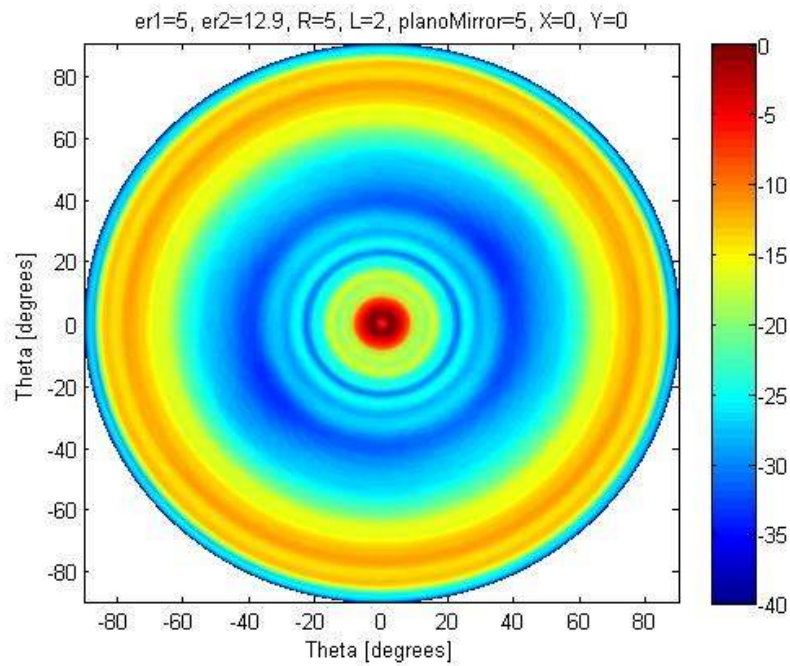


Fig. 28 Diagrama de radiación con lente hemisférica de doble foco con $\epsilon_1=5$ y $\epsilon_2=12.9$

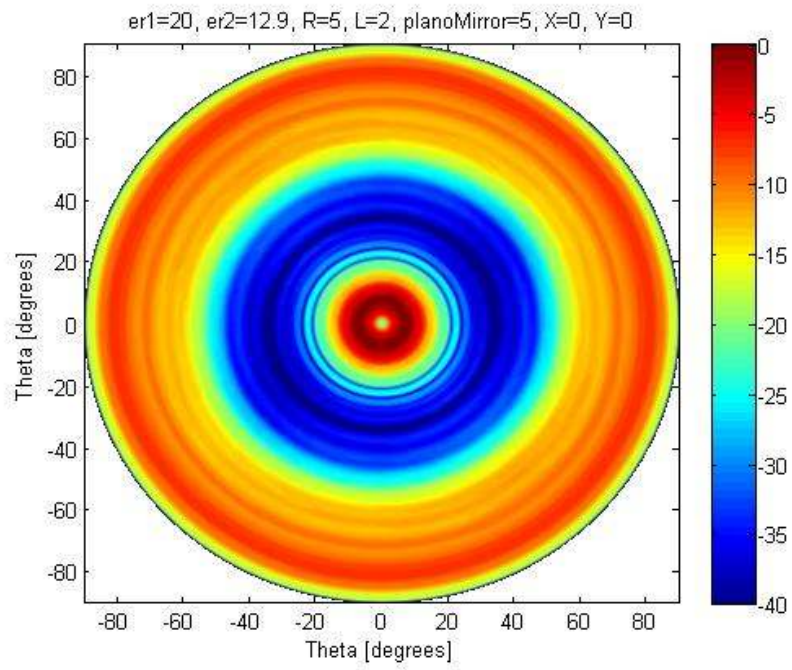


Fig. 29 Diagrama de radiación con lente hemisférica de doble foco con $\epsilon_1=20$ y $\epsilon_2=12.9$

CAPÍTULO 3. IMAGING ARRAY

Dado que el sistema compuesto por la lente y el array de antenas esta siendo estudiado para el desarrollo de un sistema de escaneo en tiempo real a altas frecuencias, el siguiente paso es estudiar como se comporta (al menos de manera teórica) dicho sistema a la hora de realizar un escaneo. Para ello, se simulará la construcción de un Imaging array. Este dispositivo se basa en emitir con un elemento radiante, y tras atravesar el medio a estudio, recoger dicha señal con un receptor. El receptor puede, o bien recoger la señal transmitida, o bien la señal reflejada. Dado que no se dispone del sistema construido aún, y solo se va a hacer el estudio de manera teórica, este es un detalle que obviaremos.

Dada la imposibilidad de realizar el escaneo del espacio de manera teórica, se simplificará el problema al escaneo de una imagen en 2D intentando conseguir la imagen obtenida en un escaneo real, y la resolución que se obtendría. Para ello, el primer paso es obtener de manera teórica el diagrama de radiación de un array de 9 elementos. El array en concreto que se va a usar es :

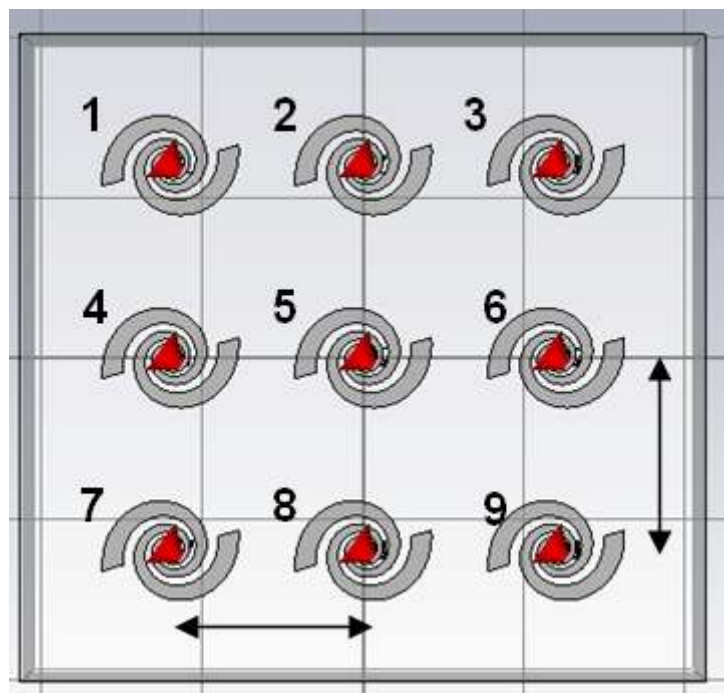


Fig. 30 Array de antenas log-espiral para el imaging array

Donde las antenas son del tipo log-espiral a 1 THz. La lente es de radio 5 mm, y el cilindro tiene una longitud $L=2\text{mm}$. La separación entre las antenas es de $120\ \mu\text{m}$, tanto en horizontal como en vertical. En el origen de coordenadas se encuentra la antena n° 5.

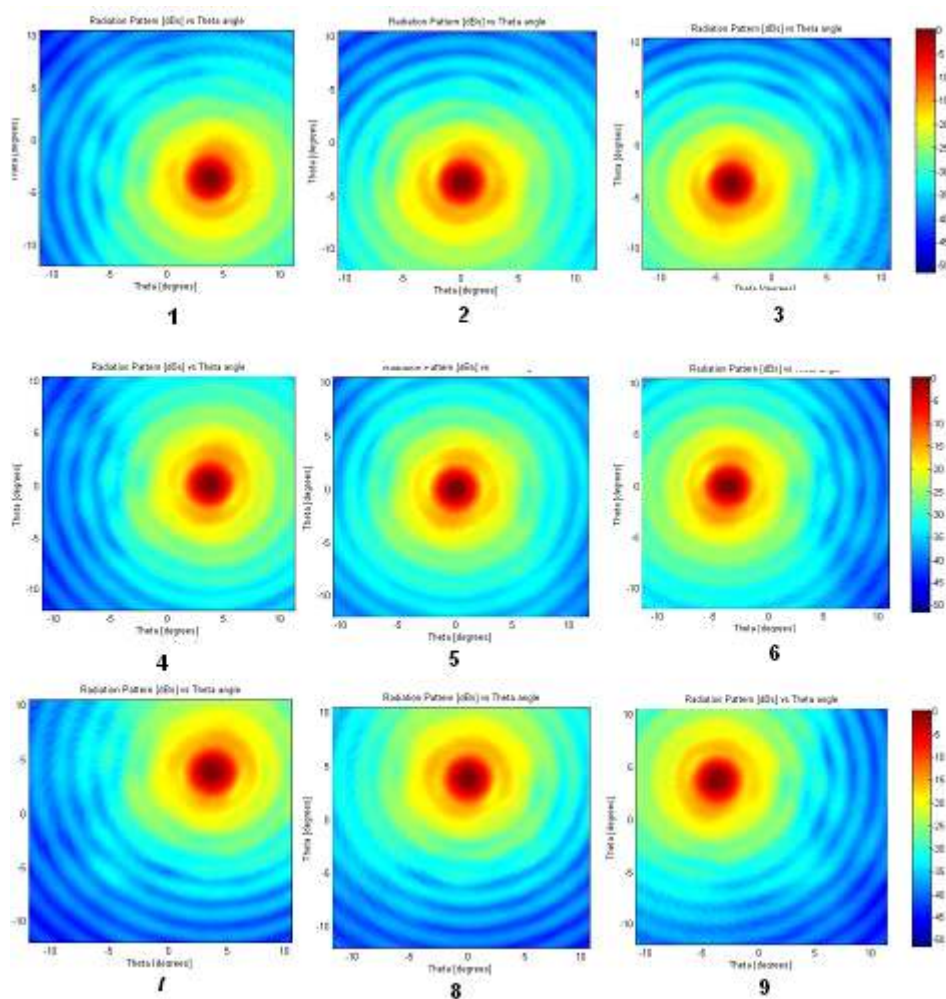


Fig. 31 Diagrama de radiación en función del ángulo φ de cada antena log-espiral del array.
Cada número representa el diagrama de radiación de cada antena por separado.

A continuación se suman los niveles de potencia obtenidos para obtener así el diagrama del conjunto de antenas junto con la lente:

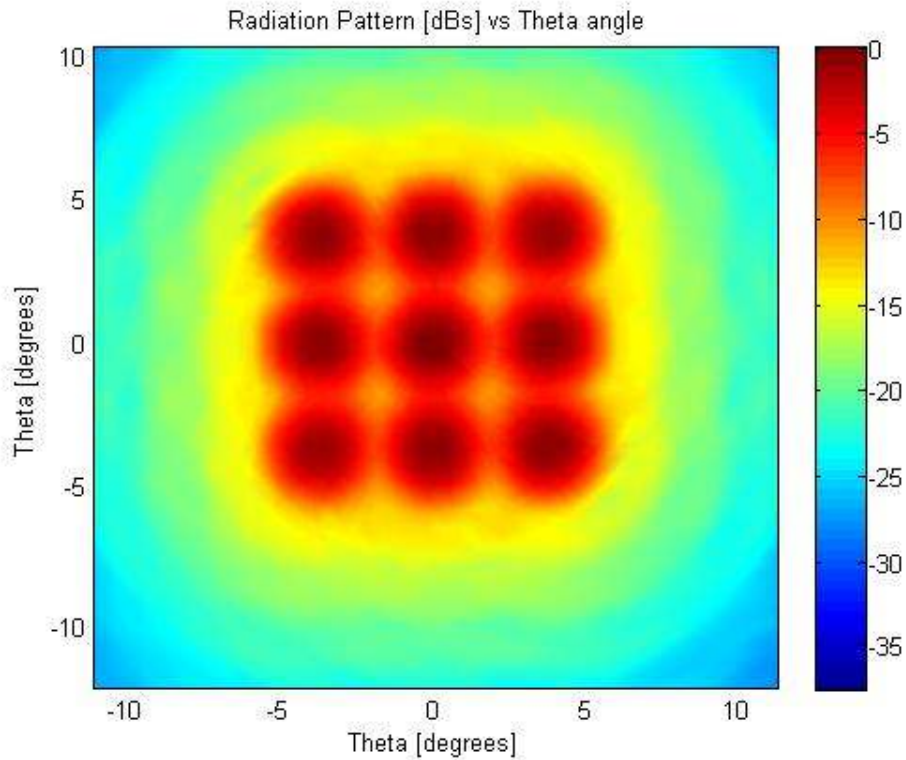


Fig. 32 Diagrama de radiación en función del ángulo φ del array completo de antenas log-espiral y lente.

Una vez conseguido el diagrama de radiación, se simplifica hasta conseguir una zona de potencia de más de 3 dB, y una zona de potencia de menos de 3 dB (aunque este límite es arbitrario). Se asume que toda señal que llegue en la zona de menos de 3 dB es ignorada.

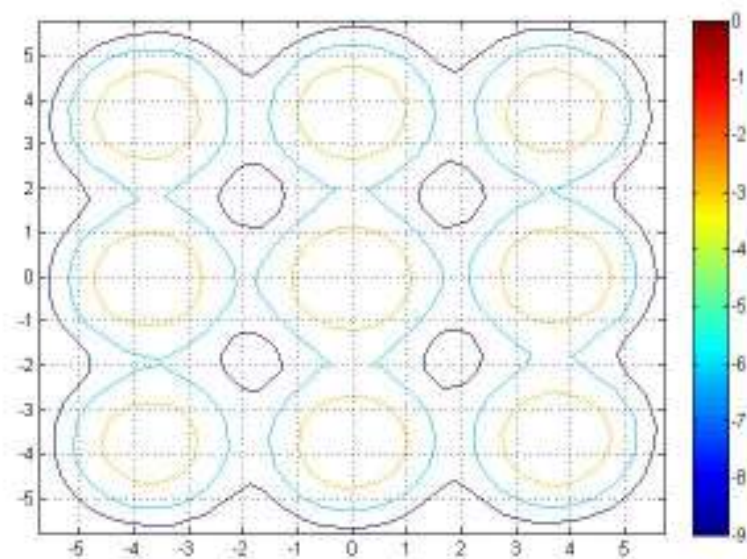


Fig. 33 Diagrama de radiación simplificado.

El siguiente paso es realizar el escaneo de una imagen. Para ello, se escoge la siguiente imagen.



Fig. 34 Imagen seleccionada para realizar el escaneo

En esta imagen, el sujeto lleva un cuchillo debajo del periódico. En la realidad, la señal de alta frecuencia atravesaría el periódico y se reflejaría en el cuchillo. Como no disponemos de la antena, no se puede ver hasta que punto el sistema es eficaz para la detección de dicho cuchillo. Lo que si que podemos ver es si la resolución del sistema sería capaz y aunque no podemos ver si la antena detectaría o no el cuchillo, al no poder realizar un escaneo en la frecuencia a la que emite la antena, realizaremos una prueba alternativa. Para ello, se modificará la imagen dejando todo en negro, y colocando un triangulo de dimensiones similares a un cuchillo en el lugar donde estaría en la imagen. Aunque no es una prueba concluyente, nos permite ver si la resolución del array sería suficiente para poder detectarlo.

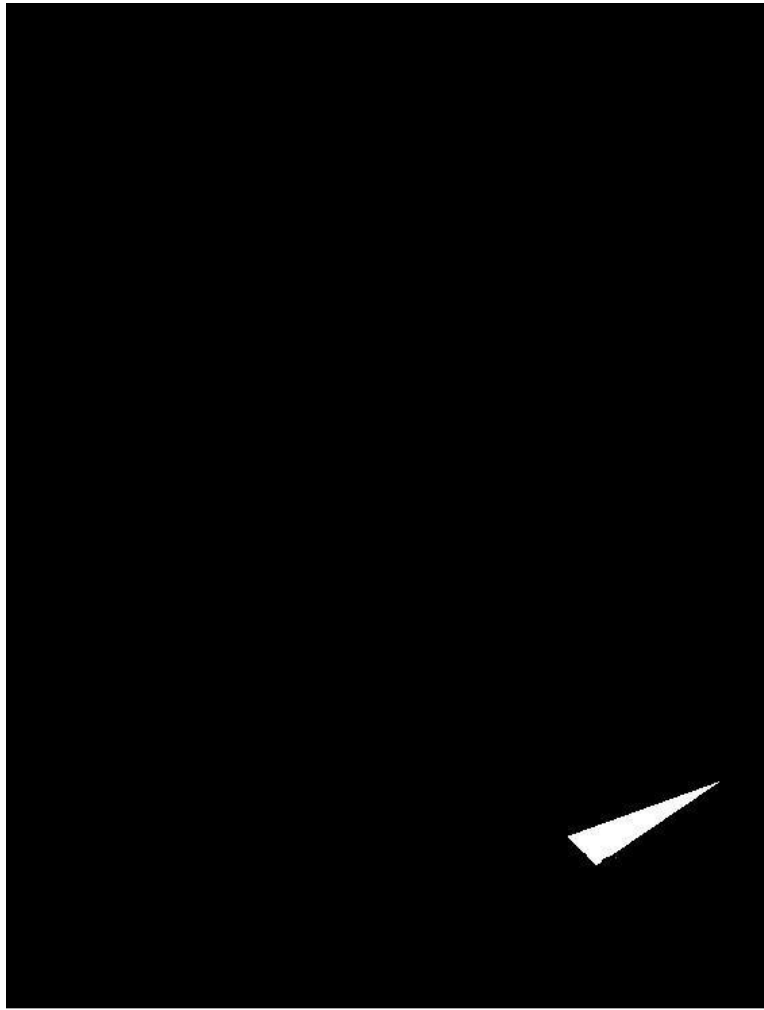


Fig. 35 Imagen modificada simulando un cuchillo

El siguiente paso, es elegir una distancia adecuada a la que colocar el array para realizar el escaneo de las fotos. Si nos ponemos muy cerca, la imagen saldrá muy nítida, pero a cambio, el número de pasadas que hay que realizar con el array para poder terminar la imagen sería demasiado elevado. Si lo colocamos muy lejos, el número de pasadas sería mucho menor, pero en la imagen no se distinguiría nada. Teniendo en cuenta que las antenas utilizadas para el array funcionan en 1 THz, la atenuación hace que no podamos alejarnos de manera excesiva de la imagen (a más de un metro, la señal sería demasiado pequeña como para poder detectarla).

Viendo el diagrama de radiación simplificado, vemos que los spots de cada antena no superan 1° de radio. Una vez decidida la distancia a la que colocar el array, es fácil obtener las zonas de las que cada antena recibiría la señal

correspondiente. En el área en al que cada antena recibe señal, se realiza el promedio del color que tiene esa zona, para emular el hecho de que una antena no puede distinguir entre las distintas potencias que recibe, si no que detecta un nivel de potencia concreto. Así, cada antena nos aporta lo que podríamos llamar un píxel de la imagen (que para no confundir con los píxeles de la imagen original, llamaremos píxeles circulares). Otra cosa a tener en cuenta es que si solo realizamos un barrido de la imagen sin solapar las áreas de detección, eso nos dejará muchas áreas sin escanear, por lo que para intentar reproducir la imagen de manera lo más fidedigna posible, habrá que solapar los escaneos para que los píxeles circulares de la nueva imagen ocupen el mayor área posible.

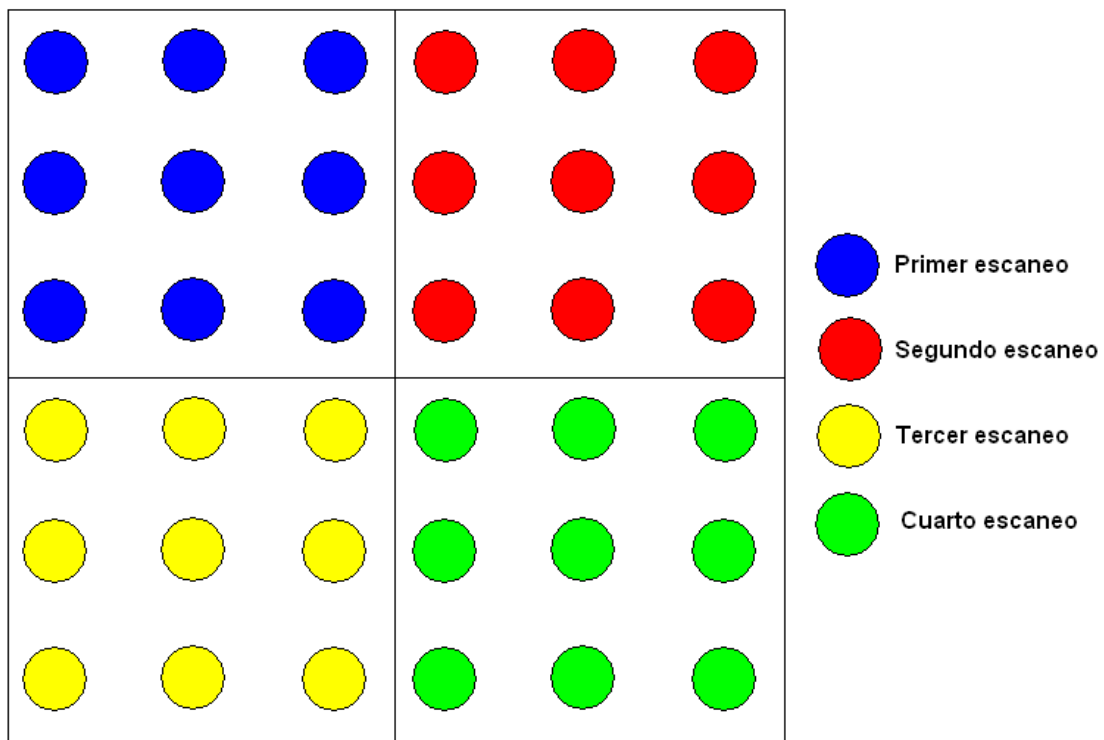


Fig. 36 Esquema del escaneo sin solapamiento

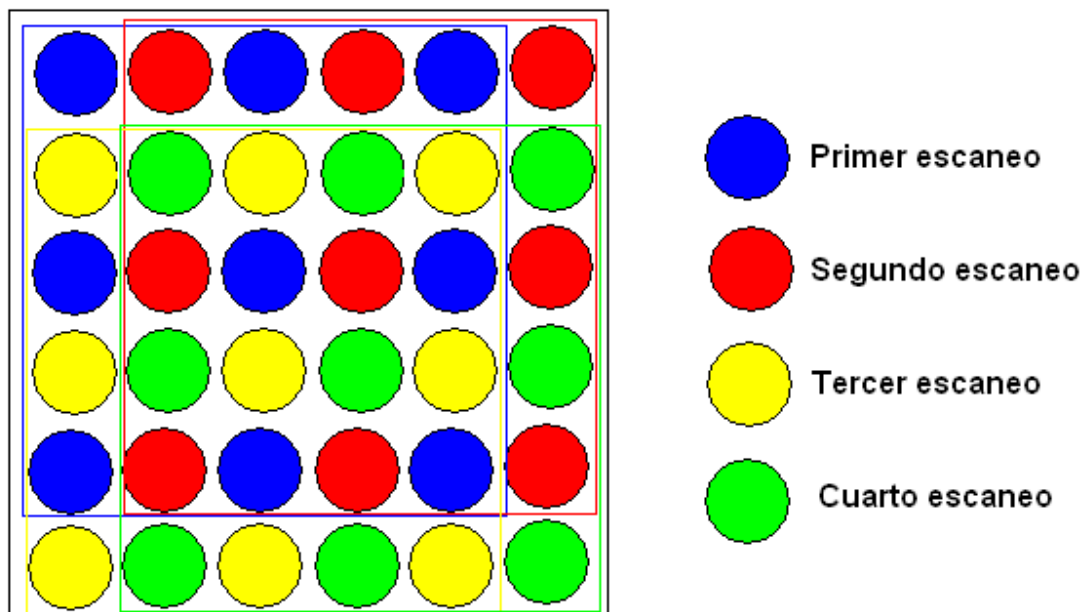


Fig. 37 Esquema del escaneo con solapamiento

Lo primero que tenemos que hacer es decidir a que distancias corresponden los laterales de la imagen, y la distancia a la que colocamos el array. Asumimos que la imagen tiene 1 metro de altura, lo que junto con el hecho de que disponemos del tamaño en píxeles de la imagen, nos da exactamente la relación que existe entre un píxel en la imagen, y la distancia en cm que este ocupa.

Después, con una simple relación se saca el espacio que ocupa el haz, primero en cm, y después en píxeles de la siguiente manera:

$$radio_{haz} = 2 \cdot d \cdot \tan(\alpha/2) \quad (26)$$

Donde d es la distancia hasta la imagen, y α es el ancho de haz en grados. Para el caso que nos ocupa, α vale 1° , y $d=0.5$ metros. Los valores obtenidos en cm y píxeles que tiene el radio del haz son de 0.87 cm. Una vez que se tiene este valor, el resto de atributos de la imagen y de los haces se extrapolan de esta distancia. El siguiente paso es extraer de la imagen original solamente el área perteneciente al haz, hacer un promedio, y asumir que ese es el nivel de potencia que recibe la antena. Solapando las imágenes se consiguen las siguientes imágenes.

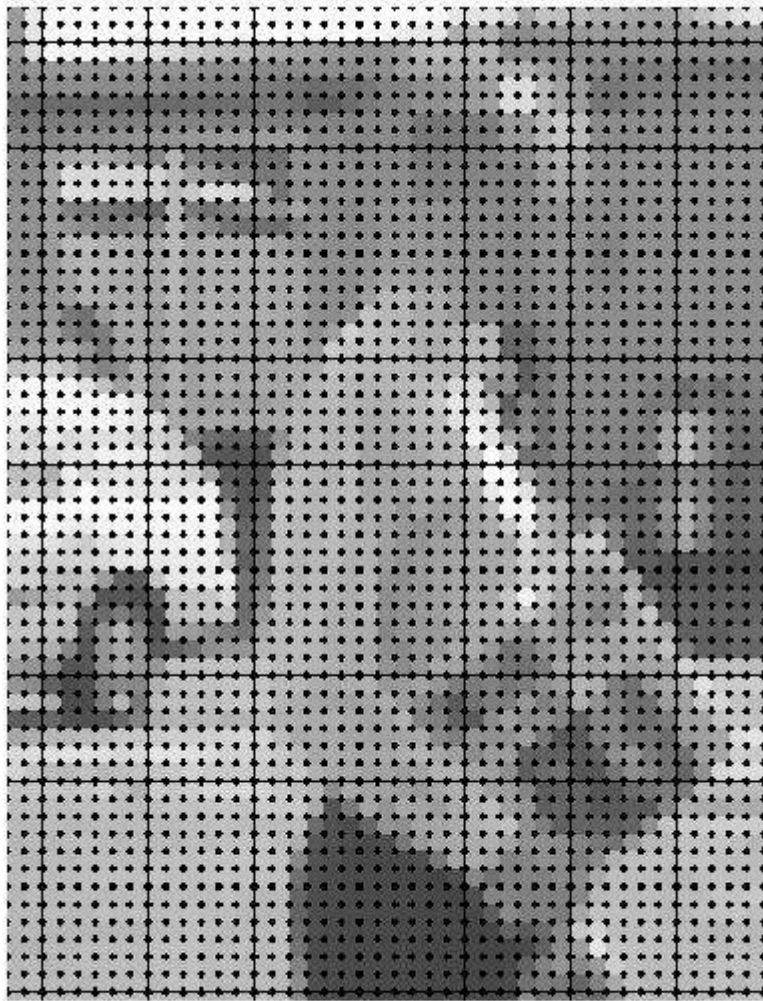


Fig. 38 resultado escaneo a 0.5 metros.

Si en lugar de escoger 0.5 metros, ponemos una distancia de 1 metro, el resultado es el siguiente

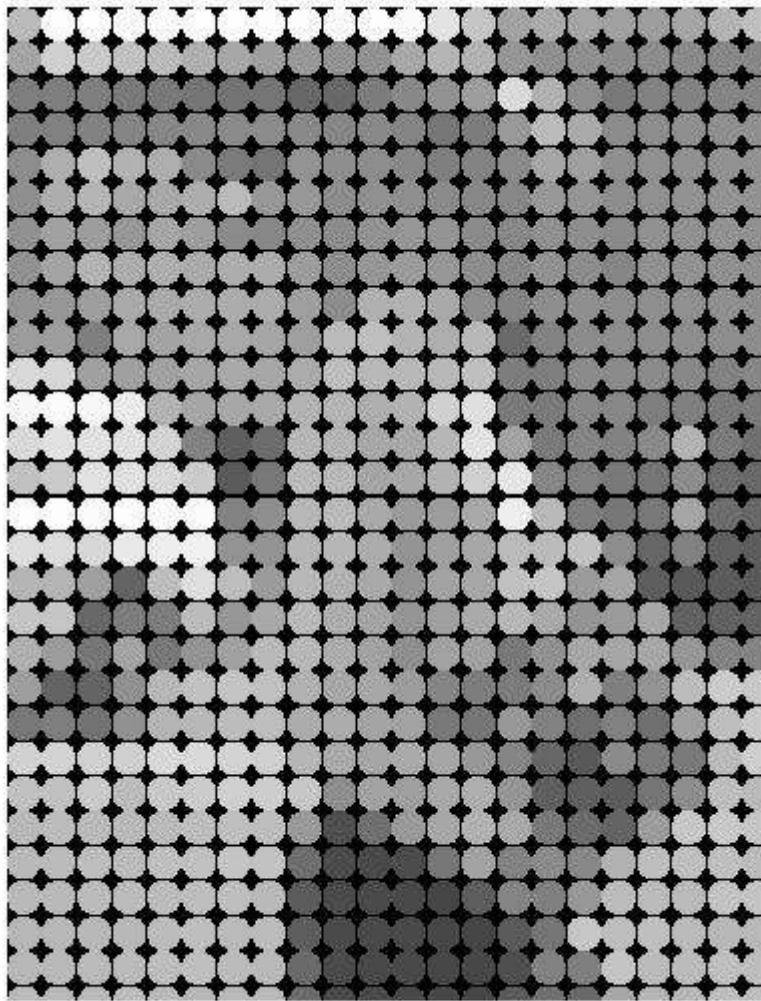


Fig. 39 resultado escaneo a 1 metro.

Como se puede ver, se ha reducido el número de pasadas necesarias para realizar el escaneo, pero a costa de perder nitidez en la imagen (hasta un punto que la imagen ya ni se intuye).

Viendo la imagen del cuchillo, se puede distinguir claramente:

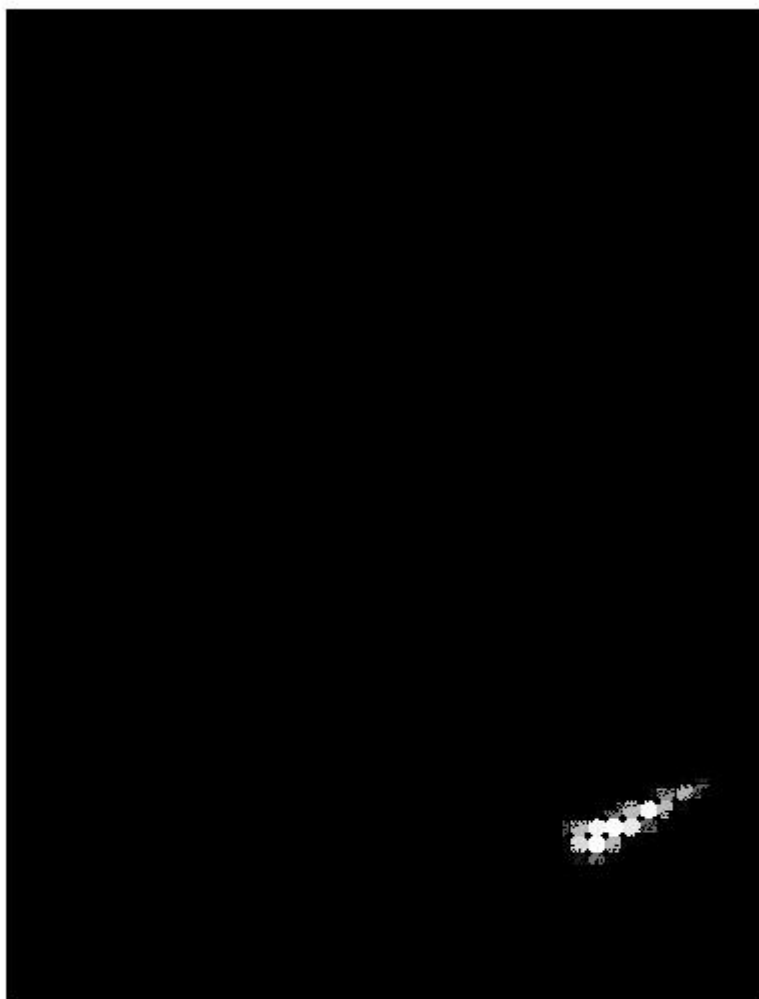


Fig. 40 resultado escaneo a 0.5 metros de la simulación del cuchillo

Como se puede observar en las imágenes, se consigue un nivel de resolución aceptable, sin necesitar un número de escaneos demasiado elevado.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Se ha presentado un método para diseñar lentes dieléctricas hemisféricas extendidas (y de doble foco) que combina la potencialidad de los simuladores electromagnéticos de onda completa con la simplicidad de la aproximación del trazado de rayos de la física óptica. El tamaño de la lente en comparación con la antena es muy grande, lo que lleva a los simuladores electromagnéticos a necesitar de un tiempo y una carga computacional muy elevados. Con este método se consigue reducir el tiempo de computación de manera muy considerable.

El procedimiento ha sido contrastado con resultados previamente presentados en diferentes congresos y revistas, y los resultados obtenidos son muy similares a éstos. Cabe destacar que el presente método es válido para tamaños de lente muy grandes (mayor de 5λ 's) en comparación con la antena. A medida que se hace más pequeño el tamaño de la lente los resultados obtenidos distan más de la realidad.

Dada la simplicidad del programa, se hace posible el cambiar la geometría de la lente de manera sencilla. Así nace el segundo diseño de lente propuesto en este proyecto, dejando su estudio y optimización a futuros proyectos.

Por último, al estar este proyecto integrado en uno más grande, se ha avanzado el estudio hasta ver de manera teórica su funcionamiento en un Imaging array. En él, el conjunto formado por un array de antenas del tipo log-espiral y una lente hemisférica dan lugar a un sistema de escaneo plausible en lo que a resolución de la imagen se refiere.

De cara a futuras líneas de investigación, queda el estudio en profundidad de la lente tipo doble foco, buscando la optimización de los valores de la misma para la obtención de una directividad deseada.

Una vez construida la lente y el array, queda también pendiente el estudio práctico del Imaging array, y la comparación con los resultados teóricos, así como la optimización de los valores usados de manera arbitraria en el estudio del mismo.

REFERENCIAS

- [1] D.F. Filipovic, S.S. Gearhart and G.M. Rebeiz “Double slot antennas on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric lenses”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech* Vol. 41, no. 10, pp. 1738-1749, Oct. 1993
- [2] J.L. Volakis, R.C. Johnson, H. Jasik, *Antenna Engineering Handbook*, McGraw Hill Professional, 4th Edition, 2007.
- [3] R.E. Collin, *Antenna and Radiowave Propagation*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1985.
- [4] T.H. Büttgenbach, “An improved solution for integrated array optics in quasi-optical mm and sbmm receivers: the hybrid antenna,” *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, Vol.41, no. 10, pp. 1750-1761. Oct. 1993.
- [5] D.F. Filipovic, G.P. Gauthier, S. Raman, and G.M. Rebeiz, “Off-Axis properties of silicon and quartz dielectric lens antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 45, pp. 760-766, May 1997
- [6] A. Neto, S. Maci, P.J.I. de Maagt, “Reflections inside and elliptical dielectric lens antenna,” *IEEE Proc. Microw. Antennas Propag.* , Vol 145, no. 3, pp. 243-24, June 1998.
- [7] G.M. Rebeiz, “Millimeter-wave and terahertz integrated circuit antenna” *Proc. IEEE*, vol. 80, no. 11, pp. 1748-1770, Nov. 1992.
- [8] C.A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. New York: Wiley, Chap. 11, 1982
- [9] S.Y. Chen and P. Hsu “A Simplified Method to Calculate Far-Field Patterns of Extended Hemispherical Dielectric Lens”, *Microwave Conference, 2007. APMC 2007. Asia-Pacific*, pp. 1-4, Dec. 2007.
- [10] W. Miao, Y. Delorme, F. Dauplay, G. Beaudin, Q.J. Yao, S.C. Shi. , “Simulation of an integrated Log-Spiral Antena at Terahertz”, *8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, 2008. ISAPE 2008*, pp. 58-61, Nov. 2008.