



Escuela
Politécnica
Superior

DESARROLLO DE UNA GUI PARA LA REPRESENTACIÓN 2D Y 3D DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE ANTENAS

Grado en Ingeniería en Sonido e Imagen
en Telecomunicación



Trabajo Fin de Grado

Autor:

Alejandro Albero Luna

Tutor/es:

Stephan Marini

Manuel Pérez Molina

Julio 2017



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Escola Politècnica Superior
Escuela Politécnica Superior



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Sonido e Imagen en Telecomunicación

DESARROLLO DE UNA GUI PARA LA REPRESENTACIÓN 2D Y 3D DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE ANTENAS

Autor:
Alejandro Alberro Luna

Tutores:
Stephan Marini
Manuel Pérez Molina

Julio, 2017

ÍNDICE

Contenido

I - INTRODUCCIÓN	4
1.1. Motivación y Objetivos	4
1.2. Estructura del Trabajo Fin de Grado	5
II – CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE ANTENAS	7
2.1. Introducción	7
2.2. Parámetros de antenas	10
III – TIPOS DE ANTENAS UTILIZADAS	21
3.1. Antenas	21
3.1.1. Dipolo elemental	21
3.1.2. Dipolos.....	23
3.2. Aperturas.....	27
3.2.1. Campos radiados por aperturas	27
3.2.1.1. Apertura rectangular.....	27
3.2.1.2. Apertura circular	30
3.2.2. Bocinas	31
3.2.2.1. Bocina piramidal rectangular	32
3.2.3. Ranuras: Antena microstrip	34
3.2.4. Reflector parabólico	36
3.3. Antenas de Hilo	38
3.4. Agrupaciones de Antenas.....	40
3.4.1. Diagrama de radiación de agrupaciones.....	42
3.4.2. Distribuciones de corrientes típicas	44
3.4.2.1. Uniforme	45
3.4.2.2. Triangular	46
3.4.2.3. Binómica.....	46
3.4.2.4. Comparaciones de características.....	47
IV - DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA LA REPRESENTACIÓN DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN 2D Y 3D DE ANTENAS EN MATLAB.....	48
4.1. Introducción	48
4.1.1. Hallazgo de parámetros	50
4.2. Ejemplos del software implementado	59

4.2.1. Diagrama de radiación: Dipolos	59
4.2.2. Diagrama de radiación: Apertura rectangular	63
4.2.2.1. Plano E	63
4.2.2.2. Plano H	64
4.2.3. Diagrama de radiación: Apertura circular	65
4.2.3.1. Plano E	66
4.2.3.2. Plano H	66
4.2.4. Diagrama de radiación: Bocina piramidal	68
4.2.4.1. Plano E	68
4.2.4.2. Plano H	69
4.2.5. Diagrama de radiación: Microstrip.....	70
4.2.5.1. Plano E.....	71
4.2.5.2. Plano H	71
4.2.6. Diagrama de radiación: Reflector parabólico.....	73
4.2.6.1. Plano E.....	74
4.2.6.2. Plano H	74
4.2.7. Diagrama de radiación: Antena de hilo largo.....	76
4.2.8. Diagrama de radiación de agrupaciones: Factor de array	77
4.2.8.1. Uniforme	78
4.2.8.2. Triangular	79
4.2.8.3. Binómica.....	79
4.2.9. Diagrama de radiación completo	80
V - CONCLUSIONES Y POSIBLES ACTUALIZACIONES.....	84
ANEXO CÓDIGOS	85
BIBLIOGRAFÍA.....	105

I - INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación y Objetivos

En este trabajo se desea conseguir implementar un software donde el usuario pueda visualizar por medio de una interfaz gráfica todos los diagramas de radiación de las antenas implementadas, tanto en 2D como en 3D. En 2D los diagramas de radiación estarán en escala logarítmica (dB) tanto en coordenadas cartesianas como en coordenadas polares. También en la representación en 3D se ha usado la escala logarítmica.

Los tipos de antenas que se podrán visualizar son el dipolo con longitud eléctrica variable, la bocina piramidal (tanto para plano E como plano H), el reflector parabólico (plano E y plano H), la apertura plana rectangular (plano E y plano H), la apertura circular (plano E y plano H), la antena microstrip (plano E y plano H), y la antena de hilo largo.

Por otra parte el usuario podrá modificar los parámetros de cada antena y de esa forma visualizar los cambios efectuados en el diagrama de radiación. Además gracias a los diagramas no será difícil obtener varios parámetros muy necesarios para el estudio de la radiación de la antena como son el ancho de haz a -3 dB, el ancho de haz entre nulos, el nivel del lóbulo principal a secundario (NLPS), y la relación delante/atrás (F/B).

En el capítulo IV se podrá visualizar con diversos ejemplos el funcionamiento del software, y como se puede variar el diagrama de radiación de cada antena implementada.

Se puede concluir que este software será muy útil para el estudio de la radiación de las antenas ya que permitirá al usuario visualizar como puede variar el diagrama de radiación y la directividad de una antena al modificar algunos parámetros.

1.2. Estructura del Trabajo Fin de Grado

Este trabajo de fin de grado está compuesto por seis capítulos, el primer capítulo consistirá en una introducción en la que se explica lo que se ha realizado, los objetivos del trabajo y la estructura que se compone la memoria.

Después está el segundo capítulo denominado "Consideraciones generales sobre antenas" que tendrá su parte introductoria y su parte teórica sobre los parámetros de cada antena.

El tercer capítulo llamado "Tipos de antenas utilizadas" será el más extenso de la memoria ya que conlleva obtener los campos eléctricos de cada antena y su consecuente diagrama de radiación.

El cuarto capítulo se denomina "Desarrollo de un software para la representación del diagrama de radiación 2D y 3D de antenas en MATLAB". Dicho capítulo consistirá en un resumen mediante capturas del funcionamiento del software apreciando los diagramas de radiación 2D y 3D de cada antena analizada.

En el caso de analizar agrupaciones de dipolos, se podrá obtener del diagrama de radiación completo multiplicando el campo de una antena por el factor de array seleccionado.

Por último en el quinto capítulo se realizará un análisis del trabajo realizado, sacando las conclusiones correspondientes. Además se propondrán diversas mejoras que se podrían añadir al programa.

En el sexto y último capítulo se adjunta un anexo con los códigos empleados para el desarrollo del software.

La información teórica utilizada en los capítulos II y III ha sido extraída de los libros que se encuentran listados en la bibliografía.

En particular, todas las figuras y ecuaciones (excepto la de los campos radiados de la antena microstrip y la bocina piramidal rectangular) implementadas pertenecen al libro "Antenas - Ángel Cardama Aznar, Lluís Jofre Roca, Juan Manuel Rius Casals, Jordi Romeu Robert, Sebastián Blanch Boris (Universitat Politècnica de Catalunya) y Miguel Ferrando Bataller (Universitat Politècnica de València)" [1]. Las ecuaciones de la antena microstrip pertenecen al libro "Antenna Theory, Analysis and Design, third edition - Constantine A. Balanis"[2].

Además también se ha utilizado información de la asignatura de Medios de Transmisión del Grado en ingeniería en sonido e imagen en telecomunicación y de la asignatura Tecnología de las Radiocomunicaciones del Máster Universitario en ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Alicante.

Para la parte del desarrollo en 3D las expresiones de los campos de la bocina piramidal, la antena microstrip y la apertura circular se ha precisado de los libros "Antenna Theory, Analysis and Design, third edition - Constantine A. Balanis" [2] y "Antenna and radiowave propagation", International Student Edition – Robert E. Collin [3].

II – CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE ANTENAS

2.1. Introducción

La definición de antena viene dada por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada de forma específica para radiar o recibir ondas electromagnéticas (IEEE Std.145-1983). Toda antena es una región de transición entre una zona donde existe una onda electromagnética guiada y una onda en el espacio libre, además se puede asignar un carácter direccional. Por medio de voltajes y corrientes (hilos conductores y líneas de transmisión) o por campos (guías de ondas) se puede conseguir la representación de la onda guiada en el espacio libre mediante campos [1]. La antena permite radiar la potencia suministrada con la direccionalidad adecuada para la aplicación que se le desea dar. Un ejemplo de aplicación de esta definición, es en radiocomunicaciones fijas ya que es preciso que las antenas sean direccionales. En cambio en radiodifusión es preciso que la antena sea omnidireccional [1].

Si se desea extraer información es necesario poder captar la onda radiada en algún punto del espacio, de esa forma se absorbe energía y se entrega al receptor. En general cada aplicación impone sus condiciones sobre la direccionalidad de la antena, que consiste en la zona del espacio donde se concentra la energía. Unas precisarán niveles de potencia más elevados y otras más bajos, por lo que el cometido de la antena será transmitir y recibir información [1].

Por este motivo hay muchas antenas diferentes, ya que cada aplicación necesita una antena con unas propiedades de directividad concretas.

Para entender cómo funciona una antena es necesario conocer que toda onda tiene como parámetros básicos una frecuencia, su longitud de onda, que se relacionan con la velocidad de propagación en el medio $c = \lambda \cdot f$. El espectro de frecuencias se divide en bandas, cada aplicación tiene asignada una franja del espectro por los organismos de normalización, tal como se aprecia en la siguiente tabla [1].

BANDA	FRECUENCIA	LONGITUD ONDA	DENOMINACIÓN
ELF	<3 kHz	>100 km	Extremely Low Frequency
VLF	3-30 kHz	100-10 km	Very Low Frequency
LF	30-300 kHz	10-1 km	Low Frequency
MF	0,3-3 MHz	1.000-100 m	Medium Frequency
HF	3-30 MHz	100-10 m	High Frequency
VHF	30-300 MHz	10-1 m	Very High Frequency
UHF	0,3 - 3 GHz	100-10 cm	Ultra High Frequency
SHF	3-30 GHz	10-1 cm	Super High Frequency
EHF	30-300 GHz	10-1 mm	Extremely High Frequency

Tabla 1.1 Denominación de las bandas de frecuencias

Para microondas las frecuencias se dividen en las siguientes bandas de frecuencia.

BANDA	FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA
L	1-2 GHz	30-15 cm
S	2-4 GHz	15-7,5 cm
C	4-8 GHz	7,5-3,75 cm
X	8-12,4 GHz	3,75-2,42 cm
Ku	12,4-18 GHz	2,42-1,66 cm
K	18-26,5 GHz	1,66-1,11 cm
Ka	26,5-40 GHz	11,1-7,5 mm
mm	40-300 GHz	7,5-1 mm

Tabla 1.2 Denominación habitual de las bandas de frecuencia en microondas

Para frecuencias superiores las ondas electromagnéticas son las del infrarrojo, visible, ultravioleta y rayos X tal como se aprecia en la siguiente tabla.

BANDA	FRECUENCIA	LONGITUD ONDA	DENOMINACIÓN
IR	300-800 GHz	1-0,4 mm	Región submilimétrica
	800 GHz-400THz	0,4mm-0,8 μ m	Infrarrojo
V	400-750 THz	0,8-0,4 μ m	Visible
UV	750-10.000 THz	400-12 nm	Ultravioleta
		120-0,6 amstrong	Rayos X

Tabla 1.3 Denominación de las bandas a frecuencias superiores

A partir de las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia, empleando las expresiones de los campos en forma compleja [1], se puede realizar un análisis de la impedancia y de la radiación de una antena.

La gran variedad de tipos de antenas viene dada por las diversas aplicaciones y bandas de frecuencias que requieren unas características concretas. Para agrupar esta amplia variedad de antenas se han desarrollado los siguientes bloques [1]:

- Antenas alámbricas: Se caracterizan por tener unos hilos conductores capaces de soportar las corrientes que originan los campos radiados. En este tipo de antenas las corrientes y las cargas varían armónicamente con el tiempo y a lo largo de los hilos las amplitudes también sufren modificaciones. Los hilos pueden ser rectos (dipolo, V, rómbica), espiras (circular, cuadrada o de cualquier forma arbitraria) y hélices.
- Antenas de apertura y reflectores: En este grupo de antenas la onda radiada es generada gracias una distribución de los campos que soporta la antena y a una excitación generada con guías de ondas. Las antenas de apertura se caracterizan por la variación armónicamente con el tiempo de los campos eléctricos y magnéticos de la apertura. Son consideradas antenas de apertura las bocinas, las aperturas, las bocas de guía y las ranuras sobre planos conductores. Por su parte los reflectores parabólicos ofrecen unas prestaciones muy necesarias para servicios de comunicaciones a grandes distancias, su ejemplo más común es el reflector parabólico.

- Agrupaciones de antenas: En ocasiones es necesario unas características de radiación que con una sola antena no es posible, pero con varias antenas combinadas es posible obtener unos resultados aceptables ya que permite este sistema una flexibilidad considerable. En principio cualquier antena es válida para generar estas agrupaciones.

2.2. Parámetros de antenas

Es conveniente caracterizar a una antena con unos parámetros concretos y propios que permitan evaluar el efecto que ocasiona sobre el sistema y poder gestionar el comportamiento de la antena sobre ese sistema [1].

1- Impedancia

Toda antena debe estar conectada a un transmisor para radiar el máximo de potencia con unas pérdidas mínimas. Se deben adaptar la antena y el transmisor para una máxima transferencia de potencia. La conexión se realiza mediante una línea de transmisión o guía de ondas ya que el transmisor está alejado de la antena. Por tanto se debe considerar la impedancia característica, la atenuación y la longitud de la línea de transmisión o guía de onda.

Las tensiones, corrientes y campos son eficaces ya que el transmisor que los genera, debe permitir que sean medidos en puntos característicos de la antena.

La impedancia de entrada Z_e se puede definir mediante tensiones y corrientes en ese punto. En régimen permanente sinusoidal la impedancia tiene una parte real $R_e(\omega)$ y una parte imaginaria $X_e(\omega)$, ambas dependientes de la frecuencia. Cuando Z_e no tiene parte reactiva a una frecuencia es una antena resonante.

Al radiar la antena energía, se produce una pérdida neta hacia el espacio debido a radiación que puede ser asignada a una resistencia de radiación R_r , se define como el valor de la resistencia que disiparía óhmicamente la misma potencia que la radiada por la antena [1].

$$P_{radiada} = I^2 R_r \quad (2.1)$$

Las pérdidas se superponen a la radiación en la antena, habitualmente son óhmicas en los conductores, si bien en las antenas de ferrita también se producen pérdidas en el núcleo [1].

La potencia entregada a la antena es la suma de las potencias radiada y de pérdidas en la antena. Todas las pérdidas se reagrupan en una resistencia de pérdidas R_{Ω} . La resistencia de entrada es la suma de la radiación y pérdidas.

$$P_{entregada} = P_{radiada} + P_{perdida} = I^2 R_r + I^2 R_{\Omega} \quad (2.2)$$

La impedancia de entrada es un parámetro importante, debido a que es el encargado de condicionar las tensiones de los generadores que se deben aplicar para conseguir unos valores de corriente determinados en la antena, por consiguiente se obtendrá una potencia radiada.

Por otra parte hay que tener en cuenta que si la parte reactiva tiene valores altos, hay que aplicar tensiones elevadas para obtener corrientes apreciables; si la resistencia de radiación es baja, se requieren elevadas corrientes para tener una potencia radiada considerable [1].

Un sistema radiante de radiodifusión de onda medio sería un ejemplo real. Por tanto para radiar una potencia de 200 kW mediante una antena de impedancia de entrada $20-j100 \Omega$ se necesita una corriente de 100 A y un generador de $|V|=10,200 \text{ V}$.

Cuando los valores de corriente y tensión son altos se producen pérdidas óhmicas importantes y se pueden producir fugas y descargas entre diversas partes de la antena o con tierra, planteando problemas de forma y aislamiento [1].

No toda la potencia entregada por el transmisor es radiada ya que hay pérdidas en la antena, por tanto se puede definir un rendimiento o eficiencia de la antena η_l mediante la relación entre potencia radiada y la entregada o de forma equivalente entre la resistencia de entrada de esa antena, si hubiera sido ideal (sin pérdidas), y la que presenta realmente.

$$\eta_l = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{R_r}{R_r + R_{\Omega}} \quad (2.3)$$

2- Intensidad de radiación

Las antenas pueden radiar con una direccionalidad determinada según la aplicación que se le va a dar, por tanto pueden concentrar la energía radiada en una dirección del espacio. Por consiguiente es necesario cuantificar este comportamiento mediante algún parámetro que permita establecer una comparación entre distintas antenas. Además será conveniente haber definido previamente el marco de referencia donde se ubica la antena que se desea caracterizar, para ello se empleará un sistema de coordenadas que permita definir cómodamente una dirección del espacio [1].

Para antenas el sistema de coordenadas normalmente es el esférico. Para definir una dirección en el espacio se utilizan los ángulos θ , ϕ .

En la figura 2.1 se define un sistema de coordenadas esféricas, con vectores unitarios \hat{r} , $\hat{\theta}$, $\hat{\phi}$ que forman una base ortogonal. La orientación de los vectores se determina mediante la intersección de una esfera de radio r , un cono de ángulo θ y un semiplano que pasa por el eje z .

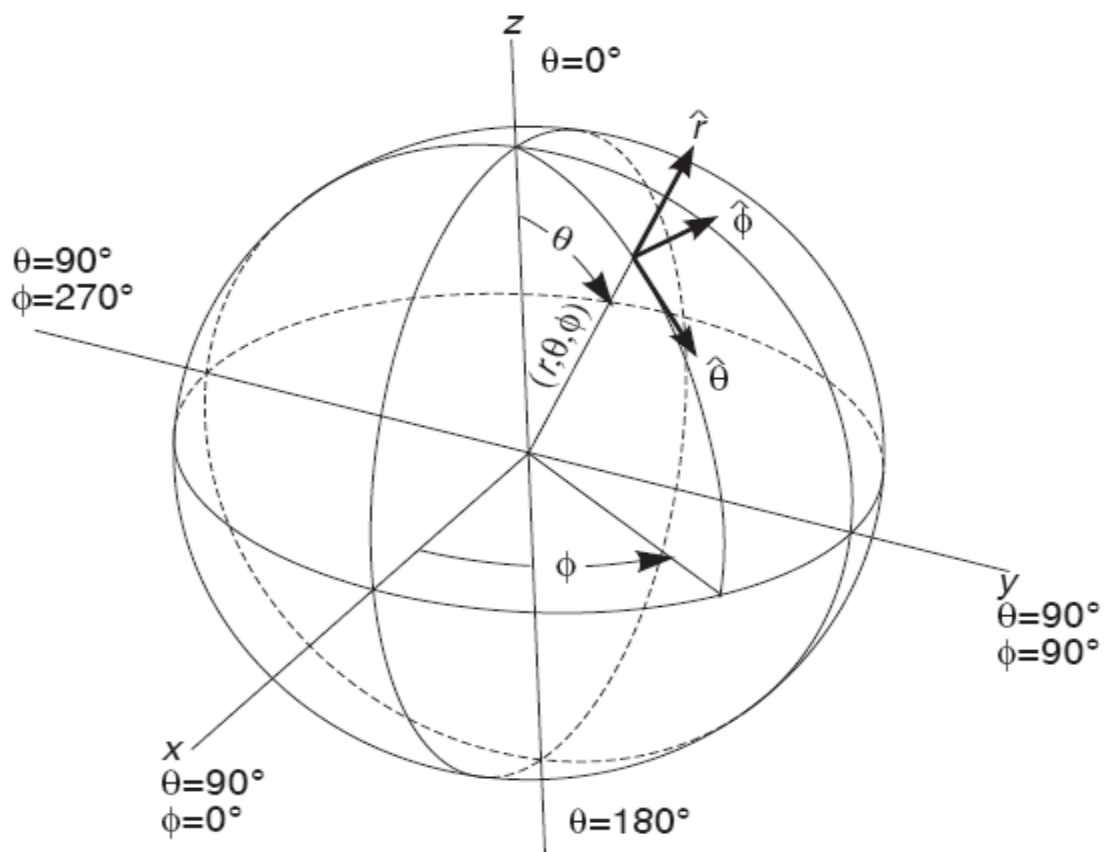


Fig2.1 Sistema de coordenadas esférico [1]

La onda electromagnética radiada está compuesta de un campo eléctrico y un campo magnético. Ambos campos son magnitudes vectoriales y están ligados por las ecuaciones de Maxwell [1].

La densidad de flujo por superficie se obtiene a partir de los valores eficaces de los campos tal como se aprecia en la siguiente expresión:

$$\vec{\rho}(\theta, \phi) = \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) \text{ W/m}^2 \quad (2.4)$$

Donde se supone una variación temporal armónica para los campos y los símbolos *, Re y \times denotan el complejo conjugado, la parte real y el producto vectorial.

Cuando los campos son radiados, los módulos del campo eléctrico y del campo magnético están relacionados por la impedancia característica del medio η , que en el vacío vale $120\pi \Omega$ [1].

Por lo tanto, la densidad de potencia radiada también se puede calcular a partir de las componentes transversales del campo eléctrico [1].

$$\rho(\theta, \phi) = \frac{|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2}{\eta} \quad (2.5)$$

Mediante la integral de la densidad de potencia en una superficie esférica que encierre a la antena se obtiene potencia total radiada [1].

$$P_r = \iint_s \vec{\rho}(\theta, \phi) \cdot d\vec{s} \quad (2.6)$$

La intensidad de radiación es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección; sus unidades son vatios por estereorradián y a grandes distancias tiene la propiedad de ser independiente de la distancia a la que se encuentre la antena [1].

La relación entre la intensidad de radiación y la densidad de potencia radiada es

$$K(\theta, \phi) = \rho(\theta, \phi)r^2 \quad (2.7)$$

y la potencia total radiada también se calcula integrando la intensidad de radiación en todas las direcciones del espacio

$$P_r = \iint_{4\pi} K(\theta, \phi) d\Omega \quad (2.8)$$

al ser el diferencial de ángulo sólido en coordenadas esféricas

$$d\Omega = ds/r^2 = \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (2.9)$$

3- Diagrama de radiación

Un diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena, en función de las distintas direcciones del espacio, a una distancia fija. Normalmente se emplea un sistema de coordenadas esféricas. Con la antena situada en el origen y manteniendo constante la distancia se expresará el campo eléctrico en función de las variables angulares (θ , φ) [1]. Ya que el campo es una magnitud vectorial, es necesario determinar en cada punto de la esfera de radio constante el valor de dos componentes ortogonales, habitualmente según $(\hat{\theta}, \hat{\phi})$ [1].

Por otra parte la representación se puede realizar a partir tanto del campo eléctrico como del campo magnético ya que el magnético se deriva directamente del eléctrico. Normalmente los diagramas se refieren al campo eléctrico.

La representación gráfica de un diagrama de potencia contiene la misma información que un diagrama de radiación de campo debido a que la densidad de potencia es proporcional al cuadrado del módulo del campo eléctrico potencia.

$$t(\theta, \phi) = \frac{|E(r, \theta, \phi)|^2}{|E(r)|^2} \quad (2.10)$$

En ocasiones la representación gráfica de la fase $E(\theta, \varphi)$ puede ser necesaria además de la amplitud de las dos componentes. Dicha representación se denomina el diagrama de fase de la antena [1]. El diagrama de radiación se puede representar en forma tridimensional utilizando técnicas gráficas diversas, como las curvas de nivel o el dibujo en perspectiva [1]. En la figura 2.2 se aprecia un diagrama tridimensional de una antena y los planos E y H. Los niveles se expresan en decibelios respecto al máximo de radiación [1].

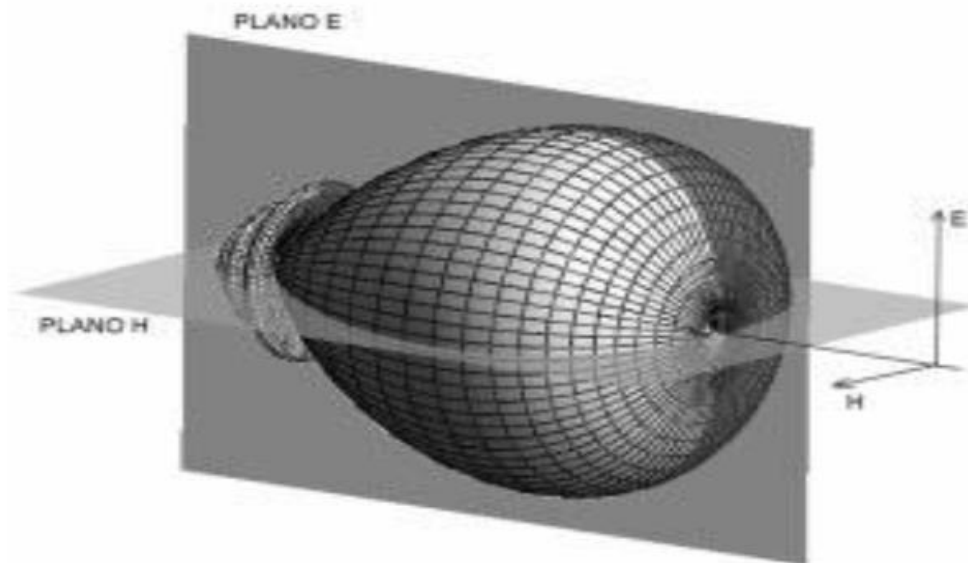


Fig. 2.2 Diagrama de radiación tridimensional [1]

Cuando la antena está polarizada linealmente el plano E se define como el que forma la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección. De forma análoga, el plano H es el formado por la dirección de máxima radiación y el campo magnético en dicha dirección [1]. Ambos planos son perpendiculares y su intersección determina una línea que define la dirección de máxima radiación de la antena.

En la mayoría de los casos, la información que nos da un corte de la representación tridimensional puede ser suficiente. Pero puede ser excesiva si se representan todos los cortes, por eso se aconseja representar dicha información sólo en los planos principales.

Los cortes pueden hacerse de infinitas formas. Los cortes más habituales son los que siguen los meridianos en una hipotética esfera (cortes para ϕ constante) o los paralelos (cortes con θ constante) [1]. Los cortes bidimensionales del diagrama de radiación se pueden representar en coordenadas polares o cartesianas. En coordenadas cartesianas se representa el ángulo en abscisas y el campo o la densidad de potencia en ordenadas.

La representación en coordenadas cartesianas permite observar los detalles en antenas muy directivas, mientras que el diagrama en coordenadas polares aporta una información detallada de la distribución de la potencia en las diferentes direcciones del espacio. En las siguientes figuras se muestran ejemplos de ambas representaciones.

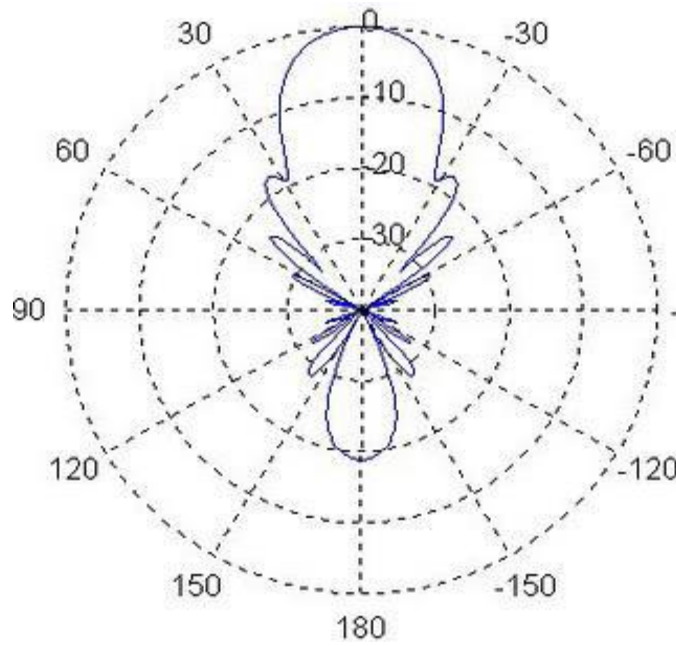


Fig 2.3 Diagrama de radiación en coordenadas polares [1]

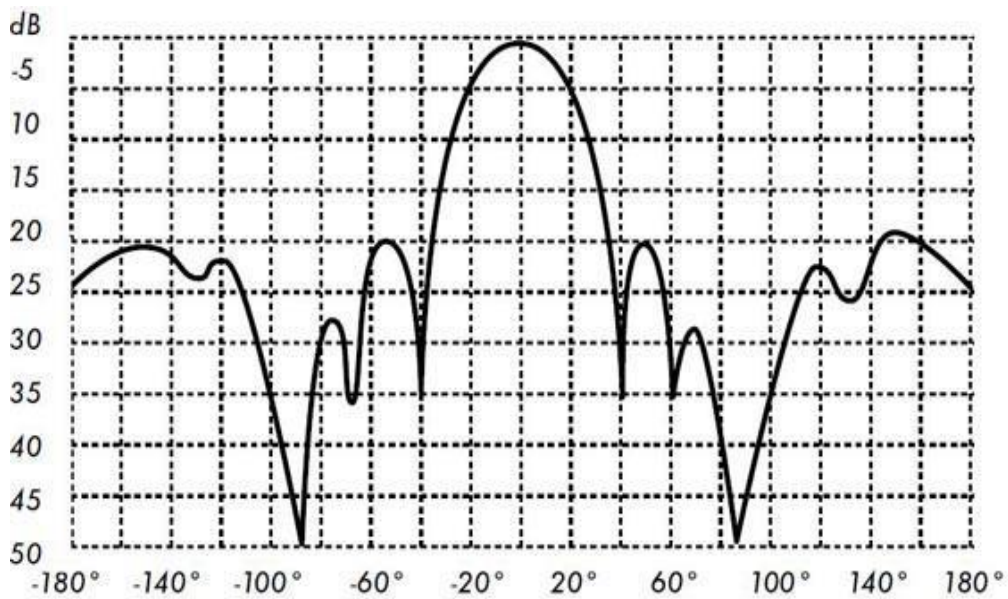


Fig 2.4 Diagrama de radiación en coordenadas cartesianas [1]

Se puede representar el campo tanto de forma absoluta como relativa, normalizando el valor máximo a la unidad. Normalmente el diagrama se encuentra representado con la escala en decibelios. El máximo del diagrama de radiación es cero decibelios y en las restantes direcciones del espacio los valores en dB son negativos. Además hay que tener en cuenta que los diagramas de campo y de potencia son idénticos cuando la escala está en decibelios.

En un diagrama de radiación se aprecia una zona donde la radiación es máxima, esta zona se denomina haz principal o lóbulo principal. Las zonas que rodean a los máximos de menor amplitud se denominan lóbulos laterales y al lóbulo lateral de mayor amplitud se denomina lóbulo secundario. A continuación se definen los parámetros del diagrama más relevantes [1].

Ancho de haz a - 3 dB ($\Delta\theta_{-3dB}$)

Es la separación angular de las direcciones en las que el diagrama de radiación de potencia toma el valor mitad del máximo. En el diagrama de campo es la excursión angular entre las direcciones en las que el valor del campo ha caído a 0,707 el valor del máximo.

Ancho de haz entre ceros ($\Delta\theta_c$)

Es la separación angular de las direcciones del espacio en las que el lóbulo principal toma un valor mínimo.

Relación de lóbulo principal a secundario (NLPS)

Es el cociente, entre el valor del diagrama en la dirección de máxima radiación y en la dirección del máximo del lóbulo secundario, todo expresado en dB. Habitualmente, dicha relación se refiere al lóbulo secundario de mayor amplitud, que suele ser adyacente al lóbulo principal.

La relación delante-atrás (D/A)

Es el cociente, entre el valor del diagrama en la dirección del máximo y el valor en la dirección diametralmente opuesta, todo expresado en dB.

Por otra parte si un diagrama de radiación presenta simetría de revolución en torno a un eje se dice que la antena es omnidireccional. En un diagrama tridimensional toda la información contenida puede representarse en un único corte que contenga al eje.

Una antena isótropa es una antena ideal que radia la misma intensidad de radiación en todas las direcciones del espacio. Pero en la realidad no existe ninguna antena de estas características, por tanto se utiliza de manera teórica para definir los parámetros de la siguiente sección [1].



Fig. 2.5 Diagramas de radiación isótropo, omnidireccional y directivo [1]

4- Directividad

La directividad D de una antena es la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isótropa que radiase la misma potencia que la antena.

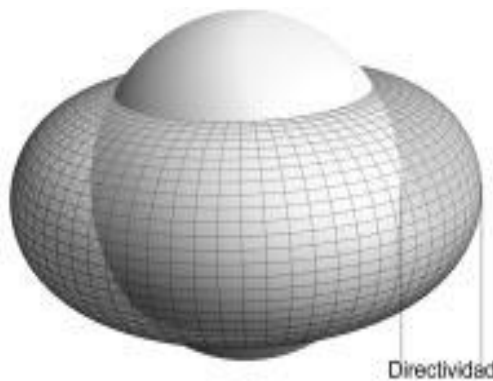


Fig. 2.6 Directividad [1]

$$D(\theta, \phi) = \frac{\rho(\theta, \phi)}{Pr / (4\pi r^2)} \quad (2.11)$$

Al no especificar la dirección angular, la directividad se refiere a la dirección de máxima radiación [1].

$$D(\theta, \phi) = \frac{\rho_{m\acute{a}x}(\theta, \phi)}{Pr / (4\pi r^2)} \quad (2.12)$$

La directividad se puede obtener, en general, a partir del conocimiento del diagrama de radiación de la antena. Si se define el diagrama normalizado mediante

$$t(\theta, \phi) = \frac{\rho(\theta, \phi)}{\rho_{m\acute{a}x}} = \frac{K(\theta, \phi)}{K_{m\acute{a}x}} \quad (2.13)$$

la expresión de la directividad puede escribirse en la forma

$$D = \frac{4\pi}{\iint_{\Omega_e} t(\theta, \phi) d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_e} \quad (2.14)$$

donde Ω_e es el ángulo sólido equivalente [1].

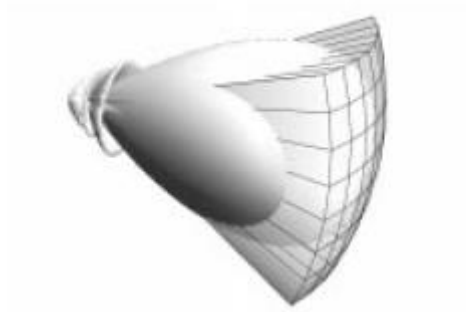


Fig. 2.7 Estimación de la directividad a partir del ángulo sólido equivalente [1]

Si una antena tiene un diagrama de radiación uniforme en un cierto ángulo sólido y cero fuera de él, Ω_e en este caso sería igual al ángulo sólido en el que la antena está radiando. Una antena isótropa tiene directividad 1; si radia de forma uniforme en un hemisferio, su directividad es 2, y si radia en un octante es 8 [1].

Además cuando una antena es directiva y posee un lóbulo principal y lóbulos secundarios de valores reducidos, se puede obtener una estimación de la directividad considerando que se produce radiación uniforme en un ángulo sólido definido por los anchos de haz a -3 dB en los dos planos principales del diagrama de radiación ($\Delta\theta_1$ $\Delta\theta_2$) [1].

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_e} = \frac{4\pi}{\Delta\theta_1 \Delta\theta_2} \quad (2.15)$$

Una vez conocida la directividad máxima D y el diagrama de radiación normalizado (θ, ϕ) , se puede obtener la directividad en cualquier dirección directamente del producto de ambos [1]

$$D = D_t(\theta, \phi) \quad (2.16)$$

Para añadir cabe destacar que hay otro parámetro relacionado con la directividad que es la ganancia de la antena. Su definición es similar, solo que no se utiliza la potencia radiada, se tiene en cuenta la potencia entregada a la antena. Por este motivo se tiene en cuenta las pérdidas en la antena, de esa forma se llega a la conclusión de que no toda la potencia entregada es radiada al espacio. La ganancia y la directividad están relacionadas, en consecuencia, por la eficiencia de la antena [1].

$$G(\theta, \phi) = \frac{\frac{\rho(\theta, \phi)}{4\pi r^2}}{\frac{P_{entregada}}{4\pi r^2}} = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} \frac{\rho(\theta, \phi)}{4\pi r^2} = \eta_l D(\theta, \phi) \quad (2.17)$$

III – TIPOS DE ANTENAS UTILIZADAS

3.1. Antenas

3.1.1. Dipolo elemental

El dipolo elemental es un elemento de corriente con una longitud l , mucho menor que λ , recorrido por una corriente uniforme de valor eficaz I . A su vez tiene una importancia considerable ya que muchas antenas en baja frecuencia precisan de estas características además, por superposición de elementos de corriente, pueden ser analizadas distribuciones de mayor longitud y no uniformes, como veremos posteriormente [1].

Si se considera la situación de la figura 3.1 con un hilo de corriente I , o la densidad correspondiente $\vec{J} = I \delta(x)\delta(y) \hat{z}$.

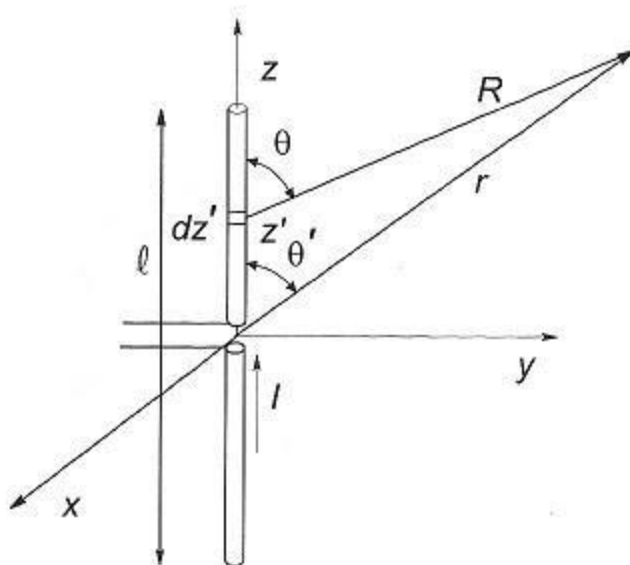


Fig. 3.1 Dipolo elemental [1]

El potencial vector \vec{A} vendrá dado por la siguiente ecuación

$$\vec{A} = \iint_{v'} \frac{\mu \vec{J}(\vec{r}') e^{-jkR}}{4\pi R} dv' \quad (3.1)$$

que, para una distribución lineal como la dada, toma la forma

$$\vec{A} = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{\mu I e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{z} dz' \quad (3.2)$$

Para el dipolo elemental I es constante y dado que $l \ll \lambda$, tendremos que para los puntos situados a una distancia r , se verifica $l \ll r$, $R \approx r - z' \cos \theta$ y

$$\begin{aligned} \vec{A} &= \int_{-l/2}^{l/2} \frac{\mu I e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{z} dz' = \frac{\mu I e^{-jkr}}{4\pi r} \int_{-l/2}^{l/2} e^{jkz' \cos \theta} dz' \\ &= \frac{\mu I l e^{-jkr}}{4\pi r} \frac{\text{sen}(k \cos \theta \frac{l}{2})}{k \cos \theta \frac{l}{2}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Finalmente obtendremos para $r \gg l$ y $\lambda \gg l$

$$\vec{A} = \frac{\mu I l e^{-jkr}}{4\pi r} \hat{z} \quad (3.4)$$

A partir de esta ecuación, podemos obtener:

$$A_\theta = -A_z \text{sen} \theta = -\mu \frac{I l e^{-jkr}}{4\pi r} \text{sen} \theta \quad (3.5)$$

$$A_\phi = 0$$

y los campos de radiación:

$$\vec{E}_{rad} = E_\theta \hat{\theta} = -j \omega A_\theta \hat{\theta} = j \omega \mu \frac{I l e^{-jkr}}{4\pi r} \text{sen} \theta \hat{\theta} \quad (3.6)$$

$$\vec{H}_{rad} = H_\phi \hat{\phi} = \frac{E_\theta}{\eta} \hat{\phi} = j k \frac{I l e^{-jkr}}{4\pi r} \text{sen} \theta \hat{\phi}$$

donde se ha tenido en cuenta que $\omega\mu = k\eta$ y que $\omega\varepsilon = k/\eta$, donde η es la impedancia intrínseca del medio. La densidad de potencia radiada viene dada por (2.4)

$$\vec{\rho} = \text{Re} [\vec{E} \times \vec{H}^*] = \hat{r} \frac{(I l)^2}{16\pi^2} \frac{k\omega\mu}{r^2} \text{sen}^2\theta \quad (3.7)$$

y se obtiene como resultado un diagrama de radiación de potencia (2.12) independiente de ϕ y proporcional a $\text{sen}^2\theta$. En la figura 3.2 se muestra representado el diagrama de radiación para todo el espacio (representación tridimensional) y para un plano que contiene el eje del dipolo, que dada la simetría de revolución del diagrama contiene toda la información de radiación. El diagrama de radiación de campo es similar en al de potencia, solo que la función representada es $\text{sen} \theta$ [1].

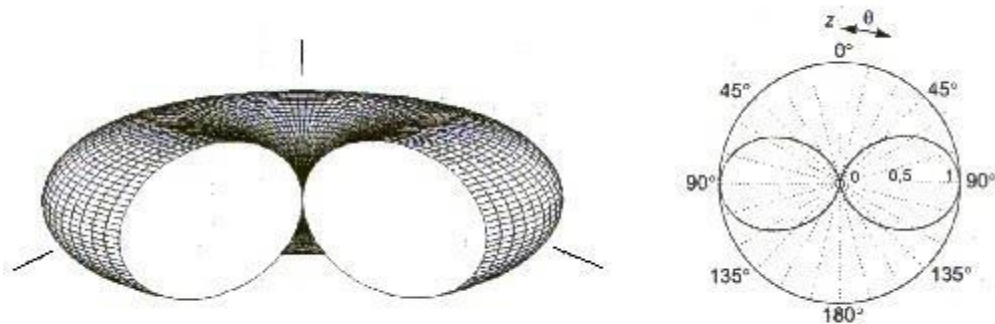


Fig. 3.2 Diagrama de radiación de un dipolo elemental, tridimensional (izquierda) y corte en plano E (derecha) [1]

3.1.2. Dipolos

Tal como hemos podido observar anteriormente los valores de λ son pequeños, por tanto se estimaba que la distribución de corriente es uniforme. En el siguiente apartado se estimará valores más altos de las dimensiones de la antena en términos de λ , esto provocará interacciones entre sus diversos elementos por lo que la aproximación de corriente no será uniforme [1].

La antena cilíndrica es el modelo de antena más sencillo, ya que consiste en un hilo fino recto conductor, de dimensión $2H$ y radio a ($a \ll \lambda$) alimentado con un generador en su centro, como se indica en la figura 3.3. De forma experimental se ha visto que la distribución de corriente en este tipo de antenas es aproximadamente sinusoidal, con un cero de corriente en los extremos teniendo en cuenta que $k = 2\pi/\lambda$ [1]

$$\vec{j}(\vec{r}') = \hat{z} I(z') \delta(x') \delta(y') \quad (3.8)$$

donde

$$I(z') = I_m \text{sen } k(H - |z'|) = \begin{cases} I_m \text{sen } k(H - z') & 0 \leq z' \leq H \\ I_m \text{sen } k(H + z') & -H \leq z' \leq 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

$$I(z') = I_m \text{sen } k(H - |z'|) = \begin{cases} I_m \text{sen } k(H - z') & 0 \leq z' \leq H \\ I_m \text{sen } k(H + z') & -H \leq z' \leq 0 \end{cases}$$

I_m es el valor máximo de la distribución de corriente, no tiene por qué coincidir con el valor de la corriente en la entrada de la antena o bornes del generador que es

$$I(0) = I_m \text{sen } kH \quad (3.10)$$

Se puede razonar esta distribución si se toma la antena cilíndrica como una línea de transmisión de hilos paralelos de longitud H acabada en circuito abierto, que se abre hasta que los hilos quedan en fila (Fig. 3.4). Como la línea acaba en circuito abierto se genera una onda estacionaria de corriente, con un nulo en el extremo [1].

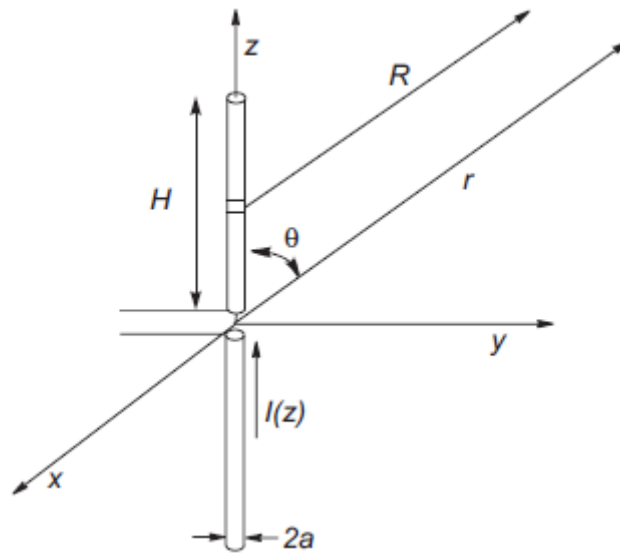


Fig. 3.3 Antena cilíndrica [1]

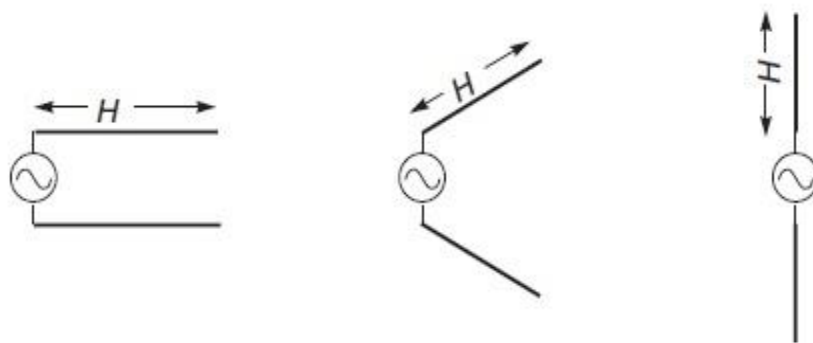


Fig. 3.4 Modelo de antena cilíndrica como línea de transmisión abierta [1]

Cuando ya se conoce la distribución de corriente se puede hallar el vector de radiación y a partir de éste los campos radiados

$$\vec{N} = \int_{-H}^H \hat{z} I(z') e^{jk\hat{r}\vec{r}'} dz' = \hat{z} \int_{-H}^H I_m \text{sen}k(H - |z'|) e^{jk_z z'} dz' = \quad (3.11)$$

$$= \hat{z} 2 I_m \int_0^H \text{sen}k(H - z') \cos k_z z' dz' =$$

$$= \hat{z} 2 k I_m \frac{\cos(k_z H) - \cos(kH)}{k^2 - k_z^2}$$

cuya expresión en función de θ , teniendo en cuenta que $k_z = k \cos \theta$, es

$$\vec{N} = \hat{z} 2 I_m \frac{\cos(kH \cos \theta) - \cos(kH)}{k \text{sen}^2 \theta} \quad (3.12)$$

a partir del vector de radiación se obtienen los campos radiados

$$E_\theta = -j\omega\mu \frac{e^{-jk r}}{4\pi r} N_\theta$$

$$E_\theta = j \frac{\eta}{2\pi r} e^{-jk r} I_m \frac{\cos(kH \cos \theta) - \cos(kH)}{\text{sen} \theta} \quad (3.13)$$

$$H_\theta = 0, \quad H_\phi = \frac{E_\theta}{\eta}$$

3.2. Aperturas

3.2.1. Campos radiados por aperturas

El concepto de apertura se entiende por una región plana de superficie S_0 sobre la que se supone que existen unos campos iluminantes conocidos \vec{E} y \vec{H} . Por otra parte para el análisis se estudiará el caso plano ya que es el que más interés tiene y a la vez tiene una resolución analítica simple [1].

3.2.1.1. Apertura rectangular

Si se tiene en cuenta una superficie rectangular de dimensiones a, b (ver figura 3.5) alimentada con un campo uniforme según $\hat{x}, \vec{E} = E_x \hat{x}$ tendremos los siguientes campos radiados.

$$E_{\theta} = j \frac{e^{-jkr}}{2\lambda r} \left(1 + \frac{\eta}{Z_0} \cos \theta\right) \cos \Phi \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} E_x e^{jk_x x'} e^{jk_y y'} dx' dy'$$

(3.14a)

$$E_{\Phi} = -j \frac{e^{-jkr}}{2\lambda r} \left(\frac{\eta}{Z_0} + \cos \theta\right) \sin \Phi \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} E_x e^{jk_x x'} e^{jk_y y'} dx' dy'$$

Ambas expresiones proceden de la transformada de Fourier unidimensional del campo en la apertura y están en función del campo iluminante E_x . Si hubieran componentes de campo E_y en la apertura, igualmente los campos radiados se obtendrían como:

$$E_{\theta} = j \frac{e^{-jkr}}{2\lambda r} \left(1 + \frac{\eta}{Z_0} \cos \theta\right) \sin \Phi \iint_{S_0} E_y e^{jk_x x'} e^{jk_y y'} dx' dy'$$

(3.14b)

$$E_{\Phi} = j \frac{e^{-jkr}}{2\lambda r} \left(\frac{\eta}{Z_0} + \cos \theta\right) \cos \Phi \iint_{S_0} E_y e^{jk_x x'} e^{jk_y y'} dx' dy'$$

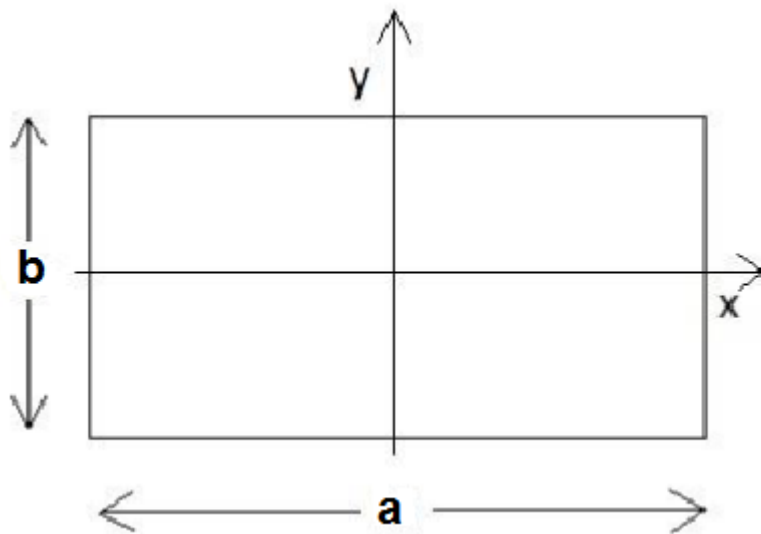


Fig. 3.5 Apertura Rectangular [1]

A continuación se analizará un caso común, una apertura rectangular alimentada con el modo TE_{10}

Apertura alimentada con el modo TE_{10}

Utilizando las expresiones conocidas para las distribuciones unidimensionales se puede analizar cualquier otra forma de iluminación distinta de la uniforme, por tanto se estudiará el caso de la iluminación producida en una boca de guía por el modo fundamental TE_{10} , cuyos campos referidos al sistema de coordenadas de la figura 3.5 son [1]

$$\begin{aligned} E_y &= E_0 \cos \frac{\pi}{a} x \\ H_x &= -\frac{E_y}{Z_0} \\ Z_0 &= \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Empleando las correspondientes transformadas de Fourier, se obtiene las siguientes expresiones de los campos de radiación a partir de 3.14.

$$E_\theta = j \frac{e^{-jkr}}{2\lambda r} \left(1 + \frac{\eta}{Z_0} \cos \theta\right) \sin \Phi \frac{\pi a}{2} \frac{\cos k_x \frac{a}{2}}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \left(k_x \frac{a}{2}\right)^2} b \frac{\sin k_y \frac{b}{2}}{k_y \frac{b}{2}}$$

donde

$$k_x = k \sin(\theta) \cos(\Phi)$$

$$k_y = k \sin(\theta) \sin(\Phi)$$

(3.16)

y

$$E_\Phi = j \frac{e^{-jkr}}{2\lambda r} \left(\frac{\eta}{Z_0} + \cos \theta\right) \cos \Phi \frac{\pi a}{2} \frac{\cos k_x \frac{a}{2}}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \left(k_x \frac{a}{2}\right)^2} b \frac{\sin k_y \frac{b}{2}}{k_y \frac{b}{2}}$$

3.2.1.2. Apertura circular

Como anteriormente se ha comentado. el campo radiado es la transformada de Fourier del campo eléctrico en la apertura, si se sitúa la apertura en el eje z, E(r) tiene únicamente componentes proporcionales a f_x y f_y .

Por otra parte es necesario expresar el campo radiado en coordenadas esféricas (3D) tal como se aprecia en la siguiente expresión [3]

$$E(r) = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{2\pi r} [a_\theta (f_x \cos\Phi + f_y \sen\Phi) + a_\Phi \cos\theta (f_y \cos\Phi - f_x \sen\Phi)] \quad (3.17)$$

Apertura iluminada con el modo TE_{11}

A continuación se realizará un estudio del caso más común que consiste en una apertura circular alimentada con el modo fundamental TE_{11} (ver figura 3.6). Las componentes de campo radiado que se generan serán las siguientes [1]:

$$E_\theta = j A k a J_1(q_{11}) \frac{e^{-jkr}}{r} \frac{1 + \cos\theta}{2} \frac{J_1(k a \sen\theta)}{k a \sen\theta} \sen\Phi \quad (3.18)$$

$$E_\phi = j A k a J_1(q_{11}) \frac{e^{-jkr}}{r} \frac{1 + \cos\theta}{2} \frac{J'_1(k a \sen\theta)}{1 - \left[\frac{k a \sen\theta}{q_{11}}\right]^2} \cos\Phi$$

donde $q_{11}=1,84118$ es el primer cero de la derivada de la función de Bessel de orden 1 ($J'_1(q_{11}) = 0$) y a , sería el radio [1].

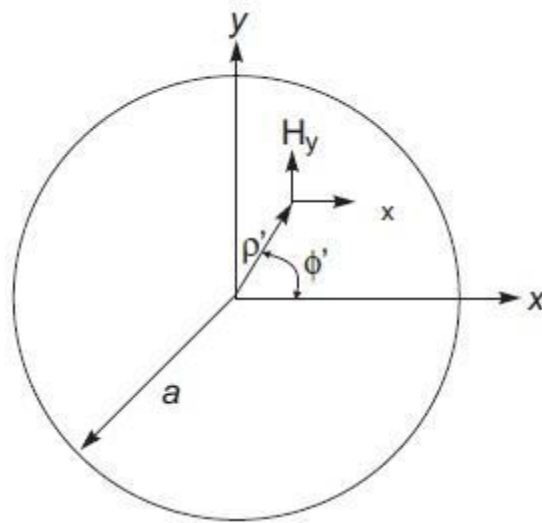


Fig. 3.6 Apertura Circular [1]

3.2.2. Bocinas

Las bocinas son geometrías de sección creciente generadas por el abocinamiento de una guía de ondas. Se trata de estructuras radiantes muy utilizadas, y las derivadas de la guía rectangular son principalmente de tres tipos. La bocina de plano E se obtiene abriendo la altura de la boca de la guía, las perpendiculares al campo eléctrico en la guía, manteniendo la anchura de la guía "a". La bocina de plano H abre la anchura de la boca de la guía, que son las perpendiculares al campo magnético, manteniendo la altura b de la guía. La piramidal abre simultáneamente las dos dimensiones [1].

3.2.2.1. Bocina piramidal rectangular

A continuación se estudiará la configuración de bocina más habitual, donde la boca está alimentada con el modo fundamental TE_{10} de la correspondiente guía rectangular. Los campos radiados serán [3]:

$$E_{\theta} = \frac{jk_0 a' b' E_0}{4r} e^{-jk_0 r} \sin \Phi \frac{\sin v}{v} \frac{\cos u}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - u^2} \quad (3.19)$$

$$E_{\Phi} = \frac{jk_0 a' b' E_0}{4r} e^{-jk_0 r} \cos \Phi \cos \theta \frac{\sin v}{v} \frac{\cos u}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - u^2}$$

a' y b' son las dimensiones de la boca tal como se aprecia en las expresiones,

donde

$$u = \left(\frac{k_0 a'}{2}\right) \sin \theta \cos \Phi$$

$$v = \left(\frac{k_0 b'}{2}\right) \sin \theta \sin \Phi$$

$$E_0 = 1$$

Las expresiones definidas en (3.19) han sido implementadas para el diagrama tridimensional de la bocina piramidal [3] y las implementadas en (3.20) para el diagrama bidimensional [3].

$$E_{\theta} = \frac{jk_0 a' b'}{4r} e^{-jk_0 r} \frac{\cos\left(\left(\frac{k_0 b'}{2}\right) \sin \theta\right)}{\left(\frac{k_0 b'}{2}\right) \sin \theta} \quad \text{Plano E } (\Phi = \frac{\pi}{2})$$

(3.20)

$$E_{\Phi} = \frac{jk_0 a' b'}{4r} e^{-jk_0 r} \frac{\sin\left(\left(\frac{k_0 a'}{2}\right) \sin \theta\right) \cos \theta}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \left(\left(k_0 \frac{a'}{2}\right) \sin \theta\right)^2} \quad \text{Plano H } (\Phi = 0)$$

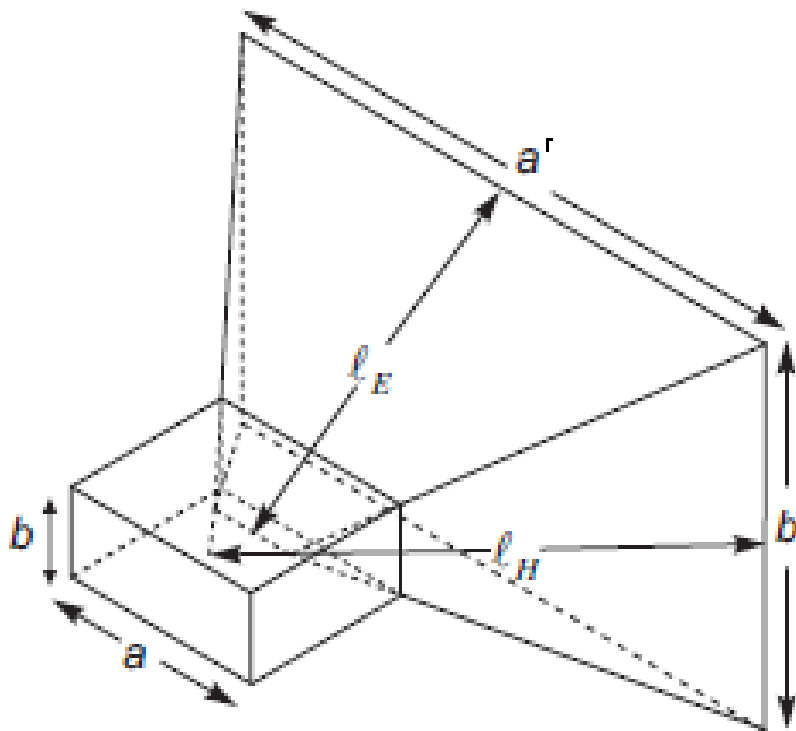


Fig. 3.7 Bocina piramidal alimentada por una guía rectangular [1]

3.2.3. Ranuras: Antena microstrip

Las antenas microstrip consisten en un parche metálico colocado sobre un sustrato dieléctrico situado encima de un plano metálico, tal como se aprecia en la figura 3.8. La estructura del parche es rectangular o circular y de dimensiones del orden de media longitud de onda. Además se puede construir agrupaciones de parches combinando líneas y radiadores impresos [1].

Por otra parte esta antena tiene también sus limitaciones como son un ancho de banda reducido por ser una estructura resonante, y una eficiencia muy baja debido a que solo una porción de energía es radiada al espacio de la energía acumulada en la cavidad formada entre el parche y el plano de masa [1].

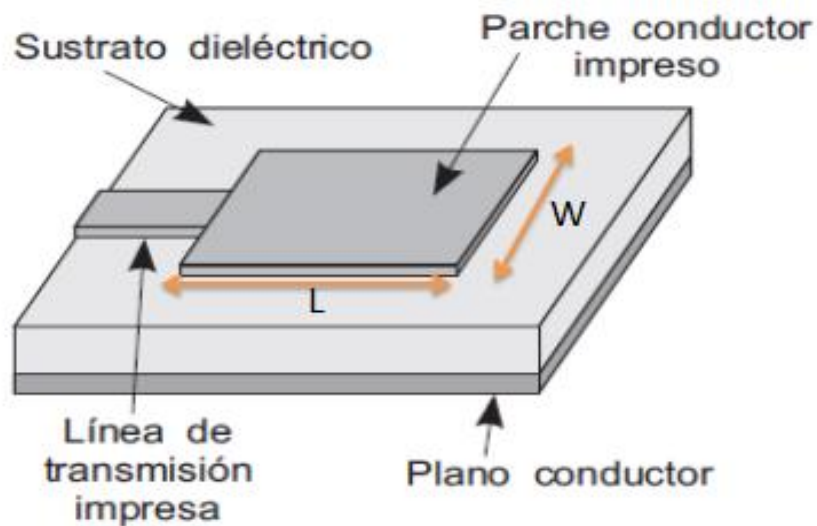


Fig. 3.8 Antena microstrip [1]

El campo radiado para una antena microstrip viene dado según [2]:

$$E'_{\Phi} = +j \frac{k_0 h W E_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \text{sen } \theta \frac{\text{sen}(X)}{X} \frac{\text{sen}(Z)}{Z} \right\} \cos \left(\frac{k_0 L_{eff}}{2} \text{sen } \theta \text{sen } \Phi \right) \quad (3.21)$$

donde

$$X = \frac{k_0 h}{2} \text{sen } \theta \cos \Phi$$

$$Z = \frac{k_0 W}{2} \cos \theta$$

Previamente se debe hallar L_{eff} para poder calcular el campo radiado, para ello necesitamos calcular la permitividad relativa efectiva del dieléctrico ϵ_{reff} que a su vez depende de los valores de la permitividad relativa ϵ_r [2]

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2}$$

Una vez obtenida la permitividad relativa efectiva del dieléctrico ϵ_{reff} se procederá a calcular una longitud efectiva relacionada con la longitud del parche L según:

$$L_{eff} = L + \Delta L$$

Donde ΔL es

$$\Delta L = 0.412 h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}$$

Por otra parte para el diagrama bidimensional se han estimado las siguientes ecuaciones de los campos radiados [2]

E – Plane ($\theta = 90^\circ$, $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ and $270^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$)

$$E_\theta = jk_0 \frac{WV_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \frac{\text{sen} \left(\left(\frac{k_0 h}{2} \right) \cos \Phi \right)}{\left(\frac{k_0 h}{2} \right) \cos \Phi} \right\} \cos \left(\frac{k_0 L_{eff}}{2} \text{sen} \Phi \right) \quad (3.22)$$

H – Plane ($\phi = 0^\circ$, $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$)

$$E_\phi = jk_0 \frac{WV_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \text{sen} \theta \frac{\text{sen} \left(\left(\frac{k_0 h}{2} \right) \text{sen} \theta \right)}{\left(\frac{k_0 h}{2} \right) \text{sen} \theta} \frac{\text{sen} \left(\left(\frac{k_0 W}{2} \right) \cos \theta \right)}{\left(\frac{k_0 W}{2} \right) \cos \theta} \right\}$$

3.2.4. Reflector parabólico

Si se plantea obtener directividades elevadas se suele emplear un reflector parabólico (ver Fig. 3.9) como superficie reflectante. El funcionamiento de un reflector parabólico consiste en focalizar la potencia incidente en el reflector sobre una fuente primaria situada en su foco [1].

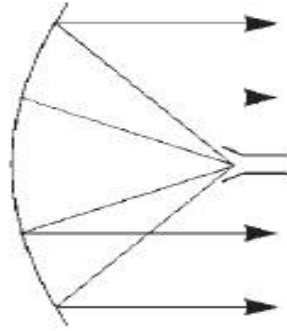


Fig. 3.9 Reflector Parabólico [1]

Para obtener el diagrama de radiación del reflector se ha utilizado la expresión (3.17) de la apertura circular. Suponiendo un campo uniforme según el eje x

$$f_x = 2\pi a^2 E_0 \widehat{a}_x \frac{J_1(k_0 a \text{sen}\theta)}{k_0 a \text{sen}\theta}$$

$$E_a = E_0 \widehat{a}_x$$

$$E_0 = 1 ; f_y = 0$$

sustituyendo $f_x(f_y = 0)$ en la siguiente expresión:

$$E(r) = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{2\pi r} [a_\theta (f_x \cos\Phi + f_y \text{sen}\Phi) + a_\Phi \cos\theta (f_y \cos\Phi - f_x \text{sen}\Phi)] \quad (3.17)$$

Por otra parte para el diagrama bidimensional las expresiones de los campos radiados son [1]

$$E_{\theta} = \frac{j k_0}{r} e^{-jk_0 r} a^2 \frac{J_1(k_0 a \text{ sen}\theta)}{k_0 a \text{ sen}\theta} \quad \text{Plano E } \left(\phi = \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.23)$$

$$E_{\phi} = \frac{-j k_0}{r} e^{-jk_0 r} a^2 \cos \theta \frac{J_1(k_0 a \text{ sen}\theta)}{k_0 a \text{ sen}\theta} \quad \text{Plano H } (\phi = 0)$$

Donde J_1 es la función de Bessel de orden 1.

3.3. Antenas de Hilo

Esta antena consiste en un hilo que tiene varias longitudes de onda terminado con una carga. El hilo y el plano de tierra forman una línea de transmisión con una impedancia característica que es función del diámetro del hilo y de la distancia al plano de tierra [1]. En la figura 3.10 se puede observar una antena de hilo largo o de Beverage.

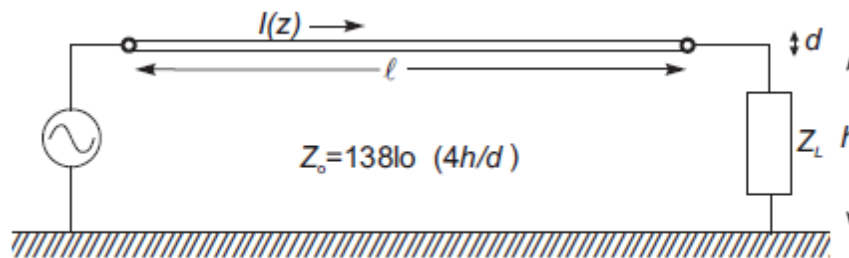


Fig. 3.10 Antena de hilo largo o de Beverage [1]

Por otra parte si el extremo del hilo se carga con la impedancia característica de la línea de transmisión no existirá onda reflejada y sólo se excitará una onda de corriente progresiva. Además la onda de corriente progresiva puede ser considerada constante con un término de propagación de fase, si las pérdidas óhmicas y de radiación en la línea son bajas. Por tanto la distribución de corriente en la antena es

$$I(z) = I_0 e^{-j\beta z} \quad (3.24)$$

donde β es la constante de fase en la línea de transmisión [1]. Si el diámetro del hilo es muy pequeño, en términos de λ , se puede hacer una aproximación de la constante de fase en la línea a la del espacio libre k .

$$E_\theta = -j\omega\mu \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} N_\theta \quad (3.25)$$

En este caso los campos radiados pueden hallarse directamente a partir de la expresión (3.25) con los valores

$$E_\theta = j30 k l I_0 \sin \theta e^{j\frac{kl}{2}(1-\cos\theta)} \frac{e^{-jkr}}{r} \frac{\text{sen}\left(\frac{kl}{2}(1-\cos\theta)\right)}{\frac{kl}{2}(1-\cos\theta)} \quad (3.26)$$

$$E_\theta = 0$$

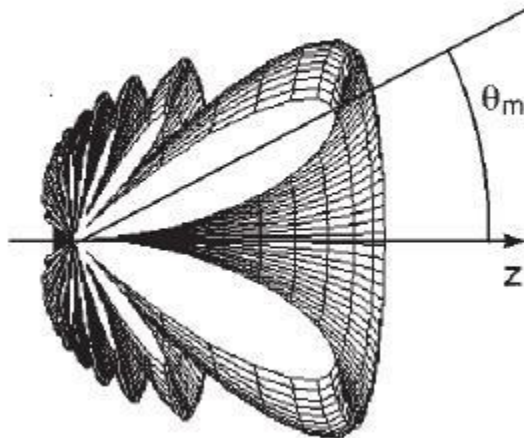


Fig. 3.11 Diagrama de radiación para un hilo largo $l = 5 \lambda$ [1]

3.4. Agrupaciones de Antenas

Se define una agrupación como un conjunto de N antenas iguales que radian o reciben simultáneamente [1]. Se puede obtener el diagrama de radiación del conjunto a partir de la interferencia de los campos. Por otra parte en recepción la señal que se recibe es una combinación lineal de las señales que capta cada antena. Además los diagramas de radiación en transmisión y recepción serán iguales si los pesos y desfases de la combinación lineal en recepción son iguales a los de la alimentación en transmisión, [1].

Sean N antenas iguales equiespaciadas una distancia d sobre el eje z , situadas en las posiciones $z'_n = nd$ y alimentadas por corrientes I_n donde $n = 0, 1, \dots, N-1$ (Fig. 3.12) [1].

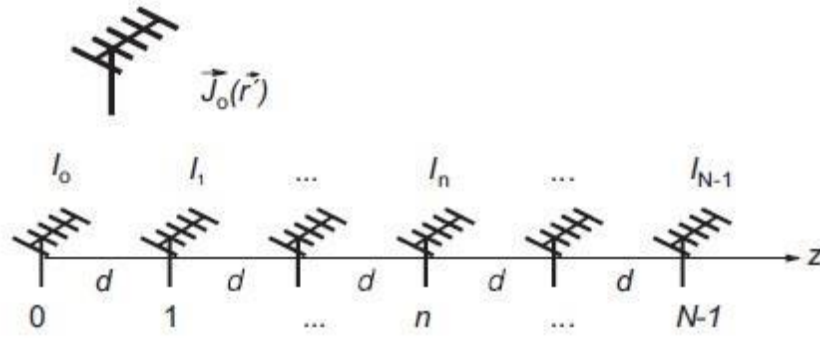


Fig. 3.12 Distribución de corrientes en una agrupación lineal sobre el eje z [1]

Los fasores de alimentación I_n normalmente presentan una fase progresiva entre cada par de antenas consecutivas, de forma que suele escribirse

$$I_n = a_n e^{jn\alpha} \quad (3.27)$$

A partir del valor del vector de radiación se puede obtener todas las características de radiación de la antena. Por tanto, el campo eléctrico radiado por la agrupación será

$$\vec{E}(\hat{r}) = \vec{E}_0(\hat{r}) \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn(kd \cos\theta + \alpha)} \quad (3.28)$$

Para simplificar los cálculos, la expresión anterior suele escribirse en función de un ángulo eléctrico ψ

$$\psi = kd \cos\theta + \alpha \quad (3.29)$$

que representa la diferencia de fase entre las contribuciones en campo lejano de dos antenas consecutivas. Por tanto la suma del desfase por diferencia de caminos, $kd \cos\theta$, más la fase progresiva de la alimentación α dará como resultado la diferencia de fase comentada antes. Si se emplea esta notación, la expresión del campo eléctrico radiado por la agrupación es

$$\vec{E}(\hat{r}) = \vec{E}_0(\hat{r}) \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi} \quad (3.30)$$

3.4.1. Diagrama de radiación de agrupaciones

Tal como se aprecia en la ecuación (3.30) el diagrama de campo radiado por la agrupación es igual al producto del diagrama de la antena básica, $\vec{E}_0(\hat{r})$ multiplicado por un factor que tiene en cuenta la interferencia de las N ondas generadas por las N antenas [1]. Este factor depende únicamente de la separación entre los elementos de la agrupación, de la alimentación y de la frecuencia de trabajo, y se denomina *factor de la agrupación (FA)*

$$FA(\psi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi} \quad (3.31)$$

Lo que resulta interesante de la expresión (3.30) es el hecho de que el diagrama de radiación depende por separado de la antena básica y del factor de la agrupación [1]. Si se desea estudiar la influencia de los parámetros de la agrupación en el diagrama de radiación, independientemente de la antena básica, se analizará a continuación el factor de la agrupación, que correspondería al diagrama de radiación de una agrupación formada por antenas básicas isotropas [1].

El factor de la agrupación definido en (3.31) y expresado en función del ángulo ψ es una función que depende únicamente de los coeficientes de la alimentación a_n . Si se desea obtener el diagrama de radiación en función de las direcciones del espacio real θ , se debe sustituir ψ por su valor, de esa forma se incluirá la dependencia con el espaciado, la fase progresiva y la frecuencia de trabajo [1].

El factor de la agrupación $FA(\psi)$ presenta las siguientes propiedades:

- Es una función periódica del ángulo ψ , de periodo 2π , tal que los coeficientes de su serie de Fourier son los coeficientes de la alimentación a_n [1]. Mediante esta propiedad se puede sintetizar diagramas de radiación de agrupaciones, ya que es suficiente con escoger unos coeficientes de la alimentación iguales a los coeficientes del desarrollo en serie de Fourier del factor de la agrupación deseado [1].

- El factor de la agrupación es la transformada de Fourier de la secuencia discreta de los coeficientes de la alimentación, a_n . Esta definición se debe a que el diagrama de radiación de una antena es la transformada de Fourier de su distribución de corriente, y de que el factor de la agrupación puede interpretarse como el diagrama de radiación de una agrupación de antenas isótropas [1].
- El máximo del factor de la agrupación se encontrará en el origen ($\psi = 0$) si los coeficientes de la alimentación a_n son reales y positivos. Esto se debe a que el máximo del diagrama se encuentra en la dirección en que los campos radiados por cada antena se suman en fase, la cual corresponde a un desfase nulo ($\psi = 0$) en la interferencia cuando los coeficientes a_n son reales y positivos [1].
- Como el ángulo θ , que indica la dirección de radiación en el espacio, sólo toma valores reales entre 0 y π , los cuales corresponden a un intervalo de variación de ψ

$$\psi \in [-kd + \alpha, kd + \alpha] \quad (3.32)$$

resulta que solamente la parte de $FA(\psi)$ comprendida en el intervalo (3.32) pertenece al diagrama de radiación. A este intervalo se le llama el margen visible [1]. La longitud del margen visible es $2kd$ y está centrado en $\psi = \alpha$, d forma que su tamaño es proporcional al espaciado de la agrupación, normalizado con respecto a la longitud de onda, y su posición en el eje ψ varía con la fase progresiva.[1]

- Para coeficientes de alimentación reales y positivos, cuando el margen visible incluye el origen $\psi = 0$, según (3.32) $|\alpha| \leq kd$, el máximo del diagrama de radiación se encuentra en la dirección del espacio

$$\psi = kd \cos \theta_{max} + \alpha = 0 \quad (3.33)$$

$$\theta_{max} = \arccos\left(-\frac{\alpha}{kd}\right) \quad |\alpha| \leq kd$$

Según (3.33), se puede controlar la dirección del máximo de radiación variando la fase progresiva α . Esto se debe a que una fase lineal en las corrientes provoca un desplazamiento en su transformada de Fourier, que es el diagrama de radiación [1]. Este es el principio de funcionamiento de las agrupaciones con barrido de fase (phased arrays), en las que la dirección del máximo se varía de forma electrónica mediante un control por medios analógicos o digitales de la fase progresiva. Este tipo de agrupaciones tiene aplicaciones importantes en radar y comunicaciones [1].

- Al ser el factor de agrupación periódico con periodo 2π , si el máximo está en ψ_{max} aparecen máximos periódicos en los múltiplos enteros de 2π , por tanto $\psi = 2m\pi + \psi_{max}$. Cuando estos máximos periódicos se encuentran dentro del margen visible, (si $kd + \alpha \geq 2\pi$ o si $-kd + \alpha \leq 2\pi$), aparecen múltiples máximos de radiación en el espacio real, denominados *lóbulos de difracción* (*grating lobes*). Este fenómeno sucede, en general, cuando el espaciado es de una o más longitudes de onda, si bien en ciertos casos (por ejemplo $\alpha = \pi$) pueden aparecer para espaciados comprendidos entre $\lambda/2$ y λ [1].

3.4.2. Distribuciones de corrientes típicas

A continuación se realizará un análisis sobre el factor de la agrupación correspondiente a las distribuciones de corrientes: uniforme, triangular y binómica. Por este motivo, si se conoce el diagrama se puede deducir fácilmente las características del diagrama asociado a otras distribuciones [1].

3.4.2.1. Uniforme

Este tipo de distribución permite alimentar a todas las antenas con la misma amplitud. Debido a su sencillez, es una de las distribuciones más utilizadas en la práctica. El polinomio de agrupación de esta antena es

$$z = e^{j\psi}$$

$$a_n = 1$$

$$P(z) = 1 + z + z^2 \dots + z^{N-1} = \frac{z^N - 1}{z - 1}$$

El factor de la agrupación uniforme es una función sinc periódica, igual a la transformada de Fourier discreta de un pulso muestreado. Corresponde a la función sinc, transformada de Fourier de un pulso continuo, repetida con periodo 2π y sumando en cada punto los infinitos alias o colas de todas las funciones sinc.

Ambas funciones se diferencian principalmente en que, si N es par existe un nulo, mientras que si N es impar el último lóbulo secundario en $\psi = \pi$ vale siempre 1 por tanto los lóbulos secundarios no decaen de forma inversa a la distancia, debido al solapamiento de la sinc periódica.

Únicamente las dos funciones son similares en la zona del lóbulo principal y primeros lóbulos secundarios cuando el número de antenas es elevado, debido a esto en dicha puede aproximarse el factor de una agrupación uniforme por una función sinc. Por tanto el factor de la agrupación uniforme sería

$$|FA(\psi)| = \frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} = \frac{\left| \text{sen } N \frac{\psi}{2} \right|}{\left| \text{sen } \frac{\psi}{2} \right|} \quad (3.34)$$

3.4.2.2. Triangular

La distribución de corrientes triangular se define para un número impar de antenas [1].

Para hallar la expresión de una distribución de corriente triangular se ha de tener en cuenta que la función triangular se puede descomponer en la convolución de dos pulsos iguales de longitud mitad que la del triángulo, lo cual se traduce en un producto de transformadas en el dominio espectral (plano Z), el polinomio de una distribución triangular es igual al de una uniforme de $(N+1)/2$ antenas elevado al cuadrado [1].

$$P(z) = \left[\sum_{n=0}^{\frac{N-1}{2}} z^n \right]^2 = \left[\frac{z^{\frac{N-1}{2}} - 1}{z - 1} \right]^2$$

Por consiguiente el factor de la agrupación triangular es también el de la uniforme de longitud $(N+1)/2$ elevado al cuadrado

$$|FA(\psi)| = \frac{\left| \text{sen} \left(\frac{N+1}{4} \psi \right) \right|^2}{\left| \text{sen} \frac{\psi}{2} \right|} \quad (3.35)$$

3.4.2.3. Binómica

La distribución de corrientes binómica toma su nombre al definir el polinomio como un binomio elevado a una potencia y se desarrolla según la fórmula de Newton, obteniendo [1]

$$P(z) = (z + 1)^{N-1} = \binom{N-1}{0} + \binom{N-1}{1} z + \binom{N-1}{2} z^2 + \dots + \binom{N-1}{N-1} z^{N-1}$$

El polinomio de la distribución binómica sólo tiene un cero, situado en $\psi = \pi$, pero con multiplicidad $N-1$. Por tanto, no hay lóbulos secundarios y el ancho de haz entre ceros en ψ es 2π . Sin embargo, puede aparecer un lóbulo debido a un lóbulo principal periódico que entra en el margen visible en el diagrama de radiación del espacio real. Si la amplitud de este lóbulo es inferior a la del principal, puede definirse en este caso un nivel de lóbulo principal a secundario [1].

El factor de la agrupación es

$$|FA(\psi)| = \left| 2 \cos \frac{\psi}{2} \right|^{N-1} \quad (3.36)$$

3.4.2.4. Comparaciones de características

Para resumir el análisis sobre los tipos de distribuciones de corriente estudiadas antes se ha resaltado los siguientes aspectos [1].

- La distribución uniforme tiene el mínimo ancho de haz. El de la triangular es aproximadamente doble que el de la uniforme (en ψ) y el de la binómica mucho mayor [1].
- Cuando hay un máximo de la distribución de corrientes, la uniforme es la que radia el mayor campo en la dirección del haz principal, mientras que la que radia el menor campo es la binómica [1].
- El peor nivel de lóbulo principal a secundario lo presenta la distribución uniforme. La distribución triangular presenta el doble en escala logarítmica (dB) que el de la uniforme para un número grande de antenas. Por otra parte la distribución binómica sólo tiene haz principal, aunque en el espacio real pueden aparecer lóbulos de difracción asociados a un lóbulo principal periódico [1].

IV - DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA LA REPRESENTACIÓN DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN 2D Y 3D DE ANTENAS EN MATLAB

4.1. Introducción

En este capítulo se explica el funcionamiento del software implementado con varios ejemplos de diagramas de radiación de las antenas implementadas.

Para el desarrollo de este software se ha hecho uso de las funciones Uicontrol de Matlab, ya que con este método se puede implementar de forma manual una GUI (Graphical User Interface), obteniendo una mayor flexibilidad y un control absoluto de todos los aspectos de la interfaz.

A continuación se muestra el funcionamiento del software mediante un gráfico

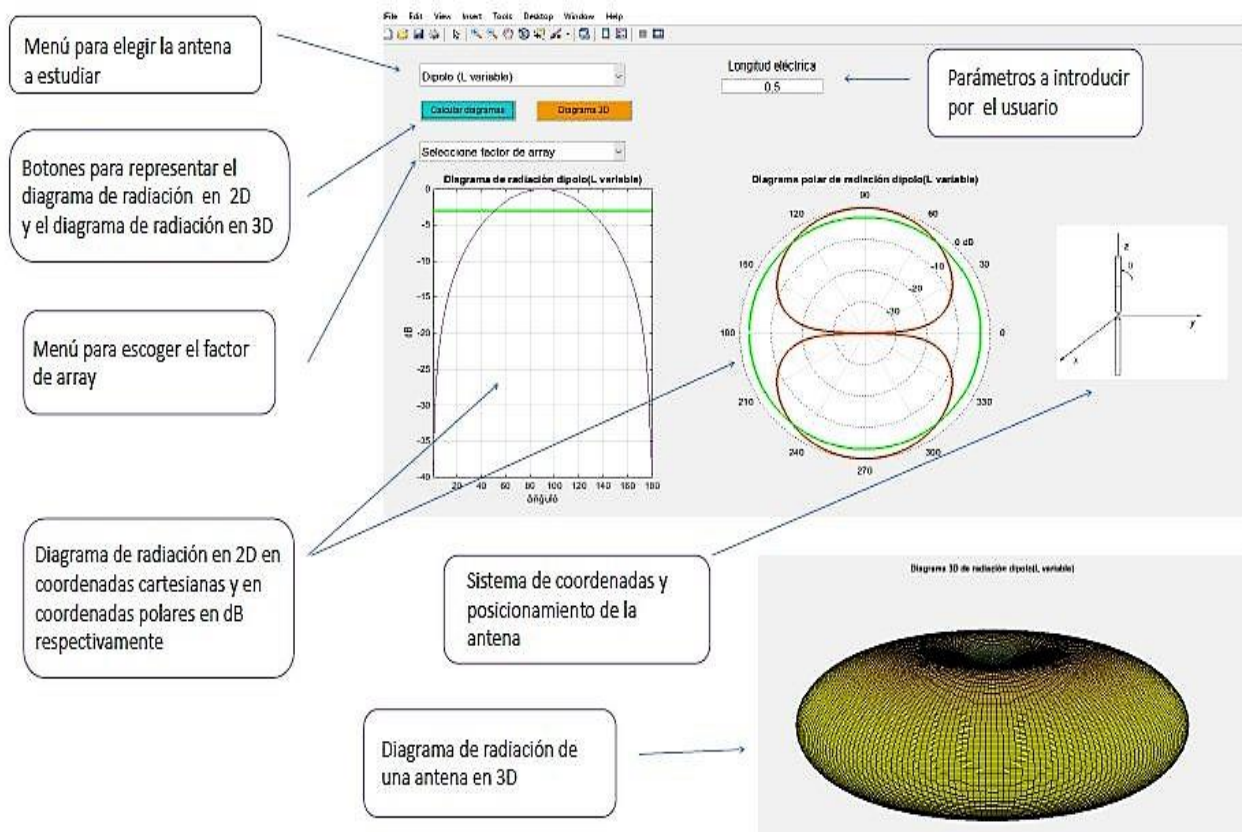


Fig. 4.1 Esquema del funcionamiento de la GUI

Para representar el diagrama de radiación de una antena, el usuario debe escoger una antena en su menú correspondiente, una vez escogida la antena la interfaz solicitará al usuario que introduzca unos parámetros que según la antena varían.

Una vez introducidos los parámetros (expresados todos en longitudes eléctricas) de la antena a estudiar, el usuario tendrá que pulsar el botón azul "Calcular diagrama" si desea visualizar la representación en 2D de los diagramas de radiación en coordenadas cartesianas y polares de la antena seleccionada. Por otra parte si se pulsa el botón naranja "Diagrama 3D" se abrirá una nueva ventana donde se podrá visualizar un diagrama de radiación tridimensional de la antena que se ha seleccionado.

Para la antena dipolo también se puede obtener el diagrama de radiación completo, pudiendo elegir tres tipo de distribuciones de corrientes (uniforme, triangular y binómica). Para obtener dicho diagrama tanto en 2D como en 3D el usuario debe seleccionar primero la antena y después ir al menú del factor de array y seleccionar la distribución que desea; nuevamente aparecerán varios parámetros a introducir, una vez introducidos los parámetros el usuario repetirá el proceso comentado antes de los botones.

Antes de pasar al siguiente apartado es necesario mostrar mediante la siguiente figura unos controles muy útiles para la visualización de los diagramas de radiación.

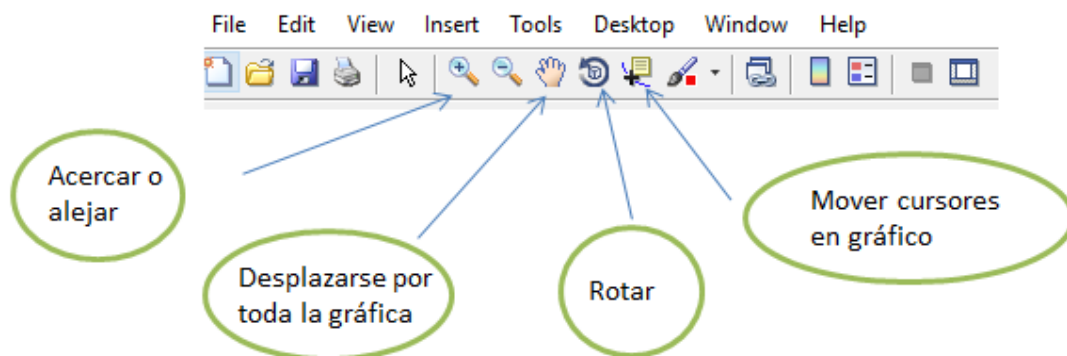


Fig. 4.2 Controles para las representaciones

4.1.1. Hallazgo de parámetros

Desde la gráfica del diagrama de radiación de la antena a representar, el usuario puede obtener los parámetros característicos como el ancho de haz a -3 dB o el ancho de haz entre nulos (ambos en grados), el nivel de lóbulo principal a secundario (en dB)

A continuación se realizará un sencillo tutorial para la obtención de los parámetros comentados anteriormente.

Ancho de Haz a -3 dB

Para hacer la prueba de cómo se obtiene este parámetro se ha seleccionado una antena dipolo con una longitud eléctrica de $\lambda/2$. Una vez introducido este parámetro el usuario debe pulsar el botón azul "Calcular diagramas". Por tanto se obtendrá el siguiente diagrama:

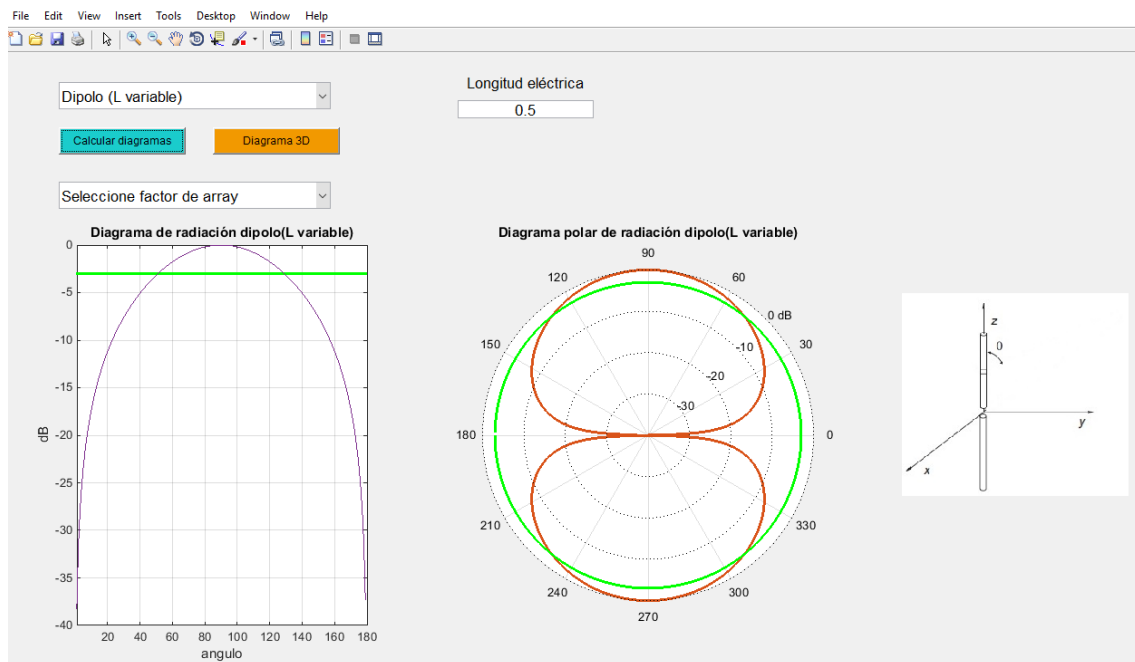


Fig. 4.3 Diagrama de radiación de dipolo $\lambda/2$

El siguiente paso será ir al menú superior de la GUI (figura 4.2) y pulsar el botón que mueve los cursores en el gráfico, de esa forma se podrá ver exactamente la posición que está situado el cursor. Tal como se menciona al principio de la memoria ambos diagramas de radiación están expresados en escala logarítmica.

Una vez pulsado el botón de los cursores, el usuario debe pinchar sobre la línea azul (la línea verde representa la zona de -3 dB de la gráfica) de dicha gráfica y podrá observar que dicho icono le proporciona los valores en los ejes "x" e "y" de la gráfica.

Deberá buscar que en el eje "y" el valor sea -3 (línea verde) o cercano a -3, y el valor exacto que le proporcione, en ese momento, en el eje "x" habrá un valor en ese extremo, luego el usuario deberá ir hacia el otro extremo donde indique en el eje "y" el valor -3, una vez sabidas los valores del eje "x" en ambos extremos, estos se restan y ese valor resultante será el ancho de haz a -3 dB.

Además el usuario puede ampliar o disminuir el zoom, para moverse con más exactitud en la gráfica.

Para este caso los pasos a seguir serían los siguientes:

- 1) Pulsar sobre la línea azul representada en la gráfica con valores logarítmicos, de momento, da igual el sitio donde pinchar.

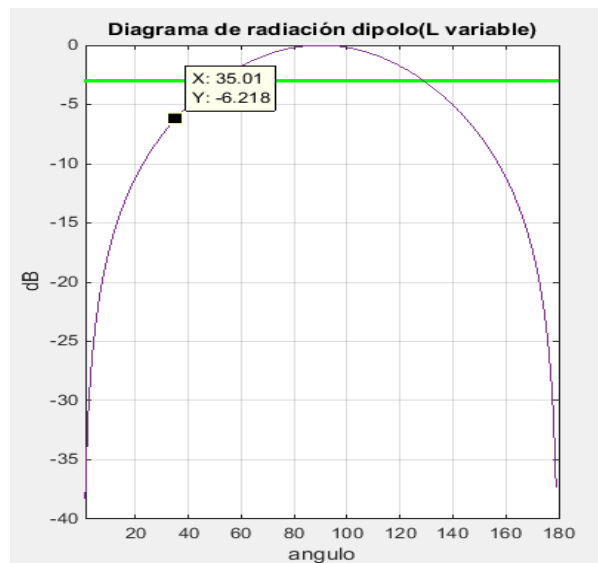


Fig. 4.4 Paso 1 a completar para ancho de haz a -3 dB

- 2) Ahora se puede dar zoom en la zona seleccionada y mover con el teclado, con las teclas de dirección izquierda o derecha, también se puede mover con el ratón, hasta conseguir que el valor en el eje "y" sea -3 o cercano.

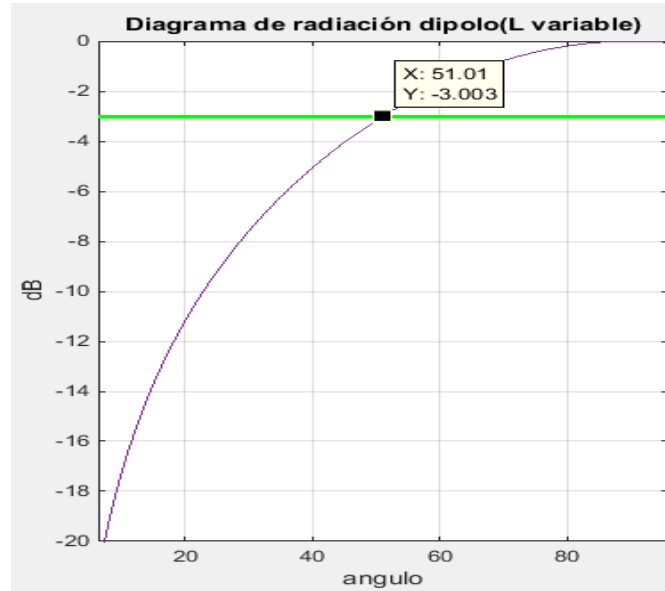


Fig. 4.5 Paso 2 a completar para ancho de haz a -3 dB

- 3) Tal como se puede observar, se ha obtenido un valor en el eje "x" de 51° , mientras que en el otro extremo se ha obtenido 129° aproximadamente, por lo que el ancho de haz a -3 dB del dipolo $\lambda/2$ será de 78°.

Estos pasos los debe realizar el usuario para cada antena, siempre que se desee obtener este parámetro.

Ancho de Haz entre nulos

Para obtener este parámetro se usará la configuración bocina piramidal plano E ($a=1 \lambda$ $b=1 \lambda$). Una vez seleccionada la antena e introducido sus parámetros es necesario volver a pulsar el botón de mover cursores que está situado en la barra superior de herramientas (que al principio de este capítulo se ha explicado sus diversas funciones).

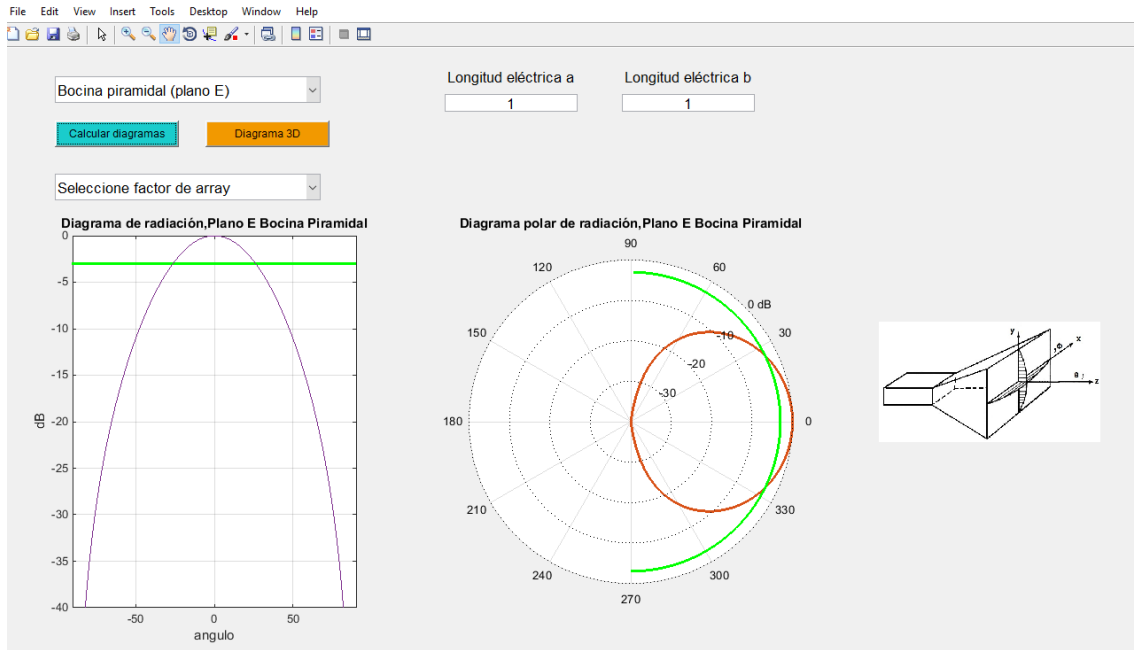


Fig. 4.6 Diagrama de radiación de bocina piramidal plano E $a=1 \lambda$ $b=1 \lambda$

Tras pulsar el botón de cursores, se deberá ejecutar la siguiente secuencia:

- 1) Pulsar sobre la línea azul representada en la gráfica con valores logarítmicos, de momento, da igual el sitio donde pinchar.

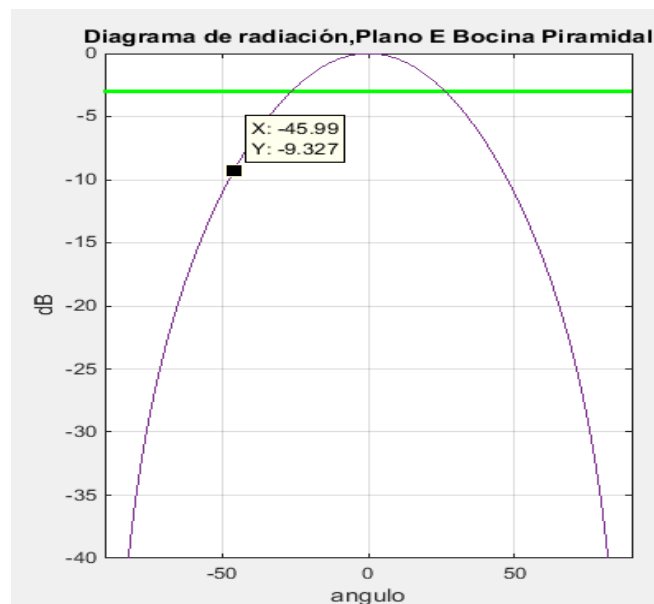


Fig. 4.7 Paso 1 a completar para ancho de haz entre nulos

- 2) Ahora se puede dar zoom en la zona seleccionada y mover con el teclado, con las teclas de dirección izquierda o derecha, también se puede mover con el ratón, hasta conseguir que el valor en el eje "y" sea de valor nulo en el lóbulo principal.

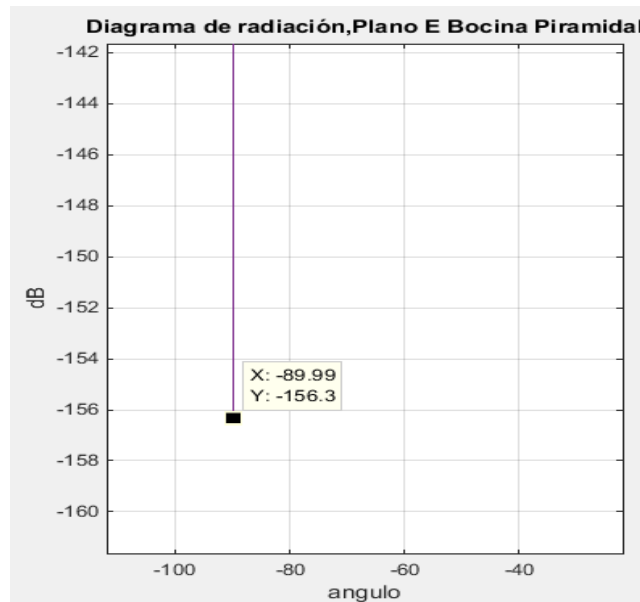


Fig. 4.8 Paso 2 a completar para ancho de haz entre nulos

- 3) Como se observa, se ha obtenido un valor en el eje "x" de -89° , mientras que en el otro extremo se ha obtenido 89° aproximadamente, por lo que el ancho de haz entre nulos es de 178° .

Estos pasos los debe realizar el usuario para cada antena, siempre que se desee obtener este parámetro.

Nivel del lóbulo principal al secundario, NLPS (dB)

Para obtener este parámetro se usará la configuración reflector parabólico plano E ($a=2\lambda$). Una vez seleccionada la antena e introducido sus parámetros es necesario volver a pulsar el botón de mover cursores que está situado en la barra superior de herramientas (que al principio de este capítulo se ha explicado sus diversas funciones).

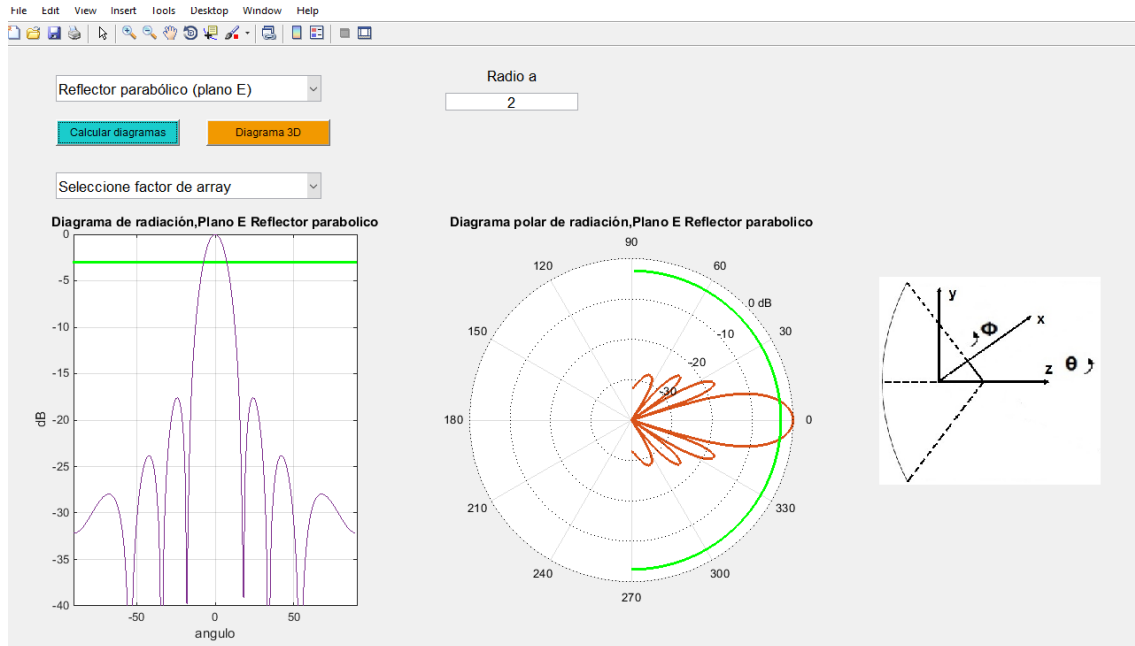


Fig. 4.9 Diagrama de radiación de reflector parabólico plano E $a=2\lambda$

Tras pulsar el botón de cursores, se deberá ejecutar la siguiente secuencia:

- 1) Pulsar sobre la línea azul representada en la gráfica con valores logarítmicos, de momento, da igual el sitio donde pinchar.

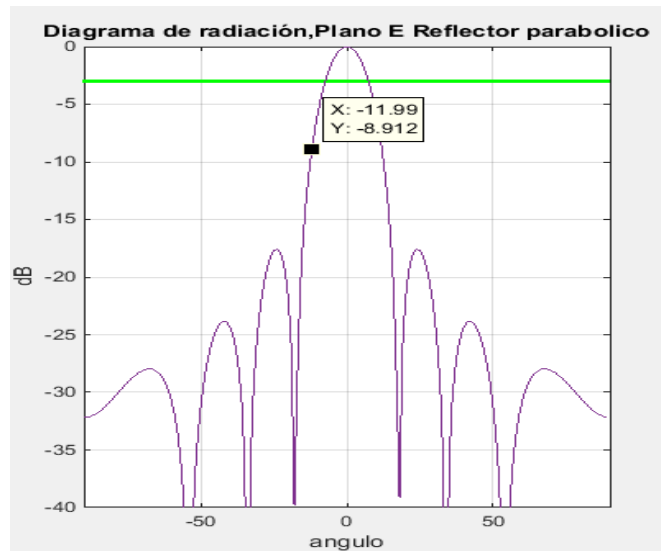


Fig. 4.10 Paso 1 a completar para el NLPS

- 2) Ahora se puede dar zoom en la zona seleccionada y mover con el teclado, con las teclas de dirección izquierda o derecha, también se puede mover con el ratón, hasta conseguir localizar el máximo del lóbulo secundario.

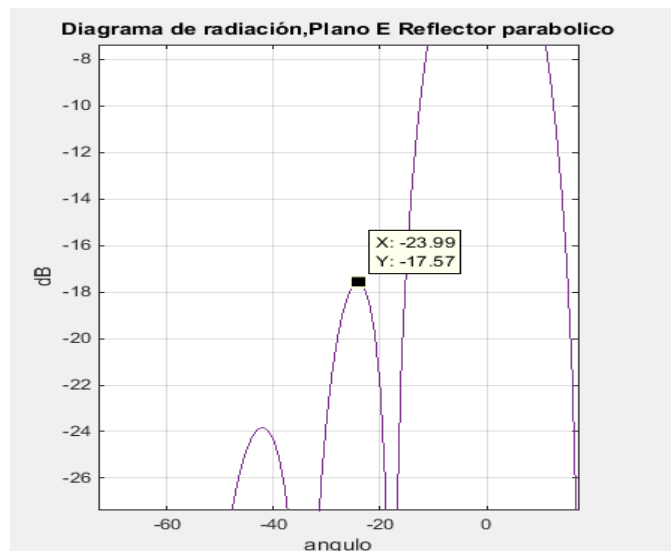


Fig. 4.11 Paso 2 a completar para el F/B

- 3) En este caso, el máximo del lóbulo principal es en 0 dB y el máximo del lóbulo secundario lo proporciona el eje "y". Por lo tanto, el máximo del lóbulo secundario coincidirá con el NLPS, que será 17,57 dB.

Estos pasos los debe realizar el usuario para cada antena, siempre que se desee obtener este parámetro.

Relación delante / atrás, F/B (dB)

Para obtener este parámetro se debe usar un ejemplo en el que la antena radie a 180 grados y a su vez tenga varios lóbulos, por tanto se ha elegido la antena de hilo largo con una longitud eléctrica de 4λ . Una vez seleccionada la antena e introducido sus parámetros es necesario volver a pulsar el botón de mover cursores que está situado en la barra superior de herramientas (que al principio de este capítulo se ha explicado sus diversas funciones).

Tras pulsar el botón de cursores, se deberá ejecutar la siguiente secuencia:

- 1) Pulsar sobre la línea azul representada en la gráfica con valores logarítmicos, de momento, da igual el sitio donde pinchar.

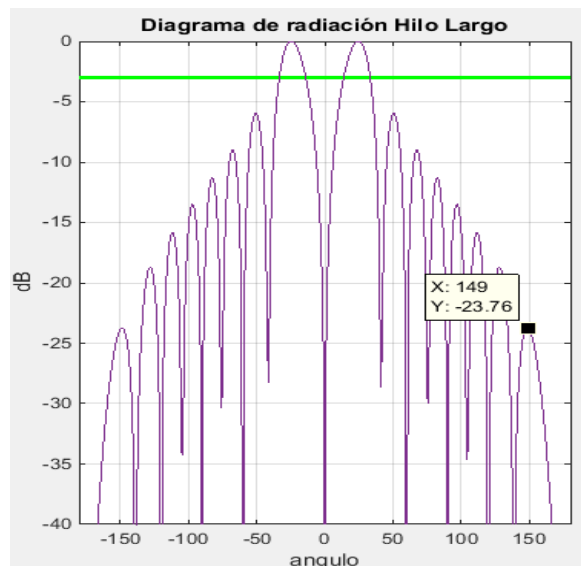


Fig. 4.12 Paso 1 a completar para el F/B

- 2) Ahora se puede dar zoom en la zona seleccionada y mover con el teclado, con las teclas de dirección izquierda o derecha, también se puede mover con el ratón, hasta conseguir localizar el máximo del último lóbulo visible.

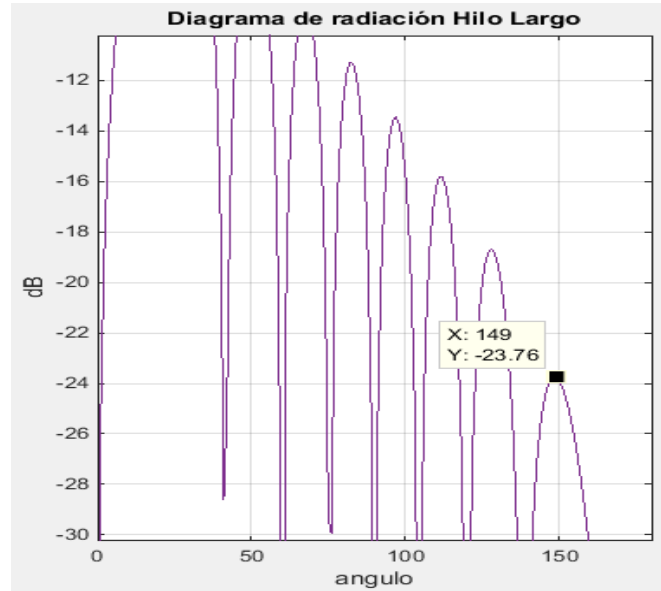


Fig. 4.13 Paso 2 a completar para el F/B

- 3) En este caso, el máximo del lóbulo principal es en 0 dB a unos 25 grados y el máximo del lóbulo más pequeño lo proporciona el eje "y". Por lo tanto, el máximo del lóbulo más pequeño coincidirá con el F/B, que será 23,76 dB.

Estos pasos los debe realizar el usuario para cada antena, siempre que se desee obtener este parámetro.

4.2. Ejemplos del software implementado

4.2.1. Diagrama de radiación: Dipolos

Para poder representar el diagrama de radiación del dipolo, se necesitará un único parámetro, y lo tendrá que introducir el usuario. Dicho parámetro es el que dotará de la información necesaria al programa para representar el diagrama de radiación de un dipolo. Es necesario recordar que en la interfaz no se puede introducir fracciones y solo está permitidos los puntos para los decimales. Este parámetro será la longitud eléctrica H (es decir normalizada respecto a la longitud de onda en el vacío) que precisa la expresión (3.13) para poder representar el campo radiado del dipolo.

A continuación se muestran varios ejemplos de la antena dipolo con distintas longitudes eléctricas H .

En la figura 4.14 se observa el diagrama de radiación de un dipolo con una longitud eléctrica de $\lambda/4$

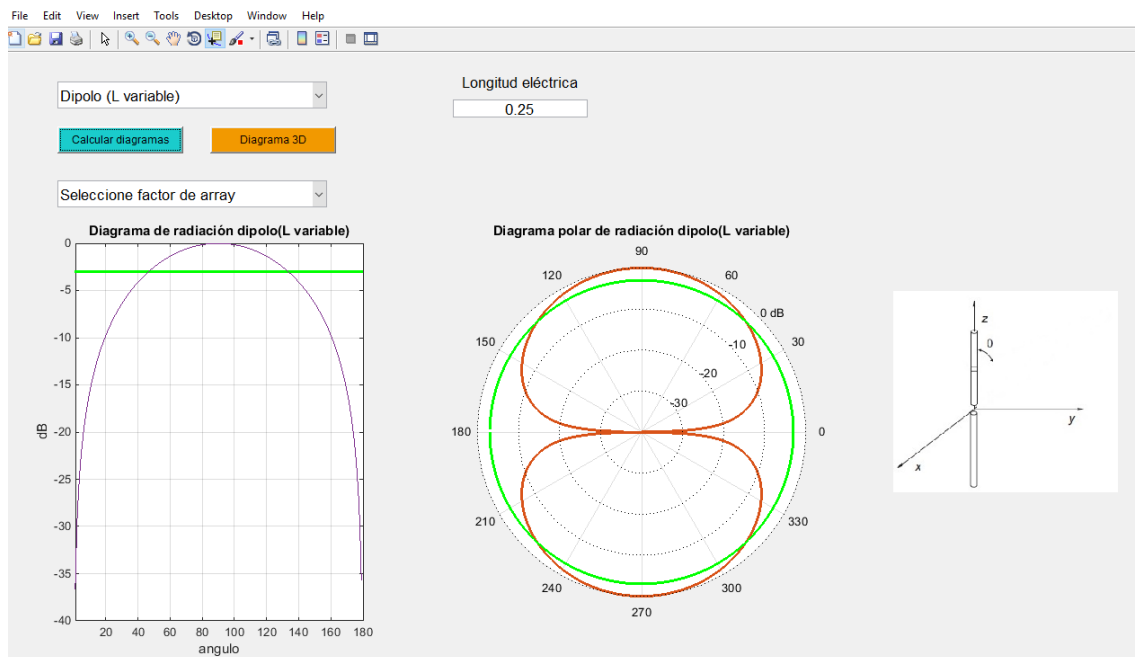


Fig. 4.14 Representación diagrama de radiación de dipolo $\lambda/4$

En la figura 4.15 se muestra el caso del diagrama de radiación de un dipolo con una longitud eléctrica de $\lambda/2$, donde se observa que el diagrama de radiación es similar al de la figura 4.14.

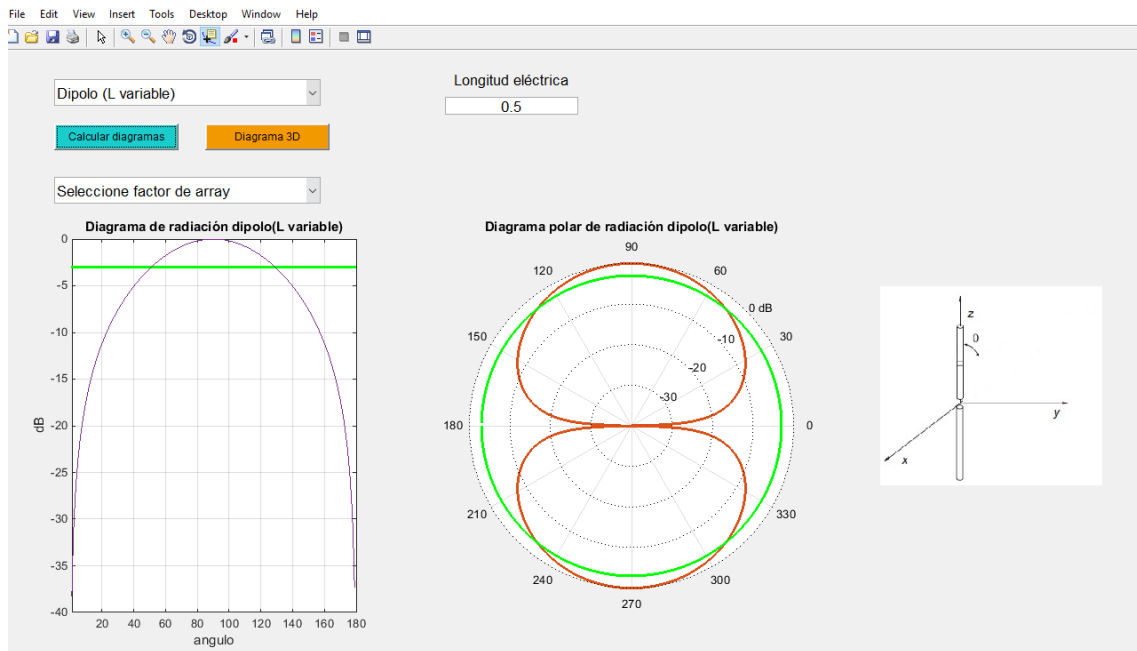


Fig. 4.15 Representación diagrama de radiación de dipolo $\lambda/2$

A diferencia de los dos casos anteriores, en la figura 4.16 se muestra el diagrama de radiación de un dipolo con una longitud eléctrica de $5\lambda/4$, en este caso han aparecido varios lóbulos secundarios junto al lóbulo principal.

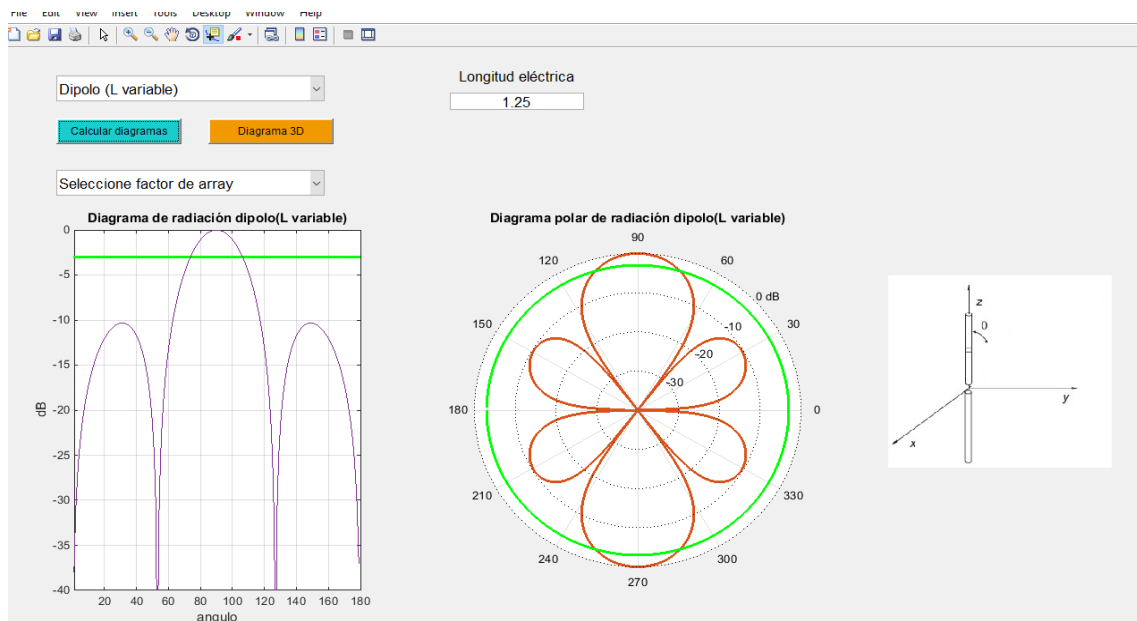


Fig. 4.16 Representación diagrama de radiación dipolo $5\lambda/4$

Tal como se mencionaba antes, el usuario debe introducir únicamente la longitud eléctrica H , que será lo que reciba la función *dipolo_L_variable* como parámetro de entrada. Dicho parámetro se empleará para calcular el campo radiado de la antena que a continuación se normalizará y se pasará a dB. La función devolverá el campo radiado para posteriormente expresarlo en coordenadas cartesianas y en coordenadas polares. Además el usuario tiene la posibilidad de representar el diagrama tridimensional pulsando el botón naranja “Diagrama 3D” tal como se puede observar en las figuras 4.17 y 4.18.

Todas las antenas implementadas tienen una función que permite realizar el diagrama de radiación tridimensional. Dicha función recibe los parámetros de entrada propios de esa antena, mientras que los parámetros de salida son los mismos para todas las antenas, cada uno con sus diferentes valores. Estos parámetros de salida son X, Y y Z en coordenadas esféricas y f que será la cantidad de radiación que transmite la antena, de este parámetro tal como se puede apreciar procede de la potencia normalizada en dB.

Para el cálculo de diagrama tridimensional de cualquier antena se han empleado las siguientes líneas de código.

```

% Definimos el diagrama 3D %
X=zeros (let,lp);           % Inicializamos X %
Y=zeros (let,lp);           % Inicializamos Y %
Z=zeros (let,lp);           % Inicializamos Z %

F=PndB;                      % Factor F %
Fmin=-40;                     % Valor mínimo en dB %

% Cualquier valor infinito en F se sustituye por Fmin %
F(isinf(F))=Fmin;

f=0.5*(1-F/Fmin+abs(1-F/Fmin)); % Parámetro para el trazado %

for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        X(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*cos(phi);
        Y(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*sin(phi);
        Z(I,J)=f(I,J)*cos(theta);
    end
end
surf(X,Y,Z,f);

```

En la figura 4.17 se muestra el caso de un diagrama de radiación tridimensional de un dipolo con una longitud eléctrica de $\lambda/4$, donde la forma que ha adoptado el dipolo es de un toroide.

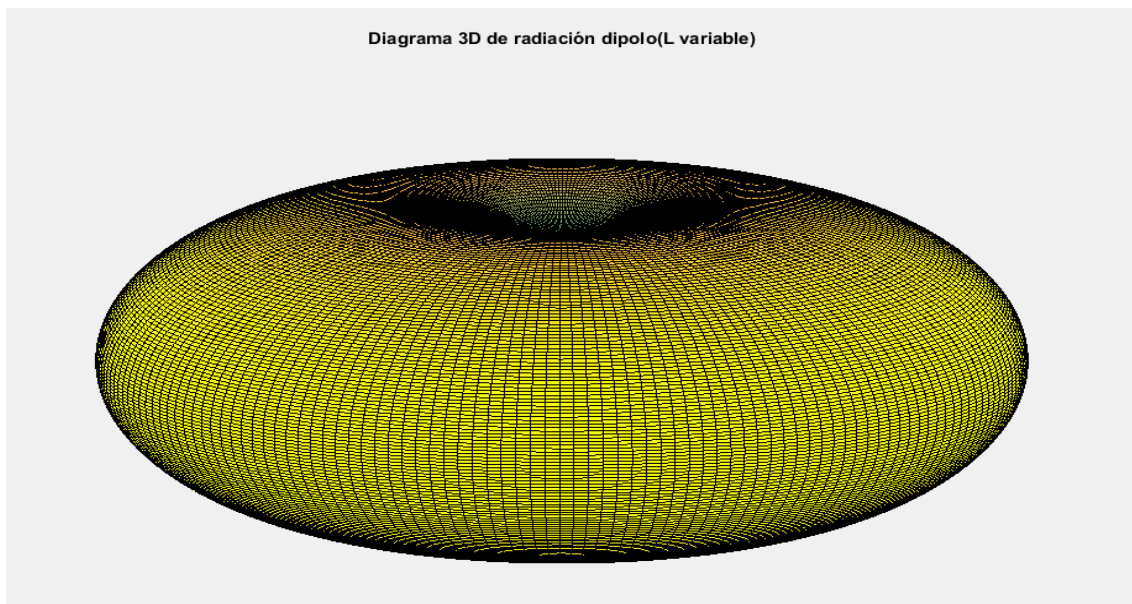


Fig. 4.17 Representación diagrama 3D de radiación de dipolo $\lambda/4$

En la figura 4.18 se observa un diagrama de radiación tridimensional de un dipolo con una longitud eléctrica de $5\lambda/4$, donde se aprecia que en el diagrama de radiación han aparecido dos lóbulos secundarios.

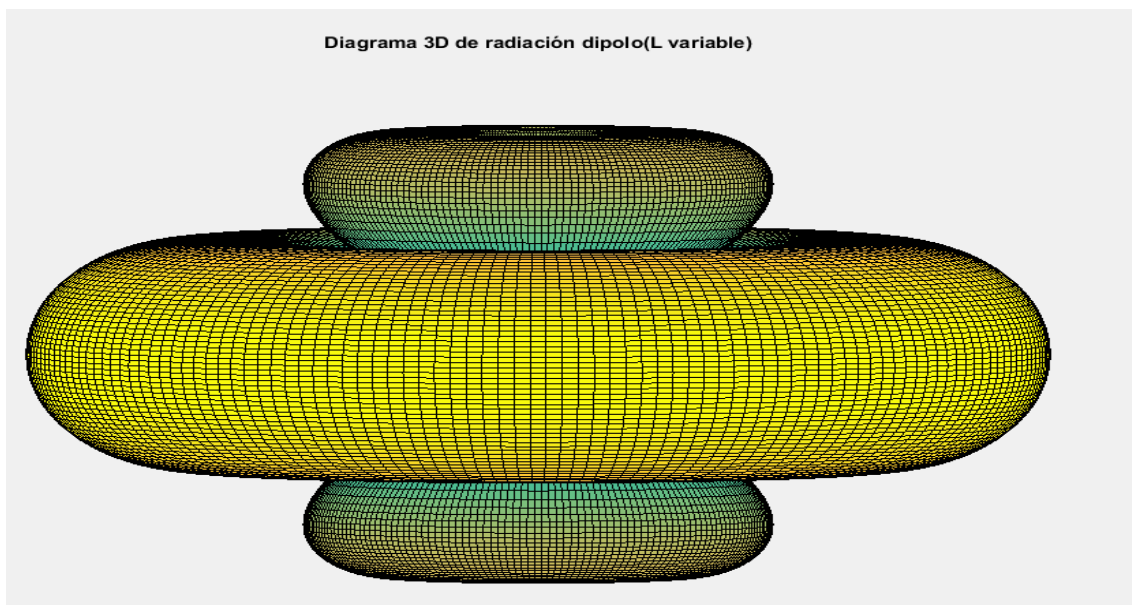


Fig. 4.18 Representación diagrama 3D de radiación de dipolo $5\lambda/4$

4.2.2. Diagrama de radiación: Apertura rectangular

En el caso de una apertura plana rectangular, el usuario deberá introducir dos parámetros. Según la ecuación de la apertura plana rectangular (3.16), serán necesarios introducir los parámetros "a" y "b", que son la anchura y la altura de la boca de la guía.

Como se ha indicado anteriormente el usuario deberá seguir los pasos indicados anteriormente de las antenas explicadas, es decir en primer lugar, deberá introducir correctamente los valores (en longitudes eléctricas), en sus respectivos lugares, para poder representar el diagrama de radiación de la apertura plana rectangular.

4.2.2.1. Plano E

A continuación, en la figura 4.19 se muestra un ejemplo del diagrama de radiación de la apertura plana rectangular en el plano E para unas longitudes eléctricas de $a=2 \lambda$ y $b=2 \lambda$.

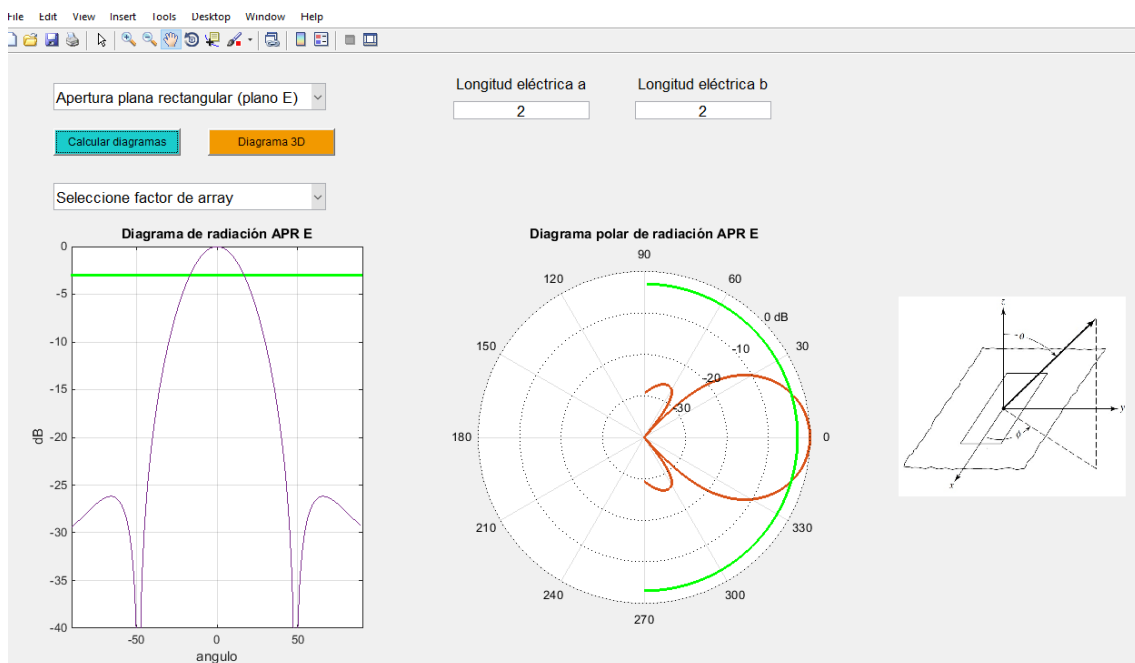


Fig. 4.19 Representación diagrama de radiación de la apertura plana rectangular plano E $a=2 \lambda$ y $b=2 \lambda$

4.2.2.2. Plano H

A continuación, en la figura 4.21 se muestra el diagrama de radiación de la misma apertura plana rectangular en el plano H con las mismas dimensiones. En este caso se puede apreciar que la anchura de haz entre nulos es menor que en el plano E.

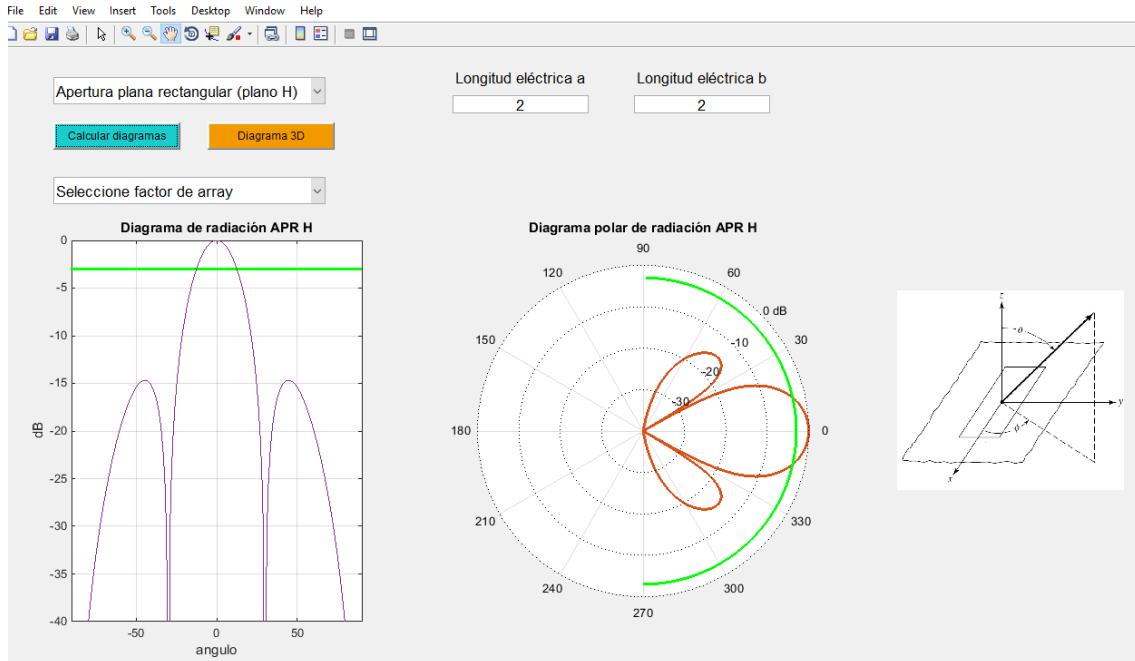


Fig. 4.20 Representación diagrama de radiación de la apertura plana rectangular plano H $a=2\lambda$ y $b=2\lambda$

En la figura 4.21 se muestra el diagrama de radiación tridimensional para la misma antena de longitudes eléctricas de $a=2\lambda$ y $b=2\lambda$, donde se observa que junto al lóbulo principal hay dos lóbulos secundarios y un lóbulo pequeño justo debajo, dicho diagrama se corresponde con los diagramas bidimensionales del plano E y H.

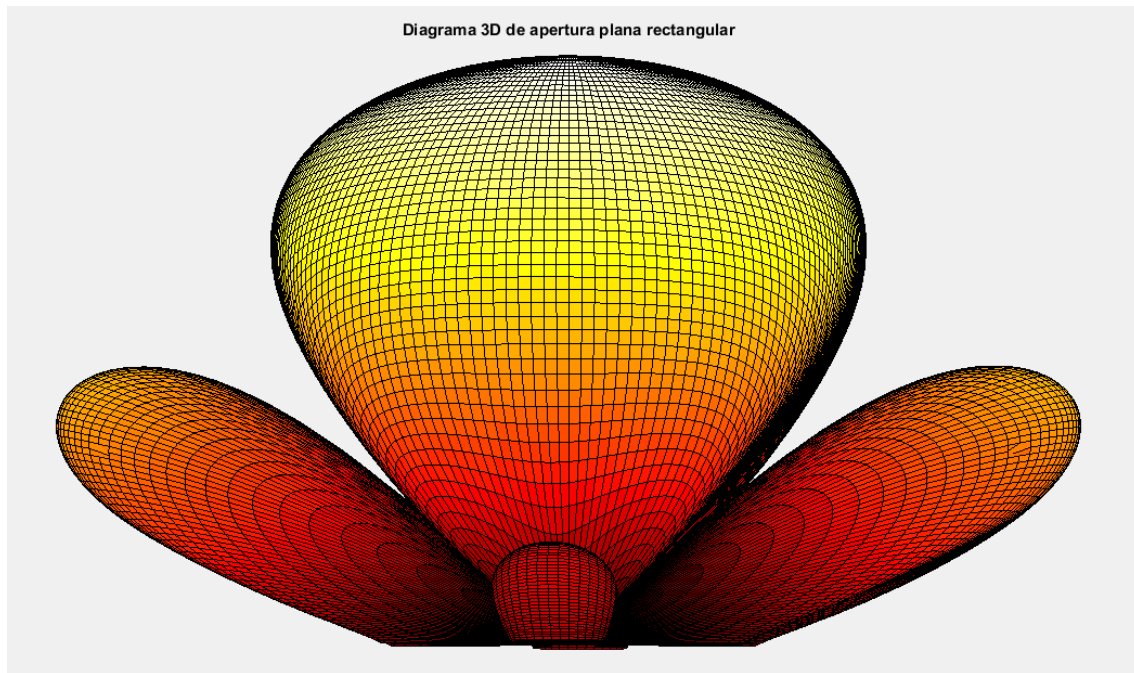


Fig. 4.21 Representación diagrama de radiación 3D de la apertura plana rectangular $a=2\lambda$ y $b=2\lambda$

4.2.3. Diagrama de radiación: Apertura circular

En el caso de una apertura circular, el usuario deberá introducir un parámetro. Según la ecuación de la apertura circular (3.17), será necesarios introducir el parámetro "a", que es el radio de la boca de la guía circular en longitudes eléctricas.

4.2.3.1. Plano E

A continuación, en la figura 4.22 se muestra un ejemplo del diagrama de radiación de la apertura circular en el plano E para un radio $a=2\lambda$. Tal como se puede apreciar al lóbulo principal le acompañan varios lóbulos secundarios.

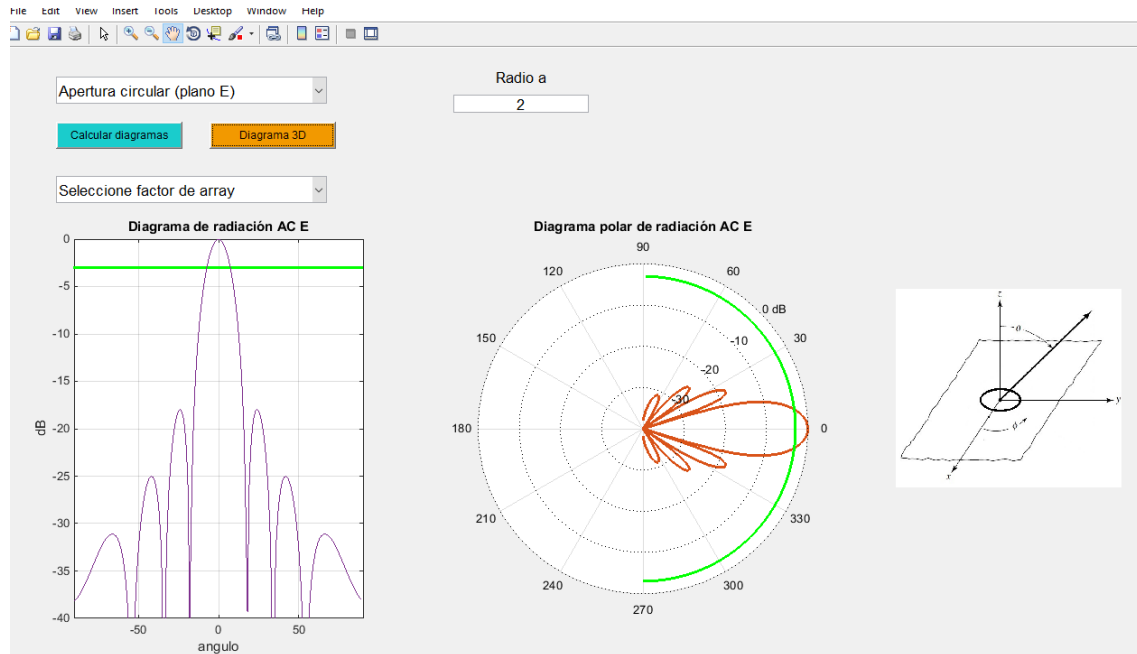


Fig. 4.22 Representación diagrama de radiación de la apertura circular plano E $a=2\lambda$

4.2.3.2. Plano H

En la figura 4.23 se muestra un ejemplo del diagrama de radiación en el plano H para la misma antena. En este caso se aprecia que tanto el ancho de haz entre nulos como el ancho de haz a -3 dB es mayor que en plano E.

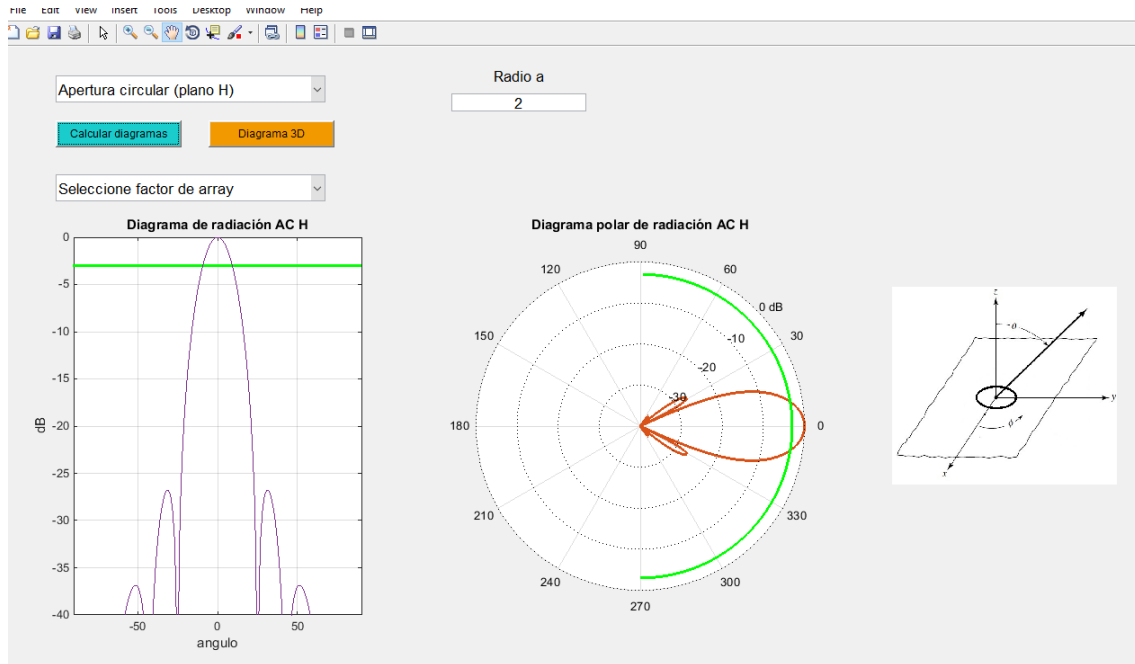


Fig. 4.23 Representación diagrama de radiación de la apertura circular plano H $a=2\lambda$

Finalmente, en la figura 4.24 se muestra el diagrama tridimensional de la misma antena; se observan los mismos lóbulos laterales presentes en los dos planos principales.

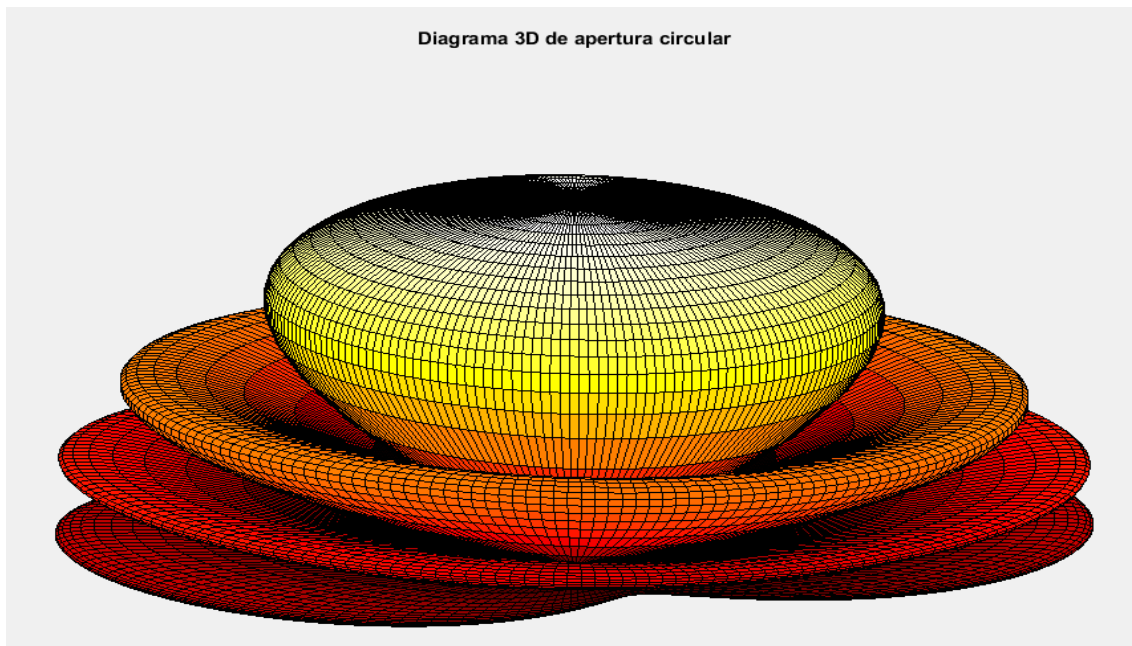


Fig. 4.24 Representación diagrama de radiación 3D de la apertura circular $a=2\lambda$

4.2.4. Diagrama de radiación: Bocina piramidal

En el caso de la bocina piramidal, el usuario deberá introducir dos parámetros. Según la ecuación de la bocina piramidal (3.19), serán necesarios introducir los parámetros "a" y "b", que son la anchura y la altura de la boca de la guía.

4.2.4.1. Plano E

A continuación, en la figura 4.25 se muestra un ejemplo del diagrama de radiación de la bocina piramidal en el plano E para unas longitudes eléctricas de $a=5 \lambda$ y $b=5 \lambda$, donde se observa como al lóbulo principal le acompañan dos lóbulos secundarios.

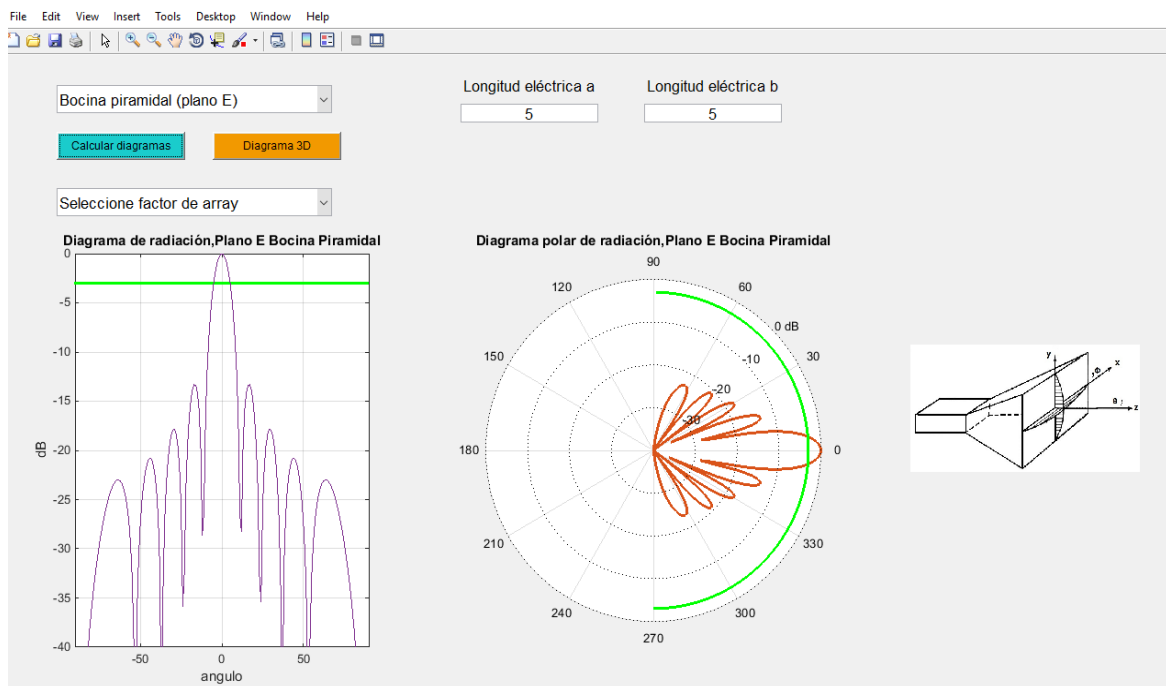


Fig. 4.25 Representación diagrama de radiación de bocina piramidal plano E $a=5 \lambda$ y $b=5 \lambda$

4.2.4.2. Plano H

En la figura 4.26 se muestra un ejemplo del diagrama de radiación de la misma bocina pero en el plano H. En este caso tanto el ancho de haz entre nulos como el ancho de haz a -3 dB han aumentado en comparación al plano E.

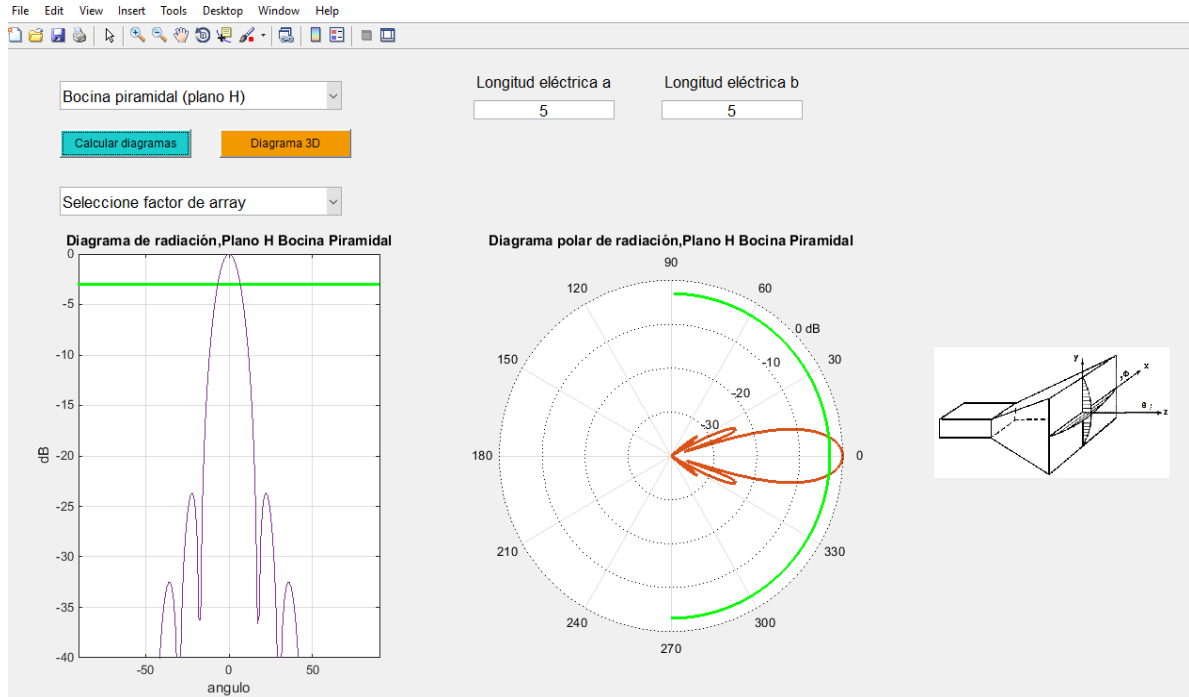


Fig. 4.26 Representación diagrama de radiación de bocina piramidal plano H $a=5 \lambda$ y $b=5 \lambda$

En la figura 4.27 se muestra el caso de un diagrama de radiación tridimensional de una bocina piramidal con las mismas longitudes eléctricas, donde se puede observar unos lóbulos secundarios junto al lóbulo principal.

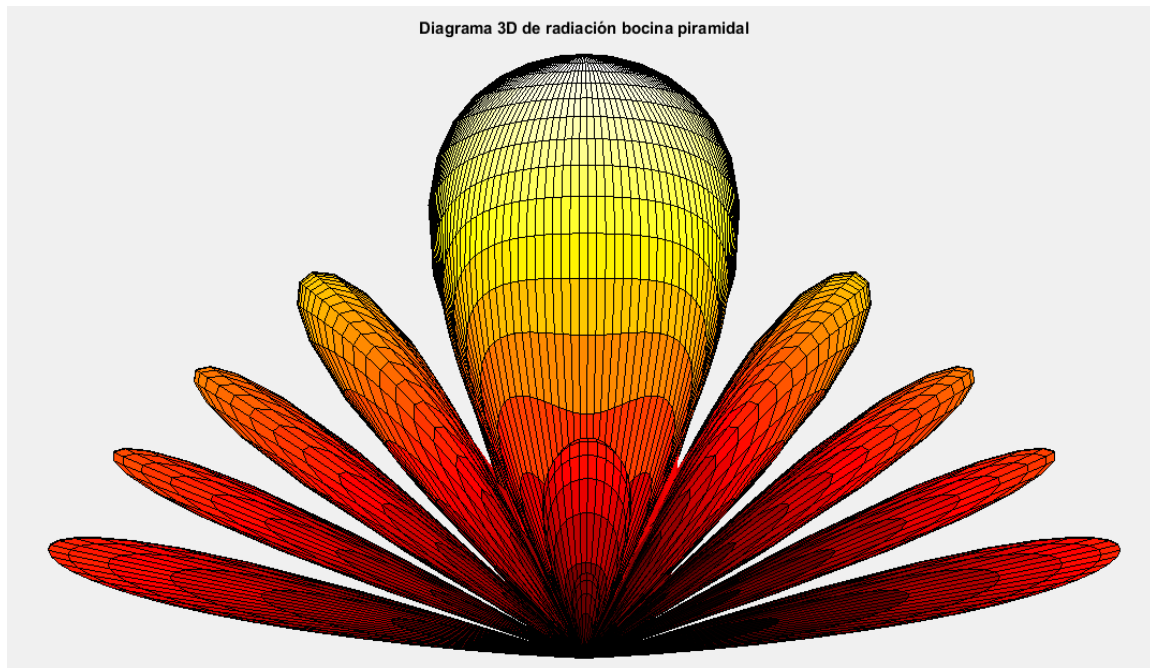


Fig. 4.27 Representación diagrama de radiación 3D de bocina piramidal $a=5 \lambda$ y $b=5 \lambda$

4.2.5. Diagrama de radiación: Microstrip

En el caso de una antena microstrip, el usuario deberá introducir cuatro parámetros. Según la ecuación de la antena microstrip (3.21), serán necesarios introducir los parámetros "h" (altura del sustrato), "W" (anchura del parche), "L" (longitud del parche) y ϵ_r (permitividad eléctrica relativa). Las dimensiones físicas de la antena van normalizadas respecto a la longitud de onda del vacío.

4.2.5.1. Plano E

Para la representación 2D del diagrama de radiación de la antena microstrip se ha recurrido a la expresión (3.22) que precisa de los mismos parámetros que la representación tridimensional.

A continuación, en la figura 4.28 se muestra un ejemplo del diagrama de radiación de la antena microstrip en el plano E en 2D para unas longitudes eléctricas de $h=0.05 \lambda$, $W=0.395 \lambda$, $L=0.3 \lambda$ y $\epsilon_r=2.2$.

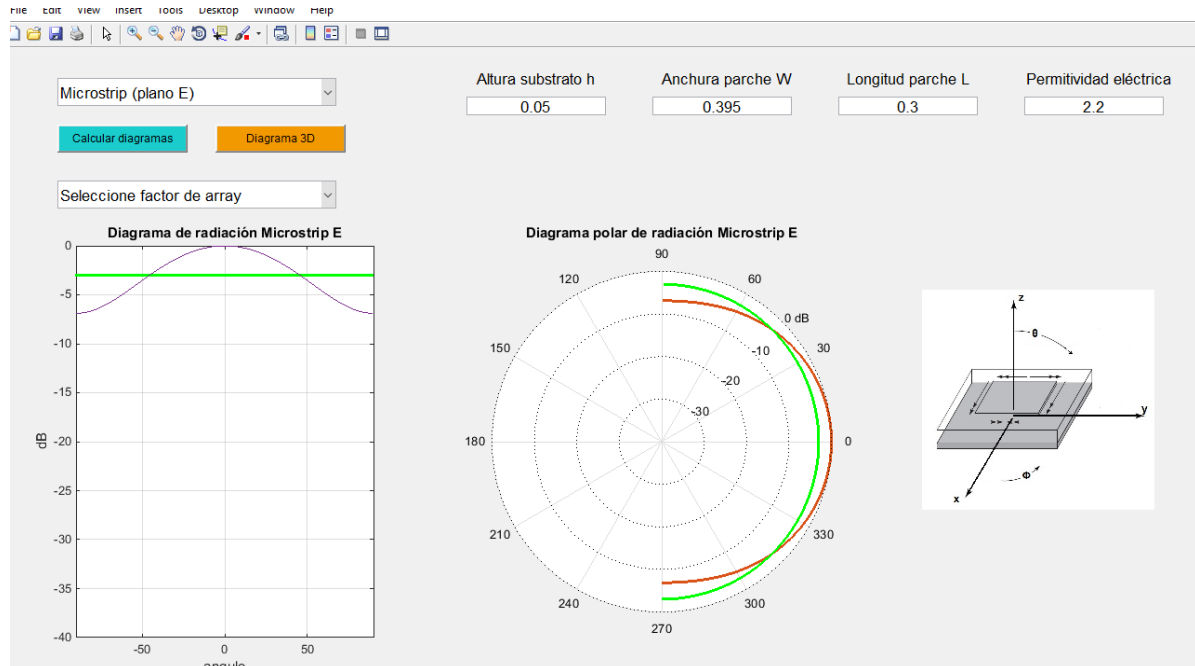


Fig. 4.28 Representación diagrama de radiación de antena microstrip plano E $h=0.05 \lambda$, $W=0.395 \lambda$, $L=0.3 \lambda$ y $\epsilon_r=2.2$

4.2.5.2. Plano H

A continuación, en la figura 4.29 se muestra un ejemplo del diagrama de radiación de la misma antena microstrip pero en el plano H.

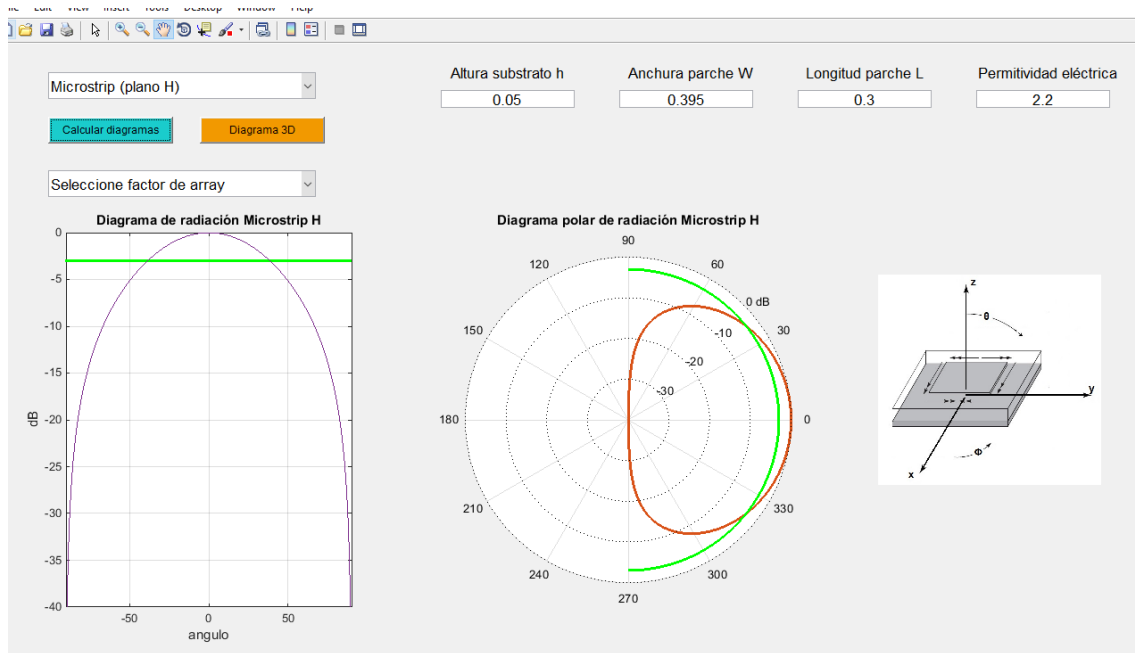


Fig. 4.29 Representación diagrama de radiación de antena microstrip plano H $h=0.05 \lambda$, $W=0.395 \lambda$, $L=0.3 \lambda$ y $\epsilon_r=2.2$

Por último, en la figura 4.30 se muestra el caso de un diagrama de radiación tridimensional de una antena microstrip con las mismas longitudes eléctricas, donde se puede observar que hay correspondencia con el diagrama bidimensional de los planos E y H.

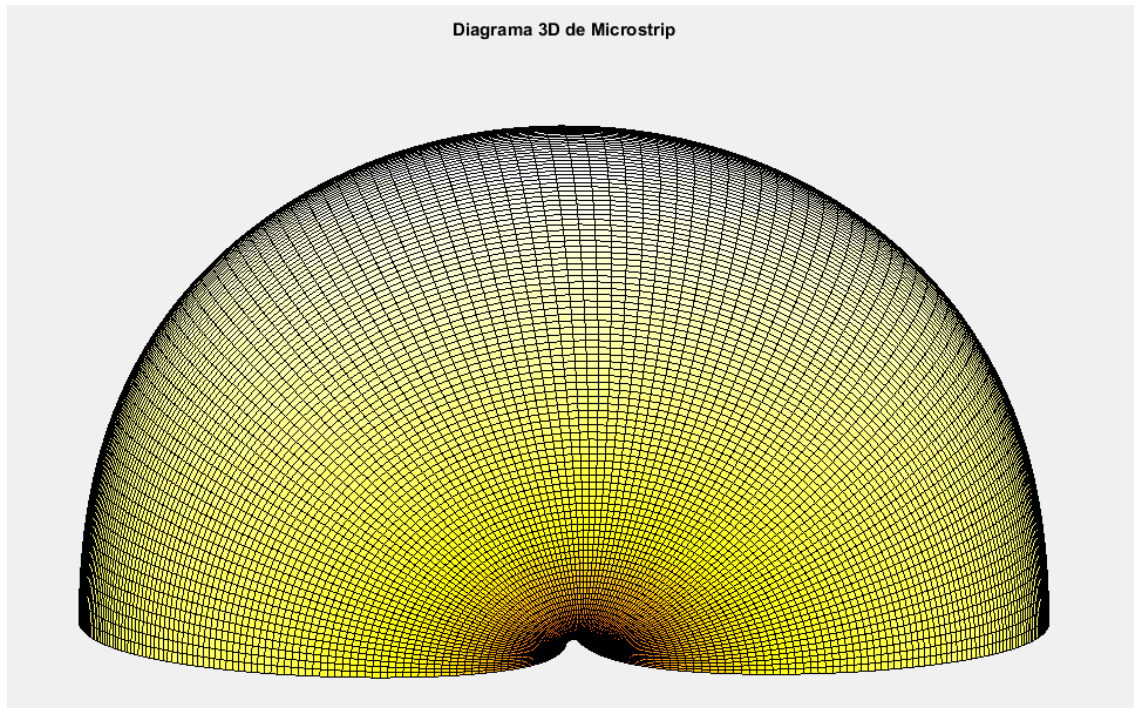


Fig. 4.30 Representación diagrama de radiación 3D de antena microstrip $h=0.05 \lambda$, $W=0.395 \lambda$, $L=0.3 \lambda$
y $\epsilon_r=2.2$

4.2.6. Diagrama de radiación: Reflector parabólico

En el caso de un reflector parabólico, el usuario deberá introducir un parámetro. Según la ecuación de la apertura circular (3.17), será necesario introducir el parámetro "a", que es el radio del reflector en función de la longitud de onda. Tal como se explica en el tercer capítulo la ecuación de esta antena se ha deducido a partir de una apertura circular.

4.2.6.1. Plano E

Para la representación 2D del diagrama de radiación del reflector parabólico se ha recurrido a la expresión (3.23).

En la figura 3.31 se muestra el diagrama de radiación de un reflector parabólico en el plano E con un radio $a=8 \lambda$ en longitudes eléctricas, donde se aprecia los lóbulos secundarios que acompañan al lóbulo principal.

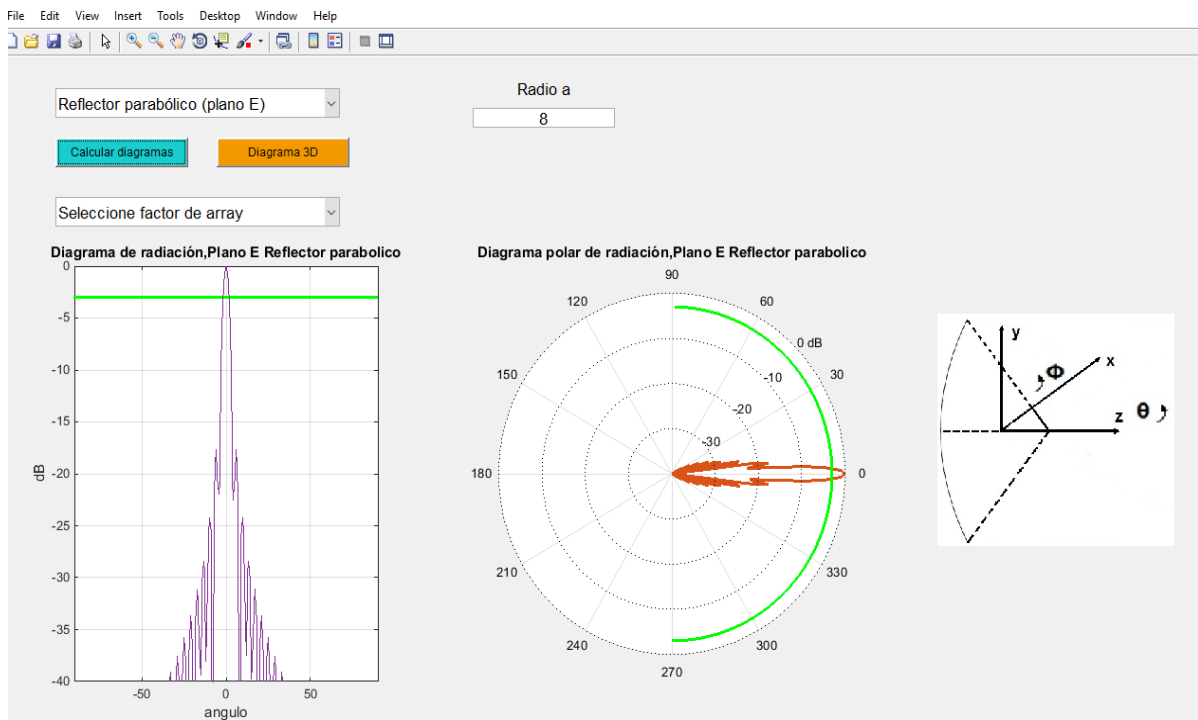


Fig. 4.31 Representación diagrama de radiación del reflector parabólico plano E $a=8 \lambda$

4.2.6.2. Plano H

En la figura 3.32 se muestra el diagrama de radiación de un reflector parabólico en el plano H con las mismas longitudes eléctricas. Para este caso la distancia F/B ha aumentado en comparación al plano E.

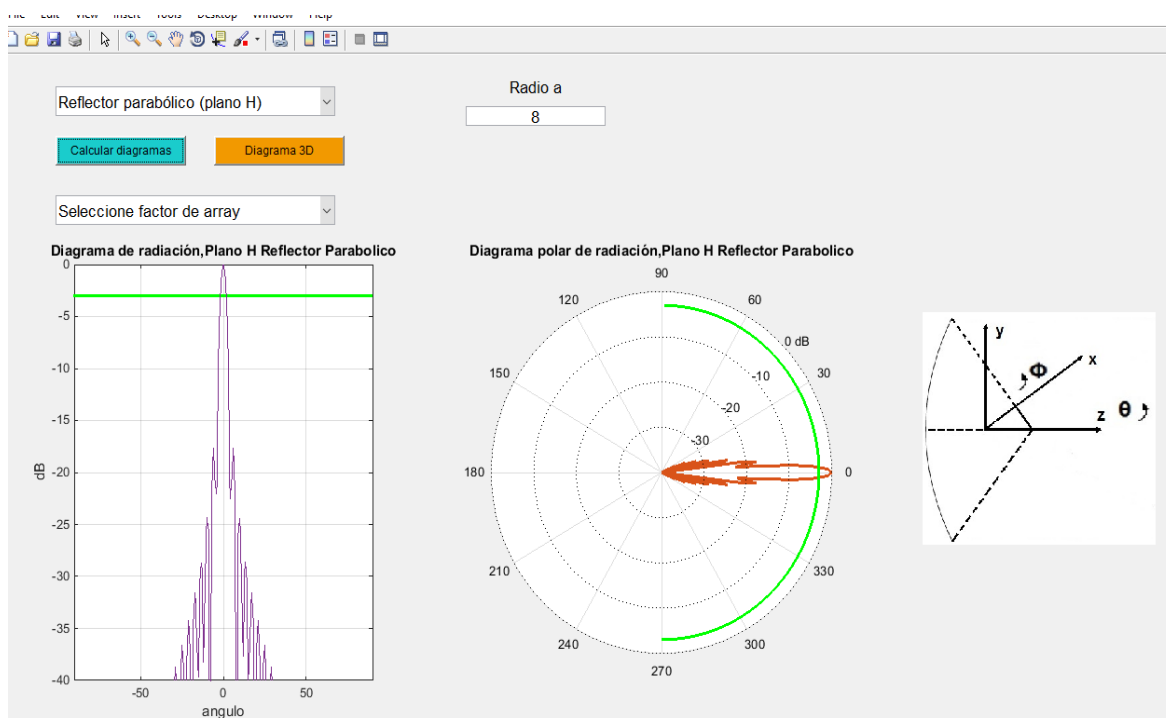


Fig. 4.32 Representación diagrama de radiación del reflector parabólico plano H $a=8\lambda$

Finalmente, en la figura 4.33 se muestra el diagrama de radiación tridimensional del mismo reflector parabólico. Donde se aprecia que hay concordancia con los diagramas de radiación de los plano E y H.

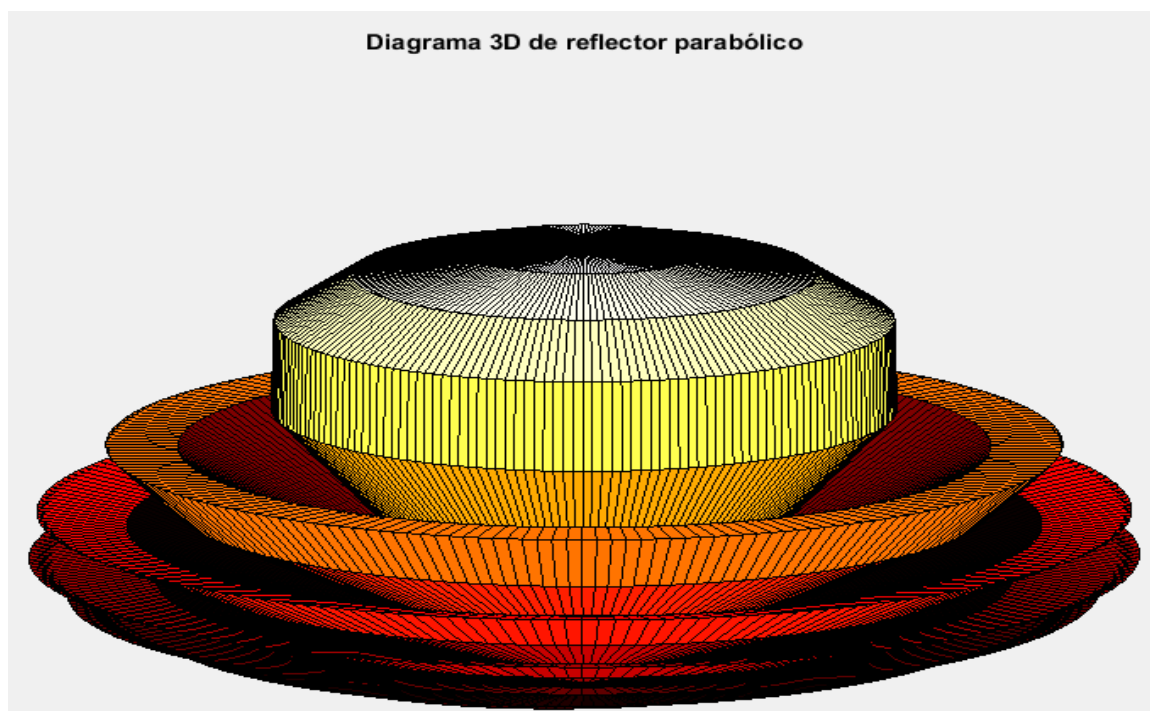


Fig. 4.33 Representación diagrama de radiación 3D del reflector parabólico $a=8\lambda$

4.2.7. Diagrama de radiación: Antena de hilo largo

En el caso de una antena de hilo largo, el usuario deberá introducir un solo parámetro. Según la ecuación de la antena de hilo largo (3.26), será necesario introducir el parámetro "l", que es la longitud del hilo de la antena en unidades eléctricas.

En la figura 4.34 se puede observar el diagrama de radiación en el plano E de una antena de hilo largo con una longitud eléctrica $l=4\lambda$

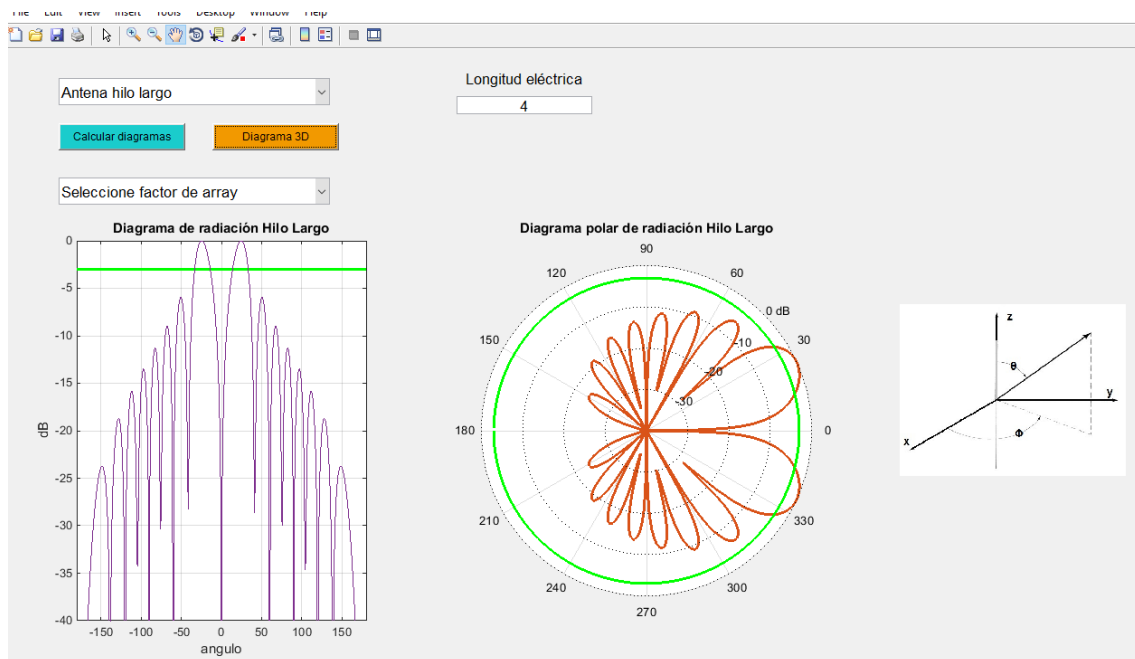


Fig. 4.34 Representación diagrama de radiación de la antena de hilo largo $a=4\lambda$

En la figura 4.35 se observa un diagrama de radiación tridimensional de la misma antena. Tal como se puede apreciar se han formado varios lóbulos secundarios alrededor del lóbulo principal.

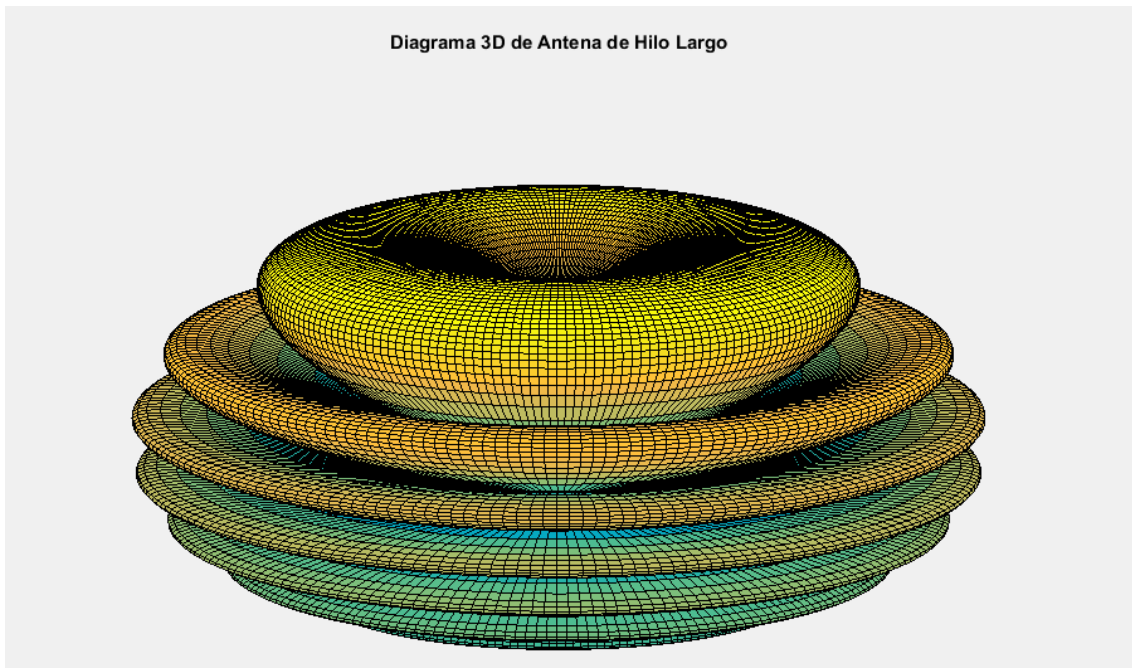


Fig. 4.35 Representación diagrama de radiación 3D de la antena de hilo largo $l=4\lambda$

4.2.8. Diagrama de radiación de agrupaciones: Factor de array

Para representar correctamente el diagrama de radiación de agrupaciones de antenas es necesario calcular el factor de array; por lo tanto el usuario debe introducir en la interfaz gráfica dos datos fundamentales. Estos datos serán los llamados "N" y "d".

- "N" será el parámetro que se encarga de informar a la función de cuántos elementos consta el factor de array que desea representar el usuario.
- "D" será un parámetro que indica el equispaciado de las antenas que forman la agrupación ($0 < D < 1$).

4.2.8.1. Uniforme

Para representar con una distribución de corriente uniforme de las antenas que forman la agrupación, el usuario debe seleccionar en el menú de “*seleccione factor de array*” la opción uniforme. A continuación deberá introducir los parámetros que la interfaz le pida y tras ejecutar deberá pulsar el botón azul para representar el diagrama. Para esta distribución de corriente se ha hecho uso de la ecuación (3.34).

En la figura 4.36 se observa el diagrama de radiación en el plano E de 4 dipolos espaciados 0.7λ y alimentados con una distribución de corriente uniforme de amplitud 1.

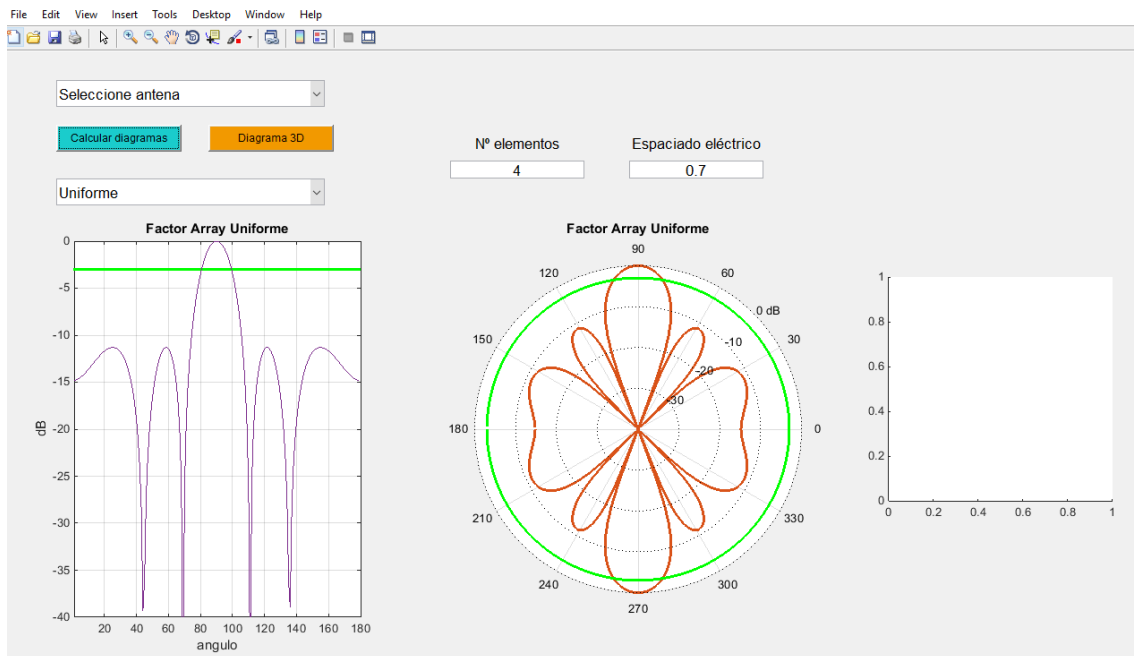


Fig. 4.36 Representación diagrama de radiación factor de array uniforme $N=4$ y $d=0.7 \lambda$

4.2.8.2. Triangular

Para representar con una distribución de corriente triangular, el usuario debe seleccionar en el menú de “seleccione factor de array” la opción triangular. A continuación deberá introducir los parámetros que la interfaz le pida y tras ejecutar deberá pulsar el botón azul para representar el diagrama. Al tratarse de una función triangular es necesario que N tenga valores impares. Para esta distribución de corriente se ha empleado la ecuación (3.35).

En la figura 4.37 se muestra la representación de radiación en el plano E de 3 dipolos espaciados 0.7λ y alimentados con una distribución de corriente triangular.

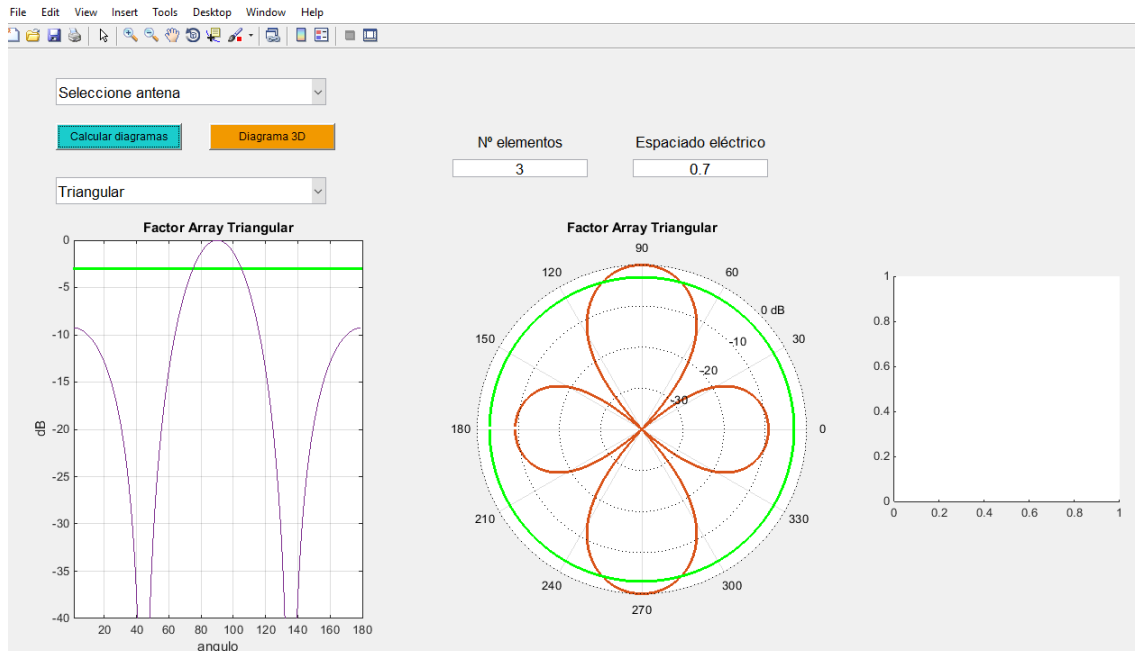


Fig. 4.37 Representación diagrama de radiación factor de array triangular $N=3$ y $d=0.7 \lambda$

4.2.8.3. Binómica

Para representar con una distribución de corriente binómica, el usuario debe seleccionar en el menú de “seleccione factor de array” la opción binómica. A continuación deberá introducir los parámetros que la interfaz le pida y tras ejecutar deberá pulsar el botón azul para representar el diagrama. Para esta distribución de corriente se ha empleado la ecuación (3.36).

En la figura 4.38 se muestra la representación del diagrama de radiación de 4 dipolos espaciados 0.7λ y alimentados con una distribución de corriente binómica.

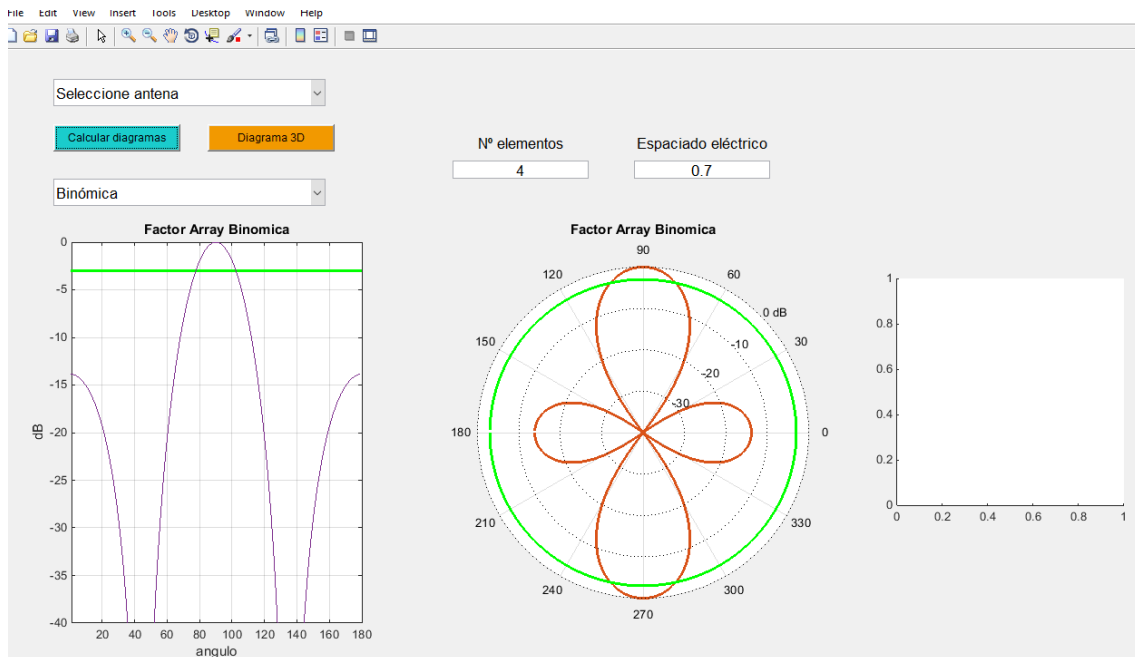


Fig. 4.38 Representación diagrama de radiación factor de array binómica $N=4$ y $d=0.7 \lambda$

4.2.9. Diagrama de radiación completo

El diagrama de radiación completo se obtiene de la multiplicación del factor de array por el diagrama de radiación de la singular antena que forma el array, todo elevado al cuadrado.

$$t(\theta, \Phi) = [t_{antena}(\theta, \Phi) \times FA(\theta, \Phi)]^2 \quad (4.1)$$

Para poder representar el diagrama de radiación completo el usuario primero debe ir al menú de las antenas y seleccionar la antena dipolo. Acto seguido deberá ir al menú del factor de array y elegir la opción que desee. Y una vez seleccionados ambos menús con sus respectivas opciones aparecerán varios parámetros donde el usuario tendrá que introducir los valores que sean convenientes.

Tanto para el 2D como para el 3D el proceso de selección es el mismo, salvo que para representar el diagrama bidimensional el usuario tendrá que pulsar el botón azul tras introducir los parámetros, y para el diagrama tridimensional el usuario deberá pulsar el botón naranja.

En la figura 4.39 se muestra el diagrama de radiación de un array formado por 4 dipolos $\lambda/2$ espaciados 0.7λ y alimentados con una distribución de corriente uniforme.

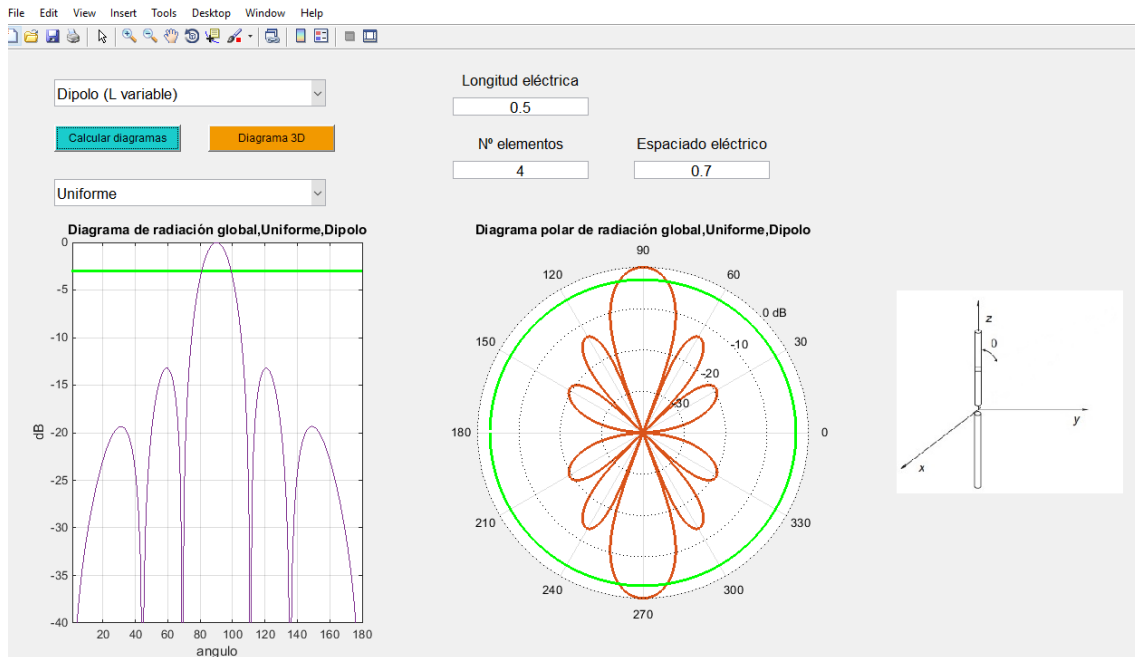


Fig. 4.39 Representación diagrama de radiación de una agrupación de 4 dipolos $\lambda/2$ espaciados 0.7λ y alimentados con una distribución de corriente uniforme

En la figura 4.40 se muestra el diagrama de radiación tridimensional de la misma agrupación de dipolos, donde se aprecian varios lóbulos secundarios junto al principal.

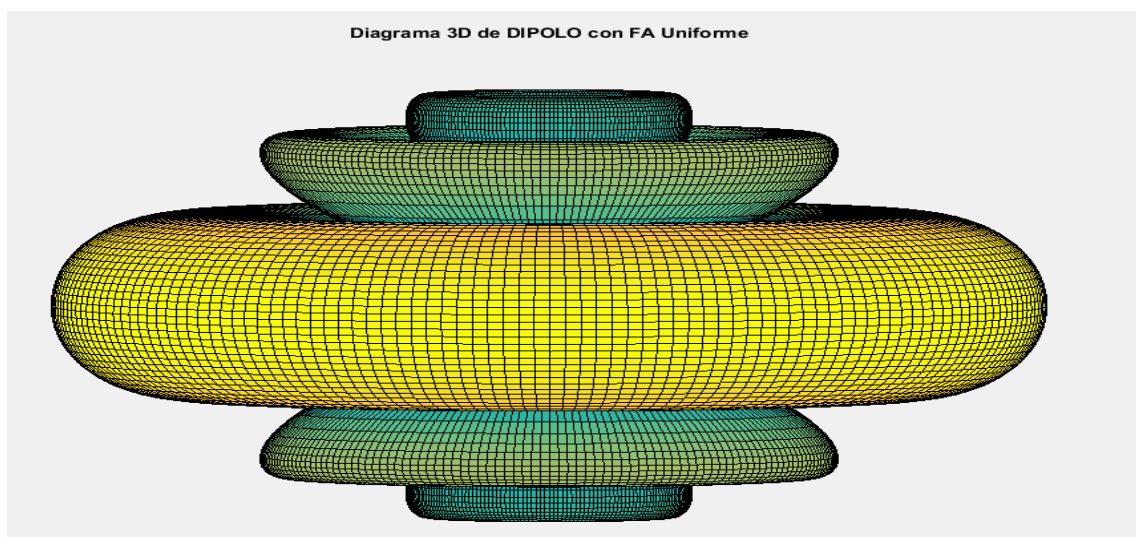


Fig. 4.40 Representación diagrama de radiación tridimensional para el caso de distribución de corriente uniforme

A continuación, en la figura 4.41 se muestra el diagrama de radiación de un array de 3 dipolos $\lambda/2$ espaciados de 0.7λ y alimentados con una distribución de corriente triangular.

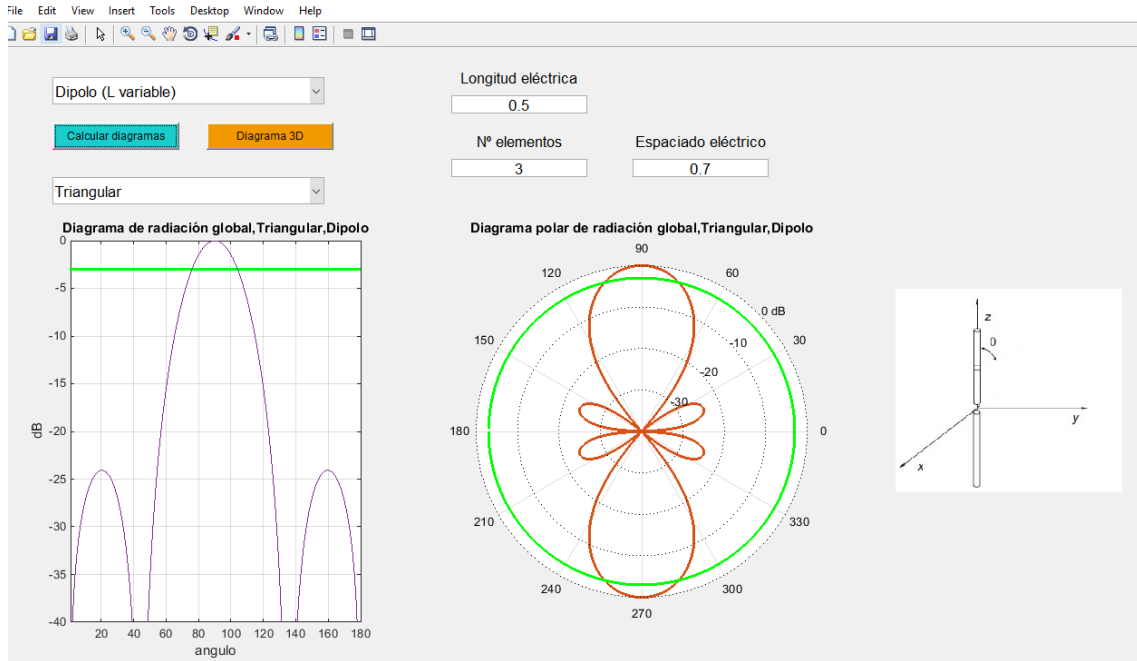


Fig. 4.41 Representación del diagrama bidimensional de un array de 3 dipolos $\lambda/2$ espaciados $d= 0.7 \lambda$ y alimentados con una distribución de corriente triangular.

En la figura 4.42 se visualiza se visualiza el diagrama tridimensional de este caso.

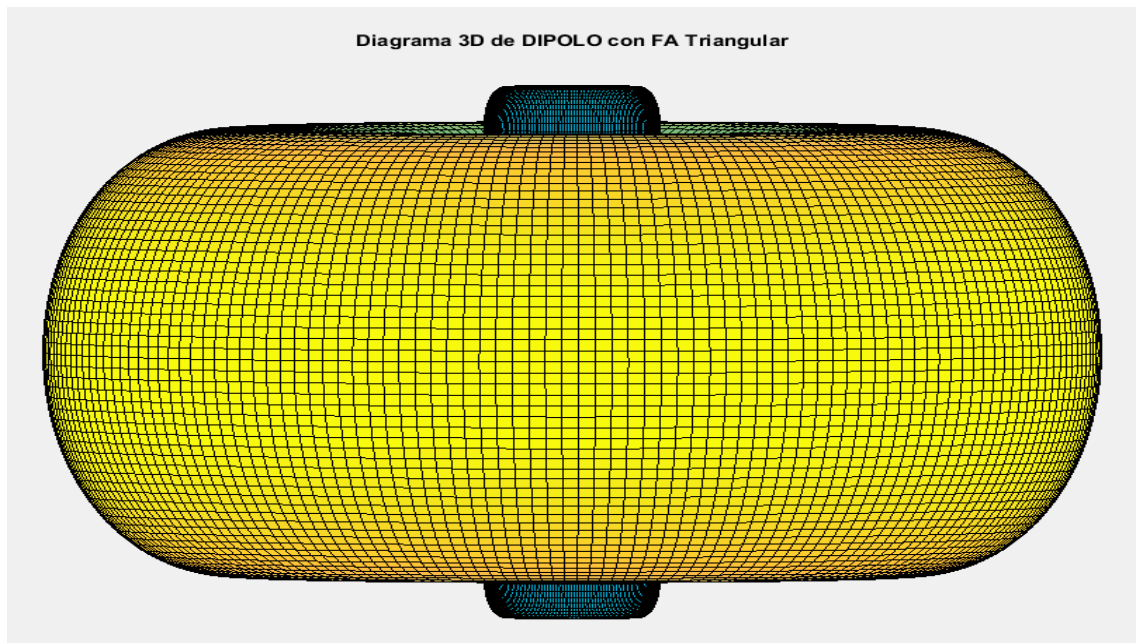


Fig. 4.42 Representación diagrama de radiación tridimensional para el caso de distribución de corriente triangular.

A continuación, en la figura 4.43 se muestra el diagrama de radiación bidimensional de 4 dipolos $\lambda/2$ espaciados 0.7λ y alimentados con una distribución de corriente binómica.

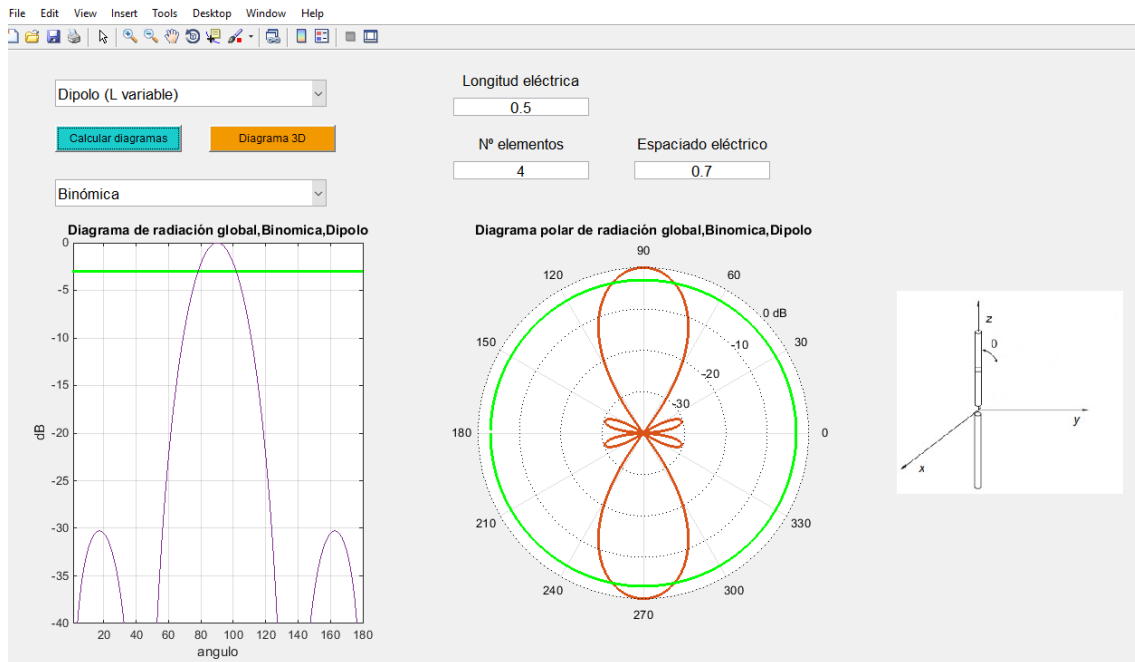


Fig. 4.43 Representación del diagrama bidimensional de un array de 4 dipolos $\lambda/2$ espaciados $d=0.7 \lambda$ y alimentados con una distribución de corriente binómica.

Finalmente, para este último caso en la figura 4.44 se observa el correspondiente diagrama de radiación tridimensional.

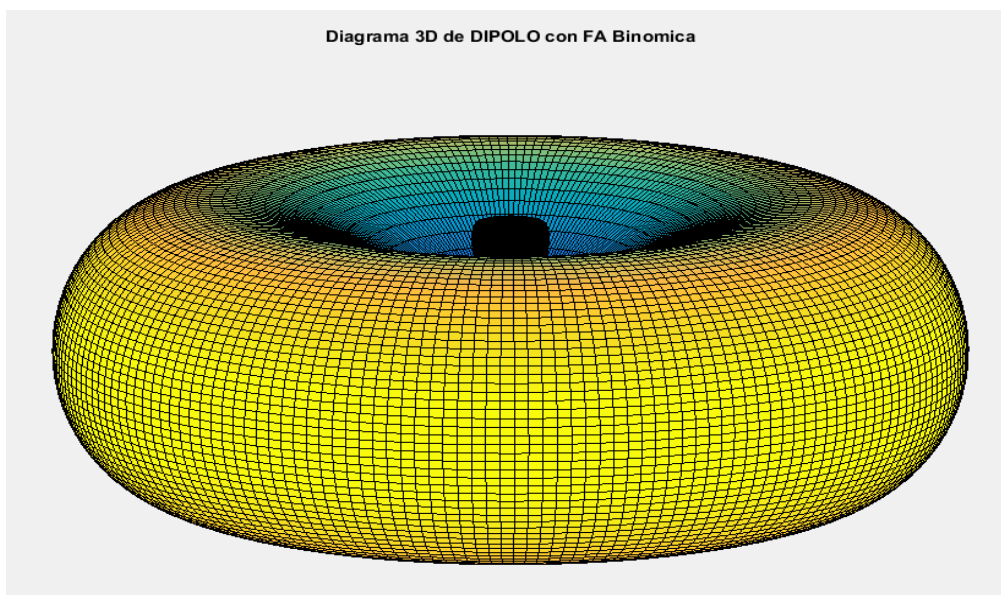


Fig. 4.44 Representación diagrama de radiación tridimensional para el caso de una distribución de corriente binómica

V - CONCLUSIONES Y POSIBLES ACTUALIZACIONES

Para concluir este trabajo de fin de grado, cabe destacar que se han cumplido los objetivos marcados ya que se ha conseguido implementar un software que permite representar los diagramas de radiación bidimensionales y tridimensionales de una amplia variedad de antenas. Además se pueden obtener los parámetros más importantes y característicos de una antena como el ancho de haz a -3 dB, el ancho de haz entre nullos, el nivel de lóbulo principal a secundario y el nivel delante/atrás de cada antena analizada.

Es interesante mencionar que el software ha sido implementado mediante las funciones `uiControl`, que han permitido que el programa posea un código abierto y fácil de modificar para posibles actualizaciones futuras.

Finalmente, como líneas futuras, se podrían incluir nuevas antenas a analizar como por ejemplo espiras, ranuras y lentes; también se podrían incluir en las expresiones del campo radiado por las bocinas el error de fase (para este estudio se ha considerado nulo). También un aspecto interesante sería estudiar agrupaciones planares (slot array o un array de parches en microstrip) y analizar el efecto de un desfase en la distribución de corriente tanto para una agrupación lineal como para una agrupación planar. Por último se podría también incluir un módulo de síntesis de agrupaciones, que a partir de un diagrama de radiación deseado indique la forma de alimentar las diferentes antenas que forman el array.

ANEXO CÓDIGOS

A continuación se adjuntan los códigos de las funciones principales que son necesarias para implementar todas las antenas.

Función para pasar a escala logarítmica el diagrama polar:

```
function polarendBs(theta,rho,rhomin,rticks)

% Parámetros de configuración del gráfico %
da=0.001; % Paso en ángulo para
circunferencia de radio 1 %
a=0:da:2*pi-da; % Ángulo para
circunferencias %
la=length(a); % Número de ángulos %
dr=1/rticks; % Paso radial %
vr=0:dr:1; % Vector de radios %
lvr=length(vr); % Número de
circunferencias %
angulot=45*pi/180;
X=zeros(la,lvr);
Y=zeros(la,lvr);
for I=1:lvr
    X(:,I)=vr(I)*cos(a);
    Y(:,I)=vr(I)*sin(a);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Trazado del gráfico principal en polares %
r=0.5*(1-rho/rhomin+abs(1-rho/rhomin)); % Diagrama de
radiación en coordenadas polares en dBs %
p=polar(theta,r); % Trazado del diagrama
de radiación polar en dBs %
hold on
%title('Diagrama polar (dB)')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Borrado de líneas y texto por defecto en 'polar' %
h = findall(gca,'type','line');
h(h == p) = [];
delete(h(end-4:end));
h = findall(gca,'type','text');
h(h == p) = [];
delete(h(end-7:end-3)); %modificado para que se vean títulos
originalmente es end-4
%delete(h(end-4:end));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Trazado de líneas y dibujo de textos auxiliares %
X3=(1+3/rhomin)*cos(theta);
Y3=(1+3/rhomin)*sin(theta);
plot(r.*cos(theta),r.*sin(theta),'LineWidth',2)
plot(X3,Y3,'color','g','LineWidth',2)
plot(X,Y,'color','k','LineWidth',1,'LineStyle',':')
drho=abs(rhomin)/(lvr-1); % Paso en dBs %
rhodB=rhomin:drho:0;
text(1.02*cos(angulot),1.02*sin(angulot),'0 dB')
```

```

for I=2:lvr-1
    texto=num2str(rhodB(lvr-I+1));
    text(vr(lvr-I+1)*cos(angulot),vr(lvr-I+1)*sin(angulot),texto)
end
hold off

```

Función para implementar la antena dipolo

```

function [En_dB,En] = dipolo_L_variable(H)
kL=2*pi*H;
ang=[(-180+0.01):1:180]*(pi/180);% array de ángulos
%Diagrama de radiacion dipolo
Elaux=((cos((kL/2).*cos(ang))-cos(kL/2))./sin(ang));
En=abs(Elaux/max(abs(Elaux))).^2;
En_dB=10*log10(En);
end

```

Función para implementar la antena dipolo en diagrama 3D

```

function [X,Y,Z,f] = dipolovariable_3D(H)

% Definimos los ángulos que definen cada dirección %
dt=pi/200; % Paso en theta %
dp=2*pi/200; % Paso en phi %
t=0:dt:pi; % Ángulo theta %
p=0:dp:2*pi; % Ángulo phi %
let=length(t); % Número de elementos
de t %
lp=length(p); % Número de elementos
de p %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los parámetros de la antena concreta %
%H=1.25; % Longitud eléctrica
del dipolo %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los campos de la antena concreta %
Et=zeros(let,lp); % Inicializamos a cero
componente Et %
for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        if ((theta==0) || (theta==pi))
            Et(I,J)=0;
        else
            Et(I,J)=(cos(pi*H*cos(theta))-cos(pi*H))/sin(theta);
        end
    end
end
E=abs(Et); % Módulo del campo
eléctrico total %
En=E/max(max(E)); % Módulo del campo
eléctrico total NORMALIZADO %
Pn=En.^2; % Potencia normalizada

```

```

en escala lineal %
PndB=10*log10(Pn); % Potencia normalizada
en dBs %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos el diagrama 3D %
X=zeros(let,lp); % Inicializamos X %
Y=zeros(let,lp); % Inicializamos Y %
Z=zeros(let,lp); % Inicializamos Z %
F=PndB; % Factor F %
Fmin=-40; % Valor mínimo en dB %
F(isinf(F))=Fmin; % Cualquier valor
infinito en F se sustituye por Fmin %
f=0.5*(1-F/Fmin+abs(1-F/Fmin)); % Parámetro para el
trazado %
%f=Pn;
for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        X(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*cos(phi);
        Y(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*sin(phi);
        Z(I,J)=f(I,J)*cos(theta);
    end
end
end

```

Función de antena dipolo con factor de array uniforme 3D

```

function [X,Y,Z,f] = dipolo_L_variable_3DFAU(H,N,d)

%DIPOLO 3D +FA UNIFORME

% Definimos los ángulos que definen cada dirección %
dt=pi/200; % Paso en theta %
dp=2*pi/200; % Paso en phi %
t=0:dt:pi; % Ángulo theta %
p=0:dp:2*pi; % Ángulo phi %
let=length(t); % Número de elementos
de t %
lp=length(p); % Número de elementos
de p %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los parámetros de la antena concreta %
%H=1.25; % Longitud eléctrica
del dipolo %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los campos de la antena concreta %
Et=zeros(let,lp); % Inicializamos a cero
componente Et %
for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        if ((theta==0) || (theta==pi))
            Et(I,J)=0;
        end
    end
end

```



```

        else
            Et(I,J)=(cos(pi*H*cos(theta))-cos(pi*H))/sin(theta);
        end
    end
end

E=abs(Et); % Módulo del campo
eléctrico total %
En=E/max(max(E)); % Módulo del campo
eléctrico total NORMALIZADO %
Pn=En.^2; % Potencia normalizada
en escala lineal %

%FACTOR DE ARRAY UNIFORME EN LINEAL
FA=(sin((N*2*pi*d*cos(t))/2))./(sin((2*pi*d*cos(t))/2));
FA_N=abs(FA/max(abs(FA))).^2;

FA_N3=zeros(let,lp);
for I=1:let
    FA_N3(I,:)=FA_N(I);
end

DGUD_N_3D=((FA_N3).*(Pn));
DGUD_N_3Dm=max(max(abs(DGUD_N_3D)));

DGUD_N_3D=abs(DGUD_N_3D/max(DGUD_N_3Dm));
PndB=10*log10(DGUD_N_3D);

% Potencia normalizada en dBs %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos el diagrama 3D %
X=zeros(let,lp); % Inicializamos X %
Y=zeros(let,lp); % Inicializamos Y %
Z=zeros(let,lp); % Inicializamos Z %
F=PndB; % Factor F %
Fmin=-40; % Valor mínimo en dB %
F(isinf(F))=Fmin; % Cualquier valor
infinito en F se sustituye por Fmin %
f=0.5*(1-F/Fmin+abs(1-F/Fmin)); % Parámetro para el
trazado %
%f=Pn;
for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        X(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*cos(phi);
        Y(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*sin(phi);
        Z(I,J)=f(I,J)*cos(theta);
    end
end
end
end

```

Función de antena dipolo con factor de array triangular 3D

```

function [X,Y,Z,f] = dipolo_L_variable_3DFAT(H,N,d)

%DIPOLO+FA TRIANGULAR 3D  valores de N impares

% Definimos los ángulos que definen cada dirección %
dt=pi/200; % Paso en theta %
dp=2*pi/200; % Paso en phi %
t=0:dt:pi; % Ángulo theta %
p=0:dp:2*pi; % Ángulo phi %
let=length(t); % Número de elementos
de t %
lp=length(p); % Número de elementos
de p %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los parámetros de la antena concreta %
%H=1.25; % Longitud eléctrica
del dipolo %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los campos de la antena concreta %
Et=zeros(let,lp); % Inicializamos a cero
componente Et %
for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        if ((theta==0) || (theta==pi))
            Et(I,J)=0;
        else
            Et(I,J)=(cos(pi*H*cos(theta))-cos(pi*H))/sin(theta);
        end
    end
end

E=abs(Et); % Módulo del campo
eléctrico total %
En=E/max(max(E)); % Módulo del campo
eléctrico total NORMALIZADO %
Pn=En.^2; % Potencia normalizada
en escala lineal %

%FACTOR DE ARRAY TRIANGULAR EN LINEAL
FA =(sin((N+1)*2*pi*d.*cos(t)/4)./sin(2*pi*d.*cos(t)/2)).^2;
FA_N=abs(FA/max(abs(FA))).^2;

FA_N3=zeros(let,lp);
for I=1:let
    FA_N3(I,:)=FA_N(I);
end

DGUD_N_3D=((FA_N3).*(Pn));
DGUD_N_3Dm=max(max(abs(DGUD_N_3D)));

DGUD_N_3D=abs(DGUD_N_3D/max(DGUD_N_3Dm));

```

```

PndB=10*log10(DGUD_N_3D);

% Potencia normalizada en dBs %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos el diagrama 3D %
X=zeros(let,lp); % Inicializamos X %
Y=zeros(let,lp); % Inicializamos Y %
Z=zeros(let,lp); % Inicializamos Z %
F=PndB; % Factor F %
Fmin=-40; % Valor mínimo en dB %
F(isinf(F))=Fmin; % Cualquier valor
infinito en F se sustituye por Fmin %
f=0.5*(1-F/Fmin+abs(1-F/Fmin)); % Parámetro para el
trazado %
%f=Pn;
for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        X(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*cos(phi);
        Y(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*sin(phi);
        Z(I,J)=f(I,J)*cos(theta);
    end
end
end
end

```

Función de antena dipolo con factor de array binómica 3D

```

function [X,Y,Z,f] = dipolo_L_variable_3DFAB(H,N,d)

%DIPOLO+FA Binomica3D

% Definimos los ángulos que definen cada dirección %
dt=pi/200; % Paso en theta %
dp=2*pi/200; % Paso en phi %
t=0:dt:pi; % Ángulo theta %
p=0:dp:2*pi; % Ángulo phi %
let=length(t); % Número de elementos
de t %
lp=length(p); % Número de elementos
de p %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los parámetros de la antena concreta %
%H=1.25; % Longitud eléctrica
del dipolo %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los campos de la antena concreta %
Et=zeros(let,lp); % Inicializamos a cero
componente Et %
for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        if ((theta==0) || (theta==pi))

```

```

        Et(I,J)=0;
    else
        Et(I,J)=(cos(pi*H*cos(theta))-cos(pi*H))/sin(theta);
    end
end
end

E=abs(Et); % Módulo del campo
eléctrico total %
En=E/max(max(E)); % Módulo del campo
eléctrico total NORMALIZADO %
Pn=En.^2; % Potencia normalizada
en escala lineal %

%FACTOR DE ARRAY BINOMICA EN LINEAL
FA=((2.*cos((2*pi*d*cos(t))/2)).^(N-1));
FA_N=abs(FA/max(abs(FA))).^2;

FA_N3=zeros(let,lp);
for I=1:let
    FA_N3(I,:)=FA_N(I);
end

DGUD_N_3D=((FA_N3).*(Pn));
DGUD_N_3Dm=max(max(abs(DGUD_N_3D)));

DGUD_N_3D=abs(DGUD_N_3D/max(DGUD_N_3Dm));
PndB=10*log10(DGUD_N_3D);

% Potencia normalizada en dBs %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos el diagrama 3D %
X=zeros(let,lp); % Inicializamos X %
Y=zeros(let,lp); % Inicializamos Y %
Z=zeros(let,lp); % Inicializamos Z %
F=PndB; % Factor F %
Fmin=-40; % Valor mínimo en dB %
F(isinf(F))=Fmin; % Cualquier valor
infinito en F se sustituye por Fmin %
f=0.5*(1-F/Fmin+abs(1-F/Fmin)); % Parámetro para el
trazado %
%f=Pn;
for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        X(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*cos(phi);
        Y(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*sin(phi);
        Z(I,J)=f(I,J)*cos(theta);
    end
end
end
end

```

Función de apertura plana rectangular plano E

```
function [ EndB,En ] = AperturaPlanaRectangular_E( a,b )
fL=1;
n=120*pi;
kL=2*pi*fL;
ang=[(-90+0.01):1:(90-0.01)]*(pi/180);
Zo=n/sqrt(1-(1/(2*a))^2);
kx=kL*sin(ang);
%Plano E
B_E=((n/Zo).*cos(ang))+1;
integralE=(pi*a*b/2).*((cos(kx*a/2))./(((pi/2).^2)-((kx*a/2).^2)));

E=B_E.*integralE;
En=abs(E/max(E)).^2;
EndB=10*log10(En);

end
```

Función de apertura plana rectangular plano H

```
function [ HndB,Hn ] = AperturaPlanaRectangular_H( a,b )
%Datos necesarios
fL=1;
n=120*pi;
ang=[(-90+0.01):1:(90-0.01)]*(pi/180);
Zo=n/sqrt(1-(1/(2*a))^2);
kL=2*pi*fL;
ky=kL*sin(ang);

%Plano H
B_H=((n/Zo)+cos(ang));
integralH=(pi*a/2).* (1/((pi/2).^2)).*(b).*(sin(ky*(b)/2))./(ky*(b)/2);

H=B_H.*integralH;
Hn=abs(H/max(H)).^2;
HndB=10*log10(Hn);

end
```

Función de apertura plana rectangular en diagrama tridimensional

```
function [X,Y,Z,f] = aperturaplanarectangular_3D(a,b)

% Archivo prueba3D.m % APERTURA PLANA RECTANGULAR

% Definimos los ángulos que definen cada dirección %
dt=pi/200; % Paso en theta %
dp=2*pi/200; % Paso en phi %
t=0:dt:pi/2; % Ángulo theta %
p=0:dp:2*pi; % Ángulo phi %
let=length(t); % Número de elementos
de t %
lp=length(p); % Número de elementos
```

```

de p %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los parámetros de la antena concreta %
eta=120*pi; % Impedancia
intrínseca del vacío (ohms) %
a=3; % Longitud eléctrica
de a %
b=3; % Longitud eléctrica
de b %
kxa=zeros (let,lp); % Parámetro kxa %
kyb=zeros (let,lp); % Parámetro kyb %
Z0=eta/sqrt (1- (1/ (2*a))^2); % Impedancia %
for I=1:let
    theta=t (I);
    for J=1:lp
        phi=p (J);
        kxa (I,J)=2*pi*sin (theta) *cos (phi);
        kyb (I,J)=2*pi*sin (theta) *sin (phi);
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los campos de la antena concreta %
Et=zeros (let,lp); % Inicializamos a cero
componente Et %
Ep=zeros (let,lp); % Inicializamos a cero
componente Ep %
for I=1:let
    theta=t (I);
    for J=1:lp
        phi=p (J);
        d1=(pi/2)^2- (kxa (I,J) *a/2)^2;
        % d2=kyb (I,J) *b/2;
        if (d1==0)
            D1=1/pi;
        else
            D1=cos (kxa (I,J) *a/2) /d1;
        end
        D2=sinc ((1/pi) *kyb (I,J) *b/2);

        Et (I,J) =(1+ (eta/Z0) *cos (theta) ) *sin (phi) *D1*D2;
        Ep (I,J) =( (eta/Z0) +cos (theta) ) *cos (phi) *D1*D2;
    end
end
E=sqrt (abs (Et.^2) +abs (Ep.^2) ); % Módulo del campo
eléctrico total %
En=E/max (max (E) ); % Módulo del campo
eléctrico total NORMALIZADO %
Pn=En.^2; % Potencia normalizada
en escala lineal %
PndB=10*log10 (Pn); % Potencia normalizada
en dBs %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos el diagrama 3D %
X=zeros (let,lp); % Inicializamos X %
Y=zeros (let,lp); % Inicializamos Y %
Z=zeros (let,lp); % Inicializamos Z %

```

```

F=PndB; % Factor F %
Fmin=-40; % Valor mínimo en dB %
f=0.5*(1-F/Fmin+abs(1-F/Fmin)); % Parámetro para el
trazado %

for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        X(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*cos(phi);
        Y(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*sin(phi);
        Z(I,J)=f(I,J)*cos(theta);
    end
end

```

Función de apertura circular plano E

```

function [ EndB,En ] = AperturaCircular_E( a )
%Datos necesarios
fL=a;
kL=2*pi*fL;
ang=[(-90+0.01):1:(90-0.01)]*(pi/180);
u=kL*sin(ang);
%Calculos
E=((1+cos(ang))/2).*(besselj(1,u))./u;
En=abs(E/max(E)).^2;
EndB=10*log10(En);
end

```

Función de apertura circular plano H

```

function [ HndB,Hn ] = AperturaCircular_H( a )
%Datos necesarios
fL=a;
kL=2*pi*fL;
ang=[(-90+0.01):1:(90-0.01)]*(pi/180);
u=kL*sin(ang);
%Calculos
H2=(-besselj(2,u)+(1./u).*besselj(1,u))./(1-
(kL*sin(ang)/1.84118).^2);
H=((1+cos(ang))/2).*H2;
Hn=abs(H/max(H)).^2;
HndB=10*log10(Hn);
end

```

Función de apertura circular en diagrama tridimensional

```

function [X,Y,Z,f] = aperturacircular_3D(a)

%APERTURA CIRCULAR 3D

% Definimos los ángulos que definen cada dirección %
dt=pi/200; % Paso en theta %
dp=2*pi/200; % Paso en phi %
t=0:dt:pi/2; % Ángulo theta %
p=0:dp:2*pi; % Ángulo phi %
let=length(t); % Número de elementos
de t %
lp=length(p); % Número de elementos
de p %
k=2*pi;
E0=1; %amplitud del campo
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los parámetros de la antena concreta %
a=3; % Longitud eléctrica de a %

% Definimos los campos de la antena concreta %
Et=zeros(let,lp); % Inicializamos a cero
componente Et %
Ep=zeros(let,lp); % Inicializamos a cero
componente Ep %
for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        xBessel=k*a*sin(theta);

        if (xBessel==0)
            fx=pi*(a^2)*E0;
        else
            fx=2*pi*(a^2)*E0*((besselj(1,xBessel))./(xBessel));
        end

        Et(I,J)=fx.*cos(phi);
        Ep(I,J)=-fx*cos(theta)*sin(phi);

    end

end

end

E=sqrt(abs(Et.^2)+abs(Ep.^2)); % Módulo del campo
eléctrico total %
En=E/max(max(E)); % Módulo del campo
eléctrico total NORMALIZADO %
Pn=En.^2; % Potencia normalizada
en escala lineal %
PndB=10*log10(Pn); % Potencia normalizada
en dBs %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```



```

% Definimos el diagrama 3D %
X=zeros(1et,lp); % Inicializamos X %
Y=zeros(1et,lp); % Inicializamos Y %
Z=zeros(1et,lp); % Inicializamos Z %
F=PndB; % Factor F %
Fmin=-40; % Valor mínimo en dB %
f=0.5*(1-F/Fmin+abs(1-F/Fmin)); % Parámetro para el
trazado %

for I=1:1et
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        X(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*cos(phi);
        Y(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*sin(phi);
        Z(I,J)=f(I,J)*cos(theta);
    end
end

```

Función de bocina piramidal plano E

```

function [En_dB,En] = BocinaPiramidal_E(b)
fL=b;
kL=2*pi*fL;
ang=[(-90+0.01):1:(90-0.01)]*(pi/180);% array de ángulos
%Diagrama de radiación de la densidad de potencia normalizada
%Plano E
E1=((sin((kL/2).*sin(ang)))/((kL/2).*sin(ang)));

En=abs(E1/max(E1)).^2;
En_dB=10*log10(En);
end

```

Función de bocina piramidal plano H

```

function [ Hn_dB,Hn ] = BocinaPiramidal_H( a )
%k=(2*pi*f)/c;
fL=a;
kL=2*pi*fL;
ang=[(-90+0.01):1:(90-0.01)]*(pi/180);% array de ángulos
%Plano H
H1=((cos((kL/2).*sin(ang)).*cos(ang))/((pi/2).^2)-
(((kL/2).*sin(ang)).^2));
Hn=abs(H1/max(H1)).^2;
Hn_dB=10*log10(Hn);
end

```

Función de bocina piramidal en diagrama 3D

```

function [X,Y,Z,f] = bocinapiramidal_3D(a,b)

%BOCINA PIRAMIDAL 3D

% Definimos los ángulos que definen cada dirección %
dt=pi/150; % Paso en theta %
dp=2*pi/150; % Paso en phi %
t=0:dt:pi/2; % Ángulo theta %
p=0:dp:2*pi; % Ángulo phi %
let=length(t); % Número de elementos
de t %
lp=length(p); % Número de elementos
de p %
k=2*pi;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los parámetros de la antena concreta %
%a=2; % Longitud eléctrica
de a %
%b=2; % Longitud eléctrica
de b %

% Definimos los campos de la antena concreta %
Et=zeros(let,lp); % Inicializamos a cero
componente Et %
Ep=zeros(let,lp); % Inicializamos a cero
componente Ep %
for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        u=(k*a/2).*sin(theta).*cos(phi);
        v=(k*b/2).*sin(theta).*sin(phi);

        d1=(pi/2)^2-u.^2;

        if (abs(d1)<=10^(-5))
            D1=1/pi;
        else
            D1=cos(u)/d1;
        end

        D2=sinc(v/pi);

        % Et(I,J)=(sin(phi)).*(sin(v)/v).*D1;
        % Ep(I,J)=(cos(phi)).*(cos(theta)).*(sin(v)/v).*D1;
        Et(I,J)=(sin(phi)).*D2.*D1;
        Ep(I,J)=(cos(phi)).*(cos(theta)).*D2.*D1;

    end
end
end
E=sqrt(abs(Et.^2)+abs(Ep.^2)); % Módulo del campo
eléctrico total %

```

```

En=E/max(max(E)); % Módulo del campo
eléctrico total NORMALIZADO %
Pn=En.^2; % Potencia normalizada
en escala lineal %
PndB=10*log10(Pn); % Potencia normalizada
en dBs %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos el diagrama 3D %
X=zeros(let,lp); % Inicializamos X %
Y=zeros(let,lp); % Inicializamos Y %
Z=zeros(let,lp); % Inicializamos Z %
F=PndB; % Factor F %
Fmin=-40; % Valor mínimo en dB %
f=0.5*(1-F/Fmin+abs(1-F/Fmin)); % Parámetro para el
trazado %

for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        X(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*cos(phi);
        Y(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*sin(phi);
        Z(I,J)=f(I,J)*cos(theta);
    end
end
end

```

Función antena microstrip plano E

```

function [ EndB,En ] = AntenaMicrostrip_E( h,W,L,Er )
%Datos necesarios
kh=2*pi*h;
k=2*pi;

%Parametros que se van calculando para obtener Leff
Ereff=((Er+1)/2)+((Er-1)/2).*(1+12.*(h/W))^(-1/2);
AL=h.*(0.412.*((Ereff+0.3).*(W/h)+0.264)./(Ereff-
0.258).*(W/h)+0.8));
Leff=L+2*AL;

ang=[(-90+0.01):0.5:(90-0.01)]*(pi/180);

%Calculamos sector E antena Microstrip

E1=(sin((kh/2)*cos(ang))./((kh/2).*cos(ang))).*(cos((k*Leff/2).*sin(ang)));
En=abs(E1/max(E1)).^2;
EndB=10*log10(En);
end

```

Función antena microstrip plano H

```
function [ HndB,Hn ] = AntenaMicrostrip_H( h,W )
%Datos necesarios
kh=2*pi*h;
kW=2*pi*W;
ang=[0:0.5:180]*(pi/180);

%Calculamos el sectorial H de la antena microstrip
X1=(sin((kh/2).*sin(ang)))./((kh/2).*sin(ang));
X2=(sin((kW/2).*cos(ang)))./((kW/2).*cos(ang));
H1=(sin(ang).*(X1.*X2));
Hn=abs(H1/max(H1)).^2;
HndB=10*log10(Hn);
end
```

Función antena microstrip en diagrama tridimensional

```
function [X,Y,Z,f] = microstrip_3D(h,W,L,Er)

%MICROSTRIP 3D

% Definimos los ángulos que definen cada dirección %
dt=pi/200; % Paso en theta %
dp=2*pi/200; % Paso en phi %

t=0:dt:pi; % Ángulo theta %
% p=0:dp:2*pi; % Ángulo phi %
p=-pi/2:dp:pi/2; % Ángulo phi %
let=length(t); % Número de elementos
de t %
lp=length(p); % Número de elementos
de p %
k=2*pi;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los parámetros de la antena concreta %
%h=2; % Longitud eléctrica
de h %
%W=2; % Longitud eléctrica
de W %
%Er=2.2; %permitividad
electrica siempre >1

%Parametros que se van calculando para obtener Leff
Ereff=((Er+1)/2)+((Er-1)/2)*(1+12*(h/W))^(-1/2);
%L=1/2;
% N1=(Ereff+0.3)*((W/h)+0.264);
% D1=(Ereff-0.258)*((W/h)+0.8);
AL=h*(0.412*((Ereff+0.3)*((W/h)+0.264))/((Ereff-0.258)*((W/h)+0.8)));
%AL=0.412*h*(N1/D1);
```

```

Leff=L+2*AL; % Longitud eléctrica
de Leff %

% Definimos los campos de la antena concreta %
% Et=zeros(let,lp); % Inicializamos a
cero componente Et %
Ep=zeros(let,lp); % Inicializamos a cero
componente Ep %
for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);

        X1=(k*h/2)*sin(theta)*cos(phi);
        Z1=(k*W/2)*cos(theta);
        sx=sinc(X1/pi);
        sz=sinc(Z1/pi);
        %
Ep(I,J)=sin(theta)*(sin(X1)/X1)*(sin(Z1)/Z1)*cos((k*Leff/2)*sin(theta)
*sin(phi));
        Ep(I,J)=sin(theta)*sx*sz*cos((k*Leff/2)*sin(theta)*sin(phi));
    end
end
E=sqrt(abs(Ep.^2)); % Módulo del campo eléctrico
total %
En=E/max(max(E)); % Módulo del campo
eléctrico total NORMALIZADO %
Pn=En.^2; % Potencia normalizada
en escala lineal %
PndB=10*log10(Pn); % Potencia normalizada
en dBs %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos el diagrama 3D %
Xp=zeros(let,lp); % Inicializamos Xp %
Yp=zeros(let,lp); % Inicializamos Yp %
Zp=zeros(let,lp); % Inicializamos Zp %
F=PndB; % Factor F %
Fmin=-40; % Valor mínimo en dB %
f=0.5*(1-F/Fmin+abs(1-F/Fmin)); % Parámetro para el
trazado %

for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        Xp(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*cos(phi);
        Yp(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*sin(phi);
        Zp(I,J)=f(I,J)*cos(theta);
    end
end
X=-Zp;
Y=Yp;
Z=Xp;

```

Función de reflector parabólico plano E

```
function [En_dB,En] = ReflectorParabolico_E(a)
kL=2*pi*a;
ang=[(-90+0.01):1:(90-0.01)]*(pi/180);% array de ángulos
%Cálculo plano E
%Plano E
xBessel=kL*sin(ang);

E1=(besselj(1,xBessel))./(xBessel));
En=abs(E1/max(E1)).^2;
En_dB=10*log10(En);
end
```

Función de reflector parabólico plano H

```
function [ Hn_dB,Hn ] = ReflectorParabolico_H( a )
kL=2*pi*a;
ang=[(-90+0.01):1:(90-0.01)]*(pi/180);% array de ángulos
%Plano H
xBessel=kL*sin(ang);
H1=(cos(ang)).*((besselj(1,xBessel))./(xBessel));
Hn=abs(H1/max(H1)).^2;
Hn_dB=10*log10(Hn);
end
```

Función de reflector parabólico plano en diagrama 3D

```
function [X,Y,Z,f] = reflectorparabolico_3D(a)

%REFLECTOR PARABOLICO 3D

% Definimos los ángulos que definen cada dirección %
dt=pi/200; % Paso en theta %
dp=2*pi/200; % Paso en phi %
t=0:dt:pi/2; % Ángulo theta %
p=0:dp:2*pi; % Ángulo phi %
let=length(t); % Número de elementos
de t %
lp=length(p); % Número de elementos
de p %
k=2*pi; %longitud de onda
E0=1; %amplitud campo
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los parámetros de la antena concreta %
%a=3; % Longitud eléctrica de a % radio de la boca

% Definimos los campos de la antena concreta %
Et=zeros(let,lp); % Inicializamos a cero
componente Et %
Ep=zeros(let,lp); % Inicializamos a cero
componente Ep %
for I=1:let
```

```

theta=t(I);
for J=1:lp
    phi=p(J);
    xBessel=k*a*sin(theta);
    if (xBessel==0)
        fx=pi*(a^2)*E0;
    else
        fx=2*pi*(a^2)*E0*((besselj(1,xBessel))./(xBessel));
    end
    Et(I,J)=fx.*cos(phi);
    Ep(I,J)=-fx*cos(theta)*sin(phi);
end
end
E=sqrt(abs(Et.^2)+abs(Ep.^2)); % Módulo del campo
eléctrico total %
En=E/max(max(E)); % Módulo del campo
eléctrico total NORMALIZADO %
Pn=En.^2; % Potencia normalizada
en escala lineal %
PndB=10*log10(Pn); % Potencia normalizada
en dBs %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos el diagrama 3D %
X=zeros(let,lp); % Inicializamos X %
Y=zeros(let,lp); % Inicializamos Y %
Z=zeros(let,lp); % Inicializamos Z %
F=PndB; % Factor F %
Fmin=-40; % Valor mínimo en dB %
f=0.5*(1-F/Fmin+abs(1-F/Fmin)); % Parámetro para el
trazado %

for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        X(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*cos(phi);
        Y(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*sin(phi);
        Z(I,J)=f(I,J)*cos(theta);
    end
end
end

```

Función de antena de hilo largo

```

function [ En_dB,En ] = AntenaHiloLargo( fL )
kL=2*pi*fL;
ang=[(-180+0.01):1:180]*(pi/180);% array de ángulos
%Diagrama de radiación Antena de hilo largo
E1=sin(ang).*exp(1j*kL*(1-cos(ang))/2).*((sin((kL/2)*(1-
cos(ang))))./((kL/2)*(1-cos(ang))));
En=abs(E1/max(E1)).^2;
En_dB=10*log10(En);
end

```

Función de antena de hilo largo en diagrama 3D

```

function [X,Y,Z,f] = hilolargo_3D(fL)

%ANTENA HILO LARGO

L=fL;

% Definimos los ángulos que definen cada dirección %
dt=pi/200; % Paso en theta %
dp=2*pi/200; % Paso en phi %
t=0:dt:pi; % Ángulo theta %
p=0:dp:2*pi; % Ángulo phi %
let=length(t); % Número de elementos
de t %
lp=length(p); % Número de elementos
de p %
k=2*pi;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los parámetros de la antena concreta %
%L=3; % Longitud eléctrica de
antena hilo largo %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos los campos de la antena concreta %
Et=zeros(let,lp); % Inicializamos a cero
componente Et %
for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);

        Et(I,J)=sin(theta).*exp(1j*k*L*(1-
cos(theta))/2).*((sin((k*L/2)*(1-cos(theta))))./((k*L/2)*(1-
cos(theta))));
    end
end

E=abs(Et); % Módulo del campo
eléctrico total %
En=E/max(max(E)); % Módulo del campo
eléctrico total NORMALIZADO %
Pn=En.^2; % Potencia normalizada
en escala lineal %
PndB=10*log10(Pn); % Potencia normalizada
en dBs %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Definimos el diagrama 3D %
X=zeros(let,lp); % Inicializamos X %
Y=zeros(let,lp); % Inicializamos Y %
Z=zeros(let,lp); % Inicializamos Z %
F=PndB; % Factor F %
Fmin=-40; % Valor mínimo en dB %
F(isinf(F))=Fmin; % Cualquier valor
infinito en F se sustituye por Fmin %
f=0.5*(1-F/Fmin+abs(1-F/Fmin)); % Parámetro para el

```



```

trazado %
for I=1:let
    theta=t(I);
    for J=1:lp
        phi=p(J);
        X(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*cos(phi);
        Y(I,J)=f(I,J)*sin(theta)*sin(phi);
        Z(I,J)=f(I,J)*cos(theta);
    end
end

```

Función factor de array uniforme

```

function [FA_N_dB,FA_N] = factorArrayUniforme(N,d)

ang=[(-180+0.01):1:180]*(pi/180);% array de ángulos
%Calculamos el factor de array
FA=(sin((N*2*pi*d*cos(ang))/2))./(sin((2*pi*d*cos(ang))/2));
FA_N=abs(FA/max(FA)).^2;
FA_N_dB=10*log10(FA_N);
end

```

Función factor de array triangular

```

function [FA_N_dB,FA_N] = factorArrayTriangular(N,d)
%siempre se tiene que probar con valores de N impares

ang=[(-180+0.01):1:180]*(pi/180);% array de ángulos
%Calculamos el factor de array
FA=(sin((N+1)*2*pi*d.*cos(ang)/4))./sin(2*pi*d.*cos(ang)/2)).^2;
FA_N=abs(FA/max(FA)).^2;
FA_N_dB=10*log10(FA_N);
end

```

Función factor de array binómica

```

function [FA_N_dB,FA_N] = factorArrayBinomica(N,d)

ang=[(-180+0.01):1:180]*(pi/180);% array de ángulos
%Calculamos el factor de array
FA=((2.*cos((2*pi*d*cos(ang))/2)).^(N-1));
FA_N=abs(FA/max(FA)).^2;
FA_N_dB=10*log10(FA_N);
end

```

BIBLIOGRAFÍA

[1] "Antenas - Ángel Cardama Aznar, Lluís Jofre Roca, Juan Manuel Rius Casals, Jordi Romeu Robert, Sebastián Blanch Boris (Universitat Politècnica de Catalunya) y Miguel Ferrando Bataller (Universitat Politècnica de València)", Editorial: Edicions UPC.

[2] "Antenna Theory, Analysis and Design, third edition - Constantine A. Balanis", Editorial: John Wiley and Sons.

[3] "Antennas and radiowave propagation, International student edition – Robert E. Collin".

Apuntes de la asignatura Medios de Transmisión del Grado en ingeniería en sonido e imagen en telecomunicación de la Universidad de Alicante.

Apuntes de la asignatura Tecnología de las Radiocomunicaciones (Máster universitario en ingeniería de telecomunicación de la Universidad de Alicante).

http://www.upv.es/antenas/Tema_7/Apertura_rectangular.htm