

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**DESARROLLO DE UNA INTERFAZ GRÁFICA EN MATLAB PARA
EL CONTROL DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN CST
STUDIO SUITE EN LA OBTENCIÓN DE ESTRUCTURAS DE
ARREGLOS DE ANTENAS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

RICARDO JOSÉ MERA LÓPEZ

DIRECTOR: DR.-ING. HERNÁN VINICIO BARBA MOLINA

CODIRECTORA: DRA. DIANA VERÓNICA NAVARRO MÉNDEZ

Quito, Abril 2021

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Ricardo José Mera López, bajo nuestra supervisión.

Dr.-Ing. Hernán Vinicio Barba Molina
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Dra. Diana Verónica Navarro Méndez
CODIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo Ricardo José Mera López, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

RICARDO JOSÉ MERA LÓPEZ

DEDICATORIA

Con mucho amor a Washington, Cristina y Nicole.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| AVAL..... | I |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA | II |
| DEDICATORIA | III |
| ÍNDICE DE CONTENIDO..... | IV |
| RESUMEN | VI |
| ABSTRACT..... | VII |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 OBJETIVOS..... | 2 |
| 1.2 ALCANCE | 2 |
| 1.3 MARCO TEÓRICO | 3 |
| 1.3.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LOS ARREGLOS DE ANTENAS | 3 |
| 1.3.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS ARREGLOS DE ANTENAS | 4 |
| 2 METODOLOGÍA..... | 16 |
| 2.1 ESTRUCTURA GENERAL..... | 16 |
| 2.2 ESTRUCTURA DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO | 17 |
| 2.3 INTERCONEXIÓN MATLAB-CST STUDIO SUITE | 21 |
| 2.4 MODELADO DE ANTENAS | 22 |
| 2.4.1 ANTENA TIPO DIPOLO DE MEDIA LONGITUD DE ONDA..... | 23 |
| 2.4.2 ANTENA TIPO <i>PATCH</i> | 24 |
| 2.5 CONFORMACIÓN DEL ARREGLO | 35 |
| 2.6 GENERACIÓN DE LÓBULOS DE RADIACIÓN | 36 |
| 2.7 OPTIMIZACIÓN | 43 |
| 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 47 |
| 3.1 GENERACIÓN DE PATRONES DE RADIACIÓN POR PARTE DEL USUARIO | 47 |
| 3.1.1 ARREGLOS LINEALES DE ANTENAS TIPO DIPOLO | 47 |
| 3.1.2 ARREGLOS PLANARES DE ANTENAS TIPO DIPOLO | 54 |
| 3.1.3 ARREGLOS LINEALES DE ANTENAS TIPO <i>PATCH</i> | 61 |
| 3.1.4 ARREGLOS PLANARES DE ANTENAS TIPO <i>PATCH</i> | 68 |
| 3.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 75 |
| 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 77 |
| 4.1. CONCLUSIONES | 77 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 4.2. RECOMENDACIONES | 79 |
| 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 80 |
| ANEXOS | 82 |

RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se desarrolla una aplicación en MATLAB que permite su interconexión con el software de simulación CST Studio Suite para generar arreglos de antenas y realizar el modelado y simulación correspondiente.

La aplicación cuenta con una interfaz gráfica que permite al usuario ingresar parámetros de configuración como pueden ser: tipo de antena, tipo de arreglo, tipo de gráfico a visualizar, tolerancia, diferencia de fase, número de elementos, dimensiones, directividad, frecuencia y apuntamiento. Se establece un modo de optimización en el cual el usuario elige el lóbulo de radiación que desea obtener en términos de apuntamiento y directividad con un margen de error esperado. Como salida se genera un arreglo de antenas que cumpla con dichas características o en su defecto la mejor aproximación posible.

En el primer capítulo se realiza un resumen teórico acerca de los arreglos de antenas, su clasificación, características y principio de operación.

En el segundo capítulo se describen los procesos de diseño, modelado y simulación de antenas que conforman los arreglos, además se describe la interconexión MATLAB-CST Studio Suite y los algoritmos utilizados para el cálculo de directividad.

El tercer capítulo expone los resultados obtenidos al utilizar la aplicación desarrollada, así como su correspondiente tabulación y análisis.

En el cuarto capítulo se discuten las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo.

PALABRAS CLAVE: MATLAB, CST Studio Suite, arreglo, directividad, dipolo, *patch*.

ABSTRACT

This project shows the implementation of an application that allows the user to control CST Studio Suite software with a graphical user interface designed in MATLAB in order to generate antenna arrays.

The application's input parameters are: antenna type, array type, visualization mode, tolerance, phase shift, number of antenna elements, antenna dimensions, directivity, azimuth angle and elevation angle.

The application's output is the array's element configuration that satisfies the input established by the user.

Chapter one briefly describes antenna theory, emphasizing on arrays and their operation principle.

In the second chapter the design process is presented, there is a full description of the connection between MATLAB and CST Studio Suite. Also, a complete analysis of the algorithms that are implemented in order to compute directivity, is shown.

Chapter three presents the results obtained from the simulation process. There is also a detailed analysis and error calculation.

Chapter four discusses the conclusions and recommendations of this work.

KEYWORDS: MATLAB, CST Studio Suite, antenna array, directivity, dipole, patch.

1 INTRODUCCIÓN

La constante evolución de las comunicaciones inalámbricas ha permitido el desarrollo de tecnologías móviles de bajo costo que interconectan usuarios de manera instantánea en posiciones geográficas distintas. Una de las consecuencias más evidentes es la gran popularidad que han adquirido los teléfonos inteligentes a nivel mundial. Debido a esto, existe un constante desarrollo de la red celular, a partir de la cual se deriva la tendencia de interconectar un volumen mucho mayor de dispositivos dando origen a las redes masivas de sensores y nuevos conceptos como “Internet de las Cosas” o “Ciudades inteligentes”. Además, la industria anticipa un incremento de estas tendencias en los años subsiguientes [1].

La próxima generación de redes inalámbricas deberá contar con la capacidad de soportar condiciones de movilidad, altas tasas de transmisión, menor latencia, mejor aprovechamiento del espectro electromagnético y soporte simultáneo y personalizado para un mayor número de usuarios [2]. Una de las alternativas para satisfacer dichos requerimientos es la utilización de múltiples arreglos de antenas tanto en transmisión como en recepción permitiendo implementar conceptos de diversidad y multiplexión espacial [3].

En este contexto, la conformación de arreglos de antenas que realicen *beamforming* y/o *beamscanning* resulta atractivo para nuevas implementaciones, principalmente en el campo de aplicaciones que utilizan ondas milimétricas [4]. Basado en la teoría tradicional de antenas y en la óptica geométrica, el diseño matemático de estructuras para la conformación de haces directivos resulta sencillo tomando en cuenta las dimensiones de un arreglo o la geometría de un componente pasivo (lente), respectivamente [5]. Sin embargo, este procedimiento, al utilizar antenas reales, implica análisis (muchas veces iterativo) por medio de simulaciones para optimizar un producto final. Bajo esta premisa se ve la necesidad de sintetizar el proceso partiendo del resultado requerido (característica de radiación) para la obtención de un arreglo de antenas.

En el presente proyecto de titulación se desarrollará una interfaz gráfica en MATLAB, la cual controlará la herramienta de simulación CST Studio Suite con el fin de generar arreglos de antenas cuyas características permitan obtener un lóbulo de radiación previamente definido por el usuario en términos de apuntamiento y directividad, o en su defecto llegar a la mejor aproximación bajo un parámetro de tolerancia dado.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

- Desarrollar una interfaz gráfica en MATLAB que permita controlar la herramienta de simulación CST Studio Suite para la obtención de estructuras de arreglos de antenas basadas en requerimientos previamente especificados por el usuario.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Describir brevemente los tipos de arreglos.
- Controlar el simulador CST Studio Suite a través de MATLAB.
- Optimizar la distribución de las antenas pertenecientes a un arreglo para la obtención de un lóbulo de radiación previamente determinado.
- Implementar una interfaz gráfica en MATLAB para la creación de estructuras en CST Studio Suite basadas en la optimización realizada.

1.2 ALCANCE

En el presente proyecto de titulación se generará una interfaz gráfica en MATLAB que permita al usuario ingresar los parámetros principales del lóbulo de radiación que desea obtener en términos de apuntamiento, directividad y tolerancia. Como salida se presentará el número de antenas necesario, así como la disposición de las mismas. Las antenas que conformarán las estructuras son aquellas que presentan, de manera general, características de radiación omnidireccional (dipolos de media longitud de onda) y directivas (antenas tipo *patch*).

Para esto se desarrollará un algoritmo en MATLAB con el objetivo de generar arreglos de antenas, realizar la simulación respectiva, almacenar los resultados y en base a los mismos, modificar los parámetros correspondientes. Este proceso será recreado de manera iterativa hasta conseguir el lóbulo de radiación deseado o en su defecto la mejor aproximación posible. Además, será realizado el cálculo del error obtenido en cada iteración.

En primer lugar, serán detallados de manera breve los diferentes tipos de arreglos de antenas, así como su influencia para la conformación de lóbulos de radiación, además se presentará el diagrama de bloques que describe la interconexión MATLAB-CST Studio Suite.

Seguidamente, se presentará la metodología para la implementación de las estructuras en CST Studio Suite cumpliendo con los requerimientos de usuario ingresados a través de MATLAB. El análisis será limitado para arreglos de antenas en dos dimensiones.

Finalmente, se realizarán pruebas de funcionamiento con la aplicación desarrollada utilizando distintos lóbulos de radiación.

En el presente trabajo la interfaz gráfica en MATLAB a desarrollar constituye el producto final demostrable.

1.3 MARCO TEÓRICO

En el estudio de antenas, las condiciones para las cuales una antena ha sido diseñada, generan limitaciones a nivel de desempeño, en especial al trabajar con frecuencias que superan la banda de UHF. En esta instancia, el ancho de banda disponible es mucho mayor, sin embargo, las pérdidas que se producen en la señal transmitida se incrementan al elevar la frecuencia [6]. Esto representa un gran inconveniente en el desarrollo de antenas para tecnologías inalámbricas de última generación debido a la constante demanda de tasas de transmisión que superen varias unidades de Gbps, por ejemplo en el caso del estándar 802.11ad para redes de área local donde se proponen frecuencias de operación en la banda de 60 GHz [7]. Los elementos radiantes cuentan con condiciones fijas de ganancia y directividad, por lo tanto, no son capaces de satisfacer estos requerimientos de forma individual.

En este aspecto, si se requieren especificaciones que no pueden ser cubiertas con la utilización de un único elemento es necesario implementar arreglos de antenas, los cuales además de incrementar dichas características, permitirán la conformación de haces directivos, es decir generar lóbulos de radiación que puedan ser modificados ya sea de forma mecánica o electrónica para cubrir los requisitos de diseño.

1.3.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LOS ARREGLOS DE ANTENAS

Un arreglo de antenas consiste en la utilización de varios elementos transmisores o receptores, en una configuración geométrica y eléctrica determinada. El patrón de radiación obtenido será el resultado de la suma vectorial de los componentes de campo eléctrico y magnético de cada elemento que conforma el arreglo. La interferencia constructiva de estos campos da como resultado mayor directividad del lóbulo principal y el apareamiento de *grating lobes*, en contraparte, la interferencia destructiva permitirá eliminar o reducir en magnitud componentes no deseados como lóbulos secundarios y *grating lobes*.

Si se desea modificar el patrón de radiación, deben tomarse en consideración los siguientes parámetros:

- Disposición geométrica del arreglo.
- Patrón de radiación de cada elemento.
- Alimentación de cada elemento (amplitud y fase).

1.3.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS ARREGLOS DE ANTENAS

En esta sección se describen de manera breve las principales características que deben ser consideradas al analizar arreglos de antenas.

1.3.2.1 Directividad

Relación entre la intensidad de radiación emitida por una antena en una dirección determinada (si la dirección no ha sido especificada se asume la dirección de máxima radiación) en comparación con la intensidad de radiación isotrópica [5].

1.3.2.2 Ganancia

Relación entre la potencia radiada por una antena en una dirección determinada en comparación con la potencia emitida por una antena de referencia, por lo general el radiador isotrópico y el dipolo de media longitud de onda son utilizados como elementos de referencia.

Según los estándares de la IEEE, la ganancia de una antena no debe incluir en sus cálculos las pérdidas por desacoplamiento de impedancias o por polarización. En estas situaciones se introduce el término ganancia completa (*realized gain*) que toma en cuenta dichas pérdidas [5].

1.3.2.3 Eficiencia de radiación

Relación entre la potencia aceptada por un elemento radiante y la potencia de salida, este parámetro permite evaluar el nivel de pérdidas por conducción y dieléctricas existentes.

Las pérdidas se deben principalmente a propiedades intrínsecas de los materiales no ideales, resistencia interna en conductores y permitividad en dieléctricos respectivamente.

1.3.2.4 Ancho del haz

Apertura angular obtenida entre dos puntos de igual valor de potencia medidos en el lóbulo principal del patrón de radiación en coordenadas polares.

En el estudio de antenas se utilizan dos casos como puntos de referencia.

1.3.2.4.1 HPBW (*half power beam width*)

Se mide el ancho del haz a partir de los puntos de media potencia, generalmente cuando se menciona el ancho del haz sin ninguna identificación adicional se asume que se hace referencia a este caso [5].

1.3.2.4.2 FNBW (*first null beam width*)

Se mide el ancho del haz a partir de los puntos en los cuales la potencia es igual a cero.

1.3.2.5 Ancho de banda

Rango de frecuencias dentro del cual el desempeño de una antena cumple con una especificación dada con respecto a uno o varios parámetros. Generalmente se toma en cuenta el ancho de banda alrededor de una frecuencia central, la cual coincide con la frecuencia de resonancia del elemento radiante [5].

Al variar la frecuencia, las características de una antena pueden verse afectadas de distintas maneras, es decir pueden ser altamente susceptibles a estos cambios o, por el contrario, no sufrir mayores alteraciones. Debido a esto se pueden utilizar dos criterios para establecer el ancho de banda.

1.3.2.5.1 Ancho de banda dado por el patrón de radiación

Incluye parámetros como ganancia, nivel de lóbulos secundarios, ancho del haz, polarización y dirección del lóbulo principal. Por ejemplo, de 1 GHz a 2 GHz el ancho del haz es de 30°, es decir, ancho de banda igual a 1 GHz.

1.3.2.5.2 Ancho de banda dado por el acoplamiento de impedancias

Incluye parámetros como impedancia de entrada y eficiencia de radiación. Por ejemplo, pérdidas por reflexión de -15 dB entre 10 GHz y 20 GHz, es decir, ancho de banda de 10 GHz.

1.3.2.6 Polarización

Propiedad de las ondas electromagnéticas que describe la variación en dirección y magnitud del vector de campo eléctrico en función del tiempo en la dirección de propagación. En otras palabras, la curva que se genera al unir los puntos extremos de los vectores que representan el campo eléctrico instantáneo desde un plano de observación perpendicular a la dirección de propagación se conoce como polarización. Según la forma que tome la curva, se pueden identificar varios tipos de polarización, la Figura 1.1 ilustra esta clasificación.

1.3.2.6.1 Polarización lineal

Se da cuando el lugar geométrico descrito por punta del vector de campo eléctrico describe una línea recta. Para que se cumpla esta condición, el vector de campo eléctrico debe contar con un solo componente, o dos componentes ortogonales que se encuentren en fase o desfasadas 180° .

Un parámetro importante es el ángulo de inclinación, según este valor se pueden rescatar tres casos relevantes:

- Polarización lineal vertical si el ángulo de inclinación es de 90° .
- Polarización lineal horizontal si el ángulo de inclinación es de 0° .
- Polarización *slant* si el ángulo de inclinación es de $\pm 45^\circ$.

1.3.2.6.2 Polarización circular

Se da cuando el lugar geométrico descrito por el vector de campo eléctrico describe una circunferencia. Para que se cumpla esta condición, el vector de campo eléctrico debe contar con dos componentes ortogonales que tengan la misma magnitud y cuenten con una diferencia de fase que sea múltiplo de 90° .

1.3.2.6.3 Polarización elíptica

Se da cuando el lugar geométrico descrito por el vector de campo eléctrico describe una elipse. Ya que las polarizaciones circular y lineal son casos particulares de la polarización elíptica, el vector de campo eléctrico debe contar con dos componentes ortogonales que pueden ser de igual o distinta magnitud, además de no cumplir con las condiciones para ser considerada polarización lineal o circular.

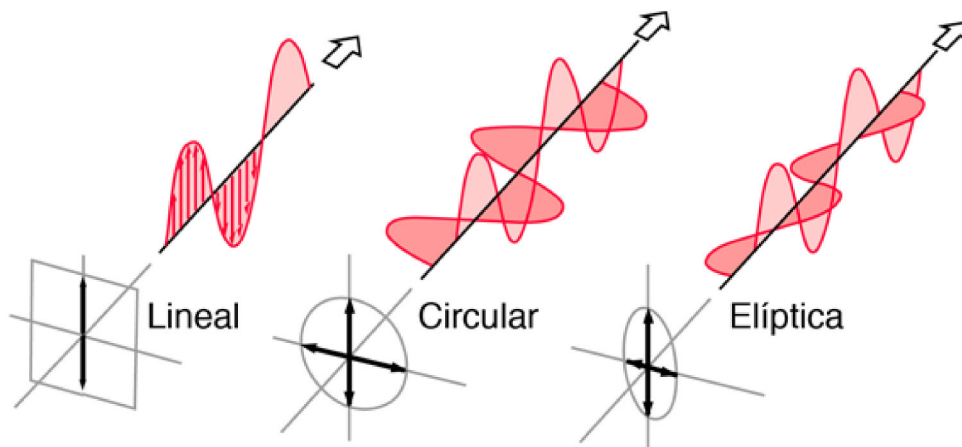


Figura 1.1. Distribución del vector campo eléctrico para los distintos tipos de polarización [8].

Tanto en polarización elíptica como circular se debe tomar en cuenta el sentido de la rotación del vector de campo eléctrico, para esto es necesario establecer un punto de vista en un plano perpendicular a la dirección de propagación ubicado en una posición a partir de la cual la onda electromagnética se aleja del observador.

Si la rotación se produce en sentido horario se denomina polarización a la derecha, si ocurre lo contrario se denomina polarización a la izquierda. En el caso exclusivo de polarización circular se denominan RHCP (*right hand cross polarization*) y LHCP (*left hand cross polarization*) respectivamente, tal como se muestra en la Figura 1.2 [9].

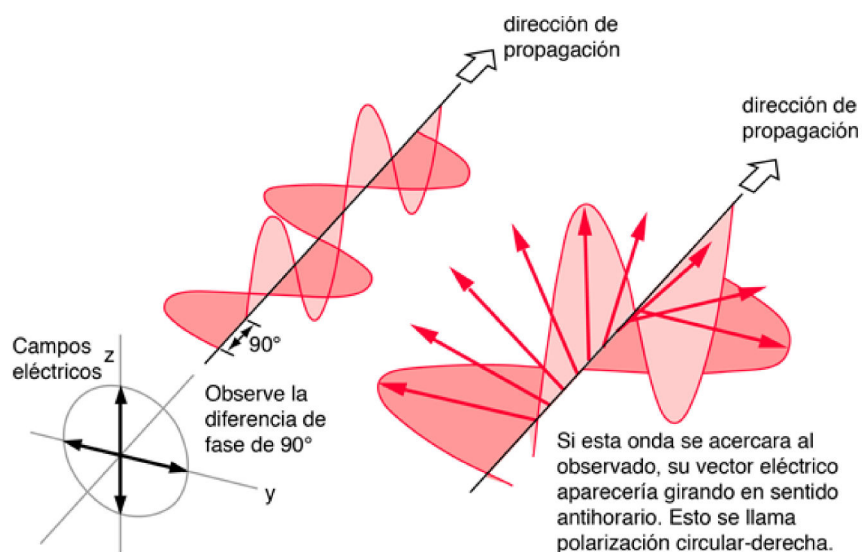


Figura 1.2. Ejemplo de RHCP tomando en cuenta que la onda electromagnética se acerca hacia el punto de observación [8].

1.3.2.6.4 **Co-polarización**

Es posible representar la polarización de una antena de manera general a través de dos componentes, si se toma como referencia cualquier punto en el campo lejano.

La co-polarización representa los componentes predominantes de la polarización de la onda radiada o recibida por una antena.

1.3.2.6.5 **Polarización cruzada**

Polarización ortogonal con respecto a algún tipo de polarización, por lo general haciendo referencia a la co-polarización.

1.3.2.7 **Side lobe level (SSL)**

Es la diferencia entre el valor de potencia máximo del lóbulo principal y el valor de potencia máximo de un lóbulo secundario expresada en decibelios, en la Figura 1.3 se muestra una representación gráfica de SLL.

Para los cálculos generalmente se utiliza el lóbulo secundario de mayor amplitud, en este caso se denomina FSSL (*first side lobe level*) [9].

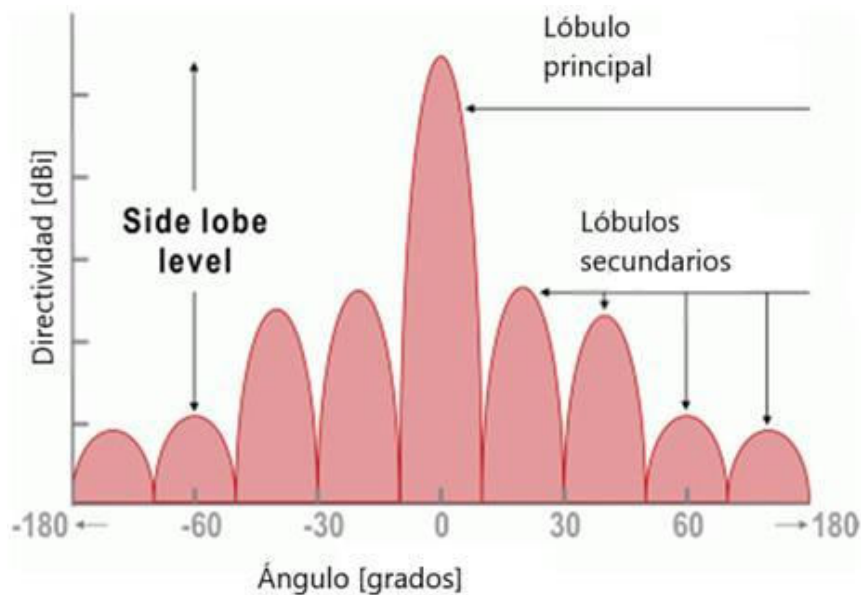


Figura 1.3. Ejemplo de SSL [10].

1.3.2.8 Grating lobes

La Figura 1.4 muestra una gráfica en coordenadas polares con la presencia de dos *grating lobes*, los cuales son lóbulos de radiación no deseados que se comparan en magnitud al lóbulo principal. Dado que el factor de arreglo es una función periódica, un espaciamiento excesivo entre elementos producirá lóbulos no deseados dentro de los cuales es probable que el valor máximo de la función se repita varias veces [9].

Por lo tanto, esta distancia depende exclusivamente del tipo de arreglo a utilizar. Por ejemplo, en arreglos del tipo *broadside* no debe superar una longitud de onda.

Debido a que no se puede modificar el patrón de radiación de cada elemento, otra opción para la disminución de *grating lobes* es modificar el factor de arreglo, esto se consigue al variar la amplitud incidente en cada antena, de tal manera que la contribución de cada elemento ya no sea uniforme y permita anular los máximos repetidos por la suma vectorial de campos [9].

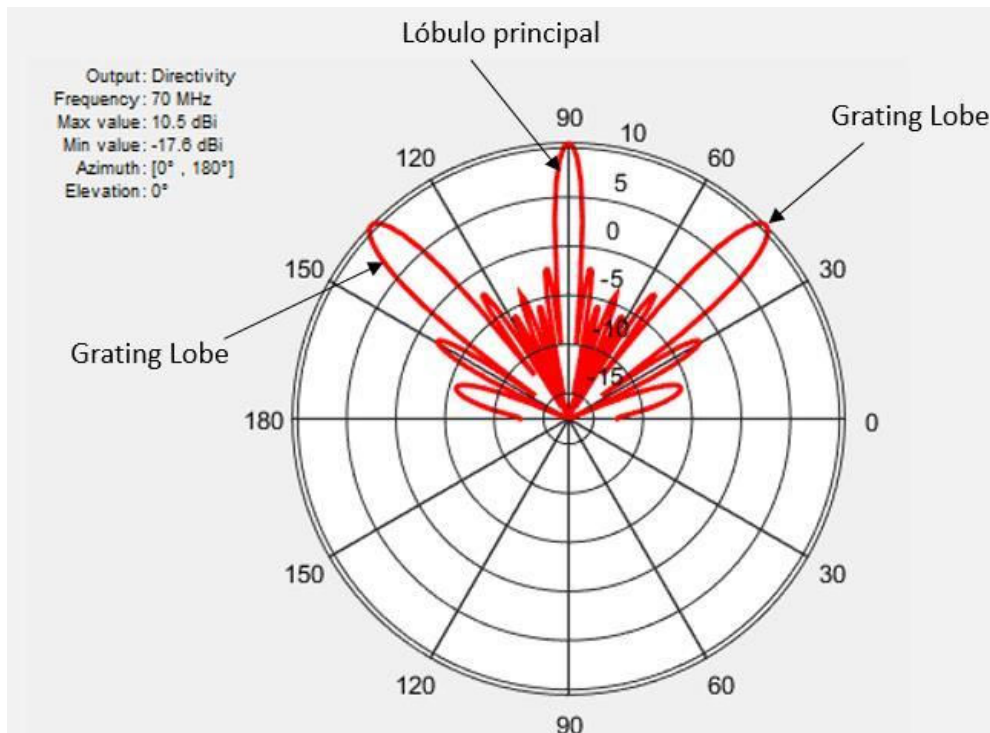


Figura 1.4. Patrón de radiación correspondiente a un arreglo lineal de 7 elementos con separación de 1,5 longitudes de onda [11].

1.3.2.9 Factor de arreglo

Función matemática que representa el patrón de radiación de un arreglo de antenas considerando que todos los elementos que lo componen son radiadores isotrópicos.

El factor de arreglo depende de los siguientes parámetros:

- Geometría del arreglo (incluye número de elementos y espaciamiento entre elementos).
- Alimentación de cada elemento (amplitud y fase).

La Tabla 1.1 muestra de forma detallada el factor de arreglo tomando en cuenta la distribución geométrica de los elementos.

1.3.2.10 Arreglos lineales de antenas

Cuando la disposición espacial de las antenas que conforman el arreglo en cuestión forma una línea recta se conoce como arreglo lineal. La disposición de los elementos radiantes puede ser por acoplamiento eléctrico o magnético. Pueden ser clasificados según sus características de radiación.

Tabla 1.1. Factor de arreglo en función de la distribución geométrica de los elementos que lo conforman.

| Tipo de arreglo de antenas | Factor de arreglo |
|----------------------------|---|
| Lineal | $\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \theta + \beta_x)}$ |
| Planar rectangular | $FA = \sum_{n=1}^N I_{n1} \left[\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \theta + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \cos \theta + \beta_y)}$ |

Donde

N : número de elementos en el eje x .

M : número de elementos en el eje y .

I_{n1} : alimentación del n -ésimo elemento (amplitud).

I_{m1} : alimentación del m -ésimo elemento (amplitud).

d_x : separación de los elementos en el eje x .

d_y : separación de los elementos en el eje y .

β_x : alimentación del m -ésimo elemento (fase).

β_y : alimentación del n -ésimo elemento (fase).

$k \sin \theta \cos \theta$: patrón de radiación del elemento isotrópico.

El patrón de radiación total del arreglo se puede obtener al multiplicar el factor de arreglo por el patrón de radiación correspondiente al tipo de antenas utilizado.

1.3.2.10.1 Arreglo *broadside*

En un arreglo lineal de antenas, cuando se produce un lóbulo de radiación perpendicular a la línea de referencia sobre la cual se encuentran posicionados los elementos radiantes, dicho arreglo se denomina arreglo *broadside*.

La Figura 1.5 muestra el patrón de radiación de un arreglo *broadside*.

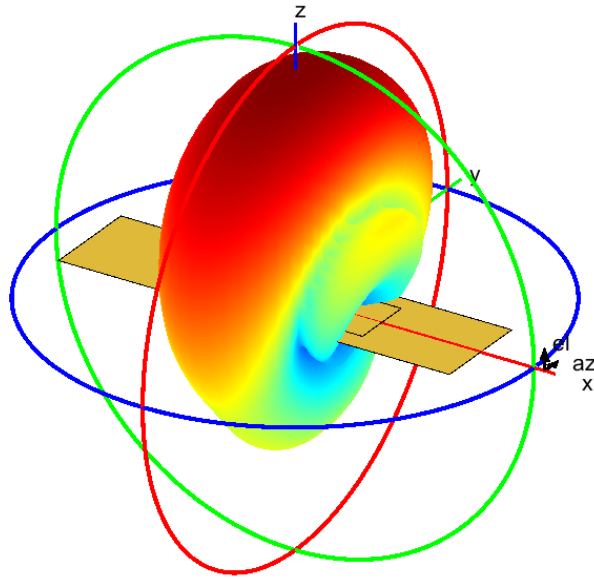


Figura 1.5. Arreglo *broadside* de 4 elementos tipo *patch* posicionados a lo largo del eje x.

Para que este patrón de radiación sea posible, es indispensable cumplir con las siguientes condiciones:

- Las señales incidentes o radiadas en cada elemento del arreglo deben contar con la misma fase, para esto se pueden utilizar redes de alimentación cuya configuración asegure que todas las señales recorran la misma distancia garantizando así que no exista diferencia de fase.
- El espaciamiento entre los elementos debe realizarse en función del patrón de radiación que se desea obtener. Mientras mayor sea este parámetro mayor será el número de lóbulos secundarios presentes, además este parámetro nunca debe superar la distancia de una longitud de onda para garantizar que no existan duplicados de lóbulo principal [9].

1.3.2.10.2 Arreglo *endfire*

Se denomina arreglo *endfire* a un arreglo de antenas lineal en el cual el patrón de radiación resulta en dirección paralela a la línea de referencia sobre la cual se encuentran posicionados los elementos radiantes, tal como se ilustra en la Figura 1.6.

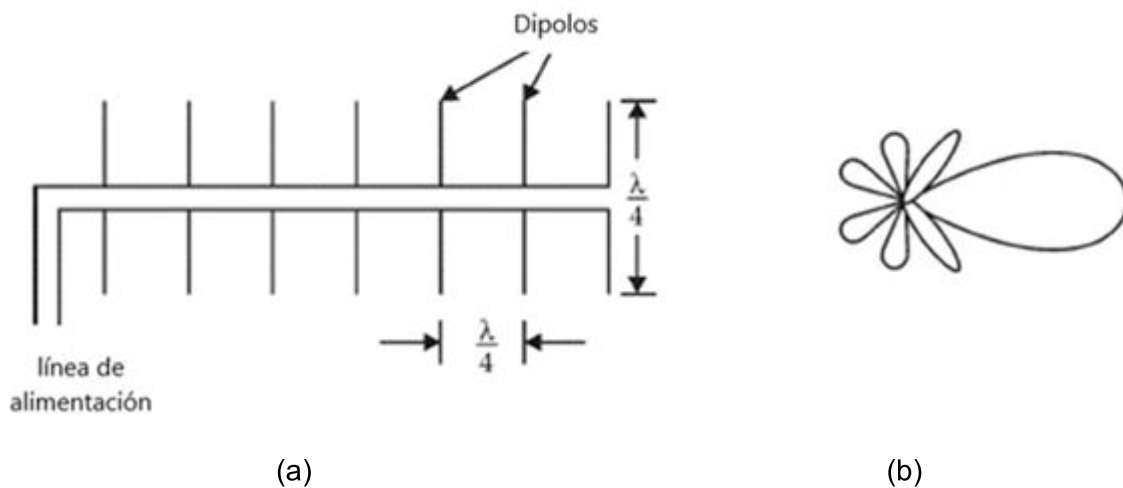


Figura 1.6. (a) Arreglo *endfire* de antenas dipolo. (b) Patrón de radiación [12].

Para cumplir con esta condición se tienen los siguientes requisitos:

- Las señales incidentes o radiadas en cada elemento del arreglo deben contar con una diferencia de fase constante, para esto se pueden utilizar redes de alimentación que cuenten con desplazadores de fase, o beneficiarse del acoplamiento mutuo al incluir elementos parásitos como es el caso de un arreglo Yagi-Uda.
- El espaciamiento entre los elementos debe realizarse en función del patrón de radiación que se desea obtener. Mientras mayor sea este parámetro mayor será el número de lóbulos secundarios presentes, además el espaciamiento nunca debe superar la distancia de media longitud de onda para garantizar que no existan duplicados de lóbulo principal [9].

1.3.2.10.3 Arreglo Hansen-Woodyard

En 1983 William Hansen y John Woodyard demostraron que es posible incrementar la directividad de un arreglo *endfire*. Esto se consigue aplicando a cada elemento una diferencia de fase adicional que sea ligeramente mayor al retardo de fase que una onda electromagnética experimenta al viajar en dirección paralela a la línea de referencia del arreglo de antenas. La Figura 1.7 ilustra el aumento de directividad obtenido al utilizar esta configuración.

Sin embargo, la reducción del ancho del haz del lóbulo principal implica la aparición de lóbulos no deseados. Para contrarrestar este inconveniente el espaciamiento entre elementos no debe exceder la distancia de un cuarto de longitud de onda [9].

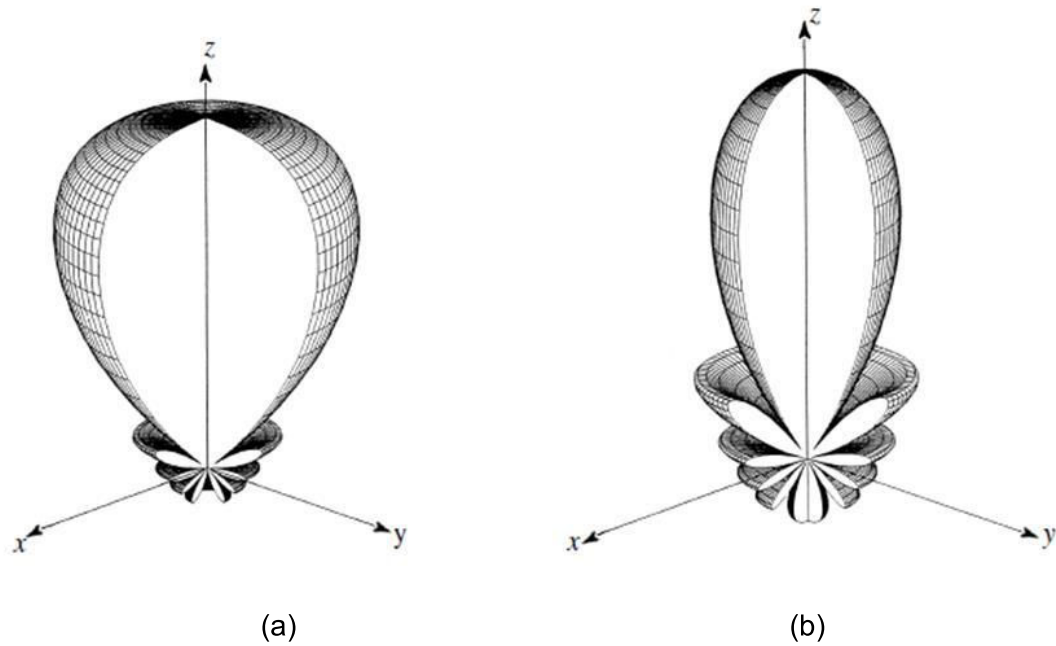


Figura 1.7. Comparación entre arreglos *endfire*. (a) Arreglo *endfire* tradicional, (b) Arreglo *endfire* de alta directividad [5].

1.3.2.10.4 Arreglos planares

Al realizar una distribución espacial en dos dimensiones de los elementos radiantes sobre una superficie plana se obtiene un arreglo planar de antenas. Las geometrías más utilizadas en este tipo de configuraciones son rectangular y circular [5].

Para simplificar el análisis puede ser considerado como un arreglo lineal de arreglos lineales en el cual el patrón de radiación estará dado por la superposición de las contribuciones de radiación de cada uno de los elementos individuales que conforman el arreglo. La Figura 1.8 muestra un arreglo planar de antenas utilizado en comunicaciones celulares 5G.

1.3.2.10.5 Arreglos conformados

En muchas ocasiones, los arreglos de antenas cuentan con condiciones de diseño a las cuales deben ser adaptadas para su posterior implementación en una superficie que no es necesariamente plana, como puede ser el caso de aplicaciones para automóviles, misiles o aviones en los cuales la forma del arreglo debe favorecer un diseño aerodinámico, o en el caso de teléfonos móviles, o puntos de acceso inalámbrico en los cuales se requiere cobertura en varias direcciones [13][14].

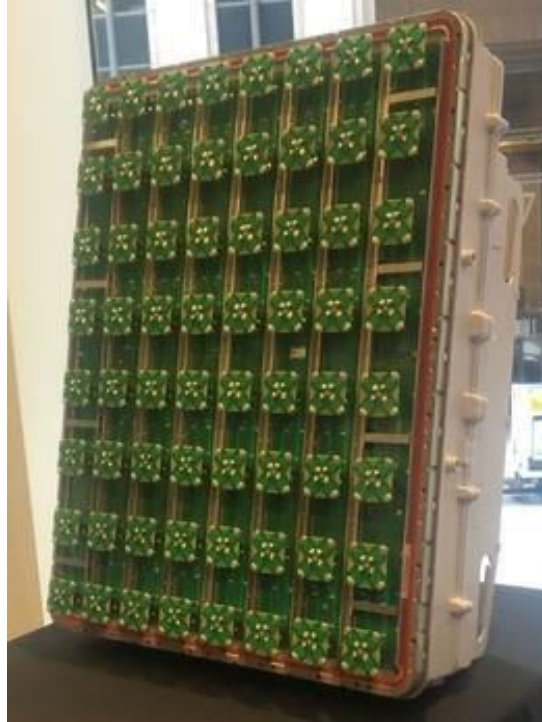


Figura 1.8. Arreglo planar MIMO masivo para 5G de 64 elementos con frecuencia de operación de 2.5 GHz [15].

En la Figura 1.9 se puede apreciar un arreglo de antenas distribuido sobre la superficie de un tronco de cono.

Debido a la distribución espacial en tres dimensiones, el análisis de este tipo de arreglos requiere métodos matemáticos complejos, sin embargo, para simplificar este proceso, se pueden aplicar los siguientes criterios de clasificación:

- Si las dimensiones del arreglo son pequeñas en relación con el radio de curvatura, entonces se puede tratar como un arreglo planar.
- Si las dimensiones del arreglo son significativamente mayores en comparación con el radio de curvatura, el factor de arreglo y el patrón de radiación de cada elemento deben ser analizados de manera conjunta. Se debe realizar un análisis por sectores con el fin de identificar el nivel de influencia de cada elemento para conformar el lóbulo de radiación deseado. Además, se debe considerar que la distribución de antenas a través de una superficie irregular producirá polarización cruzada, lóbulos indeseados y una considerable reducción de la directividad, especialmente al aumentar el número de elementos del arreglo.



Figura 1.9. Arreglo conformado para comunicaciones satelitales en órbita baja con frecuencia de operación de 8 GHz [16].

1.3.2.10.6 Arreglos en fase

Arreglo de antenas en el cual, la excitación de cada uno de los elementos que lo conforman puede ser controlada de forma individual. Esto permite la conformación de haces, es decir, generar lóbulos de radiación definidos por el usuario.

Para modificar la excitación de los elementos es necesaria la implementación de redes de alimentación capaces de realizar estos cambios ya sea de forma mecánica o electrónica. Al modificar la amplitud de la señal incidente es posible alterar el patrón de radiación del arreglo, para esto se pueden utilizar atenuadores de amplitud en la red de alimentación [9]. Si lo que se desea es alterar la fase entonces pueden implementarse desplazadores de fase o simplemente modificar la longitud de las líneas de alimentación. Este tipo de estructuras en conjunto con algoritmos para procesamiento de señales son la base para el desarrollo de antenas inteligentes [5].

2 METODOLOGÍA

En el presente capítulo se describe a detalle la estructura del proyecto desarrollado.

2.1 ESTRUCTURA GENERAL

Tal como se muestra en la Figura 2.1 la aplicación se divide en tres etapas con distintas funcionalidades.

- **Interfaz Gráfica**

Permite al usuario controlar la aplicación de manera interactiva.

- **Procesamiento**

Realiza cálculos basados en los parámetros de entrada, además se encarga de la interconexión MATLAB-CST Studio Suite.

- **Simulación**

Exportación de resultados desde MATLAB y simulación en CST Studio Suite.



Figura 2.1. Estructura general de la aplicación desarrollada.

2.2 ESTRUCTURA DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

Se desarrolla una interfaz gráfica por medio de la herramienta App Designer de MATLAB, con el fin de que el usuario final sea capaz de interactuar con la aplicación de forma simple e intuitiva sin la necesidad de manipular el código fuente de la misma. El diseño consta de tres paneles principales conformados por objetos que permiten el ingreso de información y su correspondiente impresión en pantalla como se ilustra en la Figura 2.2.

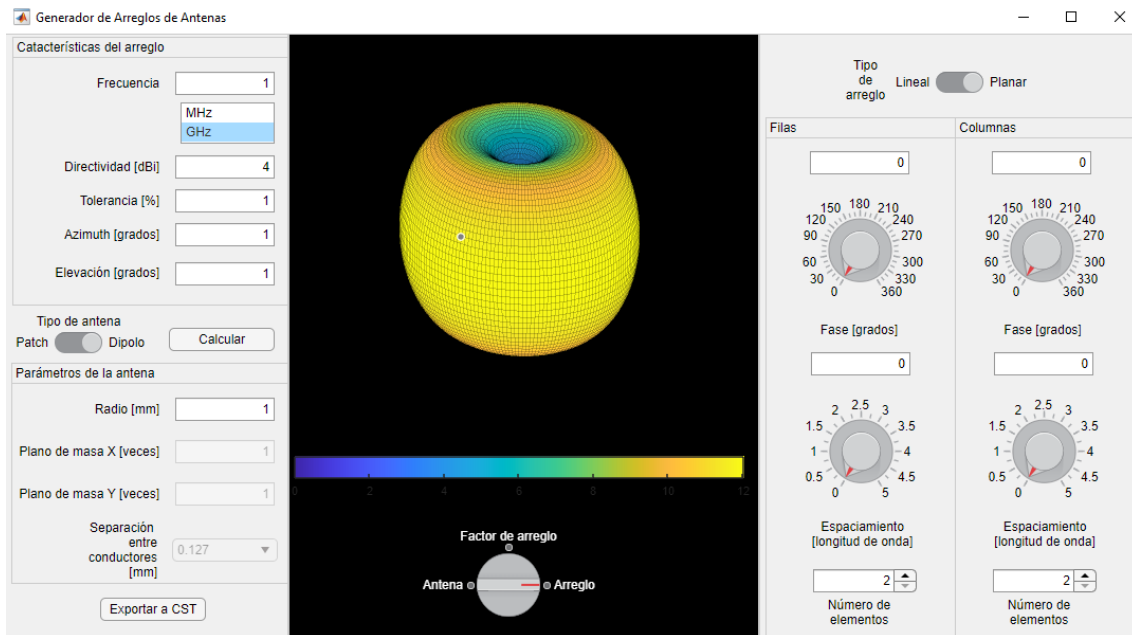


Figura 2.2. Interfaz gráfica de la aplicación desarrollada.

El panel izquierdo se muestra en la Figura 2.3 y contiene entradas de datos para las características generales de diseño tanto del arreglo como de cada elemento radiante. En primera instancia, se presentan los parámetros referentes al arreglo que son:

- **Frecuencia de operación:** Frecuencia de resonancia del arreglo de antenas en MHz y GHz respectivamente.
- **Directividad:** Valor de directividad que el usuario desea obtener con el arreglo de antenas expresado en dBi.
- **Tolerancia:** Margen de error para los cálculos realizados, es decir, es el valor mínimo de directividad aceptable por el usuario, por ejemplo, si se requiere una directividad de 10 dBi con una tolerancia del 20%, el valor mínimo aceptable será de 9,0309 dBi.

- **Azimuth:** Ángulo que indica el apuntamiento del lóbulo de radiación con respecto al plano horizontal que puede tomar valores entre 0° y 360°.
- **Elevación:** Ángulo que indica el apuntamiento del lóbulo de radiación con respecto al plano vertical que puede tomar valores entre 0° y 90°.

De modo accesorio, se adiciona un mecanismo de selección para el tipo de antena a utilizar con dos opciones posibles: dipolo y *patch*. En el primer caso, el usuario debe ingresar el valor del radio de los conductores. Antagónicamente, al elegir la antena tipo *patch*, las características a configurar son: espesor del sustrato en milímetros y dimensiones del plano de tierra en función de la estructura radiante, es decir, el factor por el cual deben multiplicarse el ancho y largo de la estructura *patch*.

Por último, se encuentran incorporados dos botones de ejecución, el botón “Calcular” inicia el proceso de optimización utilizando los valores ingresados correspondientes a las características generales del arreglo. No obstante, el botón “Exportar a CST” lleva a cabo el modelado de los elementos radiantes en CST Studio Suite.

Parámetros generales →

Características del arreglo

Frecuencia

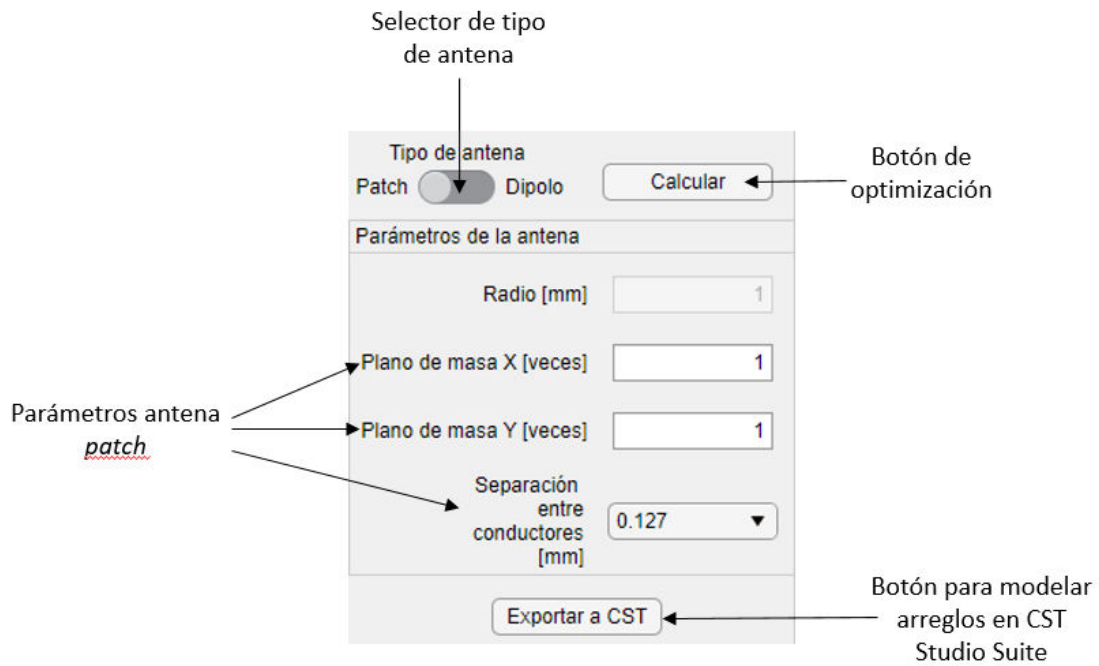
Directividad [dBi]

Tolerancia [%]

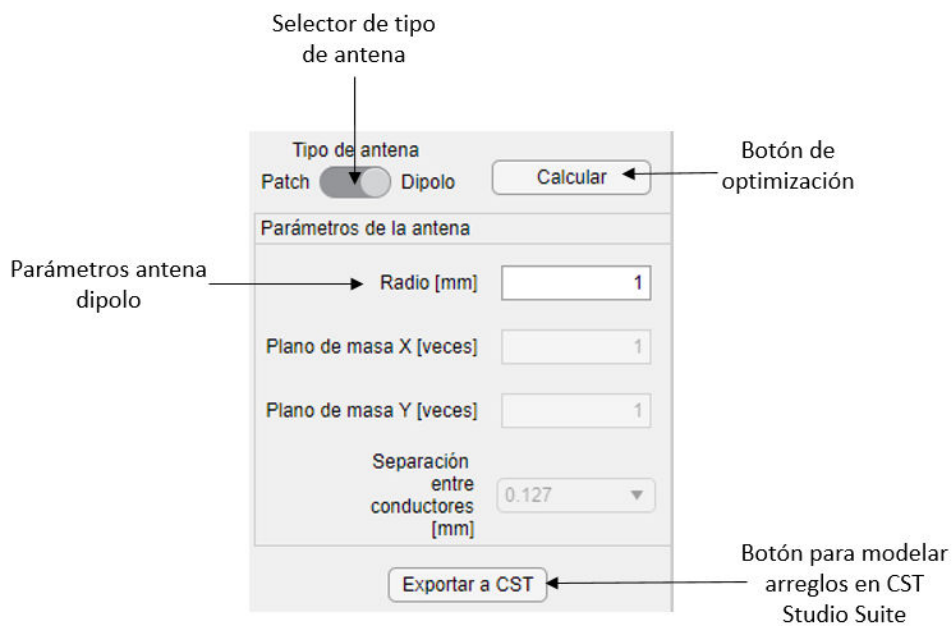
Azimuth [grados]

Elevación [grados]

(a)



(b)



(c)

Figura 2.3. Panel izquierdo de la interfaz gráfica de usuario. (a) Parámetros generales del arreglo de antenas. (b) Opciones de configuración para antena tipo *patch*. (c) Opciones de configuración para antena tipo dipolo.

El panel central se encarga de mostrar un gráfico tridimensional del lóbulo de radiación obtenido utilizando los parámetros ingresados por el usuario como se exhibe en la

Figura 2.4. Adicionalmente se incorpora un control para seleccionar el tipo de gráfico que se desea visualizar, el cual dispone de tres opciones posibles: antena, factor de arreglo y arreglo.

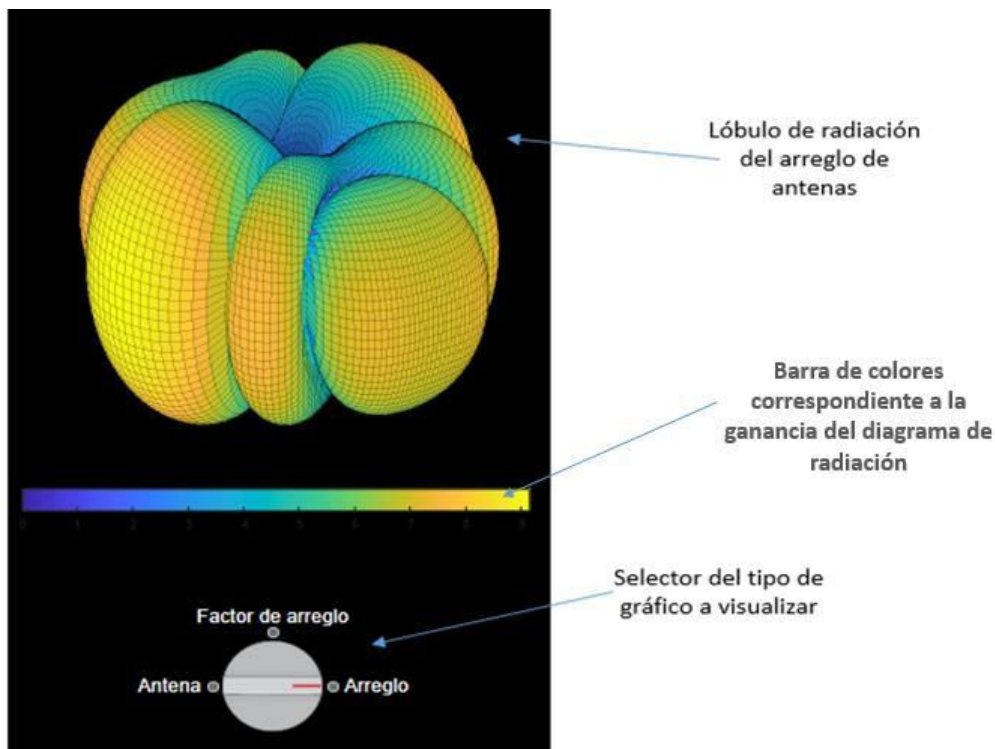


Figura 2.4. Panel central de la interfaz gráfica de usuario.

Como se aprecia en la Figura 2.5, en el panel derecho se establece un botón de selección para el tipo de arreglo que puede ser configurado como lineal o planar. Asimismo, se incluyen controles referentes a la geometría, alimentación y posicionamiento del arreglo de antenas, permitiendo al usuario definir una diferencia de fase uniforme entre 0 y 360 grados, espaciamiento entre elementos que puede variar entre 0 y 5 longitudes de onda, y establecer el número de antenas empezando por dos elementos. Estos ajustes se realizan a nivel de filas en el caso de un arreglo lineal. Si se trata de un arreglo planar los cambios se pueden llevar a cabo tanto en filas como en columnas.

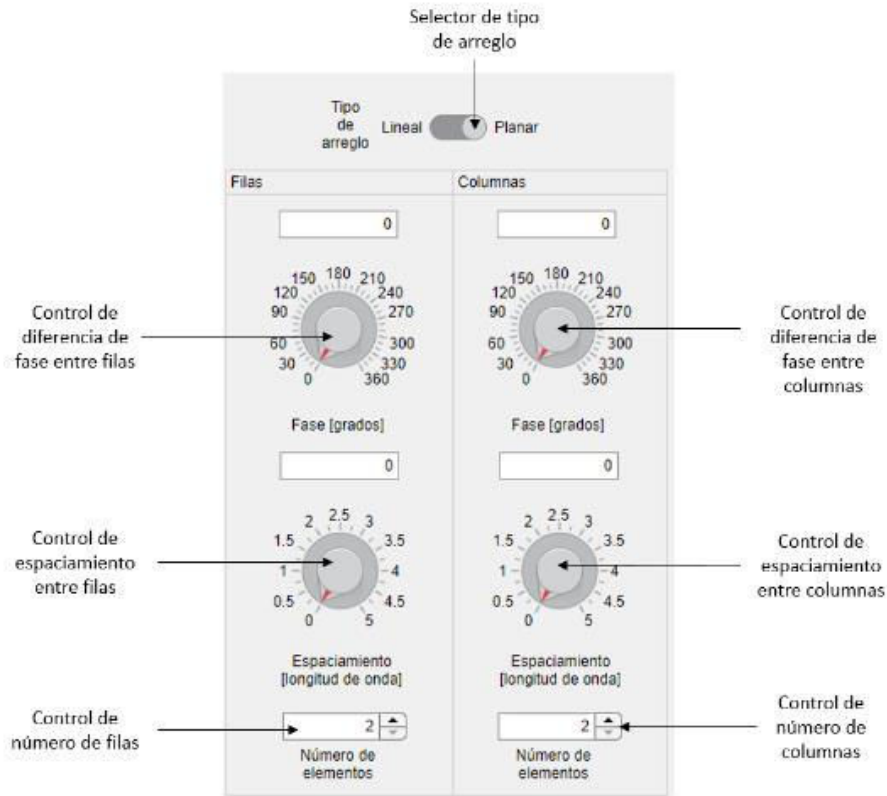


Figura 2.5. Panel derecho de la interfaz gráfica de usuario.

2.3 INTERCONEXIÓN MATLAB-CST STUDIO SUITE

El software CST Studio Suite permite el diseño asistido por computadora (CAD) de estructuras a nivel electromagnético de componentes de microondas tales como antenas.

Sin embargo, cuando se requiere la implementación de una gran cantidad de elementos el nivel de complejidad del proceso de diseño se incrementa y puede ser optimizado por medio de código. Esto es posible empleando comandos escritos en VBA (*Visual Basic for Applications*), el cual es un lenguaje de programación de macros que cuenta con la capacidad de controlar las características de una aplicación con el fin de automatizar procesos y permitir su interconexión con aplicaciones externas.

Por lo tanto, para controlar CST Studio Suite a través de MATLAB es necesario escribir los comandos VBA correspondientes, este proceso se puede optimizar con la utilización de una API (*Application Programming Interface*), la cual consta de un conjunto de funciones que facilitan al usuario la interconexión de aplicaciones. En este caso, la API permite ejecutar comandos VBA en CST Studio Suite a través de funciones en MATLAB como se muestra en la Figura 2.6.

En el presente proyecto de titulación se utiliza como base la API “hgiddenss/CST_App” disponible en el foro de la comunidad de MATLAB, desarrollada por Henry Giddens, la cual permite ejecutar simulaciones en CST Studio Suite a través de MATLAB [17].

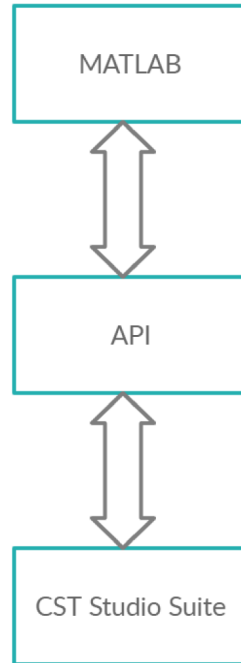


Figura 2.6. Esquema de interconexión MATLAB-CST Studio Suite.

2.4 MODELADO DE ANTENAS

El proceso de diseño para los elementos radiantes que conforman el arreglo se realiza en base a los parámetros previamente ingresados por el usuario en la interfaz gráfica.

En primera instancia, se calcula la longitud de onda utilizando la frecuencia de operación mediante la ecuación (2.1).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

Donde

λ : longitud de onda.

c : velocidad de la luz en el vacío.

f : frecuencia de operación.

Cabe destacar la utilización de milímetros como unidades de longitud tanto en la etapa de diseño como en su posterior simulación, por lo tanto, el valor de la velocidad de la luz considerado para este cometido es igual a 3×10^{11} mm/s.

Por su parte las dimensiones de los elementos se hallan en función de la longitud de onda independientemente del tipo de antena utilizado. En el presente proyecto de titulación, los radiadores empleados se catalogan en dos tipos: dipolo de media longitud de onda y *patch*.

Finalmente, para modelar las estructuras conductoras se utiliza el material conocido como “PEC” (conductor eléctrico perfecto). Como contrapartida, para representar los elementos compuestos de material dieléctrico se emplea el compuesto RT/duroid 5870 cuya permitividad es igual a 2,33 [18].

2.4.1 ANTENA TIPO DIPOLO DE MEDIA LONGITUD DE ONDA

La Figura 2.7 muestra una antena tipo dipolo de media longitud de onda. La misma está conformada por dos elementos conductores colineales separados entre sí por una fuente de alimentación. La longitud total de los dos conductores adicionando la fuente de alimentación es igual a la mitad del valor de la longitud de onda de operación.

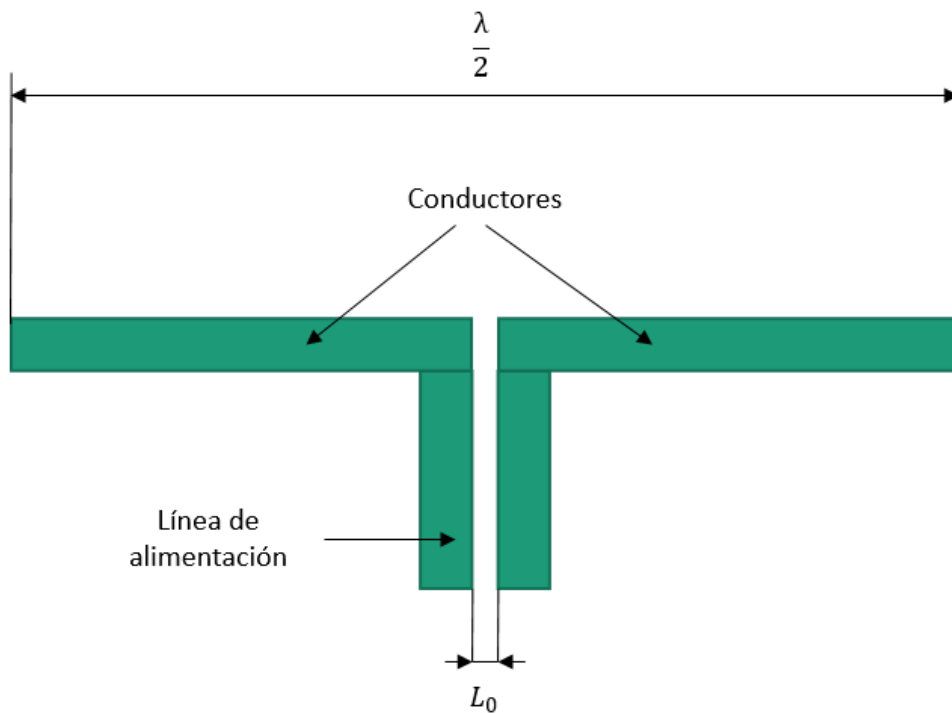


Figura 2.7. Estructura de una antena tipo dipolo de media longitud de onda.

No obstante, para representar los elementos conductoras se utilizan dos cilindros de radio definido por el usuario y cuya longitud está dada por la ecuación (2.2).

$$L = \frac{\lambda}{4} - \frac{L_0}{2} \quad (2.2)$$

Donde

L : longitud del cilindro.

λ : longitud de onda de operación.

L_0 : espacio ocupado por la fuente de alimentación.

Por su parte, es necesario garantizar un óptimo funcionamiento de la antena diseñada, para lo cual el espacio ocupado por la fuente de alimentación debe ser mucho menor que la longitud de los cilindros conductores. Se aplica el criterio de diseño $L_0 = \frac{\lambda}{20}$ por lo tanto se cumple con la condición mencionada.

La Figura 2.8 ilustra el resultado obtenido al modelar la antena dipolo.

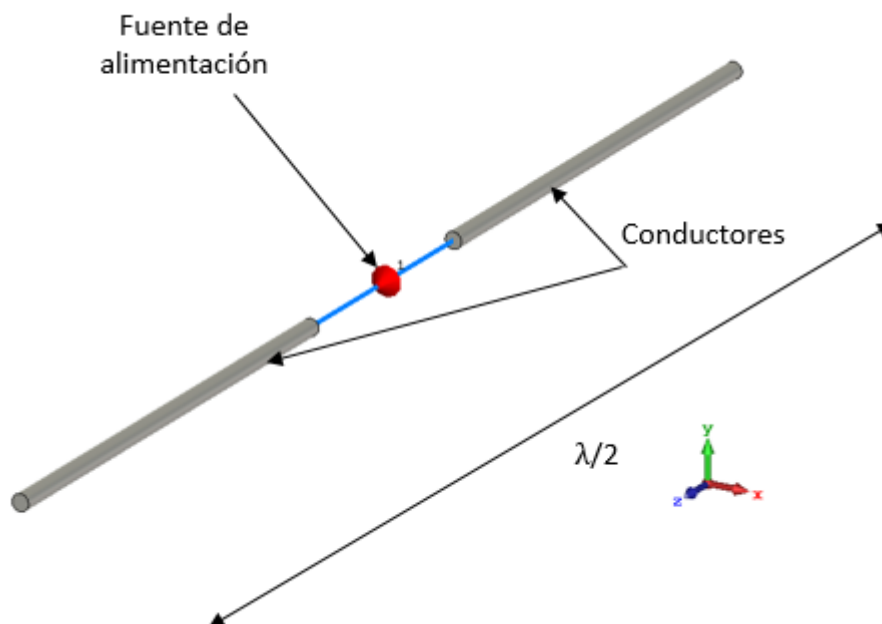


Figura 2.8. Antena dipolo de 10 mm de radio a una frecuencia de operación de 1 GHz modelada en CST Studio Suite.

2.4.2 ANTENA TIPO *PATCH*

Este tipo de antena se encuentra conformada por dos láminas conductoras paralelas que están separadas entre sí por un material dieléctrico que toma el nombre de sustrato. El conductor inferior se denomina plano de masa y el valor de sus dimensiones nunca puede ser menor que el de su contraparte conocida como parche. El parche es de menor tamaño que el plano de masa como se aprecia en la Figura 2.9.

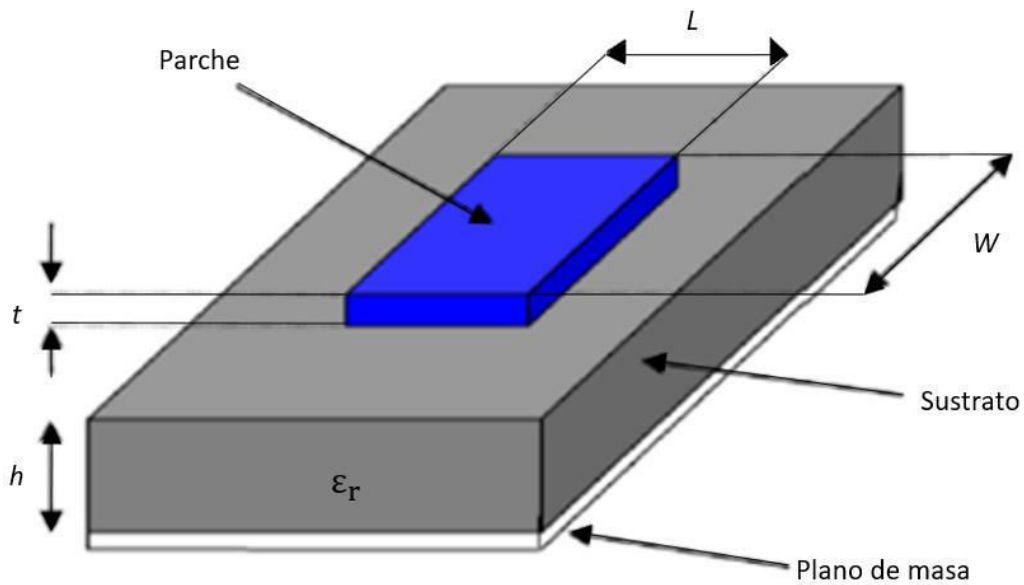


Figura 2.9. Estructura de una antena *patch* [19].

Es importante resaltar que la fuente de alimentación debe ser correctamente conectada en ambos conductores, en otras palabras, el terminal positivo se enlaza al parche, por lo cual, el terminal negativo deberá unirse al plano de masa.

2.4.2.1 Diseño de la línea de alimentación

La excitación de los elementos tipo *patch* se realiza a través de cable coaxial de 50 Ω de impedancia, en la Figura 2.10 se ilustra una antena *patch* alimentada por un cable coaxial.

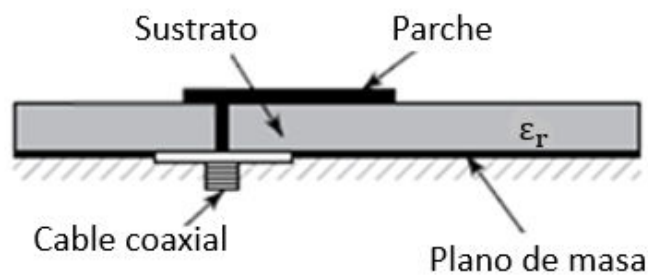


Figura 2.10. Antena *patch* excitada por medio de un cable coaxial [5].

La Figura 2.11 muestra el corte transversal de un cable coaxial. Se puede apreciar que está conformado de dos conductores concéntricos separados por material dieléctrico.

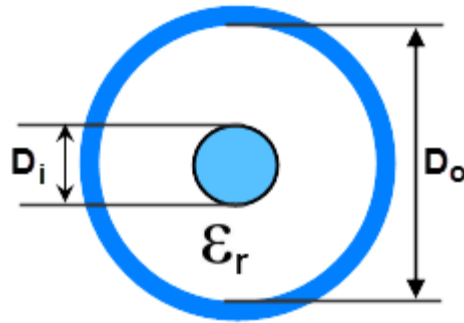


Figura 2.11. Estructura de un cable coaxial (corte transversal) [20].

La impedancia del cable está dada por la ecuación (2.3).

$$z_0 = \frac{138 \log_{10} \left(\frac{D_o}{D_i} \right)}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.3)$$

Donde

z_0 : impedancia.

D_o : diámetro del dieléctrico.

D_i : diámetro del conductor interno.

ϵ_r : permitividad del dieléctrico.

En última instancia, el diámetro del conductor interno se calcula modificando la ecuación (2.3). Al emplear una impedancia de 50Ω , y establecer el diámetro del dieléctrico en 3.57 mm con permitividad de 2,33 se obtiene como resultado 1 mm que corresponde al diámetro del conductor interno.

Se plantea entonces el modelado del cable coaxial a través de 3 cilindros concéntricos con diámetros definidos por los valores previamente expuestos y cuya longitud debe ser mayor igual que la altura total de la antena tipo *patch*. En este caso se establece dicho valor en 20 mm. Además, se define el espesor del conductor externo en 0,017 mm.

2.4.2.2 Diseño de la antena tipo *patch*

Tal como se observa en la Figura 2.9 una antena tipo *patch* se encuentra segmentada en tres componentes principales: parche, sustrato y plano de masa.

Tanto el parche como el plano de masa cuentan con un espesor de 0,017 mm.

Es importante acotar que la lámina conductora conocida como parche cuenta con dos dimensiones relacionadas con la frecuencia de operación: longitud y ancho. Estos parámetros se calculan en concordancia con las ecuaciones (2.4), (2.5), (2.6) y (2.7).

$$W = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.4)$$

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - 2\Delta L \quad (2.5)$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (2.6)$$

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W}\right]^{-1/2} \quad (2.7)$$

Donde

W : ancho del parche.

L : longitud del parche.

h : espesor del sustrato.

ϵ_{reff} : permitividad efectiva del dieléctrico.

ϵ_r : permitividad del dieléctrico.

ΔL : longitud extendida del parche (debido a los campos *fringing*).

c : velocidad de la luz en el vacío.

f : frecuencia de operación.

Las dimensiones del plano de masa se generan al multiplicar las dimensiones del parche con los factores introducidos por el usuario que deben ser mayores o iguales a 1,5. Para los cálculos se aplican las ecuaciones (2.8) y (2.9).

$$W_2 = X \times W \quad (2.8)$$

$$L_2 = Y \times L \quad (2.9)$$

Donde

W_2 : ancho del plano de tierra.

L_2 : longitud del plano de tierra.

X : factor de multiplicación ingresado por el usuario.

Y: factor de multiplicación ingresado por el usuario.

Algo semejante ocurre con el sustrato, puesto que sus dimensiones coinciden con las dimensiones del plano de masa en lo que respecta a longitud y ancho. No obstante, el espesor del dieléctrico puede tomar cualquiera de los valores estandarizados que se muestran en la Tabla 2.1. La selección de este parámetro queda a juicio y necesidad del usuario.

Tabla 2.1. Espesores estándar del sustrato RT/duroid 5870

| Espesor estándar [mm] |
|----------------------------------|
| 0,127 |
| 0,254 |
| 0,381 |
| 0,508 |
| 0,787 |
| 1,575 |
| 3,175 |

2.4.2.3 Posicionamiento de la línea de alimentación

Con la finalidad de garantizar que el coeficiente de reflexión a la entrada de la antena diseñada sea mínimo, es primordial asegurarse que el elemento radiante y su respectiva alimentación se encuentren acoplados.

Para el caso de una excitación a través de cable coaxial, la impedancia de entrada de la antena es variable en función de la posición de la fuente de alimentación como se describe en la ecuación (2.10).

$$R_{in}(L_1) \approx \frac{1}{2G_1} \cos^2\left(\frac{\pi L_1}{L}\right) \quad (2.10)$$

Donde

L : longitud del parche.

L_1 : posición del cable coaxial en la estructura parche.

G_1 : conductancia referente a las ranuras radiantes formadas entre el parche y el plano de masa separadas una distancia L .

$R_{in}(L_1)$: impedancia del cable coaxial.

Dado que las dimensiones de la antena disminuyen al incrementar la frecuencia de trabajo, el rango de operación se limita a frecuencias con un valor máximo de 10 GHz, de esta manera se garantiza que las dimensiones de la antena siempre serán mayores a las del cable coaxial de alimentación, además, la longitud de onda siempre será mayor que las dimensiones de los elementos. Como consecuencia se cumple con la condición de diseño $W \ll \lambda$. Por ende, la conductancia se calcula empleando la ecuación (2.11).

$$G_1 = \frac{1}{90} \left(\frac{W}{\lambda} \right)^2 \quad (2.11)$$

Donde

G_1 : conductancia de la antena.

λ : longitud de onda de operación.

W : ancho del parche.

Resumiendo lo planteado, para calcular la posición del cable coaxial se utiliza una impedancia de 50 Ω . Los demás parámetros son introducidos por el usuario.

2.4.2.4 Modelado de la estructura

El proceso de modelado implica crear sólidos geométricos y utilizarlos para realizar operaciones booleanas.

La Figura 2.12 muestra el modelado del plano de tierra de la antena tipo *patch* y la alimentación coaxial. En primer lugar, se crea un bloque rectangular con material "PEC" para representar el plano de masa. Posteriormente se establece un cilindro del mismo material e igual espesor centrado en la posición de la fuente de alimentación cuyo radio es igual al radio del dieléctrico del cable coaxial.

A continuación, se resta el cilindro del bloque y se crea un segundo cilindro del mismo material con la particularidad de que este elemento es hueco, es decir cuenta con dos radios. El valor del radio menor es igual al radio del dieléctrico del cable coaxial mientras que el valor del radio mayor es igual al radio menor más 0,017 mm, que corresponde al espesor de los conductores. En lo que respecta a la longitud, se toma el mismo valor que en el plano de masa y se añaden 20 mm. Esto con el fin de que el método de simulación tenga una estructura constante requerida para el mallado [21].

Por último, se combinan los dos elementos.

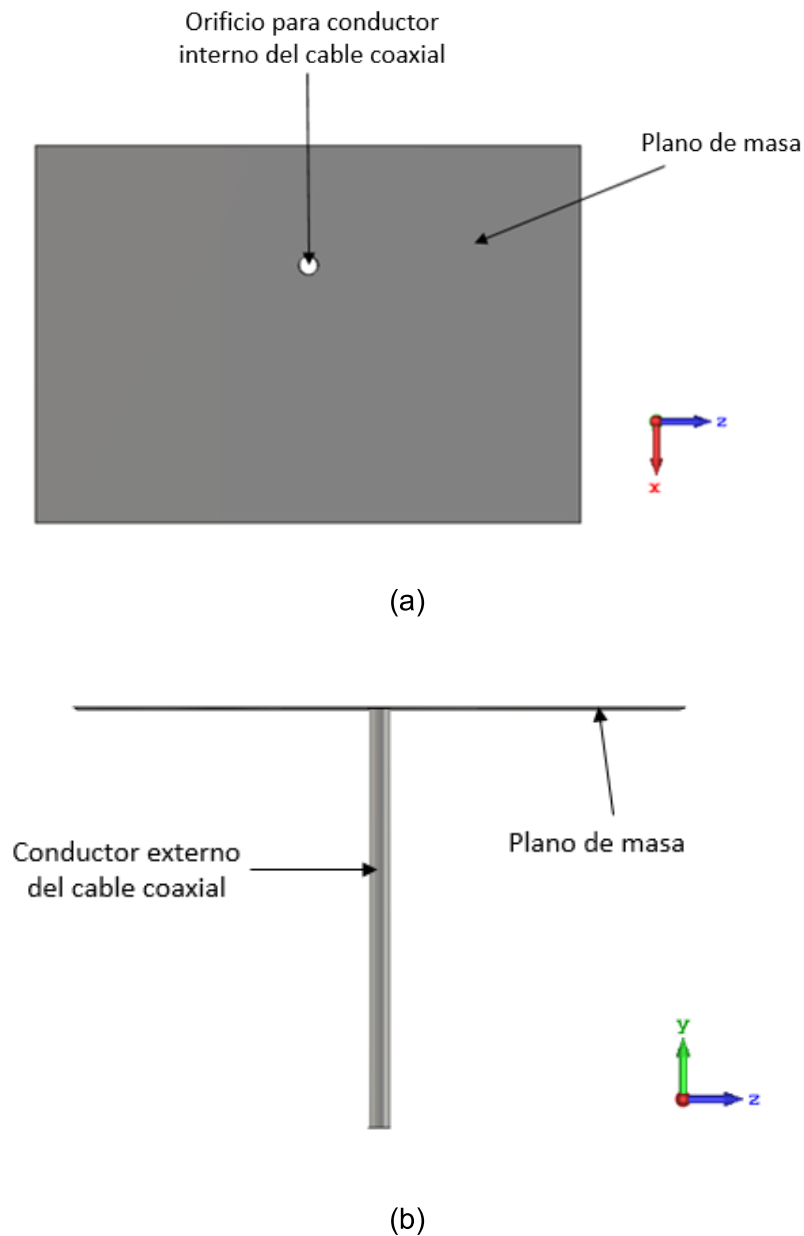


Figura 2.12. Plano de masa y alimentación coaxial modelados en CST Studio Suite.

(a) Vista inferior. (b) Vista lateral.

Para modelar el sustrato se realiza el mismo proceso que se ejecuta en el plano de masa tomando en cuenta tres modificaciones.

Primeramente, el material utilizado para los objetos pasa a ser RT/duroid 5870, asimismo, el valor del radio mayor del segundo cilindro es igual al radio del dieléctrico del cable coaxial; el segundo cilindro cambia el valor del radio mayor y su longitud se calcula con la ecuación (2.12).

$$h_2 = h_s + h_g + h_c \quad (2.12)$$

Donde

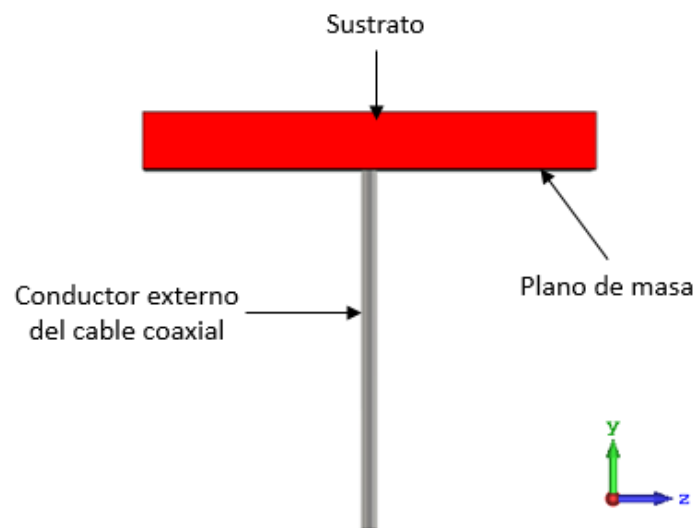
h_2 : longitud del segundo cilindro.

h_s : espesor del sustrato.

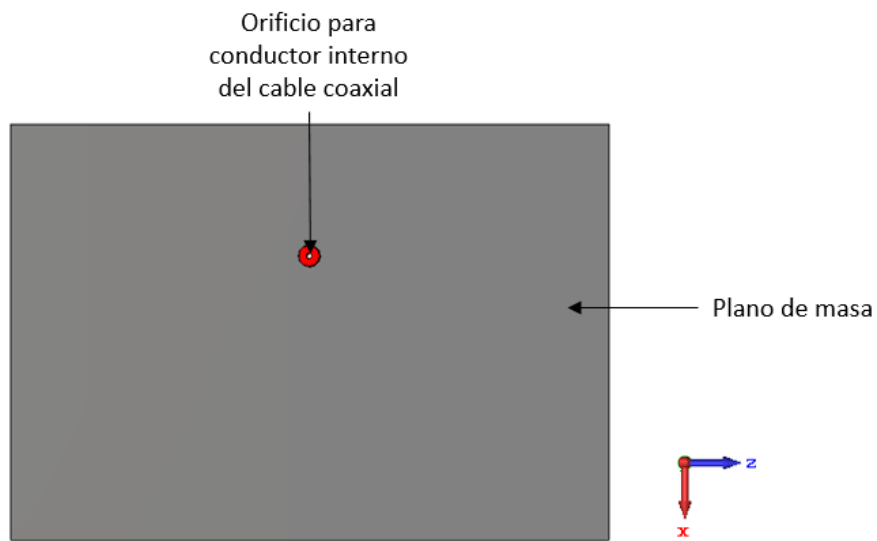
h_g : espesor del plano de masa.

h_c : longitud del cable coaxial medida a partir del plano de masa.

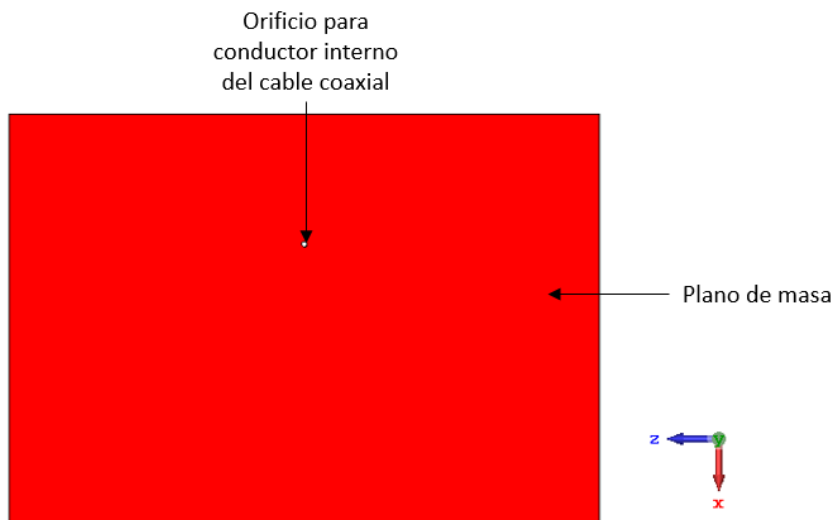
Finalmente, la longitud del primer cilindro es igual al espesor del sustrato. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2.13.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.13. Sustrato modelado en CST Studio Suite. (a) Vista lateral. (b) Vista inferior. (c) Vista superior.

El modelado del parche implica la creación de un bloque rectangular y un cilindro, ambos de material “PEC”. El diámetro del cilindro es igual al diámetro del conductor interno del cable coaxial y su longitud se define por la ecuación (2.13).

$$h_3 = h_s + h_g + h_c + h_p \quad (2.13)$$

Donde

h_3 : longitud del cilindro.

h_s : espesor del sustrato.

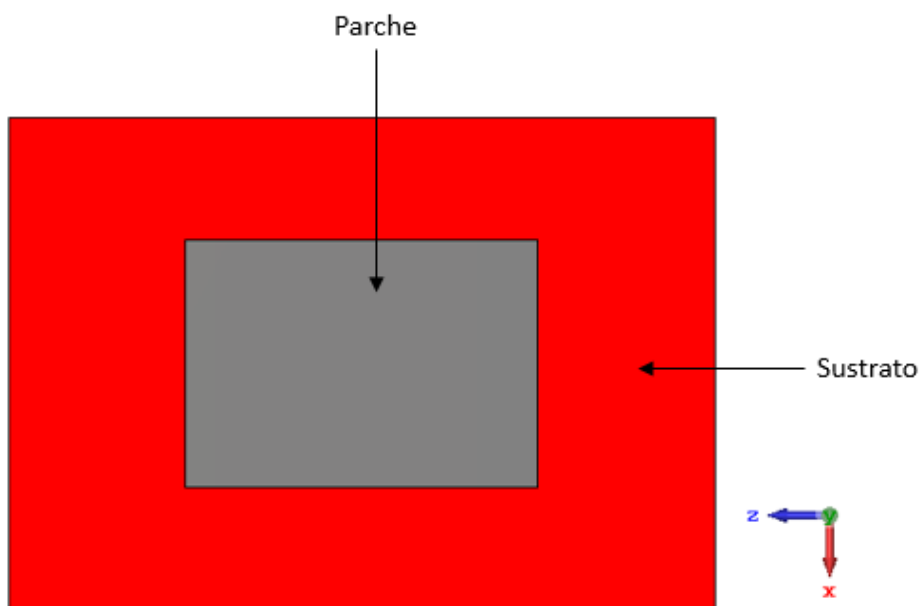
h_g : espesor del plano de masa.

h_c : longitud del cable coaxial medida a partir del plano de masa.

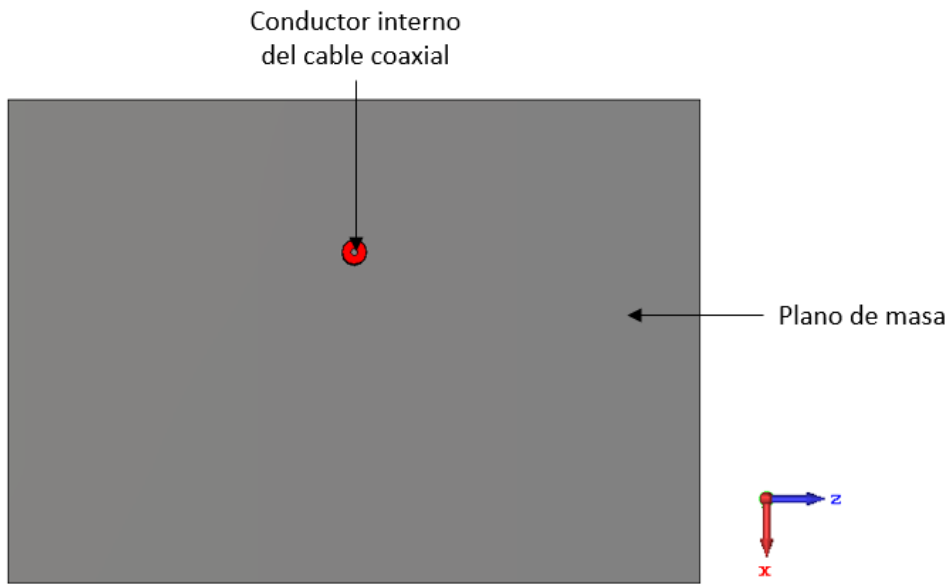
h_p : espesor del parche.

El cilindro tiene como punto de referencia la posición de la fuente de alimentación. Las dimensiones del bloque corresponden a las dimensiones de largo y ancho del parche y su espesor se establece en 0,017 mm.

A continuación, los dos sólidos se combinan. El resultado obtenido se puede apreciar en la Figura 2.14.



(a)



(b)

Figura 2.14. Antena *patch* modelada en CST Studio Suite. (a) Vista superior. (b) Vista inferior.

Como último paso se añade la alimentación, en consecuencia, se crea un puerto de guía de onda cuyas dimensiones son iguales al diámetro del conductor externo del cable coaxial y debe posicionarse en el extremo inferior del mismo como se observa en la Figura 2.15.

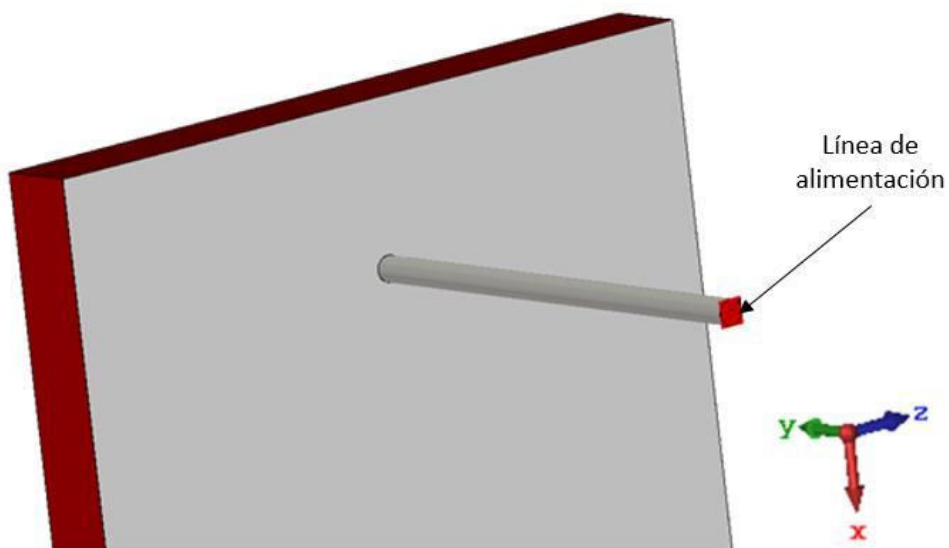


Figura 2.15. Adición del puerto de alimentación a la antena modelada.

2.5 CONFORMACIÓN DEL ARREGLO

Para conformar los arreglos correspondientes, se toman en cuenta los valores ingresados por el usuario referentes a separación entre elementos y cantidad de elementos. Estos parámetros pueden ser definidos a nivel de filas y columnas. Asimismo, se procesan todas las condiciones de diseño y el tipo de antena seleccionado.

El cálculo de la separación entre elementos se rige por las ecuaciones (2.14) y (2.15).

$$x = \lambda \times x_1 \quad (2.14)$$

$$y = \lambda \times y_1 \quad (2.15)$$

Donde

x : separación entre filas.

y : separación entre columnas.

x_1 : factor de separación entre filas.

y_1 : factor de separación entre columnas.

λ : longitud de onda de operación.

Es importante precisar que los valores de x_1 y y_1 son definidos por el usuario.

Acto seguido se realiza un barrido de filas y columnas dentro del cual se posicionan las antenas. La separación de los radiadores se mide a partir del punto central de cada elemento, no de sus extremos.

En consecuencia, los valores calculados de separación se utilizan como coordenadas de referencia para posicionar las antenas. Por lo tanto, dichos valores son incrementados constantemente para evitar la superposición de elementos, es decir, que dos antenas no sean modeladas en las mismas coordenadas. El incremento mencionado se define en las ecuaciones (2.16) y (2.17).

$$x = n_f \times x \quad (2.16)$$

$$y = n_c \times y \quad (2.17)$$

Donde

x : separación entre filas.

y : separación entre columnas.

n_f : número de elementos modelados hasta el momento en filas.

n_c : número de elementos modelados hasta el momento en columnas.

No obstante, cabe acotar que el primer elemento siempre se posiciona en el origen de coordenadas. La Figura 2.16 ilustra el proceso a seguir.

2.6 GENERACIÓN DE LÓBULOS DE RADIACIÓN

La interfaz gráfica de usuario desarrollada para la presente aplicación, como se puede observar existe un espacio destinado para graficar lóbulos de radiación en función de los parámetros ingresados por el usuario. El proceso a seguir para su generación se ilustra en la Figura 2.17. Es importante precisar que los gráficos son actualizados si el usuario realiza alguna modificación.

Existen tres opciones de gráficos: antena, factor de arreglo y arreglo. Para todos los casos se establecen valores de azimut comprendidos entre -180 y 180 grados y valores de elevación comprendidos entre -90 y 90 grados, ambos con saltos de dos unidades. Estos conjuntos de datos son los ejes de coordenadas para la representación tridimensional.

El proceso de obtención del lóbulo de radiación de antenas tipo dipolo y *patch* se expone en la Figura 2.18.

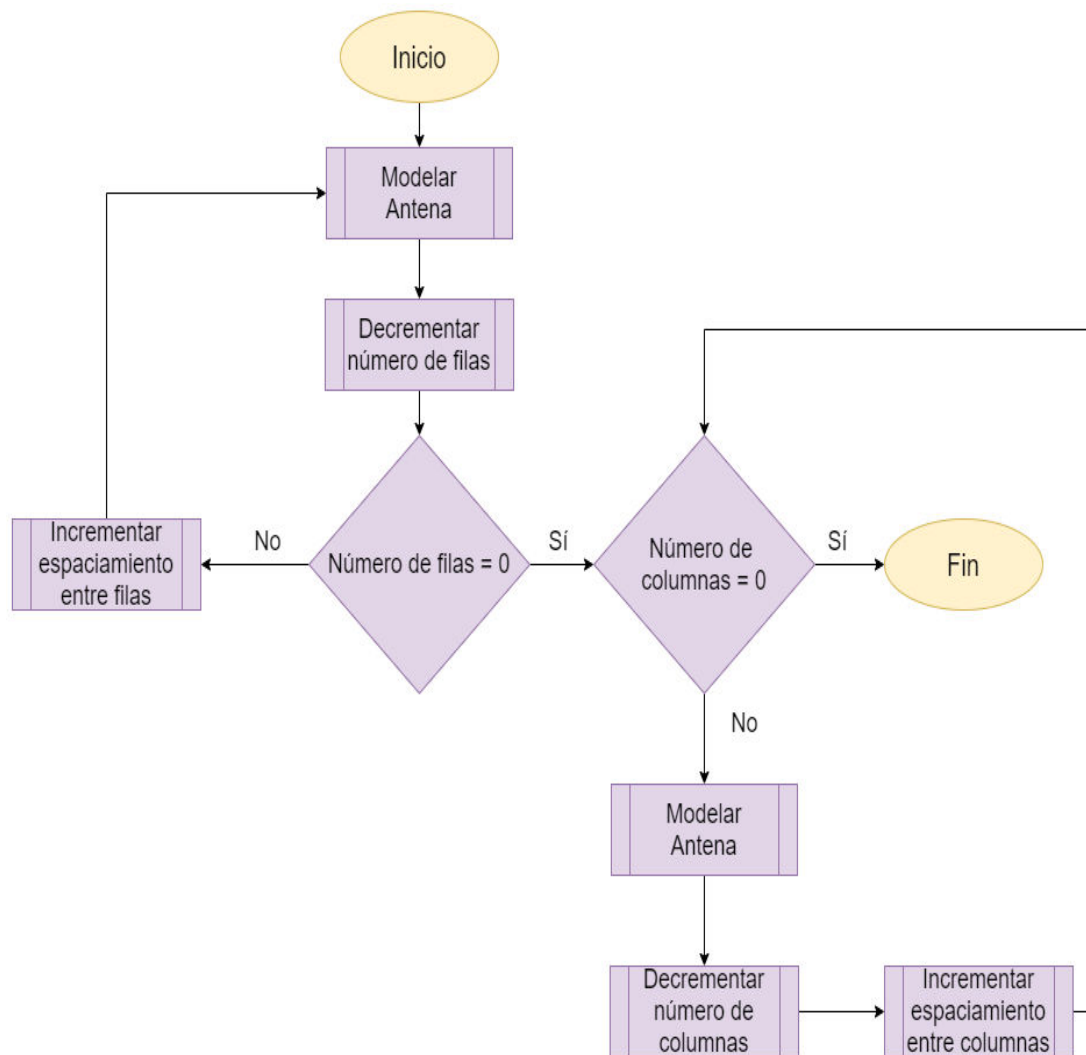


Figura 2.16. Procedimiento para modelar arreglos de antenas.

El procedimiento para calcular el factor de arreglo se muestra en la Figura 2.19. El factor de arreglo se calcula utilizando la función “arrayFactor.m”, misma que forma parte del complemento de MATLAB conocido como *antenna toolbox*. La función retorna los valores correspondientes a la directividad del factor de arreglo expresados en decibelios tomando en cuenta los rangos de azimuth y elevación previamente definidos que se utilizan como variables de entrada en conjunto con la frecuencia y el arreglo previamente definido como objeto.

Finalmente, es imprescindible destacar que para mostrar una interpretación de los resultados obtenidos en tres dimensiones se debe hacer un cambio de sistema de coordenadas a coordenadas rectangulares. Esto se debe a que el factor de arreglo y los patrones de radiación se obtienen en coordenadas esféricas.

En la Figura 2.20 se presentan ejemplos de diagramas de radiación que pueden ser generados.

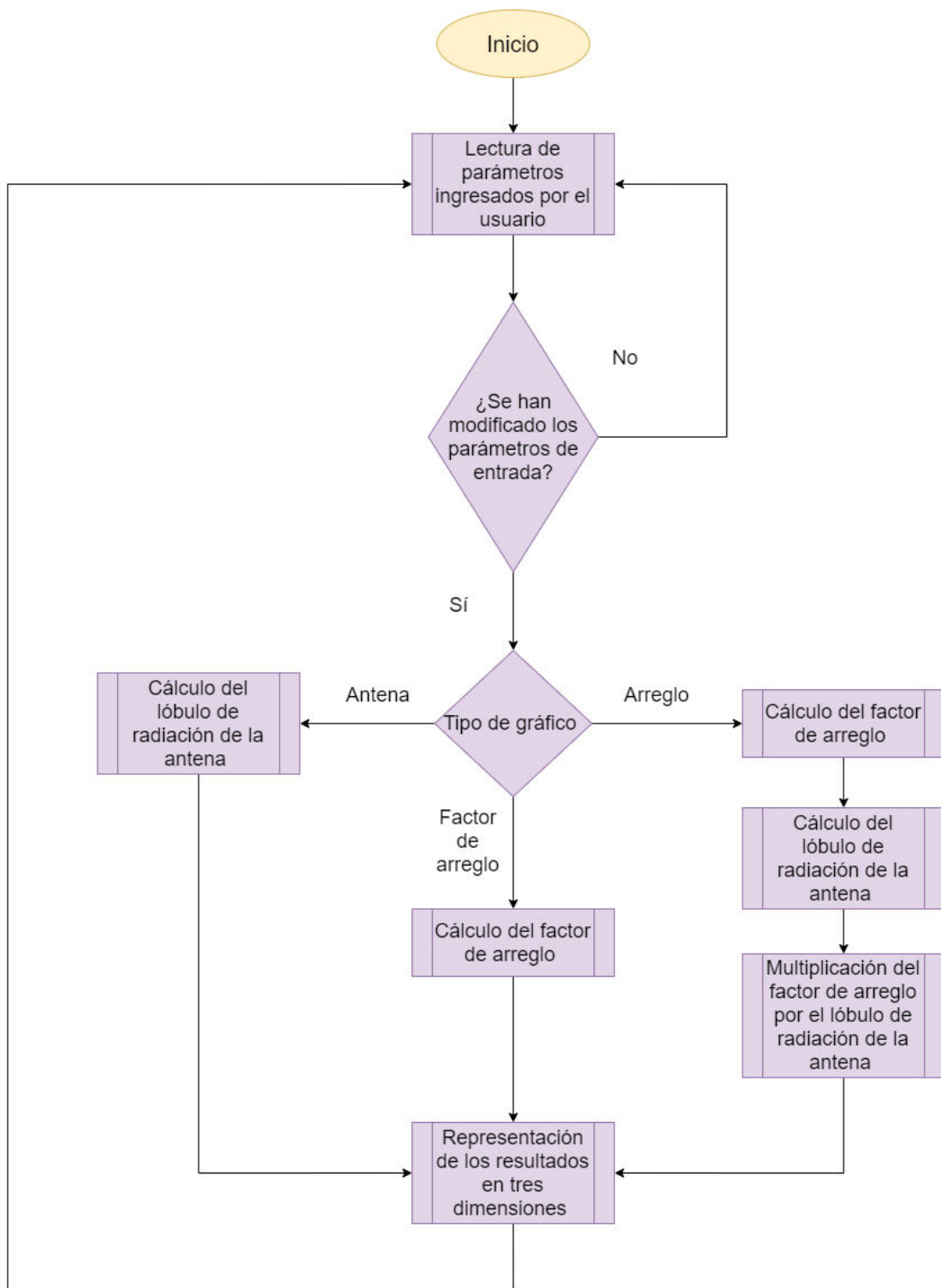


Figura 2.17. Procedimiento para generar lóbulos de radiación.

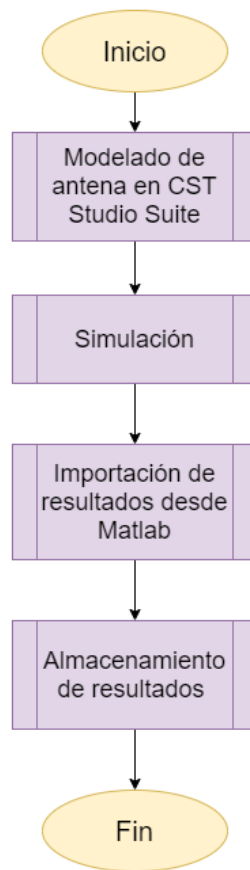


Figura 2.18. Proceso para obtener el lóbulo de radiación de antenas tipo dipolo y *patch*.

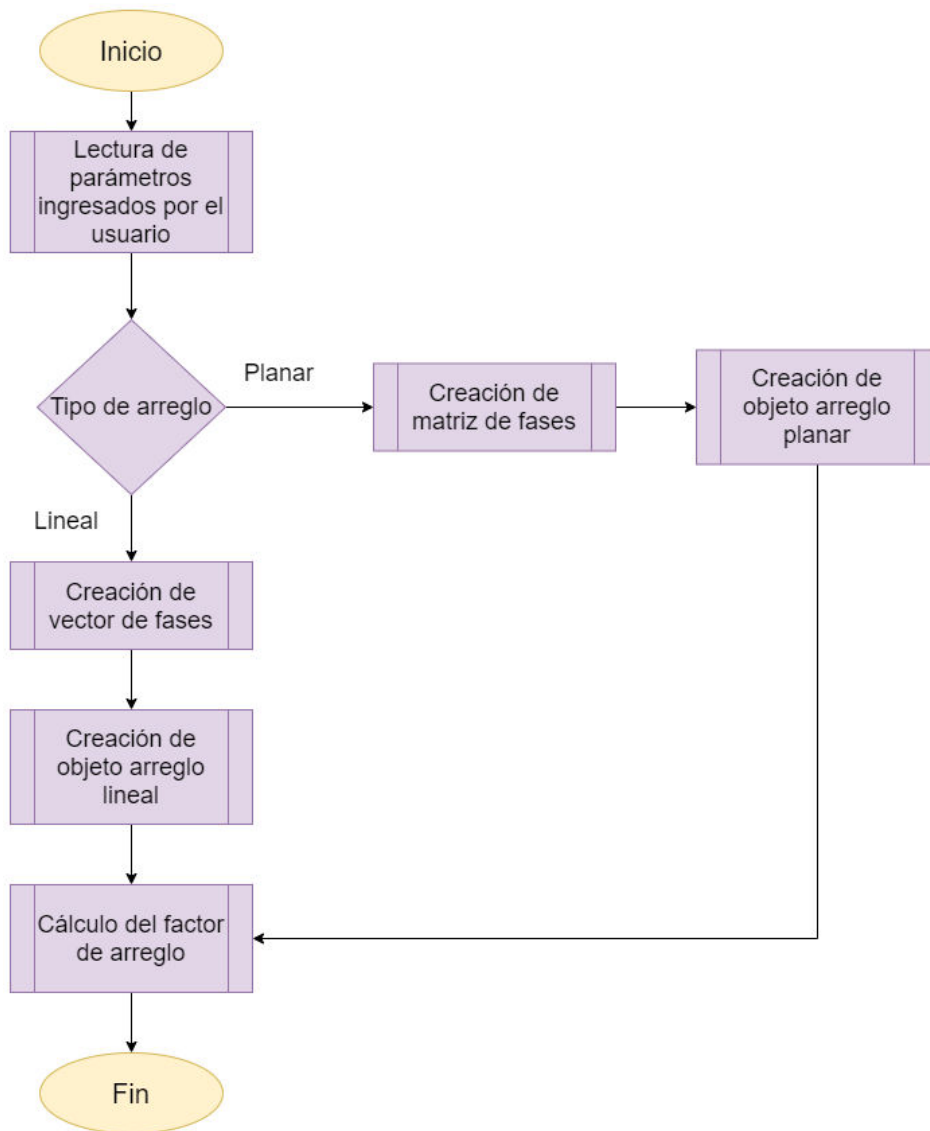
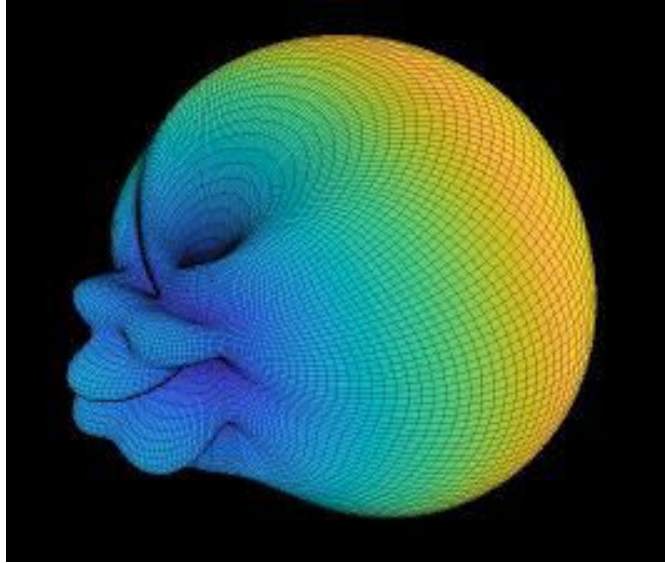
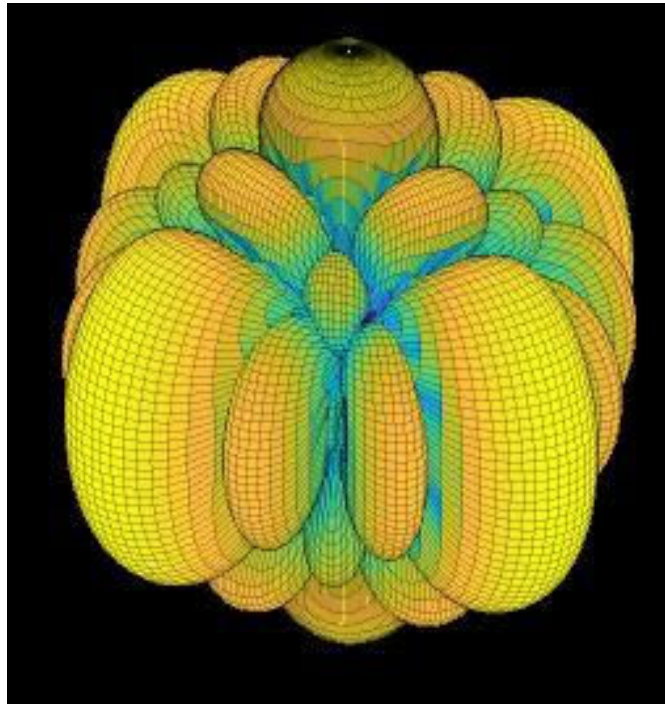


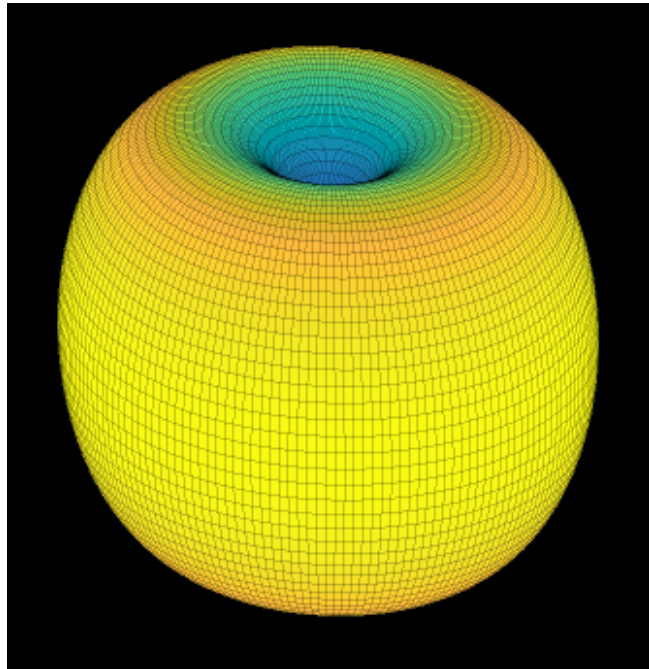
Figura 2.19. Procedimiento para calcular el factor de arreglo.



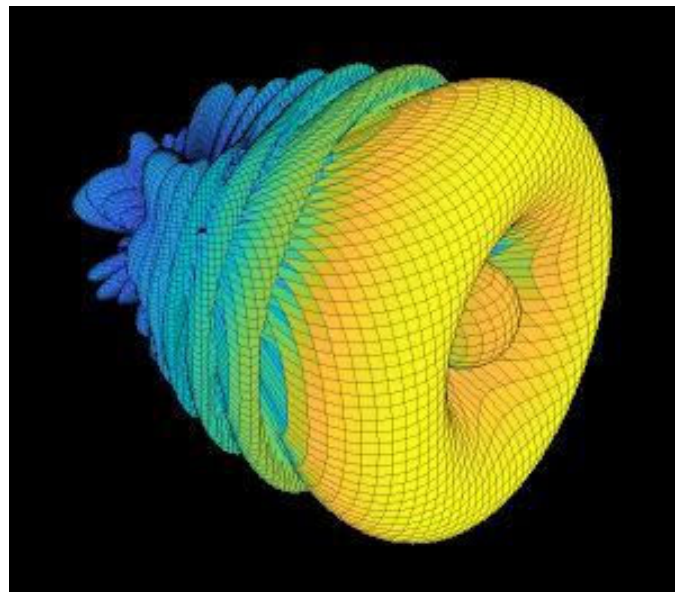
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.20. (a) Diagrama de radiación de una antena tipo *patch*. (b) Representación tridimensional del factor de arreglo para un arreglo planar tipo dipolo con configuración 3×3 , separación entre elementos igual a una longitud de onda y diferencia de fase igual a cero. (c) Diagrama de radiación de una antena tipo dipolo de media longitud de onda. (d) Diagrama de radiación para un arreglo lineal de 7 antenas tipo *patch*, separación entre elementos igual a una longitud de onda y diferencia de fase igual a 60 grados.

2.7 OPTIMIZACIÓN

Tal como se indica en la Figura 2.21, se establece un mecanismo en el cual el usuario ingresa parámetros generales de diseño como son: frecuencia de operación, directividad, margen de tolerancia, tipo de arreglo, espaciamiento entre elementos y apuntamiento expresado en ángulos de azimut y elevación. Como resultado se obtiene la configuración óptima del arreglo para cumplir con las condiciones expresadas previamente, es decir se realiza el cálculo del número de elementos, su distribución correspondiente y la diferencia de fase que se debe aplicar en cada elemento. Todo este proceso ocurre al presionar el botón “Calcular” de la interfaz gráfica.

Es imprescindible acotar que la directividad cuenta con un valor máximo independientemente de la configuración del arreglo, es decir que a partir de cierto valor el aumento de directividad es nulo o casi nulo a pesar de que se incremente el número de antenas. En consecuencia, el algoritmo de optimización podría caer en un lazo infinito. Para solventar este inconveniente se mide constantemente el aumento de directividad, si dicho valor es menor al 1% se ejecutan 100 iteraciones y el programa finaliza como se ilustra en la Figura 2.22.

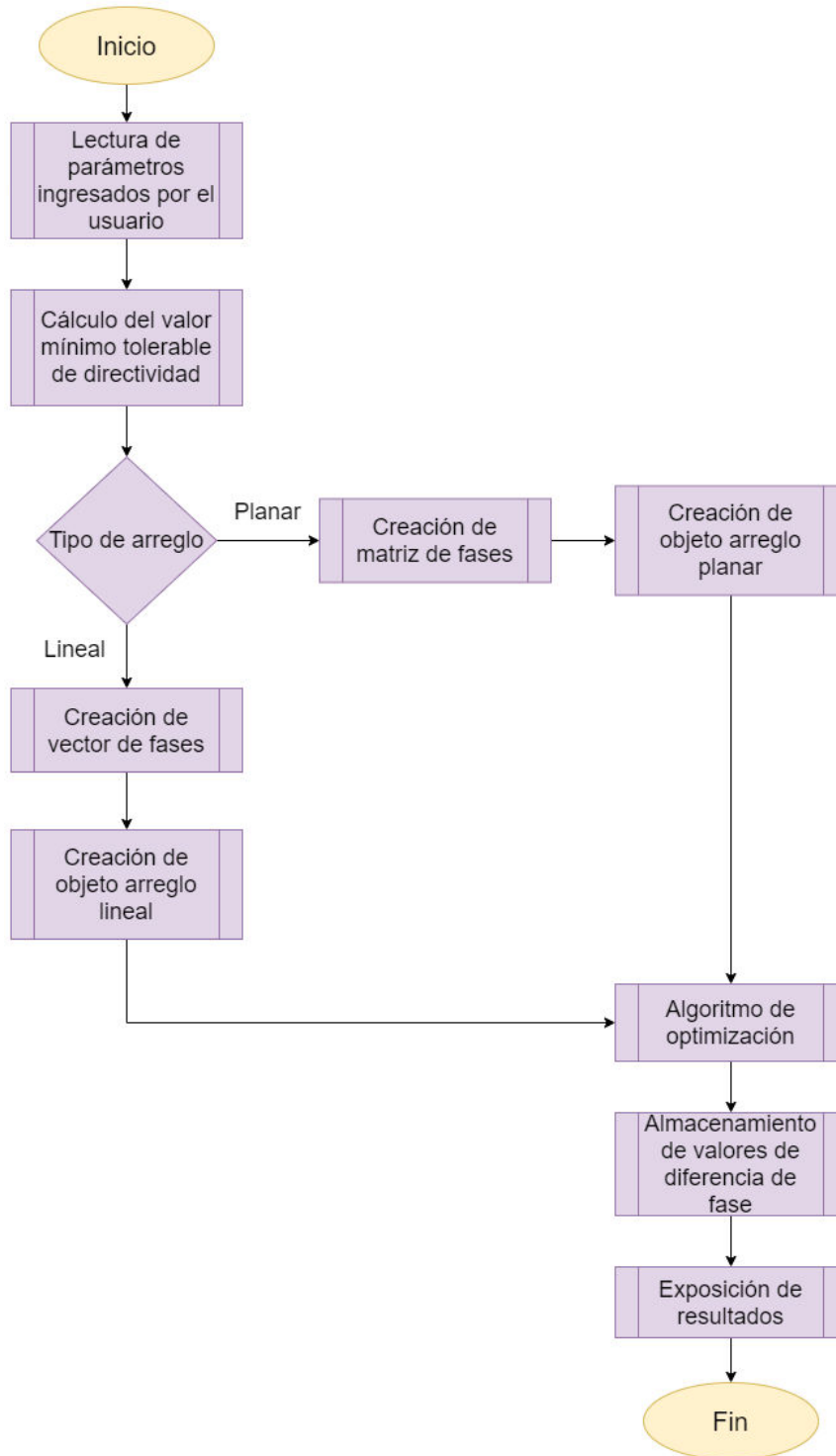
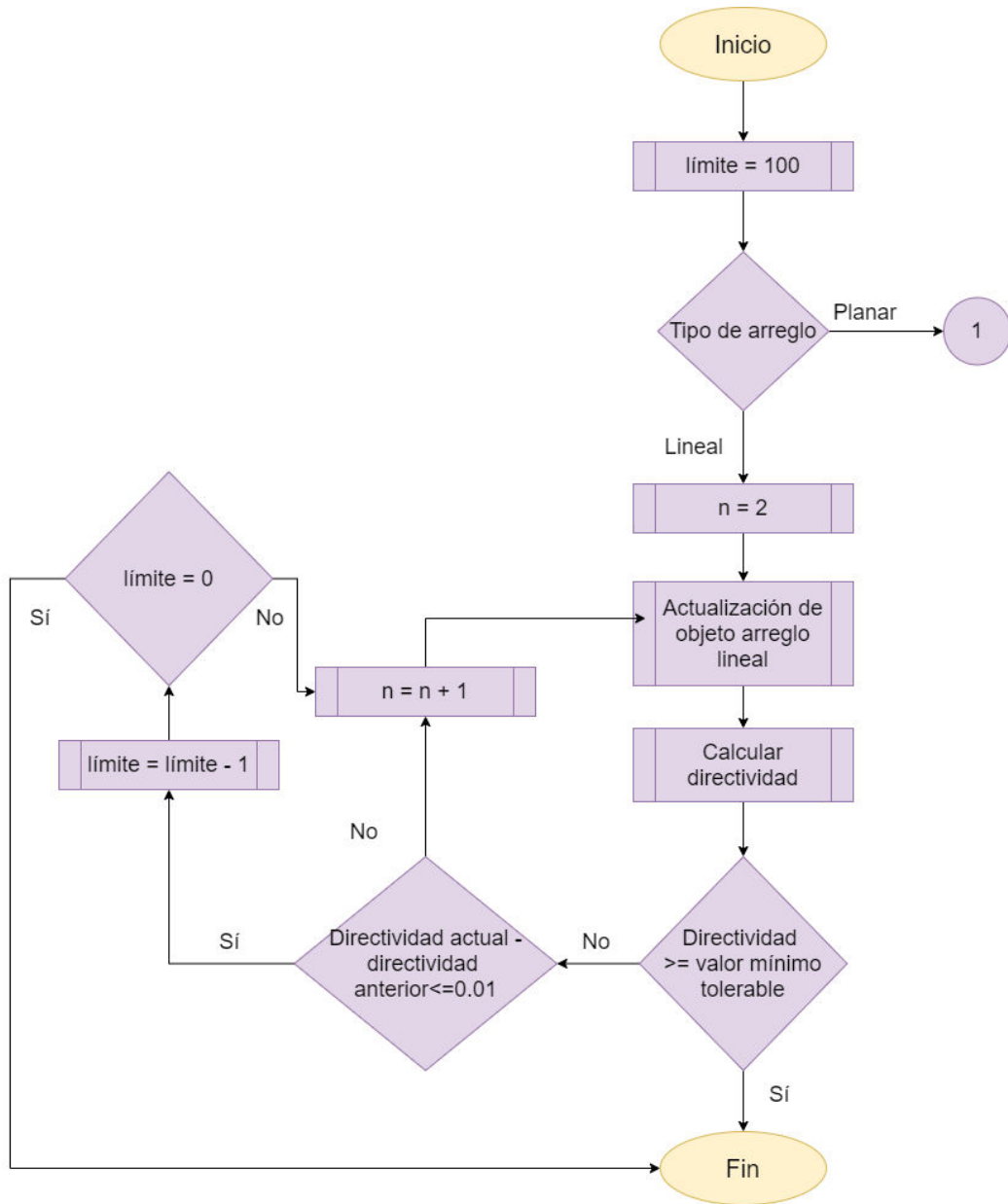
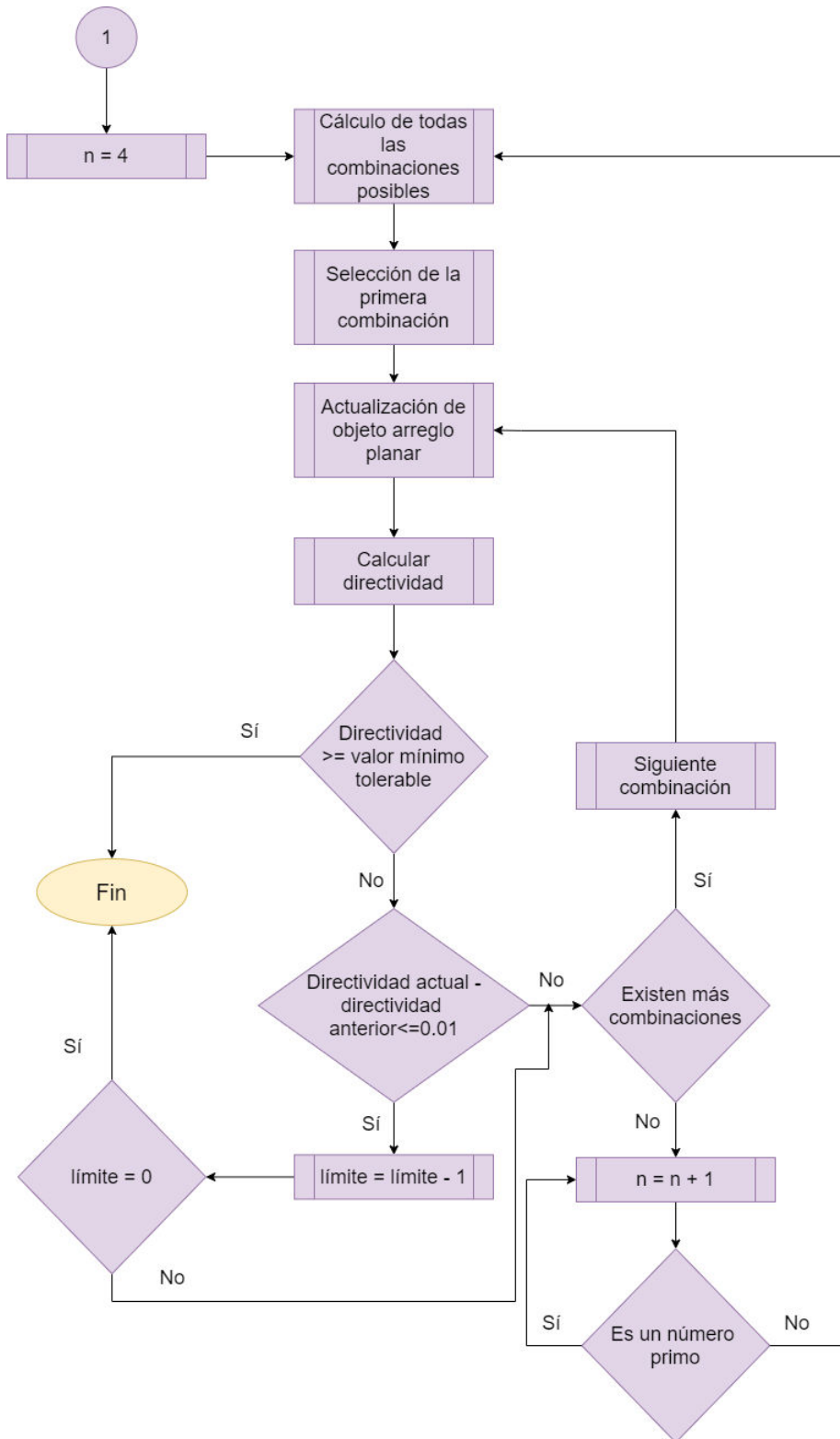


Figura 2.21. Proceso para obtener arreglos de antenas con condiciones de directividad y apuntamiento específicas.



(a)



(b)

Figura 2.22. Algoritmo de optimización. Se definen las variables n como número de antenas del arreglo y $límite$ como contador de iteraciones para prevenir lazos infinitos.

(a) Cálculo de directividad para arreglos lineales. (b) Cálculo de directividad para arreglos planares.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se realiza la tabulación y análisis de los resultados obtenidos.

3.1 GENERACIÓN DE PATRONES DE RADIACIÓN POR PARTE DEL USUARIO

En esta sección se muestran los diagramas de radiación y los valores de directividad obtenidos en CST Studio Suite.

La tabulación de datos (Tabla 3.1 - Tabla 3.12) se realiza tomando en cuenta los siguientes parámetros: número de experimento, número de elementos del arreglo de antenas, separación entre elementos, frecuencia de operación, valor esperado de directividad, valor de directividad obtenido en la simulación y valor mínimo aceptable de directividad. Adicionalmente se agrega un parámetro (*Fuera de rango*) para evaluar el margen de error de la aplicación desarrollada, si el valor de directividad obtenido en la simulación es menor al valor mínimo aceptable entonces se considera que los resultados se encuentran fuera de rango.

3.1.1 ARREGLOS LINEALES DE ANTENAS TIPO DIPOLO

La Figura 3.1 muestra la variación de la directividad con respecto al número de elementos para distintas configuraciones de arreglos lineales de antenas tipo dipolo con escala logarítmica en el eje x.

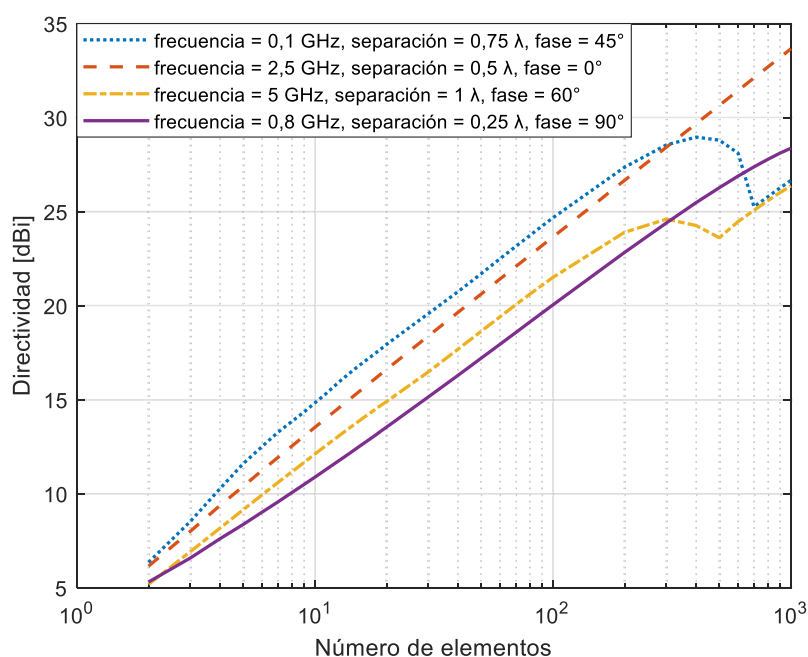
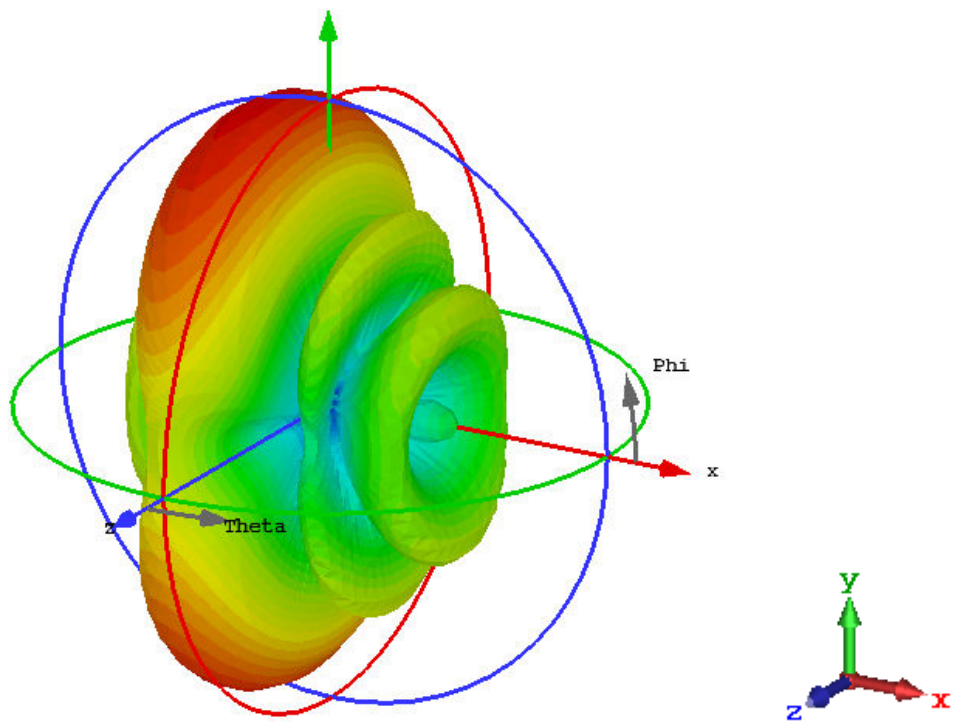
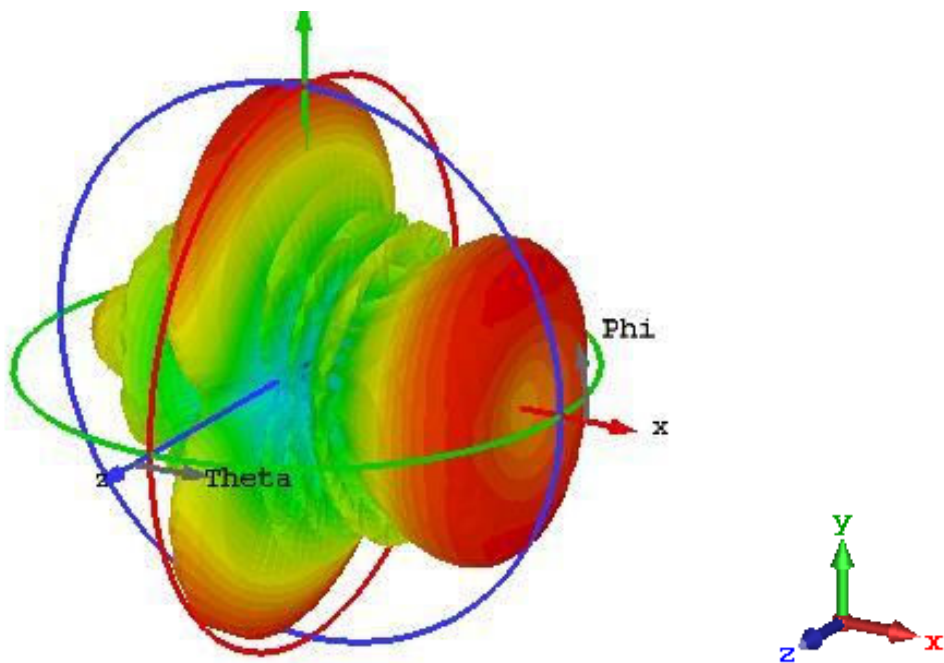


Figura 3.1. Variación de la directividad con respecto al número de elementos para arreglos lineales de antenas tipo dipolo.

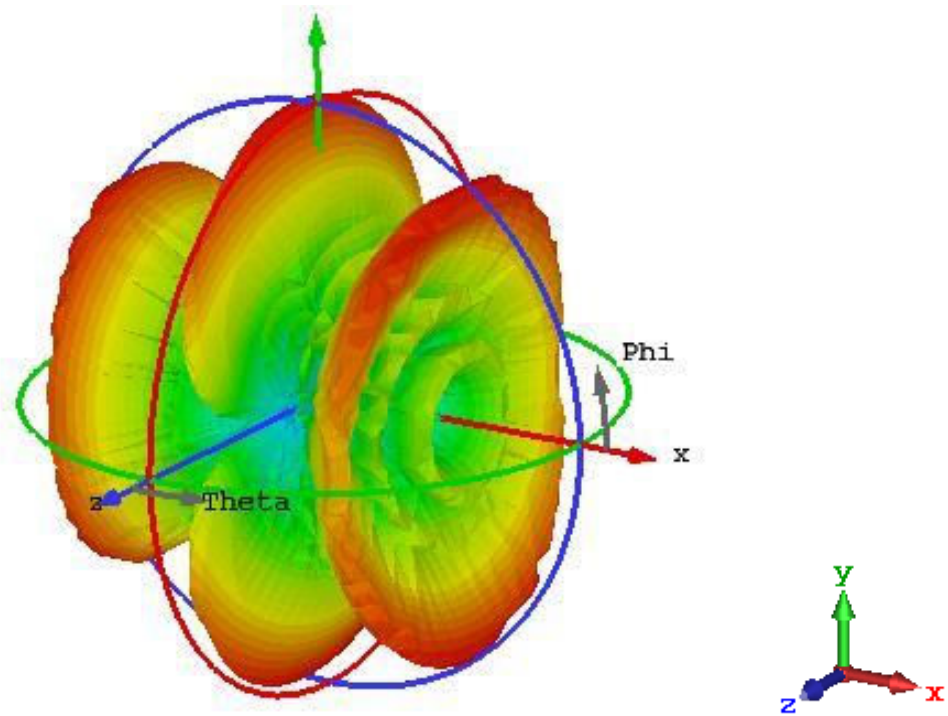
La Figura 3.2 ilustra la influencia que tiene la separación entre elementos sobre el lóbulo de radiación generado por un arreglo lineal de 5 antenas tipo dipolo con frecuencia de operación de 2,4 GHz y diferencia de fase uniforme de 60° .



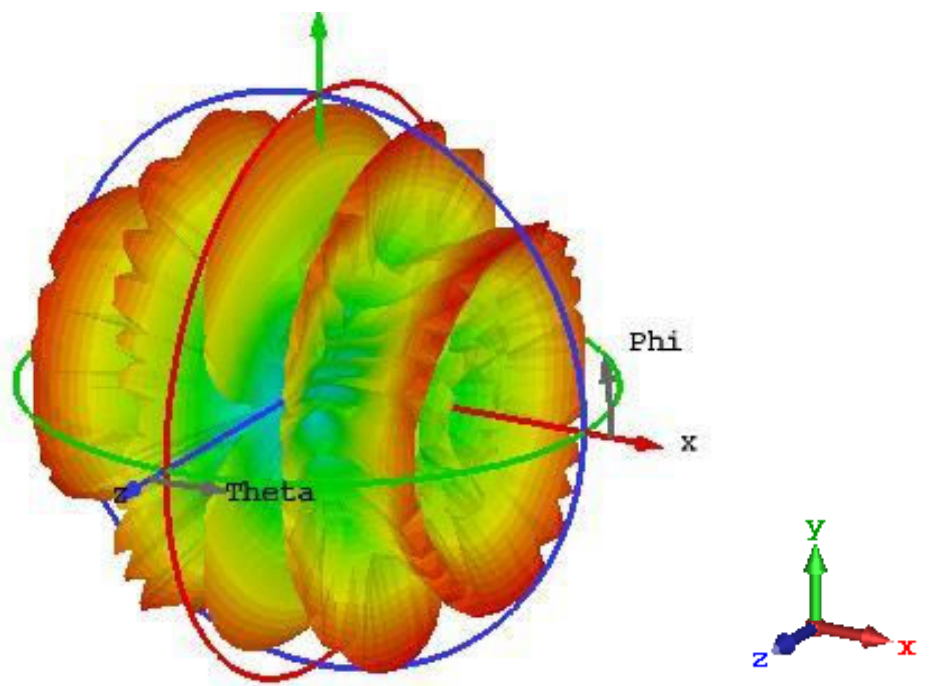
(a)



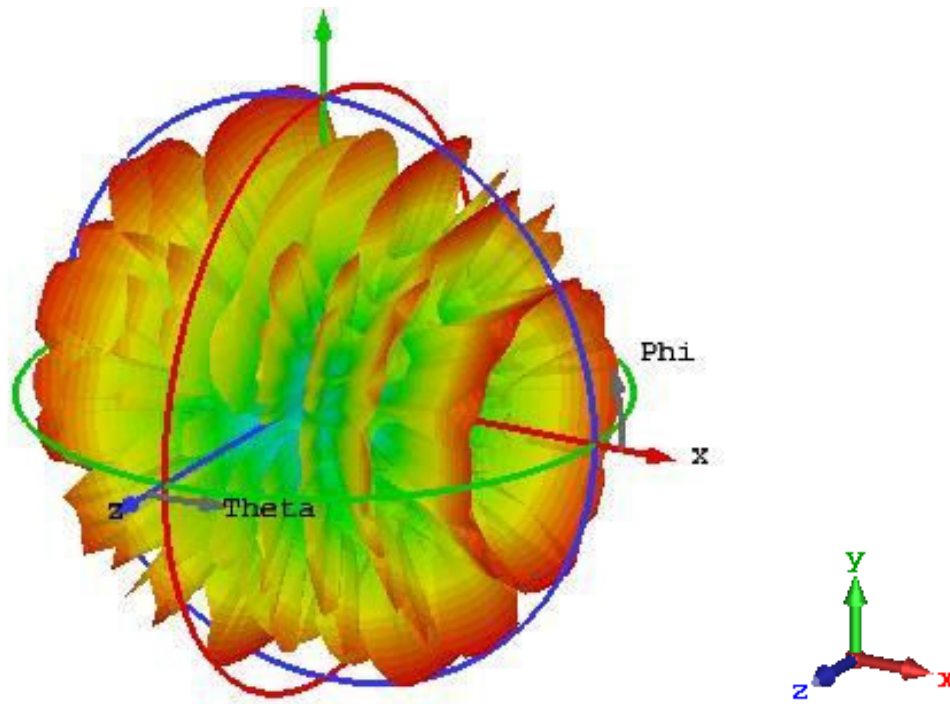
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.2. Lóbulo de radiación generado por un arreglo lineal de 5 antenas tipo dipolo con frecuencia de operación de 2,4 GHz y diferencia de fase uniforme de 60° . (a) Separación igual a $0,5 \lambda$. (b) Separación = λ . (c) Separación = $1,5 \lambda$. (d) Separación = $2,5 \lambda$. (e) Separación = $4,5 \lambda$.

En la Figura 3.3 se muestra la variación de la directividad con respecto al ángulo Phi cuando $\text{Theta} = 90^\circ$, para un arreglo lineal de 5 antenas tipo dipolo con frecuencia de operación de 2,4 GHz diferencia de fase uniforme de 60° y separación entre elementos variable.

La Tabla 3.1 contiene la directividad obtenida al calcular la configuración de 18 arreglos lineales de antenas tipo dipolo con tolerancia = 20%, azimut = 180° , elevación = 50° , utilizando la aplicación desarrollada.

La Tabla 3.2 contiene la directividad obtenida al calcular la configuración de 18 arreglos lineales de antenas tipo dipolo con tolerancia = 10%, azimut = 100° , elevación = 0° , utilizando la aplicación desarrollada.

La Tabla 3.3 contiene la directividad obtenida al calcular la configuración de 18 arreglos lineales de antenas tipo dipolo con tolerancia = 5%, azimut = 0° , elevación = 0° , utilizando la aplicación desarrollada.

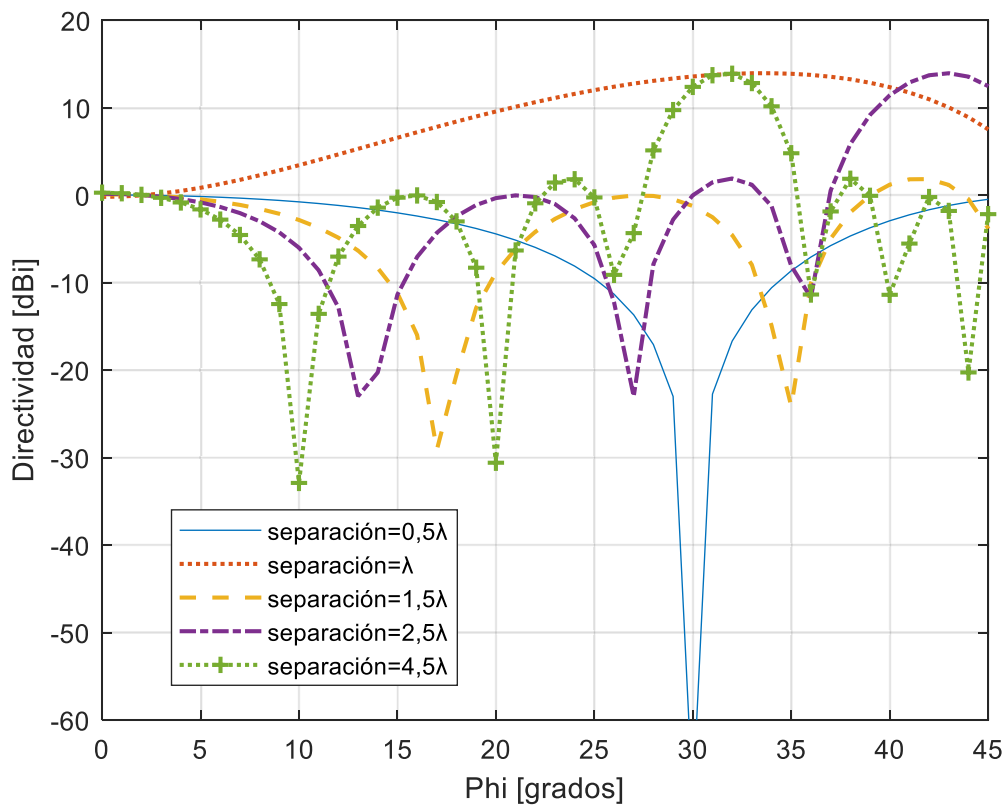


Figura 3.3. Variación de la directividad con respecto al ángulo Phi cuando Theta = 90°, para un arreglo lineal de 5 antenas tipo dipolo con frecuencia de operación de 2,4 GHz diferencia de fase uniforme de 60° y separación entre elementos variable.

Tabla 3.1. Resultados obtenidos con la aplicación desarrollada con 20% de tolerancia.

| Experimento | Elementos | Separación [λ] | Frecuencia [GHz] | Directividad [dBi] | | Valor mínimo aceptable [dBi] | Fuera de rango |
|-------------|-----------|----------------|------------------|--------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | | Valor esperado | Valor obtenido | | |
| 1 | 3 | 0,5 | 2,4 | 5 | 6,964 | 4,0309 | No |
| 2 | 3 | | | 6 | 6,964 | 5,0309 | No |
| 3 | 4 | | | 7 | 8,191 | 6,0309 | No |
| 4 | 5 | | | 8 | 9,231 | 7,0309 | No |
| 5 | 6 | | | 9 | 10,07 | 8,0309 | No |
| 6 | 7 | | | 10 | 10,72 | 9,0309 | No |
| 7 | 3 | 0,25 | 5 | 5 | 5,769 | 4,0309 | No |
| 8 | 3 | | | 6 | 5,769 | 5,0309 | No |
| 9 | 4 | | | 7 | 6,404 | 6,0309 | No |
| 10 | 5 | | | 8 | 6,994 | 7,0309 | Sí |
| 11 | 6 | | | 9 | 7,628 | 8,0309 | Sí |
| 12 | 7 | | | 10 | 8,507 | 9,0309 | Sí |
| 13 | 3 | 0,75 | 0,8 | 5 | 5,959 | 4,0309 | No |
| 14 | 3 | | | 6 | 5,959 | 5,0309 | No |
| 15 | 4 | | | 7 | 7,384 | 6,0309 | No |
| 16 | 5 | | | 8 | 8,276 | 7,0309 | No |
| 17 | 6 | | | 9 | 8,969 | 8,0309 | No |
| 18 | 7 | | | 10 | 9,639 | 9,0309 | No |

Tabla 3.2. Resultados obtenidos con la aplicación desarrollada con 10% de tolerancia.

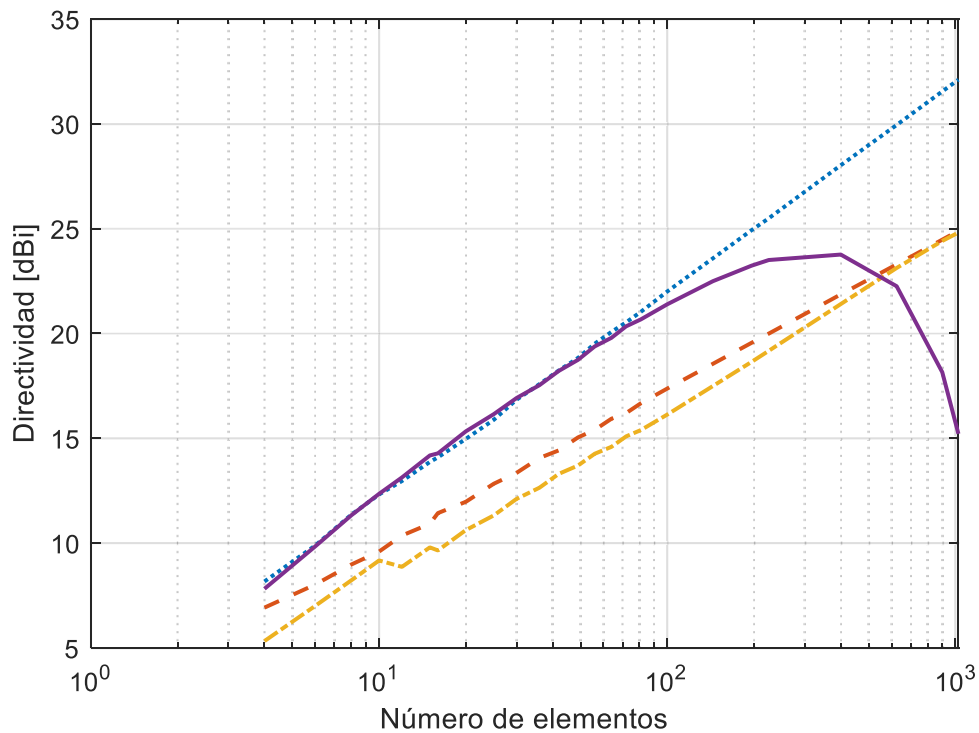
| Experimento | Elementos | Separación [λ] | Frecuencia [GHz] | Directividad [dBi] | | Valor mínimo aceptable [dBi] | Fuera de rango |
|-------------|-----------|----------------|------------------|--------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | | Valor esperado | Valor obtenido | | |
| 1 | 3 | 0,5 | 50 | 5 | 8,044 | 4,5424 | No |
| 2 | 3 | | | 6 | 8,044 | 5,5424 | No |
| 3 | 4 | | | 7 | 9,369 | 6,5424 | No |
| 4 | 5 | | | 8 | 10,47 | 7,5424 | No |
| 5 | 6 | | | 9 | 11,26 | 8,5424 | No |
| 6 | 8 | | | 10 | 12,58 | 9,5424 | No |
| 7 | 3 | 0,25 | 25 | 5 | 5,258 | 4,5424 | No |
| 8 | 3 | | | 6 | 5,258 | 5,5424 | Sí |
| 9 | 4 | | | 7 | 6,819 | 6,5424 | No |
| 10 | 5 | | | 8 | 7,891 | 7,5424 | No |
| 11 | 6 | | | 9 | 8,616 | 8,5424 | No |
| 12 | 8 | | | 10 | 9,923 | 9,5424 | No |
| 13 | 3 | 0,75 | 1,7 | 5 | 8,887 | 4,5424 | No |
| 14 | 3 | | | 6 | 8,887 | 5,5424 | No |
| 15 | 4 | | | 7 | 10,43 | 6,5424 | No |
| 16 | 5 | | | 8 | 11,81 | 7,5424 | No |
| 17 | 6 | | | 9 | 12,77 | 8,5424 | No |
| 18 | 8 | | | 10 | 14,25 | 9,5424 | No |

Tabla 3.3. Resultados obtenidos con la aplicación desarrollada con 5% de tolerancia.

| Experimento | Elementos | Separación [λ] | Frecuencia [GHz] | Directividad [dBi] | | Valor mínimo aceptable [dBi] | Fuera de rango |
|-------------|-----------|----------------|------------------|--------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | | Valor esperado | Valor obtenido | | |
| 1 | 3 | 0,5 | 10 | 5 | 6,078 | 4,7772 | No |
| 2 | 4 | | | 6 | 7,047 | 5,7772 | No |
| 3 | 4 | | | 7 | 7,047 | 6,7772 | No |
| 4 | 5 | | | 8 | 7,801 | 7,7772 | No |
| 5 | 7 | | | 9 | 8,955 | 8,7772 | No |
| 6 | 8 | | | 10 | 9,423 | 9,7772 | Sí |
| 7 | 3 | 0,25 | 15 | 5 | 6,853 | 4,7772 | No |
| 8 | 4 | | | 6 | 8,357 | 5,7772 | No |
| 9 | 4 | | | 7 | 8,357 | 6,7772 | No |
| 10 | 5 | | | 8 | 9,423 | 7,7772 | No |
| 11 | 7 | | | 9 | 11,73 | 8,7772 | No |
| 12 | 8 | | | 10 | 12,25 | 9,7772 | No |
| 13 | 3 | 0,75 | 0,6 | 5 | 7,433 | 4,7772 | No |
| 14 | 4 | | | 6 | 8,672 | 5,7772 | No |
| 15 | 4 | | | 7 | 8,672 | 6,7772 | No |
| 16 | 5 | | | 8 | 9,547 | 7,7772 | No |
| 17 | 7 | | | 9 | 11 | 8,7772 | No |
| 18 | 8 | | | 10 | 11,6 | 9,7772 | No |

3.1.2 ARREGLOS PLANARES DE ANTENAS TIPO DIPOLO

La Figura 3.4 muestra la variación de la directividad con respecto al número de elementos para distintas configuraciones de arreglos planares de antenas tipo dipolo con escala logarítmica en el eje x. En el caso de que existan varias configuraciones posibles para un determinado número de elementos, se toman en cuenta aquellas configuraciones en las cuales el valor correspondiente a la diferencia entre el número de filas y número de columnas es mínimo.



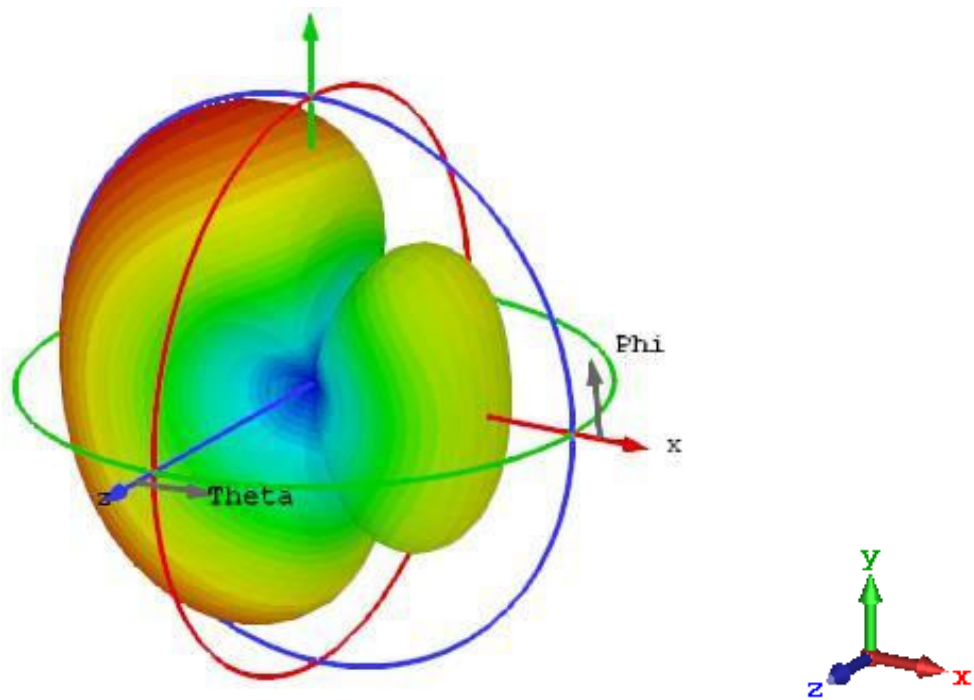
..... frecuencia = 2,4 GHz, Filas: separación = $0,5 \lambda$, fase = 0° , Columnas: separación = $0,5 \lambda$, fase = 0°
 - - - frecuencia = 0,8 GHz, Filas: separación = $0,25 \lambda$, fase = 90° , Columnas: separación = $0,5 \lambda$, fase = 0°
 - - - frecuencia = 1,7 GHz, Filas: separación = λ , fase = 45° , Columnas: separación = $0,25 \lambda$, fase = 30°
 — frecuencia = 5 GHz, Filas: separación = $0,5 \lambda$, fase = 100° , Columnas: separación = $0,75 \lambda$, fase = 60°

Figura 3.4. Variación de la directividad con respecto al número de elementos para arreglos planares de antenas tipo dipolo.

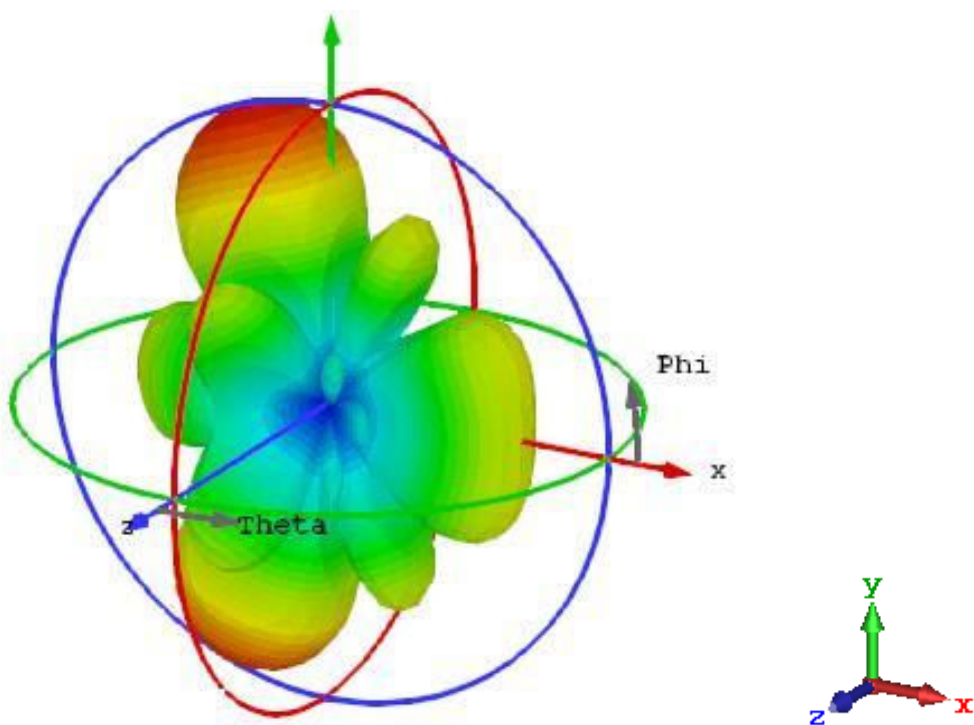
La Figura 3.5 ilustra la influencia que tiene la separación entre elementos sobre el lóbulo de radiación generado por un arreglo planar de 16 antenas tipo dipolo en configuración 4x4 con frecuencia de operación de 2,4 GHz y diferencia de fase uniforme de 60° entre columnas y 15° entre filas.

En la Figura 3.6 se muestra la variación de la directividad con respecto al ángulo Theta cuando $\Phi = 90^\circ$ para un arreglo planar de 16 antenas tipo dipolo en configuración 4x4 con frecuencia de operación de 2,4 GHz diferencia de fase uniforme de 60° entre columnas y 15° entre filas y separación entre elementos variable.

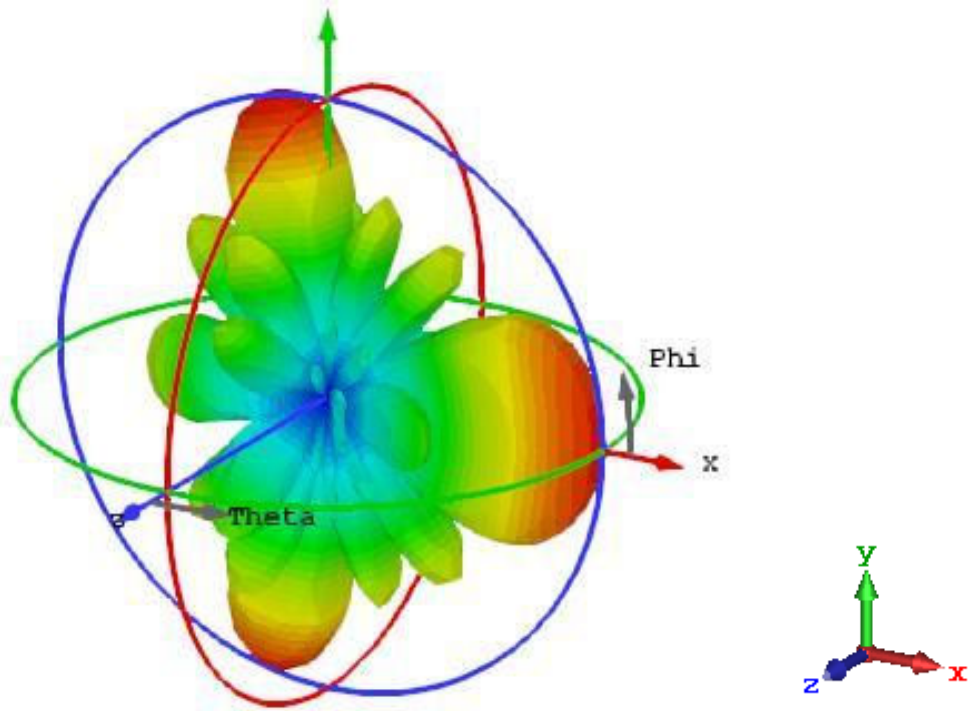
La Tabla 3.4 contiene la directividad obtenida al calcular la configuración de 18 arreglos planares de antenas tipo dipolo con tolerancia = 20%, azimut = 180° , elevación = 50° , utilizando la aplicación desarrollada.



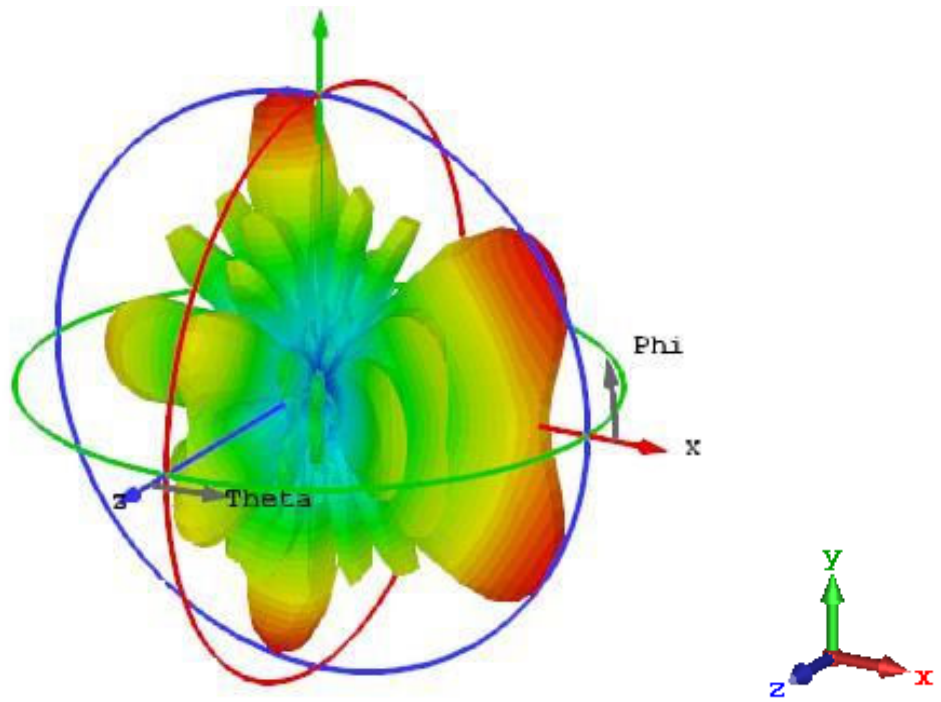
(a)



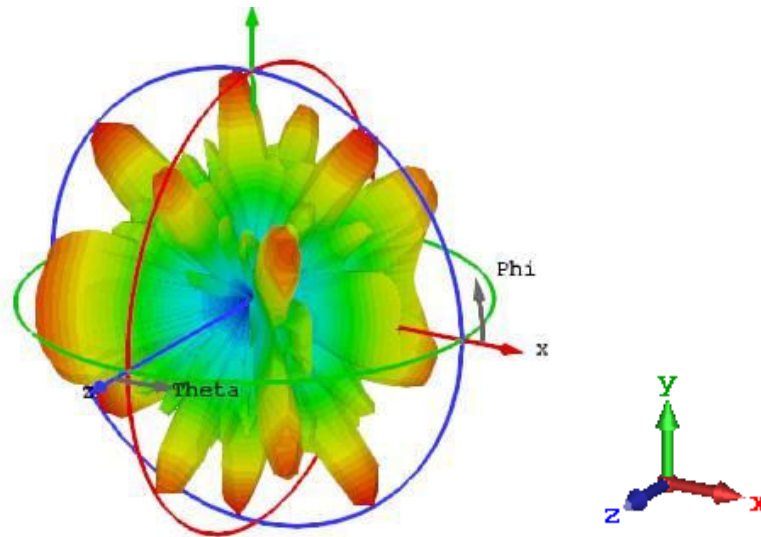
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.5. Lóbulo de radiación generado por un arreglo planar de 16 antenas tipo dipolo en configuración 4×4 con frecuencia de operación de 2,4 GHz y diferencia de fase uniforme de 60° entre columnas y 15° entre filas. (a) Separación = 0,25 λ en filas y columnas. (b) Separación = 0,5 λ en filas y columnas. (c) Separación = 0,75 λ en filas y columnas. (d) Separación = λ en filas y columnas. (e) Separación = 1,5 λ en filas y columnas.

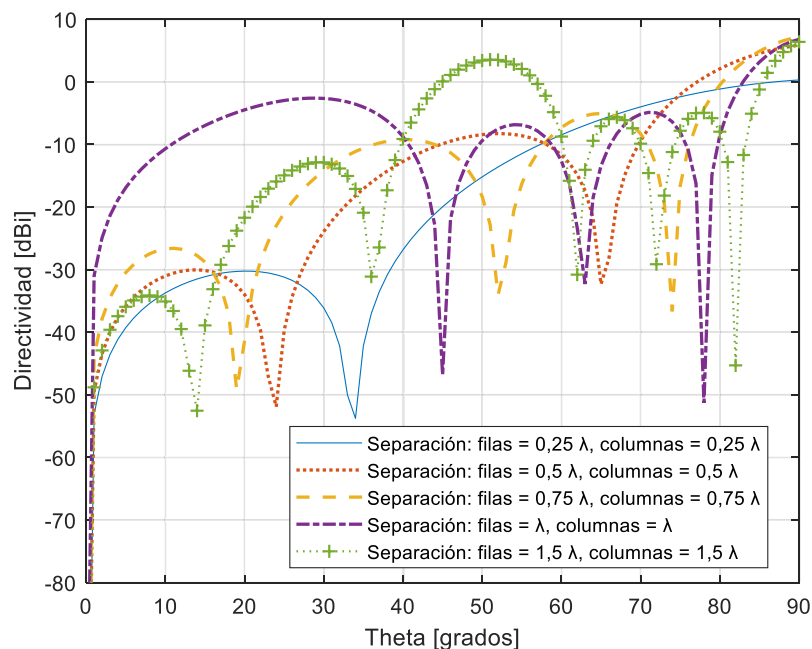


Figura 3.6. Variación de la directividad con respecto al ángulo Theta cuando Phi = 90° para un arreglo planar de 16 antenas tipo dipolo en configuración 4×4 con frecuencia de operación de 2,4 GHz diferencia de fase uniforme de 60° entre columnas y 15° entre filas y separación entre elementos variable.

Tabla 3.4. Resultados obtenidos con la aplicación desarrollada con 20% de tolerancia.

| Experimento | Configuración | Separación filas [λ] | Separación columnas [λ] | Frecuencia [GHz] | Directividad [dBi] | | Valor mínimo aceptable [dBi] | Fuera de rango |
|-------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | | | Valor esperado | Valor obtenido | | |
| 1 | 2x2 | 0,5 | 1 | 2,4 | 5 | 7,822 | 4,0309 | No |
| 2 | 2x3 | | | | 8 | 9,56 | 7,0309 | No |
| 3 | 3x3 | | | | 10 | 11,56 | 9,0309 | No |
| 4 | 2x7 | | | | 12 | 14,96 | 11,0309 | No |
| 5 | 2x13 | | | | 15 | 18,19 | 14,0309 | No |
| 6 | 3x27 | | | | 20 | 22,98 | 19,0309 | No |
| 7 | 2x2 | 0,25 | 0,5 | 5 | 5 | 5,165 | 4,0309 | No |
| 8 | 2x3 | | | | 8 | 6,702 | 7,0309 | Sí |
| 9 | 3x3 | | | | 10 | 8,515 | 9,0309 | Sí |
| 10 | 2x7 | | | | 12 | 10,08 | 11,0309 | Sí |
| 11 | 2x13 | | | | 15 | 12,67 | 14,0309 | Sí |
| 12 | 3x27 | | | | 20 | 17,67 | 19,0309 | Sí |
| 13 | 2x2 | 0,75 | 0,5 | 0,8 | 5 | 8,52 | 4,0309 | No |
| 14 | 2x3 | | | | 8 | 9,883 | 7,0309 | No |
| 15 | 3x3 | | | | 10 | 12,96 | 9,0309 | No |
| 16 | 2x7 | | | | 12 | 13,13 | 11,0309 | No |
| 17 | 2x13 | | | | 15 | 15,67 | 14,0309 | No |
| 18 | 3x27 | | | | 20 | 21,97 | 19,0309 | No |

La Tabla 3.5 contiene la directividad obtenida al calcular la configuración de 18 arreglos planares de antenas tipo dipolo con tolerancia = 10%, azimut = 100°, elevación = 0°, utilizando la aplicación desarrollada.

La Tabla 3.6 contiene la directividad obtenida al calcular la configuración de 18 arreglos planares de antenas tipo dipolo con tolerancia = 5%, azimut = 0°, elevación = 0°, utilizando la aplicación desarrollada.

Tabla 3.5. Resultados obtenidos con la aplicación desarrollada con 10% de tolerancia.

| Experimento | Configuración | Separación filas [λ] | Separación columnas [λ] | Frecuencia [GHz] | Directividad [dBi] | | Valor mínimo aceptable [dBi] | Fuera de rango |
|-------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | | | Valor esperado | Valor obtenido | | |
| 1 | 2x2 | 0,5 | 1 | 2,4 | 5 | 7,822 | 4,5424 | No |
| 2 | 2x3 | | | | 8 | 9,56 | 7,5424 | No |
| 3 | 2x5 | | | | 10 | 13,71 | 9,5424 | No |
| 4 | 3x5 | | | | 12 | 15,22 | 11,5424 | No |
| 5 | 6x5 | | | | 15 | 18,63 | 14,5424 | No |
| 6 | 7x13 | | | | 20 | 23,63 | 19,5424 | No |
| 7 | 2x2 | 0,25 | 0,5 | 5 | 5 | 5,165 | 4,5424 | No |
| 8 | 2x3 | | | | 8 | 6,702 | 7,5424 | Sí |
| 9 | 2x5 | | | | 10 | 8,703 | 9,5424 | Sí |
| 10 | 3x5 | | | | 12 | 10,55 | 11,5424 | Sí |
| 11 | 6x5 | | | | 15 | 13,89 | 14,5424 | Sí |
| 12 | 7x13 | | | | 20 | 18,55 | 19,5424 | Sí |
| 13 | 2x2 | 0,75 | 0,5 | 0,8 | 5 | 8,52 | 4,5424 | No |
| 14 | 2x3 | | | | 8 | 9,883 | 7,5424 | No |
| 15 | 2x5 | | | | 10 | 12,23 | 9,5424 | No |
| 16 | 3x5 | | | | 12 | 14,9 | 11,5424 | No |
| 17 | 6x5 | | | | 15 | 18,11 | 14,5424 | No |
| 18 | 7x13 | | | | 20 | 22,7 | 19,5424 | No |

Tabla 3.6. Resultados obtenidos con la aplicación desarrollada con 5% de tolerancia.

| Experimento | Configuración | Separación filas [λ] | Separación columnas [λ] | Frecuencia [GHz] | Directividad [dBi] | | Valor mínimo aceptable [dBi] | Fuera de rango |
|-------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | | | Valor esperado | Valor obtenido | | |
| 1 | 2×2 | 0,5 | 1 | 2,4 | 5 | 7,822 | 4,7772 | No |
| 2 | 2×3 | | | | 8 | 9,56 | 7,7772 | No |
| 3 | 2×5 | | | | 10 | 13,71 | 9,7772 | No |
| 4 | 2×8 | | | | 12 | 15,93 | 11,7772 | No |
| 5 | 8×4 | | | | 15 | 18,87 | 14,7772 | No |
| 6 | 5×19 | | | | 20 | 23,8 | 19,7772 | No |
| 7 | 2×2 | 0,25 | 0,5 | 5 | 5 | 5,165 | 4,7772 | No |
| 8 | 2×3 | | | | 8 | 6,702 | 7,7772 | Sí |
| 9 | 2×5 | | | | 10 | 8,703 | 9,7772 | Sí |
| 10 | 2×8 | | | | 12 | 10,63 | 11,7772 | Sí |
| 11 | 8×4 | | | | 15 | 14,37 | 14,7772 | Sí |
| 12 | 5×19 | | | | 20 | 18,9 | 19,7772 | Sí |
| 13 | 2×2 | 0,75 | 0,5 | 0,8 | 5 | 8,52 | 4,7772 | No |
| 14 | 2×3 | | | | 8 | 9,883 | 7,7772 | No |
| 15 | 2×5 | | | | 10 | 12,23 | 9,7772 | No |
| 16 | 2×8 | | | | 12 | 14,12 | 11,7772 | No |
| 17 | 8×4 | | | | 15 | 18,35 | 14,7772 | No |
| 18 | 5×19 | | | | 20 | 22,53 | 19,7772 | No |

3.1.3 ARREGLOS LINEALES DE ANTENAS TIPO *PATCH*

La Figura 3.7 muestra la variación de la directividad con respecto al número de elementos para distintas configuraciones de arreglos lineales de antenas tipo *patch* con escala logarítmica en el eje x.

La Figura 3.8 ilustra la influencia que tiene la separación entre elementos sobre el lóbulo de radiación generado por un arreglo lineal de 5 antenas tipo *patch* con frecuencia de operación de 2,4 GHz y diferencia de fase uniforme de 60°.

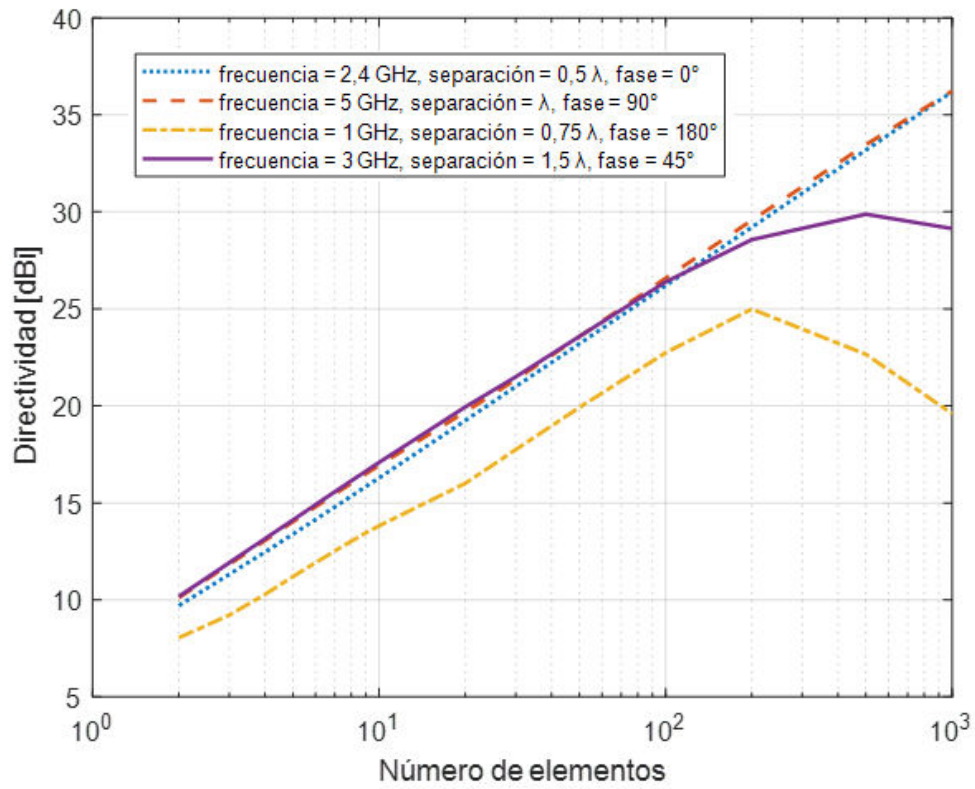
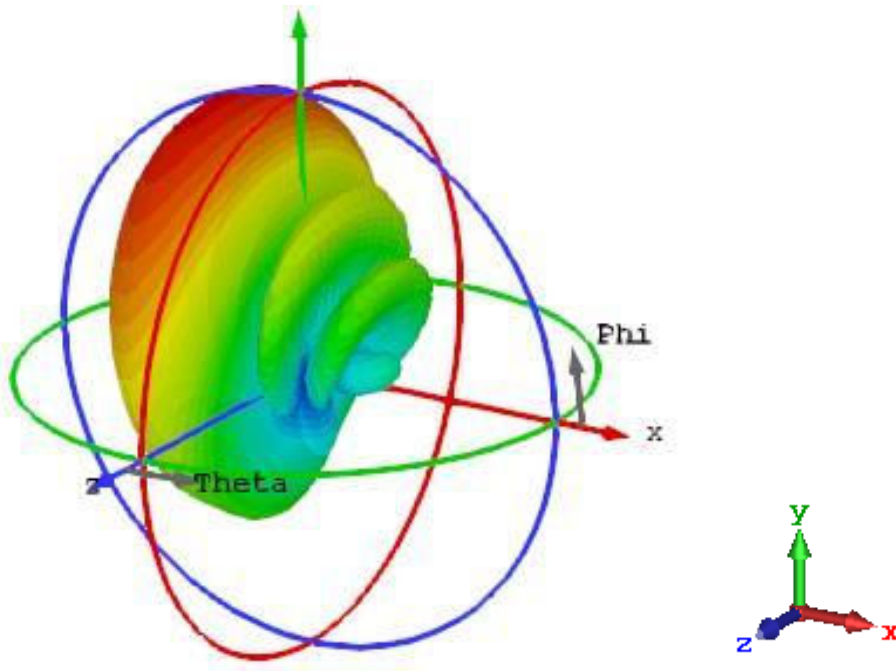
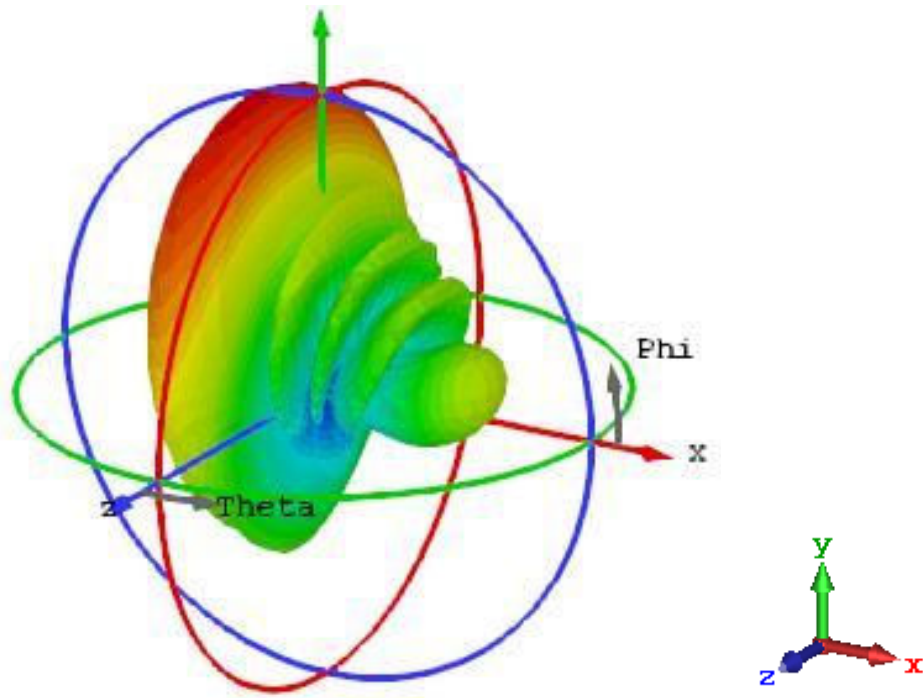


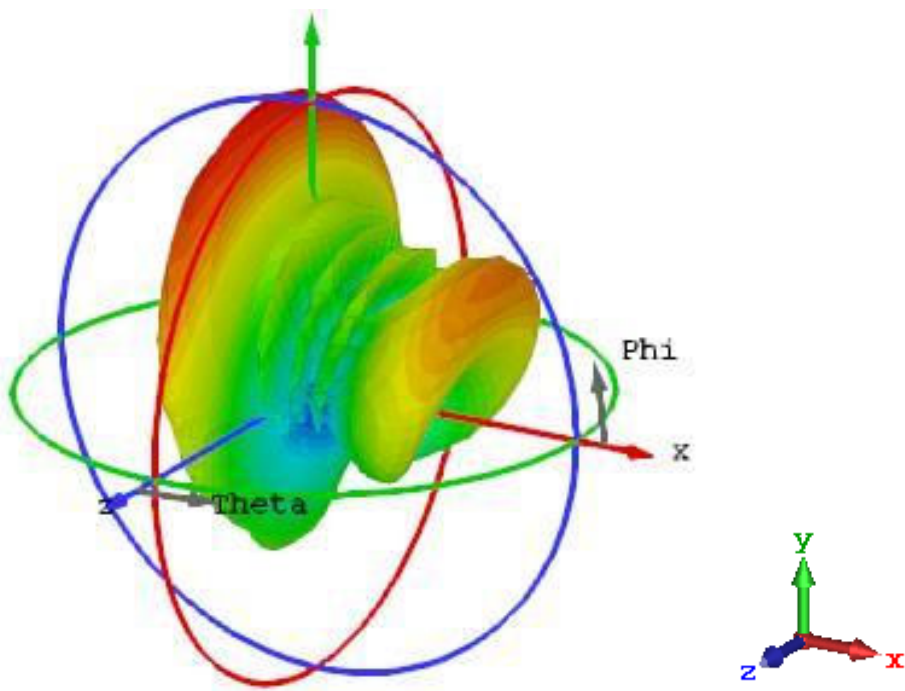
Figura 3.7. Variación de la directividad con respecto al número de elementos para arreglos lineales de antenas tipo *patch*.



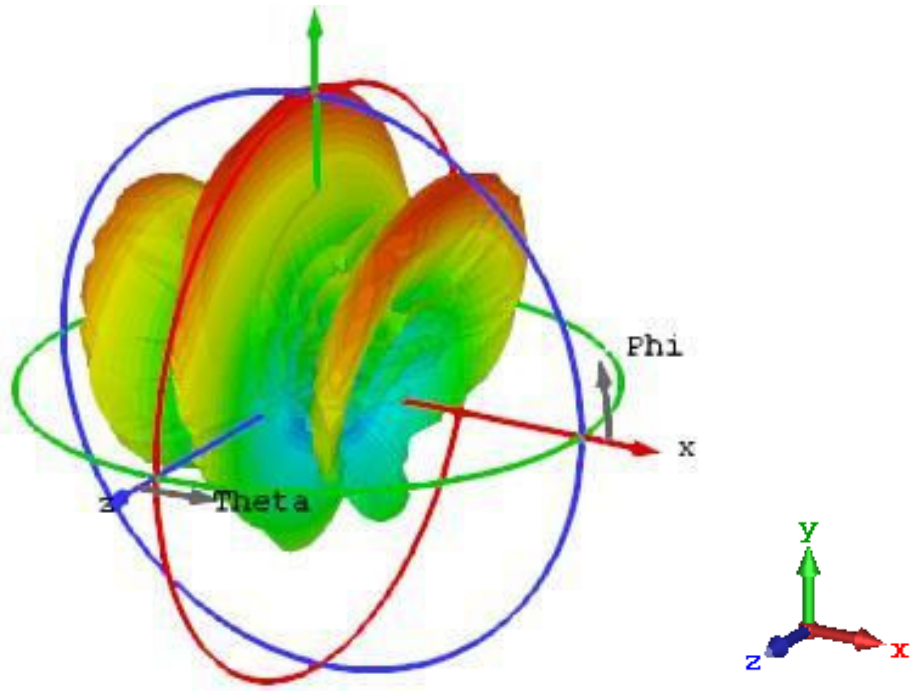
(a)



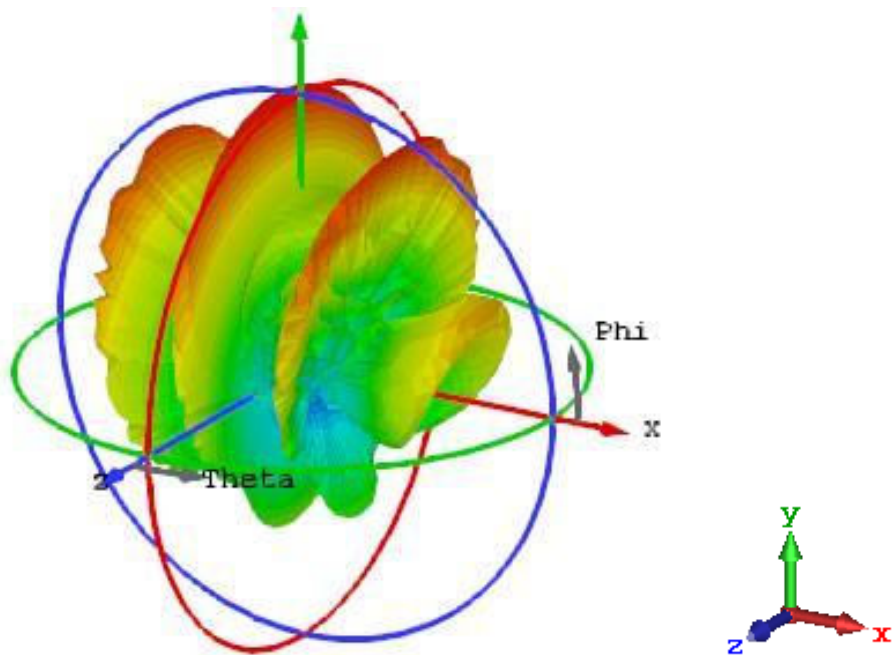
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.8. Lóbulo de radiación generado por un arreglo lineal de 5 antenas tipo *patch* con frecuencia de operación de 2,4 GHz y diferencia de fase uniforme de 60° . (a) Separación= a $0,5 \lambda$. (b) Separación= $0,75\lambda$. (c) Separación = 1λ . (d) Separación= $1,5 \lambda$. (e) Separación= 2λ .

En la Figura 3.9 se muestra la variación de la directividad con respecto al ángulo Phi cuando Theta = 90°, para un arreglo lineal de 5 antenas tipo *patch* con frecuencia de operación de 2,4 GHz diferencia de fase uniforme de 60° y separación entre elementos variable.

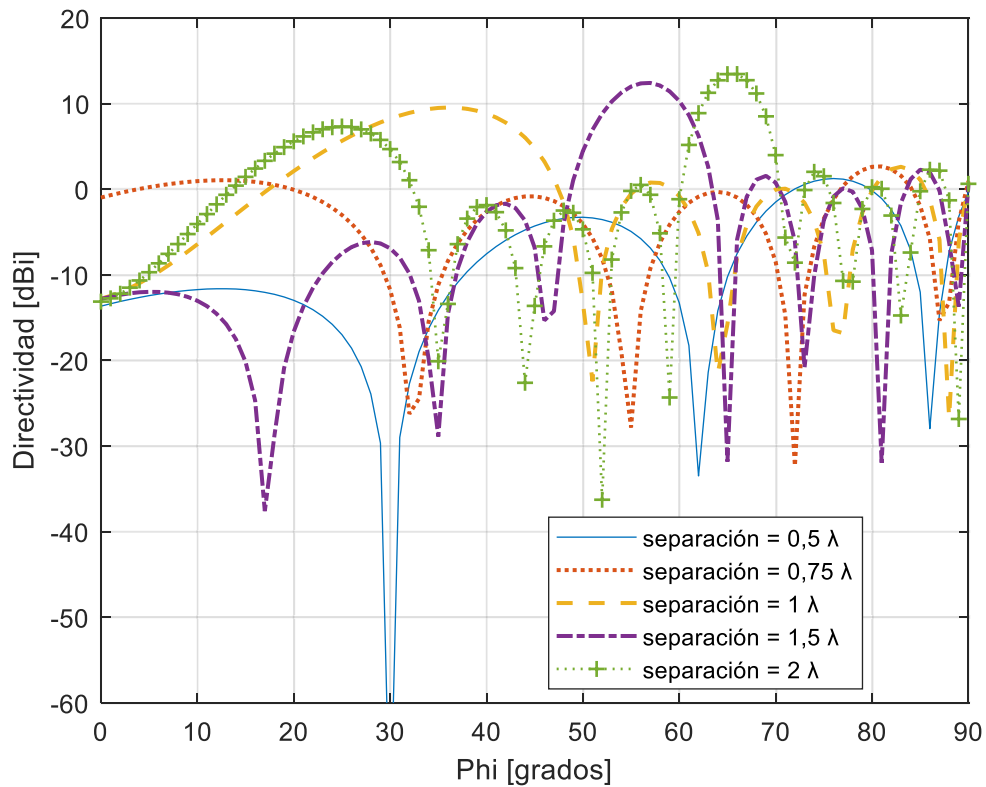


Figura 3.9. Variación de la directividad con respecto al ángulo Phi cuando Theta = 90°, para un arreglo lineal de 5 antenas tipo *patch* con frecuencia de operación de 2,4 GHz diferencia de fase uniforme de 60° y separación entre elementos variable.

La Tabla 3.7 contiene la directividad obtenida al calcular la configuración de 18 arreglos lineales de antenas tipo *patch* con tolerancia = 20%, azimut = 180°, elevación = 50°, utilizando la aplicación desarrollada.

La Tabla 3.8 contiene la directividad obtenida al calcular la configuración de 18 arreglos lineales de antenas tipo *patch* con tolerancia = 10%, azimut = 100°, elevación = 0°, utilizando la aplicación desarrollada.

La Tabla 3.9 contiene la directividad obtenida al calcular la configuración de 18 arreglos lineales de antenas tipo *patch* con tolerancia = 5%, azimut = 0°, elevación = 0°, utilizando la aplicación desarrollada.

Tabla 3.7. Resultados obtenidos con la aplicación desarrollada con 20% de tolerancia.

| Experimento | Elementos | Separación [λ] | Frecuencia [GHz] | Directividad [dBi] | | Valor mínimo aceptable [dBi] | Fuera de rango |
|-------------|-----------|----------------|------------------|--------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | | Valor esperado | Valor obtenido | | |
| 1 | 5 | 0,5 | 2,4 | 8 | 12,22 | 7,0309 | No |
| 2 | 7 | | | 10 | 13,5 | 9,0309 | No |
| 3 | 11 | | | 12 | 15,44 | 11,0309 | No |
| 4 | 21 | | | 15 | 18,24 | 14,0309 | No |
| 5 | 42 | | | 18 | 21,24 | 17,0309 | No |
| 6 | 68 | | | 20 | 23,33 | 19,0309 | No |
| 7 | 5 | 0,25 | 5 | 8 | 10,37 | 7,0309 | No |
| 8 | 7 | | | 10 | 11,26 | 9,0309 | No |
| 9 | 11 | | | 12 | 12,77 | 11,0309 | No |
| 10 | 21 | | | 15 | 15,32 | 14,0309 | No |
| 11 | 42 | | | 18 | 18,28 | 17,0309 | No |
| 12 | 68 | | | 20 | 20,35 | 19,0309 | No |
| 13 | 5 | 0,75 | 1,7 | 8 | 11,34 | 7,0309 | No |
| 14 | 7 | | | 10 | 12,77 | 9,0309 | No |
| 15 | 11 | | | 12 | 14,75 | 11,0309 | No |
| 16 | 21 | | | 15 | 17,49 | 14,0309 | No |
| 17 | 42 | | | 18 | 20,49 | 17,0309 | No |
| 18 | 68 | | | 20 | 22,58 | 19,0309 | No |

Tabla 3.8. Resultados obtenidos con la aplicación desarrollada con 10% de tolerancia.

| Experimento | Elementos | Separación [λ] | Frecuencia [GHz] | Directividad [dBi] | | Valor mínimo aceptable [dBi] | Fuera de rango |
|-------------|-----------|----------------|------------------|--------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | | Valor esperado | Valor obtenido | | |
| 1 | 5 | 0,5 | 2,4 | 8 | 13 | 7,5424 | No |
| 2 | 8 | | | 10 | 14,71 | 9,5424 | No |
| 3 | 12 | | | 12 | 16,83 | 11,5424 | No |
| 4 | 24 | | | 15 | 19,79 | 14,5424 | No |
| 5 | 48 | | | 18 | 22,76 | 17,5424 | No |
| 6 | 75 | | | 20 | 24,72 | 19,5424 | No |
| 7 | 5 | 0,25 | 5 | 8 | 10,67 | 7,5424 | No |
| 8 | 8 | | | 10 | 12,45 | 9,5424 | No |
| 9 | 12 | | | 12 | 14,08 | 11,5424 | No |
| 10 | 24 | | | 15 | 16,95 | 14,5424 | No |
| 11 | 48 | | | 18 | 19,9 | 17,5424 | No |
| 12 | 75 | | | 20 | 21,81 | 19,5424 | No |
| 13 | 5 | 0,75 | 1,7 | 8 | 14,81 | 7,5424 | No |
| 14 | 8 | | | 10 | 16,87 | 9,5424 | No |
| 15 | 12 | | | 12 | 18,64 | 11,5424 | No |
| 16 | 24 | | | 15 | 21,66 | 14,5424 | No |
| 17 | 48 | | | 18 | 24,68 | 17,5424 | No |
| 18 | 75 | | | 20 | 26,62 | 19,5424 | No |

Tabla 3.9. Resultados obtenidos con la aplicación desarrollada con 5% de tolerancia.

| Experimento | Elementos | Separación [λ] | Frecuencia [GHz] | Directividad [dBi] | | Valor mínimo aceptable [dBi] | Fuera de rango |
|-------------|-----------|----------------|------------------|--------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | | Valor esperado | Valor obtenido | | |
| 1 | 5 | 0,5 | 2,4 | 8 | 12,22 | 7,7772 | No |
| 2 | 8 | | | 10 | 14,07 | 9,7772 | No |
| 3 | 13 | | | 12 | 16,16 | 11,7772 | No |
| 4 | 26 | | | 15 | 19,16 | 14,7772 | No |
| 5 | 51 | | | 18 | 22,08 | 17,7772 | No |
| 6 | 80 | | | 20 | 24,04 | 19,7772 | No |
| 7 | 5 | 0,25 | 5 | 8 | 10,3 | 7,7772 | No |
| 8 | 8 | | | 10 | 11,31 | 9,7772 | No |
| 9 | 13 | | | 12 | 12,69 | 11,7772 | No |
| 10 | 26 | | | 15 | 15,02 | 14,7772 | No |
| 11 | 51 | | | 18 | 17,61 | 17,7772 | Sí |
| 12 | 80 | | | 20 | 19,26 | 19,7772 | Sí |
| 13 | 5 | 0,75 | 1,7 | 8 | 13,98 | 7,7772 | No |
| 14 | 8 | | | 10 | 16,04 | 9,7772 | No |
| 15 | 13 | | | 12 | 18,1 | 11,7772 | No |
| 16 | 26 | | | 15 | 20,98 | 14,7772 | No |
| 17 | 51 | | | 18 | 23,71 | 17,7772 | No |
| 18 | 80 | | | 20 | 25,55 | 19,7772 | No |

3.1.4 ARREGLOS PLANARES DE ANTENAS TIPO *PATCH*

La Figura 3.10 muestra la variación de la directividad con respecto al número de elementos para distintas configuraciones de arreglos planares de antenas tipo *patch* con escala logarítmica en el eje x. En el caso de que existan varias configuraciones posibles para un determinado número de elementos, se toman en cuenta aquellas configuraciones en las cuales el valor correspondiente a la diferencia entre el número de filas y número de columnas es mínimo.

La Figura 3.11 ilustra la influencia que tiene la separación entre elementos sobre el lóbulo de radiación generado por un arreglo planar de 16 antenas tipo *patch* en configuración 4×4 con frecuencia de operación de 2,4 GHz y diferencia de fase uniforme de 60° entre columnas y 15° entre filas.

En la Figura 3.12 se muestra la variación de la directividad con respecto al ángulo Theta cuando $\Phi = 90^\circ$ para un arreglo planar de 16 antenas tipo *patch* en configuración 4×4

con frecuencia de operación de 2,4 GHz diferencia de fase uniforme de 60° entre columnas y 15° entre filas y separación entre elementos variable.

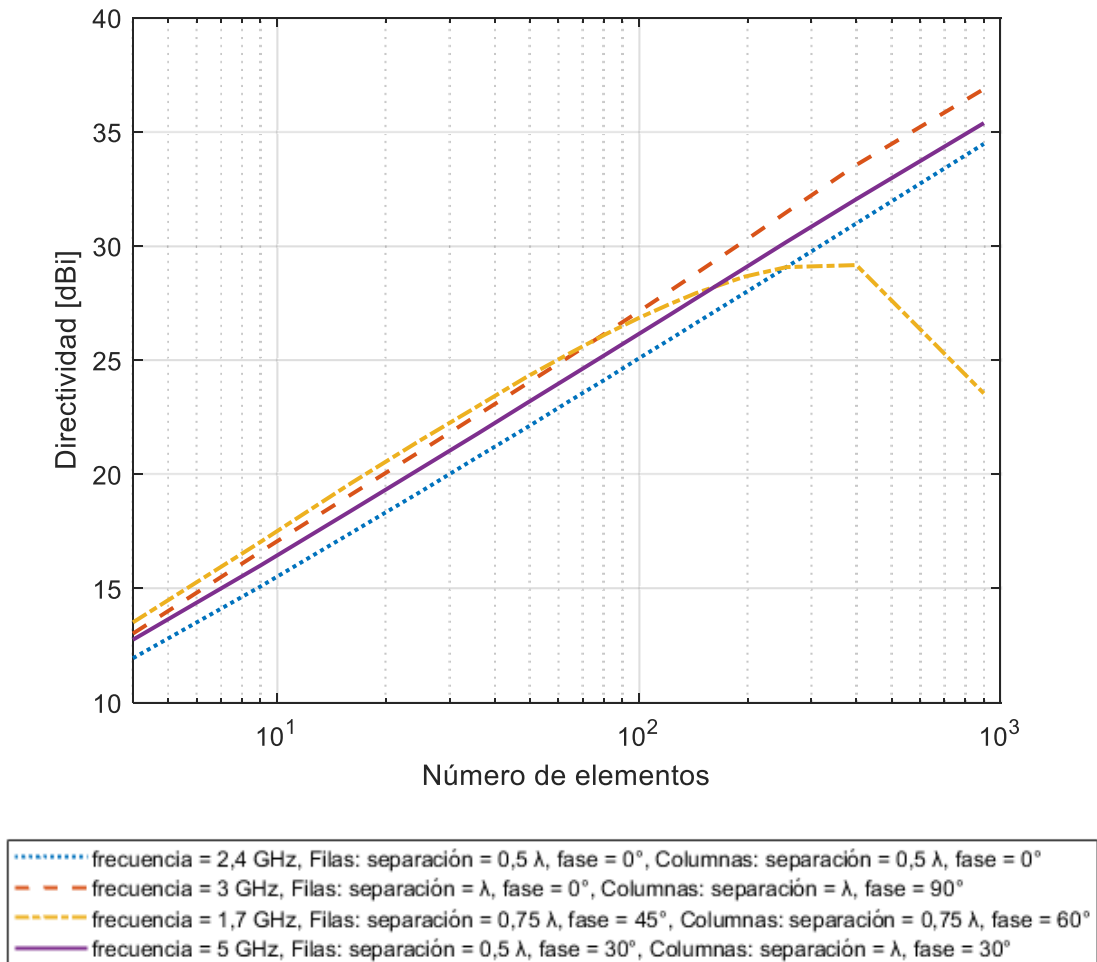
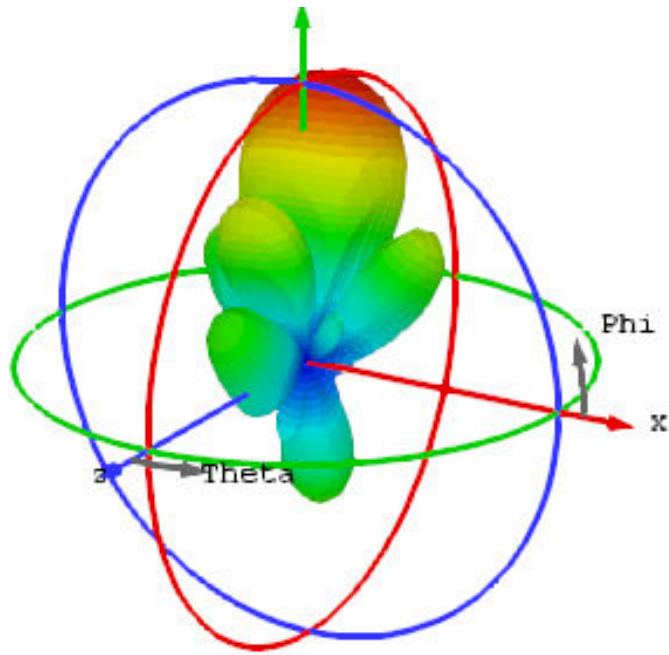
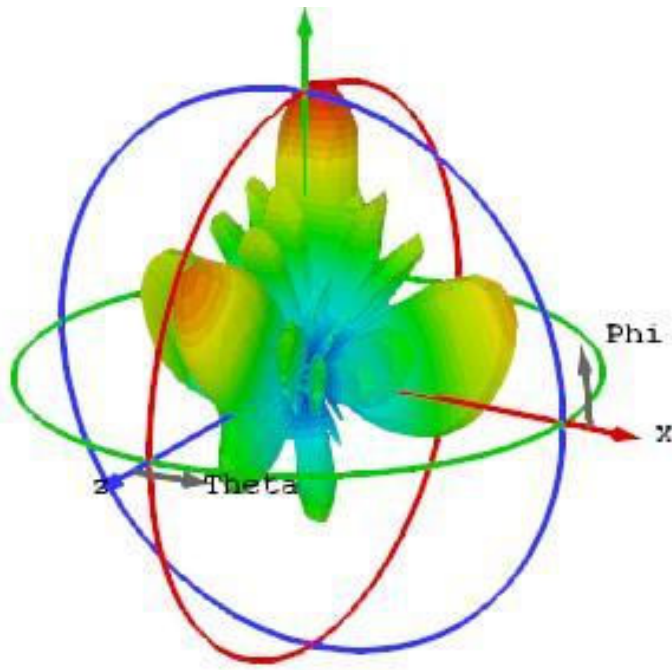


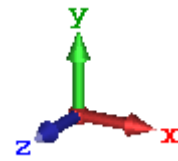
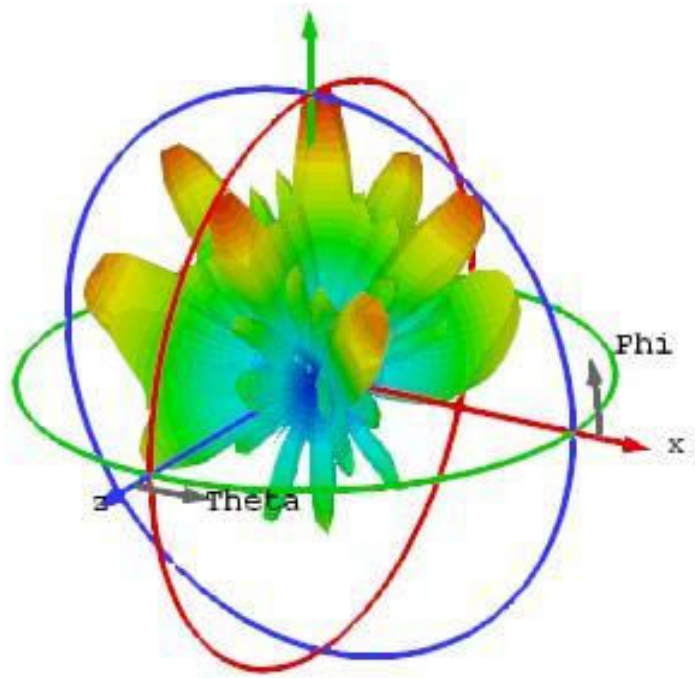
Figura 3.10. Variación de la directividad con respecto al número de elementos para arreglos planares de antenas tipo dipolo.



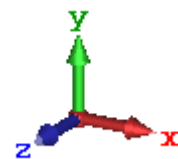
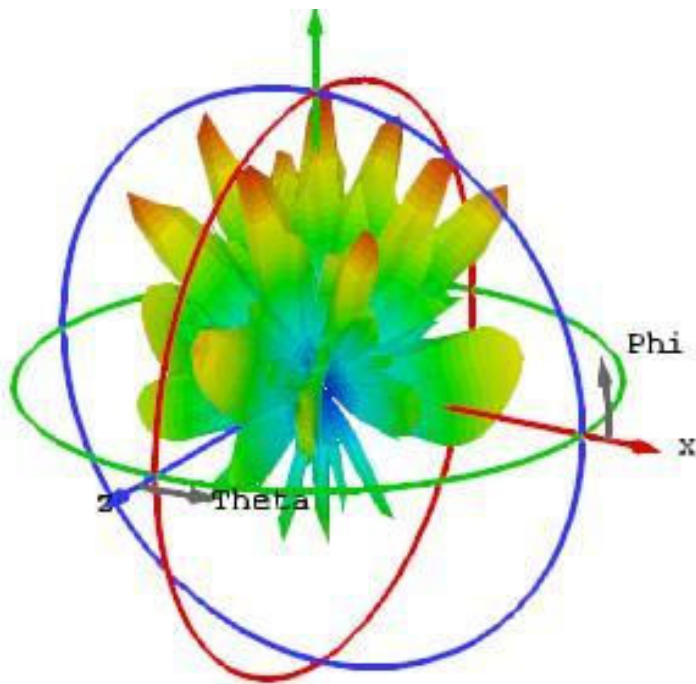
(a)



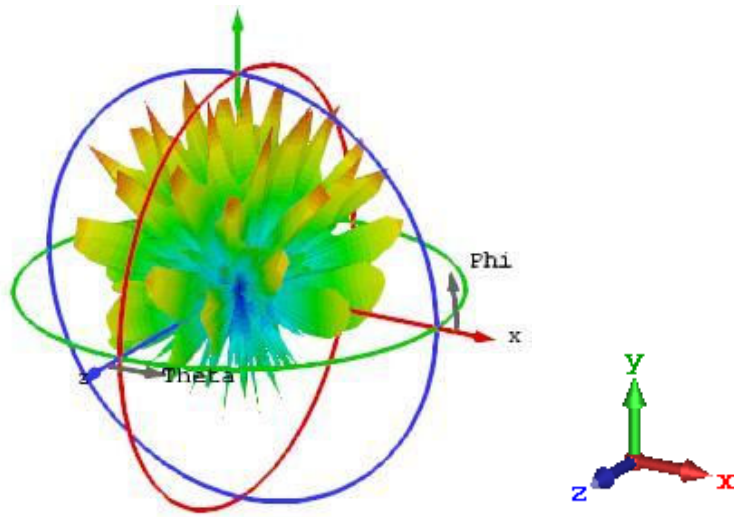
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.11. Lóbulo de radiación generado por un arreglo planar de 16 antenas tipo *patch* en configuración 4×4 con frecuencia de operación de 2,4 GHz y diferencia de fase uniforme de 60° entre columnas y 15° entre filas. (a) Separación = 0,5 λ en filas y columnas. (b) Separación = λ en filas y columnas. (c) Separación = 1,5 λ en filas y columnas. (d) Separación = 2 λ en filas y columnas. (e) Separación = 3 λ en filas y columnas.

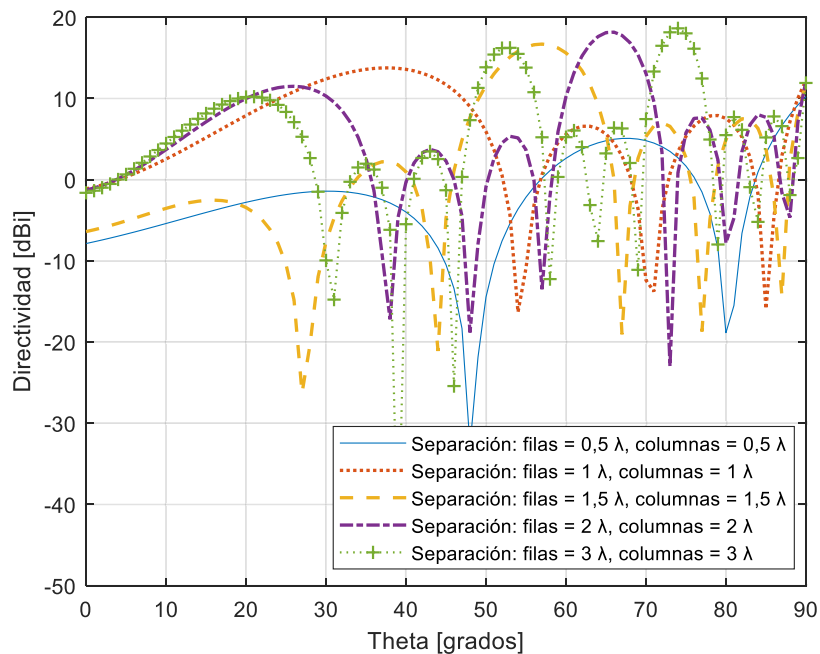


Figura 3.12. Variación de la directividad con respecto al ángulo Theta cuando Phi = 90° para un arreglo planar de 16 antenas tipo *patch* en configuración 4×4 con frecuencia de operación de 2,4 GHz diferencia de fase uniforme de 60° entre columnas y 15° entre filas y separación entre elementos variable.

La Tabla 3.10 contiene la directividad obtenida al calcular la configuración de 18 arreglos planares de antenas tipo *patch* con tolerancia = 20%, azimut = 180°, elevación = 50°, utilizando la aplicación desarrollada.

Tabla 3.10. Resultados obtenidos con la aplicación desarrollada con 20% de tolerancia.

| Experimento | Configuración | Separación filas [λ] | Separación columnas [λ] | Frecuencia [GHz] | Directividad [dBi] | | Valor mínimo aceptable [dBi] | Fuera de rango |
|-------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | | | Valor esperado | Valor obtenido | | |
| 1 | 2x3 | 0,5 | 1 | 2,4 | 8 | 14,19 | 7,0309 | No |
| 2 | 2x4 | | | | 10 | 15,52 | 9,0309 | No |
| 3 | 4x3 | | | | 12 | 16,69 | 11,0309 | No |
| 4 | 2x11 | | | | 15 | 20,12 | 14,0309 | No |
| 5 | 11x4 | | | | 18 | 22,36 | 17,0309 | No |
| 6 | 17x4 | | | | 20 | 24,28 | 19,0309 | No |
| 7 | 2x3 | 0,25 | 0,5 | 5 | 8 | 12,29 | 7,0309 | No |
| 8 | 2x4 | | | | 10 | 13,41 | 9,0309 | No |
| 9 | 4x3 | | | | 12 | 12,53 | 11,0309 | No |
| 10 | 2x11 | | | | 15 | 17,59 | 14,0309 | No |
| 11 | 11x4 | | | | 18 | 15,04 | 17,0309 | Sí |
| 12 | 17x4 | | | | 20 | 14,03 | 19,0309 | Sí |
| 13 | 2x3 | 0,75 | 0,5 | 1,7 | 8 | 13,13 | 7,0309 | No |
| 14 | 2x4 | | | | 10 | 14,25 | 9,0309 | No |
| 15 | 4x3 | | | | 12 | 15,77 | 11,0309 | No |
| 16 | 2x11 | | | | 15 | 18,44 | 14,0309 | No |
| 17 | 11x4 | | | | 18 | 21,01 | 17,0309 | No |
| 18 | 17x4 | | | | 20 | 22,88 | 19,0309 | No |

La Tabla 3.11 contiene la directividad obtenida al calcular la configuración de 18 arreglos planares de antenas tipo *patch* con tolerancia = 10%, azimut = 100°, elevación = 0°, utilizando la aplicación desarrollada.

Tabla 3.11. Resultados obtenidos con la aplicación desarrollada con 10% de tolerancia.

| Experimento | Configuración | Separación filas [λ] | Separación columnas [λ] | Frecuencia [GHz] | Directividad [dBi] | | Valor mínimo aceptable [dBi] | Fuera de rango |
|-------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | | | Valor esperado | Valor obtenido | | |
| 1 | 2x3 | 0,5 | 1 | 2,4 | 8 | 9,703 | 7,5424 | No |
| 2 | 2x4 | | | | 10 | 9,919 | 9,5424 | No |
| 3 | 4x3 | | | | 12 | 12,13 | 11,5424 | No |
| 4 | 6x4 | | | | 15 | 13,86 | 14,5424 | Sí |
| 5 | 12x4 | | | | 18 | 16,47 | 17,5424 | Sí |
| 6 | 38x2 | | | | 20 | 20,73 | 19,5424 | No |
| 7 | 2x3 | 0,25 | 0,5 | 5 | 8 | 12,04 | 7,5424 | No |
| 8 | 2x4 | | | | 10 | 13,16 | 9,5424 | No |
| 9 | 4x3 | | | | 12 | 13,11 | 11,5424 | No |
| 10 | 6x4 | | | | 15 | 14,76 | 14,5424 | No |
| 11 | 12x4 | | | | 18 | 15,89 | 17,5424 | Sí |
| 12 | 38x2 | | | | 20 | 16,51 | 19,5424 | Sí |
| 13 | 2x3 | 0,75 | 0,5 | 1,7 | 8 | 13,74 | 7,5424 | No |
| 14 | 2x4 | | | | 10 | 14,86 | 9,5424 | No |
| 15 | 4x3 | | | | 12 | 16,49 | 11,5424 | No |
| 16 | 6x4 | | | | 15 | 19,28 | 14,5424 | No |
| 17 | 12x4 | | | | 18 | 21,86 | 17,5424 | No |
| 18 | 38x2 | | | | 20 | 23,21 | 19,5424 | No |

La Tabla 3.12. Resultados obtenidos con la aplicación desarrollada con 5% de tolerancia. contiene la directividad obtenida al calcular la configuración de 18 arreglos planares de antenas tipo *patch* con tolerancia = 5%, azimut = 0°, elevación = 0°, utilizando la aplicación desarrollada.

Tabla 3.12. Resultados obtenidos con la aplicación desarrollada con 5% de tolerancia.

| Experimento | Configuración | Separación filas [λ] | Separación columnas [λ] | Frecuencia [GHz] | Directividad [dBi] | | Valor mínimo aceptable [dBi] | Fuera de rango |
|-------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | | | Valor esperado | Valor obtenido | | |
| 1 | 2x3 | 0,5 | 1 | 2,4 | 8 | 7,717 | 7,7772 | Sí |
| 2 | 2x4 | | | | 10 | 7,888 | 9,7772 | Sí |
| 3 | 2x7 | | | | 12 | 8,616 | 11,7772 | Sí |
| 4 | 2x13 | | | | 15 | 10,38 | 14,7772 | Sí |
| 5 | 3x17 | | | | 18 | 11,8 | 17,7772 | Sí |
| 6 | 40x2 | | | | 20 | 17,16 | 19,7772 | Sí |
| 7 | 2x3 | 0,25 | 0,5 | 5 | 8 | 10,2 | 7,7772 | No |
| 8 | 2x4 | | | | 10 | 11,29 | 9,7772 | No |
| 9 | 2x7 | | | | 12 | 13,53 | 11,7772 | No |
| 10 | 2x13 | | | | 15 | 16,11 | 14,7772 | No |
| 11 | 3x17 | | | | 18 | 21,12 | 17,7772 | No |
| 12 | 40x2 | | | | 20 | 16,6 | 19,7772 | Sí |
| 13 | 2x3 | 0,75 | 0,5 | 1,7 | 8 | 11,52 | 7,7772 | No |
| 14 | 2x4 | | | | 10 | 12,64 | 9,7772 | No |
| 15 | 2x7 | | | | 12 | 14,94 | 11,7772 | No |
| 16 | 2x13 | | | | 15 | 17,54 | 14,7772 | No |
| 17 | 3x17 | | | | 18 | 19,93 | 17,7772 | No |
| 18 | 40x2 | | | | 20 | 19,59 | 19,7772 | Sí |

3.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tomando en cuenta las siguientes figuras: Figura 3.1, Figura 3.4, Figura 3.7 y Figura 3.10, se puede apreciar que la directividad de un arreglo de antenas es inversamente proporcional al número de elementos, independientemente del tipo de arreglo (lineal o planar) o su respectiva configuración (fase, espaciamento entre elementos, frecuencia). El número de elementos aumenta de forma exponencial mientras que la directividad describe una curva de crecimiento logarítmica, por lo tanto, existe un límite a partir del cual el incremento de directividad no es significativo en comparación con el número de antenas, esto sucede aproximadamente en el intervalo de 15 dBi a 20 dBi con un incremento estimado de 50 antenas para conseguir un aumento de 5 dBi de directividad.

En las siguientes figuras: Figura 3.2, Figura 3.3, Figura 3.6, Figura 3.8, Figura 3.9, Figura 3.11 y Figura 3.12, se muestra la relación que existe entre la directividad del arreglo de antenas y el espaciamento entre elementos, se puede observar que a mayor

espaciamiento mayor será la directividad y viceversa, sin embargo, al incrementar el espaciamiento aparecen lóbulos secundarios y *grating lobes*, en consecuencia la forma del patrón de radiación se altera.

Al analizar las tablas Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3, se puede apreciar que en el caso de arreglos lineales de antenas tipo dipolo, de un total de 54 experimentos realizados se obtienen 5 resultados fuera de rango, por lo cual el margen de error es del 9,26%.

Al analizar las tablas Tabla 3.4, Tabla 3.5 y Tabla 3.6, se puede apreciar que en el caso de arreglos planares de antenas tipo dipolo, de un total de 54 experimentos realizados se obtienen 15 resultados fuera de rango, por lo cual el margen de error es del 27,78%. Todos los errores se presentan al utilizar una separación entre elementos inferior a $0,5\lambda$.

Al analizar las tablas Tabla 3.7, Tabla 3.8 y Tabla 3.9, se puede apreciar que en el caso de arreglos lineales de antenas tipo *patch*, de un total de 54 experimentos realizados se obtienen 2 resultados fuera de rango, por lo cual el margen de error es del 3,7%.

Al analizar las tablas Tabla 3.10, Tabla 3.11 y Tabla 3.12, se puede apreciar que en el caso de arreglos planares de antenas tipo *patch*, de un total de 54 experimentos realizados se obtienen 14 resultados fuera de rango, por lo cual el margen de error es del 25,93%.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

En el presente proyecto de titulación se desarrolló una aplicación que interconecta MATLAB con el software de simulación CST Studio Suite y permite al usuario diseñar y modelar estructuras de arreglos de antenas que cumplan con condiciones de apuntamiento y directividad previamente establecidas.

En primer lugar, se definieron los tipos de antenas a emplear tomando en cuenta el lóbulo de radiación que generan y su grado de utilización en la industria, por lo tanto, se seleccionaron antenas tipo dipolo y antenas tipo *patch* cuyos lóbulos de radiación se permiten crear patrones directivos y son altamente utilizadas en comunicaciones inalámbricas para dispositivos móviles como pueden ser teléfonos inteligentes, ordenadores portátiles, routers, radio bases, entre otros.

Para establecer la interconexión MATLAB-CST Studio Suite, se utilizó la API “hgiddens/CST_App” desarrollada por Henry Giddens, empleando dicho código como base se desarrollaron funciones para modelar antenas tipo dipolo y antenas tipo *patch*.

En lo que respecta al diseño y modelado de los elementos, se optó por una alimentación a través de cable coaxial para las antenas tipo *patch*, con la finalidad de garantizar un correcto acoplamiento entre las antenas y la línea de alimentación, debido a esto se limitó la frecuencia de operación con un valor máximo de 10 GHz, ya que una implementación en frecuencias superiores implica una disminución en las dimensiones de la antena y su tamaño sería comparable con el del cable coaxial. Para el caso de las antenas tipo dipolo no se estableció ninguna restricción.

En cuanto al método para obtener la directividad, inicialmente se tomaron en cuenta 3 enfoques:

- El primero consiste en utilizar la función “pattern” de MATLAB, que toma como parámetro de entrada el arreglo de antenas y devuelve el valor de directividad, sin embargo, la cantidad de recursos computacionales requeridos para realizar los cálculos es demasiado alta por lo cual no se implementó.
- El segundo método requiere ejecutar una simulación en CST Studio Suite e importar los resultados desde MATLAB, lo cual consume menor cantidad de recursos que el método antes descrito. No obstante, al emplear un algoritmo de optimización iterativo, este proceso se repite hasta encontrar una configuración

óptima, por lo cual el tiempo de ejecución no es fijo y podría extenderse por encima de una hora si se requiere una configuración con más de 10 elementos.

- El último método consiste en calcular de manera independiente el factor de arreglo y la directividad individual de la antena (dipolo y *patch*). Posteriormente se multiplican estos valores y como resultado se obtiene la directividad del arreglo, sin embargo, no se toma en cuenta el acoplamiento mutuo.

Se optó por utilizar el tercer enfoque debido a que se dio prioridad a la optimización de recursos computacionales con el fin de reducir el tiempo de simulación.

Los datos tabulados muestran el margen de error de la aplicación desarrollada, de un total de 216 experimentos realizados, se obtuvieron 180 valores de directividad dentro del rango esperado y 36 valores erróneos, lo cual corresponde a un error del 16,67%. Cabe destacar que la mayor cantidad de errores se encuentra en los experimentos que involucran arreglos planares con un total de 29 errores que se distribuyen de la siguiente manera: 15 errores en arreglos planares de antenas tipo dipolo y 14 errores en arreglos planares de antenas tipo *patch*.

En cuanto a los arreglos lineales, la distribución de errores es la siguiente: 5 errores en arreglos lineales de antenas tipo dipolo y 2 errores en arreglos lineales de antenas tipo *patch*.

No obstante, si se realiza el análisis por tipo de arreglo (lineal y planar), con un total de 108 muestras para cada caso se obtiene un margen de error del 26,85% para arreglos planares y 6,48% si se trata de arreglos lineales. Dicha diferencia se debe a la complejidad de los cálculos necesarios para obtener la directividad, que en el caso de los arreglos planares involucra un mayor número de variables puesto que requiere un análisis en dos dimensiones en comparación al análisis unidimensional empleado en arreglos lineales.

Por último, el producto final demostrable puede ser utilizado como material didáctico para la enseñanza de la teoría de arreglos de antenas y como herramienta para facilitar y optimizar el proceso de diseño y modelado.

4.2. RECOMENDACIONES

En primer lugar, se recomienda contar con un equipo de altas prestaciones computacionales que cuente con un mínimo de 16 GB de RAM y una tarjeta gráfica, al utilizar este tipo de configuración se podrán implementar métodos más precisos en el cálculo de la directividad.

El presente proyecto de titulación se enfoca en la generación de arreglos de antenas y la disposición de sus elementos, por lo cual, para futuras investigaciones se propone el diseño redes de alimentación para cada arreglo de tal manera que éstas sean aplicables tanto a los procesos de diseño como a un ambiente de producción. Asimismo, se propone el análisis de las señales incidentes en cada antena y su aplicación orientada a la conformación de haces (*beamforming*).

Para reducir el margen de error de la aplicación se recomienda realizar una base de datos con valores de directividad generados en CST Studio Suite, posteriormente contrastar estos resultados con los valores obtenidos en MATLAB y generar una expresión matemática que relacione dichos valores, y por lo tanto obtener resultados más precisos.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, and Y.-J. A. Zhang, "The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 8, pp. 84–90, 2019.
- [2] C. Jiang, H. Zhang, Y. Ren, Z. Han, K.-C. Chen, and L. Hanzo, "Machine learning paradigms for next-generation wireless networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 2, pp. 98–105, 2016.
- [3] R. Li, Z. Zhao, X. Zhou, G. Ding, Y. Chen, Z. Wang, and H. Zhang, "Intelligent 5G: When cellular networks meet artificial intelligence," *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 5, pp. 175–183, 2017.
- [4] J. Hesselbarth, D. López-Cuenca, and H. Barba-Molina, "Millimeter-wave front-end integration concept using beam-switched lens antenna," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2016, pp. 1–5.
- [5] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons, 2016.
- [6] M. Stanley, Y. Huang, H. Wang, H. Zhou, A. Alieldin, and S. Joseph, "A novel mm-Wave phased array antenna with 360° coverage for 5G smartphone applications," in *2017 10th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT)*, 2017, pp. 1–3.
- [7] E. Perahia, C. Cordeiro, M. Park, and L. L. Yang, "IEEE 802.11 ad: Defining the next generation multi-Gbps Wi-Fi," in *2010 7th IEEE consumer communications and networking conference*, 2010, pp. 1–5.
- [8] Hyperphysics, [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/polclas.html> [Último acceso: 30 11 2020].
- [9] H. J. Visser, *Array and phased array antenna basics*. United States: Wiley, 2005.
- [10] S. Mubeen, "Synthesis of Circular Array Antennas Using Accelerated Particle Swarm Optimization" *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*), 2019, pp. 2121–2125.
- [11] MathWorks, [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/grating-lobes.html>. [Último acceso: 30 11 2020].
- [12] Electronics Club, [En línea]. Available: <https://electronics-club.com/difference-between-broadside-and-end-fire-array/> [Último acceso: 30 11 2020].
- [13] J. Volakis, *Antenna Engineering Handbook, Fourth Edition*. United States: McGraw-Hill Professional, 2007.
- [14] A. V. Durán. Pardo, "Diseño y simulación de una antena conformada para un vehículo aéreo no tripulado utilizado para monitoreo agrícola," 2020.

- [15] FIERCE Wireless, [En línea]. Available: <https://www.fiercewireless.com/5g/sba-says-sprint-only-carrier-it-sees-deploying-massive-mimo> [Último acceso: 30 11 2020].
- [16] THE EUROPEAN SPACE AGENCY, [En línea]. Available: http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2003/12/LEO_data_transmission_Conformal_Array_Antenna [Último acceso: 30 11 2020].
- [17] Henry Giddens (2021). hgiddens/CST_App (https://github.com/hgiddens/CST_App), GitHub. Retrieved January 11, 2021.
- [18] ROGERS CORPORATION, [En línea]. Available: <https://rogerscorp.com/advanced-connectivity-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-5870-laminates> [Último acceso: 30 11 2020].
- [19] J. Iosr, S. B. N.Mohamed, P. Dr.M.Ramkumar, and U.T.Sasikala, "Design A Square Microstrip Patch Antenna for S-Band Application," 2015.
- [20] PASTERNAK, [En línea]. Available: <https://www.pasternack.com/t-calculator-coax-cutoff.aspx> [Último acceso: 06 01 2021].
- [21] DASSAULT SYSTEMS, [En línea]. Available: <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/cst-studio-suite/> [Último acceso: 30 11 2020].

ANEXOS

ANEXO A. Código principal de la aplicación desarrollada.

ANEXO B. Código para modelar antenas tipo dipolo.

ANEXO C. Código para modelar antenas tipo *patch*.

ANEXO D. Código para calcular la disposición de los elementos en arreglos planares.

ANEXO E. Código para generar matrices con diferencia de fase uniforme.

ANEXO F. Código para generar etiquetas para los elementos modelados.

ANEXO A

Código principal de la aplicación desarrollada

```
classdef tesis_v8_beta2 < matlab.apps.AppBase

% Properties that correspond to app components
properties (Access = public)
    UIFigure          matlab.ui.Figure
    GridLayout        matlab.ui.container.GridLayout
    LeftPanel         matlab.ui.container.Panel
    TipodeantenaSwitchLabel  matlab.ui.control.Label
    TipodeantenaSwitch    matlab.ui.control.Switch
    CatactersticasdelarregloPanel  matlab.ui.container.Panel
    Unidades           matlab.ui.control.ListBox
    FrecuenciaEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label
    Frecuencia         matlab.ui.control.NumericEditField
    DirectividadaddBLabel  matlab.ui.control.Label
    Directividad       matlab.ui.control.NumericEditField
    ToleranciaLabel    matlab.ui.control.Label
    Tolerancia         matlab.ui.control.NumericEditField
    AzimuthgradosLabel  matlab.ui.control.Label
    azimuth           matlab.ui.control.NumericEditField
    ElevacingradosLabel  matlab.ui.control.Label
    elevacion          matlab.ui.control.NumericEditField
    ParmetrosdelaantenaPanel  matlab.ui.container.Panel
    RadiommLabel       matlab.ui.control.Label
    Radio              matlab.ui.control.NumericEditField
    PlanodetierraXvecesLabel  matlab.ui.control.Label
    GroundX            matlab.ui.control.NumericEditField
    PlanodetierraYvecesLabel  matlab.ui.control.Label
    GroundY            matlab.ui.control.NumericEditField
    SeparacinentreconductoresmmLabel  matlab.ui.control.Label
    Separacion         matlab.ui.control.DropDown
    ExportaraCSTButton  matlab.ui.control.Button
    CalcularButton     matlab.ui.control.Button
    CenterPanel        matlab.ui.container.Panel
    UIAxes             matlab.ui.control.UIAxes
    tipoDeGrafico      matlab.ui.control.DiscreteKnob
    RightPanel         matlab.ui.container.Panel
    TipodearregloLabel  matlab.ui.control.Label
    TipodearregloSwitch  matlab.ui.control.Switch
    ColumnasPanel      matlab.ui.container.Panel
    fase1              matlab.ui.control.NumericEditField
    spaceY1            matlab.ui.control.NumericEditField
    FasegradosLabel_2  matlab.ui.control.Label
    Fase               matlab.ui.control.Knob
    EspaciamientolongituddeondaLabel_2  matlab.ui.control.Label
    spaceY             matlab.ui.control.Knob
    NmerodeelementosLabel  matlab.ui.control.Label
    NelemY             matlab.ui.control.Spinner
    FilasPanel         matlab.ui.container.Panel
    spaceX1            matlab.ui.control.NumericEditField
    fase1_2            matlab.ui.control.NumericEditField
    EspaciamientolongituddeondaLabel  matlab.ui.control.Label
    spaceX             matlab.ui.control.Knob
    NmerodeelementosLabel_2  matlab.ui.control.Label
    NelemX             matlab.ui.control.Spinner
    FasegradosLabel    matlab.ui.control.Label
end
```

```

Fase_2          matlab.ui.control.Knob
end

% Properties that correspond to apps with auto-reflow
properties (Access = private)
    onePanelWidth = 576;
    twoPanelWidth = 768;
end

properties (Access = private)
    f % frecuencia
    espX % espaciamiento en X
    espY %espaciamiento en Y
    phase %diferencia de fase en columnas
    phaseFila %diferencia de fase en filas
    campoDipolo %patron de radiacion dipolo
    lambda %longitud de onda
    direc %directividad
    direc2
    toleracia
    azi%azimuth
    elev%elevación
    cont1=0 %variable auxiliar
    aux2=0%auxiliar2
end

methods (Access = private)
    function graficos(app)
        app.UIAxes.Color='none';
        app.UIAxes.XColor='none';
        app.UIAxes.YColor='none';
        app.UIAxes.ZColor='none';
    end

    function activarDipolo(app)
        tipoDeAntena=app.TipodeantenaSwitch.Value;
        load patrones2.mat E E2
        if tipoDeAntena=="Patch"
            app.campoDipolo=E2+abs(min(min(E2)));
            app.Radio.Enable='off';
            app.GroundX.Enable='on';
            app.GroundY.Enable='on';
            app.Separacion.Enable='on';
        else
            app.campoDipolo=E;
            app.Radio.Enable='on';
            app.GroundX.Enable='off';
            app.GroundY.Enable='off';
            app.Separacion.Enable='off';
        end
    end

    function Arreglo(app)
        tipoDeArreglo=app.TipodearregloSwitch.Value;
        if app.tipoDeGrafico.Value=="Antena"
            app.spaceX.Enable='off';

```

```

app.spaceX1.Enable='off';
app.spaceY.Enable='off';
app.spaceY1.Enable='off';
app.TipodearregloSwitch.Enable='off';
app.NelemX.Enable='off';
app.NelemY.Enable='off';
app.Fase.Enable='off';
app.fase1.Enable='off';
app.fase1_2.Enable='off';
app.Fase_2.Enable='off';
app.CalcularButton.Enable='off';
app.ExportaraCSTButton.Enable='off';

else
app.TipodearregloSwitch.Enable='on';
app.CalcularButton.Enable='on';
app.ExportaraCSTButton.Enable='on';
app.Fase.Enable='on';
app.fase1.Enable='on';
app.fase1_2.Enable='on';
app.Fase_2.Enable='on';
app.spaceX.Enable='on';
app.spaceX1.Enable='on';
app.NelemX.Enable='on';
if tipoDeArreglo=="Lineal"
app.spaceY.Enable='off';
app.spaceY1.Enable='off';
app.NelemY.Enable='off';
app.Fase.Enable='off';
app.fase1.Enable='off';
else
app.spaceY.Enable='on';
app.spaceY1.Enable='on';
app.NelemY.Enable='on';
app.Fase.Enable='on';
app.fase1.Enable='on';
end
end
end

function parametros(app)
f1=app.Frecuencia.Value;
f2=str2double(app.Unidades.Value);
app.f=f1*f2;
app.lambda=3e8/(f1*f2);
if app.spaceX.Value==0
app.espX=1/1000;
else
app.espX = app.lambda*(app.spaceX.Value);
end
if app.TipodearregloSwitch.Value=="Planar"
app.aux2=app.NelemY.Value;
if app.spaceY.Value==0
app.espY=1/1000;
else
app.espY = app.lambda*(app.spaceY.Value);
end
else
app.aux2=0;
end
end

```

```

app.azi=app.azimuth.Value;
app.elev=app.elevacion.Value;
app.tolerancia=10*log10(1-app.Tolerancia.Value/100)
app.direc=app.Directividad.Value;
app.phase=app.Fase.Value;
app.phaseFila=app.Fase_2.Value;
app.fase1.Value = app.Fase.Value;
app.fase1_2.Value=app.Fase_2.Value;
app.spaceX1.Value=app.spaceX.Value;
app.spaceY1.Value=app.spaceY.Value;
end

function calcular(app)
if app.TipodearregloSwitch.Value=="Lineal"

h = linearArray('ElementSpacing',app.espX);
if app.cont1==0
h.NumElements=app.NelemX.Value;
h.PhaseShift=diferenciaDeFase(app.phaseFila,0,app.NelemX.Value,0);
% layout(h)
else
barra = waitbar(0,'Buscando una configuración óptima...');
barra2=0;
direc2=0;
h.NumElements=2;

while direc2<=app.direc+app.tolerancia
waitbar(barra2+0.2,barra,'Buscando una configuración óptima...');
h.PhaseShift=phaseShift(h,app.f,[app.azi;app.elev]);
h.PhaseShift
[y,y2,y3]=arrayFactor(h,app.f,-180:2:180,-90:2:90);
app.tolerancia
direc2=5.9147867+0.9830405*max(max(y))+0.0021399*app.NelemX.Value-
4.2767338-0.6414347
h.NumElements=h.NumElements+1;
barra2=barra2+0.05;
if barra2>0.5
barra2=0.5;
end
end
h.NumElements=h.NumElements-1;
h.PhaseShift=phaseShift(h,app.f,[app.azi;app.elev]);
app.NelemX.Value=h.NumElements;
waitbar(1,barra,'Optimización terminada');
end

else
h= rectangularArray;
h.ColumnSpacing=app.espY;
h.RowSpacing=app.espX;
if app.cont1==0
h.Size=[app.NelemX.Value app.NelemY.Value];

h.PhaseShift=diferenciaDeFase(app.phaseFila,app.phase,app.NelemX.Value,app.NelemY.Valu
e);

else
barra = waitbar(0,'Buscando una configuración óptima...');

```

```

barra2=0;
n=4;
direc2=0;
while direc2<=app.direc+app.tolerancia
    if isprime(n)==0
        p=conf_arreglo(n)
        for i=1:numel(p)/2
            waitbar(barra2+0.2,barra,'Buscando una configuración óptima...');
            if direc2<=app.direc+app.tolerancia
                app.NelemX.Value=p(i,1);
                app.NelemY.Value=p(i,2);
                h.Size=[app.NelemX.Value app.NelemY.Value];
                h.PhaseShift=phaseShift(h,app.f,[app.azi;app.elev]);
                h.PhaseShift
                [y,y2,y3]=arrayFactor(h,app.f,-180:2:180,-90:2:90);
                if app.TipodeantenaSwitch.Value=="Patch"

direc2=5.9147867+0.9830405*max(max(y))+0.0021399*app.NelemX.Value-4.2767338-
0.6414347

                    else
                        direc2=max(max(y));
                    end
                end
                barra2=barra2+0.05;
                if barra2>0.5
                    barra2=0.5;
                end
            end
        end
        n=n+1;
    end
    waitbar(1,barra,'Optimización terminada');
end
end

[y,y2,y3]=arrayFactor(h,app.f,-180:2:180,-90:2:90);
app.direc2=max(max(y));
max(max(y))
y1=y+abs(min(min(y)));
p1 = deg2rad(y2);
t1 = deg2rad(y3);
[p1,t1] = meshgrid(p1,t1);
if app.tipoDeGrafico.Value=="Arreglo"
    y1=y1.*app.campoDipolo;
    max(max(y.*app.campoDipolo));
elseif app.tipoDeGrafico.Value=="Antena"
    y1=abs(app.campoDipolo);
end
[X,Y,Z] = sph2cart(p1,t1,y1);
surf(app.UIAxes,X,Y,Z,y1,'edgealpha',0.2)

end
end

% Callbacks that handle component events
methods (Access = private)

% Code that executes after component creation
function startupFcn(app)
    activarDipolo(app)

```

```

    Arreglo(app)
    graficos(app)
    parametros(app)
    calcular(app)
end

% Changes arrangement of the app based on UIFigure width
function updateAppLayout(app, event)
    currentFigureWidth = app.UIFigure.Position(3);
    if(currentFigureWidth <= app.onePanelWidth)
        % Change to a 3x1 grid
        app.GridLayout.RowHeight = {578, 578, 578};
        app.GridLayout.ColumnWidth = {'1x'};
        app.CenterPanel.Layout.Row = 1;
        app.CenterPanel.Layout.Column = 1;
        app.LeftPanel.Layout.Row = 2;
        app.LeftPanel.Layout.Column = 1;
        app.RightPanel.Layout.Row = 3;
        app.RightPanel.Layout.Column = 1;
    elseif (currentFigureWidth > app.onePanelWidth && currentFigureWidth <=
app.twoPanelWidth)
        % Change to a 2x2 grid
        app.GridLayout.RowHeight = {578, 578};
        app.GridLayout.ColumnWidth = {'1x', '1x'};
        app.CenterPanel.Layout.Row = 1;
        app.CenterPanel.Layout.Column = [1,2];
        app.LeftPanel.Layout.Row = 2;
        app.LeftPanel.Layout.Column = 1;
        app.RightPanel.Layout.Row = 2;
        app.RightPanel.Layout.Column = 2;
    else
        % Change to a 1x3 grid
        app.GridLayout.RowHeight = {'1x'};
        app.GridLayout.ColumnWidth = {268, '1x', 364};
        app.LeftPanel.Layout.Row = 1;
        app.LeftPanel.Layout.Column = 1;
        app.CenterPanel.Layout.Row = 1;
        app.CenterPanel.Layout.Column = 2;
        app.RightPanel.Layout.Row = 1;
        app.RightPanel.Layout.Column = 3;
    end
end

% Value changed function: TipodeantenaSwitch
function TipodeantenaSwitchValueChanged(app, event)
    activarDipolo(app)
    Arreglo(app)
    parametros(app)
    calcular(app)
end

% Value changed function: TipodearregloSwitch
function TipodearregloSwitchValueChanged(app, event)
    Arreglo(app)
    parametros(app)
    calcular(app)
end

% Value changing function: Fase
function FaseValueChanging(app, event)

```



```

    app.Fase.Value = event.Value;
    parametros(app)
    calcular(app)
end

% Value changing function: spaceX
function spaceXValueChanging(app, event)
    app.spaceX.Value = event.Value;
    parametros(app)
    calcular(app)
end

% Value changed function: tipoDeGrafico
function tipoDeGraficoValueChanged(app, event)
    Arreglo(app)
    parametros(app)
    calcular(app)
end

% Value changed function: spaceX1
function spaceX1ValueChanged(app, event)
    app.spaceX.Value=app.spaceX1.Value;
    parametros(app)
    calcular(app)
end

% Value changed function: fase1
function fase1ValueChanged(app, event)
    app.Fase.Value = app.fase1.Value;
    parametros(app)
    calcular(app)
end

% Value changed function: Radio
function RadioValueChanged(app, event)

end

% Value changing function: spaceY
function spaceYValueChanging(app, event)
    app.spaceY.Value = event.Value;
    parametros(app)
    calcular(app)
end

% Value changed function: spaceY1
function spaceY1ValueChanged(app, event)
    app.spaceY.Value=app.spaceY1.Value;
    parametros(app)
    calcular(app)
end

% Value changing function: NelemX
function NelemXValueChanging(app, event)
    app.NelemX.Value = event.Value;
    parametros(app)
    calcular(app)
end

```

```

% Value changing function: NelemY
function NelemYValueChanging(app, event)
    app.NelemY.Value = event.Value;
    parametros(app)
    calcular(app)
end

% Value changing function: Fase_2
function Fase_2ValueChanging(app, event)
    app.Fase_2.Value = event.Value;
    parametros(app)
    calcular(app)
end

% Value changed function: fase1_2
function fase1_2ValueChanged(app, event)
    app.Fase_2.Value = app.fase1_2.Value;
    parametros(app)
    calcular(app)
end

% Button pushed function: CalcularButton
function CalcularButtonPushed(app, event)
    parametros(app)
    app.cont1=1;
    calcular(app)
    error=abs((app.direc2-app.direc)/app.direc)*100;
    x=(app.direc2);
    app.cont1=0;
end

% Button pushed function: ExportaraCSTButton
function ExportaraCSTButtonPushed(app, event)
    parametros(app)
    calcular(app)
    tipoDeAntena=app.TipodeantenaSwitch.Value;
    h=str2double(app.Separacion.Value);
    if tipoDeAntena=="Patch"
exportarPatch(app.NelemX.Value,app.aux2,app.espX,app.espY,app.GroundX.Value...
    ,app.GroundY.Value,h,app.lambda,app.f)
    else
        exportarDipolo(app.NelemX.Value,app.aux2,app.espX,app.espY,app.Radio.Value ...
    ,app.lambda,app.f)
    end
end
end

% Component initialization
methods (Access = private)

% Create UIFigure and components
function createComponents(app)

    % Create UIFigure and hide until all components are created
    app.UIFigure = uifigure('Visible', 'off');
    app.UIFigure.AutoResizeChildren = 'off';
    app.UIFigure.Position = [100 100 1077 578];

```

```

app.UIFigure.Name = 'Generador de Arreglos de Antenas';
app.UIFigure.SizeChangedFcn = createCallbackFcn(app, @updateAppLayout, true);

% Create GridLayout
app.GridLayout = uigridlayout(app.UIFigure);
app.GridLayout.ColumnWidth = {268, '1x', 364};
app.GridLayout.RowHeight = {'1x'};
app.GridLayout.ColumnSpacing = 0;
app.GridLayout.RowSpacing = 0;
app.GridLayout.Padding = [0 0 0 0];
app.GridLayout.Scrollable = 'on';

% Create LeftPanel
app.LeftPanel = uipanel(app.GridLayout);
app.LeftPanel.Layout.Row = 1;
app.LeftPanel.Layout.Column = 1;

% Create TipodeantenaSwitchLabel
app.TipodeantenaSwitchLabel = uilabel(app.LeftPanel);
app.TipodeantenaSwitchLabel.HorizontalAlignment = 'center';
app.TipodeantenaSwitchLabel.Position = [27 295 85 22];
app.TipodeantenaSwitchLabel.Text = 'Tipo de antena';

% Create TipodeantenaSwitch
app.TipodeantenaSwitch = uiswitch(app.LeftPanel, 'slider');
app.TipodeantenaSwitch.Items = {'Patch', 'Dipolo'};
app.TipodeantenaSwitch.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@TipodeantenaSwitchValueChanged, true);
app.TipodeantenaSwitch.Position = [47 276 45 20];
app.TipodeantenaSwitch.Value = 'Dipolo';

% Create CatactersticasdellarregloPanel
app.CatactersticasdellarregloPanel = uipanel(app.LeftPanel);
app.CatactersticasdellarregloPanel.Title = 'Catacterísticas del arreglo';
app.CatactersticasdellarregloPanel.Position = [7 321 270 254];

% Create Unidades
app.Unidades = uilistbox(app.CatactersticasdellarregloPanel);
app.Unidades.Items = {'MHz', 'GHz'};
app.Unidades.ItemsData = {'1e6', '1e9'};
app.Unidades.Position = [159 153 89 39];
app.Unidades.Value = '1e9';

% Create FrecuenciaEditFieldLabel
app.FrecuenciaEditFieldLabel = uilabel(app.CatactersticasdellarregloPanel);
app.FrecuenciaEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.FrecuenciaEditFieldLabel.Position = [74 199 65 22];
app.FrecuenciaEditFieldLabel.Text = 'Frecuencia';

% Create Frecuencia
app.Frecuencia = uieditfield(app.CatactersticasdellarregloPanel, 'numeric');
app.Frecuencia.Limits = [1 Inf];
app.Frecuencia.Position = [154 199 94 22];
app.Frecuencia.Value = 1;

% Create DirectividadaddBLabel
app.DirectividadaddBLabel = uilabel(app.CatactersticasdellarregloPanel);
app.DirectividadaddBLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.DirectividadaddBLabel.Position = [46 120 93 22];

```

```

app.DirectividadaddBLabel.Text = 'Directividad [dBi]';

% Create Directividad
app.Directividad = uieditfield(app.CatactersticadelarregloPanel, 'numeric');
app.Directividad.Limits = [4 Inf];
app.Directividad.Position = [154 120 94 22];
app.Directividad.Value = 4;

% Create ToleranciaLabel
app.ToleranciaLabel = uilabel(app.CatactersticadelarregloPanel);
app.ToleranciaLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.ToleranciaLabel.Position = [58 88 81 22];
app.ToleranciaLabel.Text = 'Tolerancia [%]';

% Create Tolerancia
app.Tolerancia = uieditfield(app.CatactersticadelarregloPanel, 'numeric');
app.Tolerancia.Limits = [0 100];
app.Tolerancia.Position = [154 88 94 22];
app.Tolerancia.Value = 1;

% Create AzimuthgradosLabel
app.AzimuthgradosLabel = uilabel(app.CatactersticadelarregloPanel);
app.AzimuthgradosLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.AzimuthgradosLabel.Position = [43 56 96 22];
app.AzimuthgradosLabel.Text = 'Azimuth [grados]';

% Create azimuth
app.azimuth = uieditfield(app.CatactersticadelarregloPanel, 'numeric');
app.azimuth.Limits = [0 360];
app.azimuth.Position = [154 56 94 22];
app.azimuth.Value = 1;

% Create ElevacingradosLabel
app.ElevacingradosLabel = uilabel(app.CatactersticadelarregloPanel);
app.ElevacingradosLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.ElevacingradosLabel.Position = [35 20 104 22];
app.ElevacingradosLabel.Text = 'Elevación [grados]';

% Create elevacion
app.elevacion = uieditfield(app.CatactersticadelarregloPanel, 'numeric');
app.elevacion.Limits = [0 360];
app.elevacion.Position = [154 19 94 22];
app.elevacion.Value = 1;

% Create ParmetrosdelaantenaPanel
app.ParmetrosdelaantenaPanel = uipanel(app.LeftPanel);
app.ParmetrosdelaantenaPanel.Title = 'Parámetros de la antena';
app.ParmetrosdelaantenaPanel.Position = [6 58 270 209];

% Create RadiommLabel
app.RadiommLabel = uilabel(app.ParmetrosdelaantenaPanel);
app.RadiommLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.RadiommLabel.Position = [73 154 67 22];
app.RadiommLabel.Text = 'Radio [mm]';

% Create Radio
app.Radio = uieditfield(app.ParmetrosdelaantenaPanel, 'numeric');
app.Radio.Limits = [1e-12 Inf];

```

```

app.Radio.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app, @RadioValueChanged, true);
app.Radio.Position = [155 154 94 22];
app.Radio.Value = 1;

% Create PlanodetierraXvecesLabel
app.PlanodetierraXvecesLabel = uilabel(app.ParmetrosdelaantenaPanel);
app.PlanodetierraXvecesLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.PlanodetierraXvecesLabel.Position = [4 114 136 22];
app.PlanodetierraXvecesLabel.Text = 'Plano de masa X [veces]';

% Create GroundX
app.GroundX = uieditfield(app.ParmetrosdelaantenaPanel, 'numeric');
app.GroundX.Limits = [1 Inf];
app.GroundX.Position = [155 114 94 22];
app.GroundX.Value = 1;

% Create PlanodetierraYvecesLabel
app.PlanodetierraYvecesLabel = uilabel(app.ParmetrosdelaantenaPanel);
app.PlanodetierraYvecesLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.PlanodetierraYvecesLabel.Position = [4 74 136 22];
app.PlanodetierraYvecesLabel.Text = 'Plano de masa Y [veces]';

% Create GroundY
app.GroundY = uieditfield(app.ParmetrosdelaantenaPanel, 'numeric');
app.GroundY.Limits = [1 Inf];
app.GroundY.Position = [155 74 94 22];
app.GroundY.Value = 1;

% Create SeparacinentreconductoresmmLabel
app.SeparacinentreconductoresmmLabel = uilabel(app.ParmetrosdelaantenaPanel);
app.SeparacinentreconductoresmmLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.SeparacinentreconductoresmmLabel.Position = [67 4 71 56];
app.SeparacinentreconductoresmmLabel.Text = {'Separación ', 'entre', 'conductores';
'[mm]'};

% Create Separacion
app.Separacion = uidropdown(app.ParmetrosdelaantenaPanel);
app.Separacion.Items = {'0.127', '0.254', '0.381', '0.508', '0.787', '1.575', '3.175'};
app.Separacion.Position = [152 21 100 22];
app.Separacion.Value = '0.127';

% Create ExportaraCSTButton
app.ExportaraCSTButton = uibutton(app.LeftPanel, 'push');
app.ExportaraCSTButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@ExportaraCSTButtonPushed, true);
app.ExportaraCSTButton.Position = [90 23 100 22];
app.ExportaraCSTButton.Text = 'Exportar a CST';

% Create CalcularButton
app.CalcularButton = uibutton(app.LeftPanel, 'push');
app.CalcularButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@CalcularButtonPushed, true);
app.CalcularButton.Position = [155 278 100 22];
app.CalcularButton.Text = 'Calcular';

% Create CenterPanel
app.CenterPanel = uipanel(app.GridLayout);
app.CenterPanel.BackgroundColor = [0 0 0];
app.CenterPanel.Layout.Row = 1;

```

```

app.CenterPanel.Layout.Column = 2;

% Create UIAxes
app.UIAxes = uiaxes(app.CenterPanel);
title(app.UIAxes, "")
xlabel(app.UIAxes, 'X')
ylabel(app.UIAxes, 'Y')
app.UIAxes.PlotBoxAspectRatio = [1 1.07474226804124 1];
app.UIAxes.Color = 'none';
app.UIAxes.BackgroundColor = [0 0 0];
app.UIAxes.Position = [1 116 435 459];

% Create tipoDeGrafico
app.tipoDeGrafico = uiknob(app.CenterPanel, 'discrete');
app.tipoDeGrafico.Items = {'Antena', 'Factor de arreglo', 'Arreglo'};
app.tipoDeGrafico.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@tipoDeGraficoValueChanged, true);
app.tipoDeGrafico.Tooltip = {'Permite seleccionar el patrón de radiación que se desea
visualizar'};
app.tipoDeGrafico.FontColor = [1 1 1];
app.tipoDeGrafico.Position = [178 27 60 60];
app.tipoDeGrafico.Value = 'Antena';

% Create RightPanel
app.RightPanel = uipanel(app.GridLayout);
app.RightPanel.Layout.Row = 1;
app.RightPanel.Layout.Column = 3;

% Create TipodearregloLabel
app.TipodearregloLabel = uilabel(app.RightPanel);
app.TipodearregloLabel.HorizontalAlignment = 'center';
app.TipodearregloLabel.Position = [79 513 43 42];
app.TipodearregloLabel.Text = {'Tipo'; 'de'; 'arreglo'};

% Create TipodearregloSwitch
app.TipodearregloSwitch = uiswitch(app.RightPanel, 'slider');
app.TipodearregloSwitch.Items = {'Lineal', 'Planar'};
app.TipodearregloSwitch.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@TipodearregloSwitchValueChanged, true);
app.TipodearregloSwitch.Position = [167 522 45 20];
app.TipodearregloSwitch.Value = 'Lineal';

% Create ColumnasPanel
app.ColumnasPanel = uipanel(app.RightPanel);
app.ColumnasPanel.Title = 'Columnas';
app.ColumnasPanel.Position = [185 6 170 493];

% Create fase1
app.fase1 = uieditfield(app.ColumnasPanel, 'numeric');
app.fase1.Limits = [0 Inf];
app.fase1.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app, @fase1ValueChanged, true);
app.fase1.Position = [35 439 94 22];
app.fase1.Value = 1;

% Create spaceY1
app.spaceY1 = uieditfield(app.ColumnasPanel, 'numeric');
app.spaceY1.Limits = [0 Inf];
app.spaceY1.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app, @spaceY1ValueChanged,
true);

```

```

app.spaceY1.Position = [37 249 94 22];
app.spaceY1.Value = 1;

% Create FasegradosLabel_2
app.FasegradosLabel_2 = uilabel(app.ColumnasPanel);
app.FasegradosLabel_2.HorizontalAlignment = 'center';
app.FasegradosLabel_2.Position = [43.5 281 79 22];
app.FasegradosLabel_2.Text = 'Fase [grados]';

% Create Fase
app.Fase = uiknob(app.ColumnasPanel, 'continuous');
app.Fase.Limits = [0 360];
app.Fase.MajorTicks = [0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330 360];
app.Fase.ValueChangingFcn = createCallbackFcn(app, @FaseValueChanging, true);
app.Fase.Tooltip = {'Valor del desplazamiento de fase uniforme en grados'; ''};
app.Fase.Position = [52 337 60 60];

% Create EspaciamientolongituddeondaLabel_2
app.EspaciamientolongituddeondaLabel_2 = uilabel(app.ColumnasPanel);
app.EspaciamientolongituddeondaLabel_2.HorizontalAlignment = 'center';
app.EspaciamientolongituddeondaLabel_2.Position = [34.5 85 101 28];
app.EspaciamientolongituddeondaLabel_2.Text = {'Espaciamiento'; '[longitud de onda]'};

% Create spaceY
app.spaceY = uiknob(app.ColumnasPanel, 'continuous');
app.spaceY.Limits = [0 5];
app.spaceY.MajorTicks = [0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5];
app.spaceY.ValueChangingFcn = createCallbackFcn(app, @spaceYValueChanging,
true);
app.spaceY.Tooltip = {'Valor del espaciamiento entre elementos en función de la
longitud de onda'};
app.spaceY.Position = [54 147 60 60];

% Create NmerodeelementosLabel
app.NmerodeelementosLabel = uilabel(app.ColumnasPanel);
app.NmerodeelementosLabel.HorizontalAlignment = 'center';
app.NmerodeelementosLabel.Position = [47 11 65 28];
app.NmerodeelementosLabel.Text = {'Número de'; 'elementos'};

% Create NelemY
app.NelemY = uispinner(app.ColumnasPanel);
app.NelemY.ValueChangingFcn = createCallbackFcn(app, @NelemYValueChanging,
true);
app.NelemY.Limits = [2 Inf];
app.NelemY.Position = [36 44 100 22];
app.NelemY.Value = 2;

% Create FilasPanel
app.FilasPanel = uipanel(app.RightPanel);
app.FilasPanel.Title = 'Filas';
app.FilasPanel.Position = [6 6 180 493];

% Create spaceX1
app.spaceX1 = uieditfield(app.FilasPanel, 'numeric');
app.spaceX1.Limits = [0 Inf];
app.spaceX1.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app, @spaceX1ValueChanged,
true);
app.spaceX1.Position = [43 249 94 22];
app.spaceX1.Value = 1;

```

```

% Create fase1_2
app.fase1_2 = uieditfield(app.FilasPanel, 'numeric');
app.fase1_2.Limits = [0 Inf];
app.fase1_2.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app, @fase1_2ValueChanged,
true);
app.fase1_2.Position = [42 439 94 22];
app.fase1_2.Value = 1;

% Create EspaciamientolongituddeondaLabel
app.EspaciamientolongituddeondaLabel = uilabel(app.FilasPanel);
app.EspaciamientolongituddeondaLabel.HorizontalAlignment = 'center';
app.EspaciamientolongituddeondaLabel.Position = [41 85 101 28];
app.EspaciamientolongituddeondaLabel.Text = {'Espaciamiento'; '[longitud de onda]'};

% Create spaceX
app.spaceX = uiknob(app.FilasPanel, 'continuous');
app.spaceX.Limits = [0 5];
app.spaceX.MajorTicks = [0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5];
app.spaceX.ValueChangingFcn = createCallbackFcn(app, @spaceXValueChanging,
true);
app.spaceX.Tooltip = {'Valor del espaciamiento entre elementos en función de la
longitud de onda'};
app.spaceX.Position = [60 147 60 60];

% Create NmerodeelementosLabel_2
app.NmerodeelementosLabel_2 = uilabel(app.FilasPanel);
app.NmerodeelementosLabel_2.HorizontalAlignment = 'center';
app.NmerodeelementosLabel_2.Position = [56 11 65 28];
app.NmerodeelementosLabel_2.Text = {'Número de'; 'elementos'};

% Create NelemX
app.NelemX = uispinner(app.FilasPanel);
app.NelemX.ValueChangingFcn = createCallbackFcn(app, @NelemXValueChanging,
true);
app.NelemX.Limits = [2 Inf];
app.NelemX.Position = [45 44 100 22];
app.NelemX.Value = 2;

% Create FasegradosLabel
app.FasegradosLabel = uilabel(app.FilasPanel);
app.FasegradosLabel.HorizontalAlignment = 'center';
app.FasegradosLabel.Position = [49 281 82 22];
app.FasegradosLabel.Text = 'Fase [grados] ';

% Create Fase_2
app.Fase_2 = uiknob(app.FilasPanel, 'continuous');
app.Fase_2.Limits = [0 360];
app.Fase_2.MajorTicks = [0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330 360];
app.Fase_2.ValueChangingFcn = createCallbackFcn(app, @Fase_2ValueChanging,
true);
app.Fase_2.Tooltip = {'Valor del desplazamiento de fase uniforme en grados'; ''};
app.Fase_2.Position = [59 337 60 60];

% Show the figure after all components are created
app.UIFigure.Visible = 'on';
end
end

```



```

% App creation and deletion
methods (Access = public)

% Construct app
function app = tesis_v8_beta2

    % Create UIFigure and components
    createComponents(app)

    % Register the app with App Designer
    registerApp(app, app.UIFigure)

    % Execute the startup function
    runStartupFcn(app, @startupFcn)

    if nargin == 0
        clear app
    end
end

% Code that executes before app deletion
function delete(app)

    % Delete UIFigure when app is deleted
    delete(app.UIFigure)
end
end
end

```

ANEXO B

Código para modelar antenas tipo dipolo.

```
function [] = exportarDipolo(ncol,nfil,espCol,espFil,radio,lambda,freq)
%función para exportar un arreglo de dipolos de media longitud de onda
barra = waitbar(0,'Exportando Arreglo...');
a=[99 111 109 112 111 110 101 110 116 48 48 48 48];
CST = CST_MicrowaveStudio(cd,'dipole');
CST.setFreq(freq-1,freq+1);
total1=nfil*ncol;
total2=ncol;
espCol=espCol*10000
espFil=espFil*10000
lambda=3e12/freq
if nfil==0
    for i=0:ncol-1

        CST.addDiscretePort([i*espCol i*espCol],[0 0],[-lambda/20 lambda/20],radio,50);
        CST.addCylinder(radio,0,'z',i*espCol,0,[lambda/20 lambda/4],char(a),a,'PEC');
        a=etiqueta(a);
        CST.addCylinder(radio,0,'z',i*espCol,0,[-lambda/20 -lambda/4],char(a),a,'PEC');
        a=etiqueta(a);
        waitbar(((100*i+1)/total2)/50,barra,'Exportando arreglo...');
        total2=total2+1;
    end
else
    i2=0;
    for i=0:ncol-1
        for j=0:nfil-1
            CST.setBoundaryCondition('xmin','open add space','xmax','open add space','ymin','open
add space',...
'ymax','open add space','zmin','open add space','zmax','open add space')
            CST.addDiscretePort([i*espCol i*espCol],[0 0],[-lambda/20+j*espFil
lambda/20+j*espFil],radio,50);
            CST.addCylinder(radio,0,'z',i*espCol,0,[lambda/20+j*espFil
lambda/4+j*espFil],char(a),a,'PEC');
            a=etiqueta(a);
            CST.addCylinder(radio,0,'z',i*espCol,0,[-lambda/20+j*espFil -
lambda/4+j*espFil],char(a),a,'PEC');
            a=etiqueta(a);
            waitbar(((100*i2+1)/total1)/50,barra,'Exportando Arreglo...');
            total1=total1+1;
            i2=i2+1;
        end
    end
end
waitbar(1,barra,'El arreglo ha sido exportado con éxito');
end
```

ANEXO C

Código para modelar antenas tipo *patch*.

```
function [] = exportarPatch(ncol,nfil,espCol,espFil,X,Y,h,lambda,freq)
%función para exportar un arreglo de antenas tipo patch rectangulares
barra = waitbar(0,'Exportando Arreglo...');
%% Diseño de la antena
f=freq;
Er=2.33;
vo=3e11;
lambda=vo/f
k0=2*pi/lambda;
W=(vo/(2*freq))*sqrt(2/(Er+1))

Ereff=(Er+1)/2+((Er-1)/2)*(1+12*h/W)^(-0.5);

dL=h*0.412*((Ereff+0.3)*(W/h+0.264))/((Ereff-0.258)*(W/h+0.8));

L=vo/(2*f*(sqrt(Ereff)))-2*dL

G1=1/90*(W/lambda)^2;%W/(120*lambda)*(1-(k0*h)^2/240);

L1=acos(sqrt(50*2*G1))*L/pi;

espCol=espCol*1000;
espFil=espFil*1000;

%%Exportación a CST
patch=[80 97 116 99 104 48 48 48 49];
substrate=[83 117 98 115 116 114 97 116 101 48 48 48 49];
ground=[71 114 111 117 110 100 48 48 48 49];
CST = CST_MicrowaveStudio(cd,'dipole');
CST.setFreq(freq/1e9-0.1,freq/1e9+0.1);
CST.addNormalMaterial('RT duroid 5870',2.33,1,[204/255 0/255 0/255]);
total1=nfil*ncol;
total2=ncol;
conductor=0.017;
coaxial=20;
coax_int=1/2;
coax_ext=3.57/2;
if nfil==0

for i=0:ncol-1
waitbar(((100*i+1)/total2)/50,barra,'Exportando arreglo...!');
%Plano de tierra
CST.addBrick([(-L/2*X+i*espCol) (L/2*X+i*espCol)],[0 conductor],[-W/2*Y
W/2*Y],'ground',ground,'PEC');
CST.addCylinder(coax_ext,0,'y',-L1+i*espCol,[-coaxial-conductor
conductor],0,'aux',ground,'PEC');
component1 = etiqueta2(ground,0);
component2 = etiqueta2(ground,3);
CST.subtractObject(component1,component2)
CST.addCylinder(coax_ext+conductor,coax_ext,'y',-L1+i*espCol,[-coaxial
conductor],0,'aux',ground,'PEC');
```

```

CST.mergeCommonSolids(ground)
ground=etiqueta(ground);
%   %Substrato
CST.addBrick([(-L/2*X+i*espCol) (L/2*X+i*espCol)],[conductor conductor+h],[-W/2*Y
W/2*Y], 'substrate',sustrate,'RT duroid 5870');
CST.addCylinder(coax_int,0,'y',-L1+i*espCol,[conductor conductor+h],0,'aux',sustrate,'RT
duroid 5870');
component1 = etiqueta2(sustrate,2);
component2 = etiqueta2(sustrate,3);
CST.subtractObject(component1,component2)
CST.addCylinder(coax_ext,coax_int,'y',-L1+i*espCol,[-coaxial-conductor
conductor],0,'aux',sustrate,'RT duroid 5870');
CST.mergeCommonSolids(sustrate)
sustrate=etiqueta(sustrate);
%Patch
CST.addBrick([(-L/2+i*espCol) (L/2+i*espCol)],[conductor+h conductor*2+h],[-W/2
W/2], 'conductor',patch,'PEC');
CST.addCylinder(coax_int,0,'y',-L1+i*espCol,[-coaxial-conductor
conductor*2+h],0,'aux',patch,'PEC');
CST.mergeCommonSolids(patch)
patch=etiqueta(patch);
CST.addWaveguidePort('ymin',[-coax_ext-conductor+i*espCol-L1
coax_ext+conductor+i*espCol-L1],-coaxial-conductor,[-coax_ext-conductor
coax_ext+conductor])
total2=total2+1;
end
else
i2=0;
for i=0:ncol-1
for j=0:nfil-1
waitbar(((100*i2+1)/total1)/50,barra,'Exportando Arreglo...');
%Plano de tierra
CST.addBrick([(-L/2*X+i*espCol) (L/2*X+i*espCol)],[0 conductor],[-W/2*Y+j*espFil
W/2*Y+j*espFil], 'ground',ground,'PEC');
CST.addCylinder(coax_ext,0,'y',-L1+i*espCol,[-coaxial-conductor
conductor],j*espFil,'aux',ground,'PEC');
component1 = etiqueta2(ground,0);
component2 = etiqueta2(ground,3);
CST.subtractObject(component1,component2)
CST.addCylinder(coax_ext+conductor,coax_ext,'y',-L1+i*espCol,[-coaxial
conductor],j*espFil,'aux',ground,'PEC');
CST.mergeCommonSolids(ground)
ground=etiqueta(ground);
%Substrato
CST.addBrick([(-L/2*X+i*espCol) (L/2*X+i*espCol)],[conductor conductor+h],[-
W/2*Y+j*espFil W/2*Y+j*espFil], 'substrate',sustrate,'RT duroid 5870');
CST.addCylinder(coax_int,0,'y',-L1+i*espCol,[conductor
conductor+h],j*espFil,'aux',sustrate,'RT duroid 5870');
component1 = etiqueta2(sustrate,2);
component2 = etiqueta2(sustrate,3);
CST.subtractObject(component1,component2)
CST.addCylinder(coax_ext,coax_int,'y',-L1+i*espCol,[-coaxial-conductor
conductor],j*espFil,'aux',sustrate,'RT duroid 5870');
CST.mergeCommonSolids(sustrate)
sustrate=etiqueta(sustrate);
%Patch
CST.addBrick([(-L/2+i*espCol) (L/2+i*espCol)],[conductor+h conductor*2+h],[-
W/2+j*espFil W/2+j*espFil], 'conductor',patch,'PEC');
CST.addCylinder(coax_int,0,'y',-L1+i*espCol,[-coaxial-conductor
conductor*2+h],j*espFil,'aux',patch,'PEC');

```

```
CST.mergeCommonSolids(patch)
patch=etiqueta(patch);
CST.addWaveguidePort('ymin',[-coax_ext-conductor+i*espCol-L1
coax_ext+conductor+i*espCol-L1],[-coaxial-conductor,[-coax_ext-conductor+j*espFil
coax_ext+conductor+j*espFil])
total1=total1+1;
i2=i2+1;
end
end

end
waitbar(1,barra,'El arreglo ha sido exportado con éxito');
end
```

ANEXO D

Código para calcular la disposición de los elementos en arreglos planares.

```
function [conf] = conf_arreglo(n)
%esta función entrega todas las combinaciones posibles
%para generar un arreglo con n elementos
j=1;
for i=2:1:n/2
    if mod(n,i)==0
        y(j)=i;
        j=j+1;
    end
end

y2=n./y;
a3=(cat(1,y,y2))';
if length(a3)<=3
    conf=a3([1:ceil(length(a3)/2)],[1,2]);
else
    conf=a3([floor(length(a3)/2)+1:length(a3)],[1,2]);
end
```

ANEXO E

Código para generar matrices con diferencia de fase uniforme.

```
function [fase] = diferenciaDeFase(phaseF,phaseC,nElemX,nElemY)
%esta función genera un vector que representa la
%diferencia de fase uniforme según el número de
%elementos del arreglo

if nElemY==0
    nElemY=1;
end

fase(1)=0; %valor de referencia

%%primero se calcula la diferencia de fase en filas
for i=2:nElemX
    for j=1:nElemY
        fase(i,j)=(i-1)*phaseF;
    end
end

%%se clacula la diferencia de fase en columnas de la primera fila
for i=2:nElemY
    fase(1,i)=phaseC+fase(1,i-1);
end

%%se calcula la diferencia de fase en columnas del resto de la matriz de
%%fase
for i=2:nElemX
    for j=2:nElemY
        fase(i,j)=phaseC+fase(i,j-1);
    end
end
fase1=fase;
%organizo todo con un vector
fase=reshape(fase',1,[]);
end
```

ANEXO F

Código para generar etiquetas para los elementos modelados.

```
function [tag] = etiqueta(tag)
%esta función permite generar etiquetas en orden ascendente
x=tag;
y=length(x);
if x(y)<57
    x(y)=x(y)+1;
else
    x(y)=48;
if x(y-1)<57
    x(y-1)=x(y-1)+1;
else
    x(y-1)=48;
if x(y-2)<57
    x(y-2)=x(y-2)+1;
else
    x(y-2)=48;
if x(y-3)<57
    x(y-3)=x(y-3)+1;
else
    x(y-3)=48;
    x(y-2)=48;
    x(y-1)=48;
    x(y)=48;
end
end
end
end
```

tag=x;

```
function [x] = etiqueta2(x,y)
z=length(x);
if y==1
    x(z+1)=58;
    x(z+2)='c';
    x(z+3)='o';
    x(z+4)='n';
    x(z+5)='d';
    x(z+6)='u';
    x(z+7)='c';
    x(z+8)='t';
    x(z+9)='o';
    x(z+10)='r';
elseif y==2
    x(z+1)=58;
    x(z+2)='s';
    x(z+3)='u';
    x(z+4)='b';
    x(z+5)='s';
    x(z+6)='t';
    x(z+7)='r';
    x(z+8)='a';
    x(z+9)='t';
    x(z+10)='e';
elseif y==0
```



```
x(z+1)=58;  
x(z+2)='g';  
x(z+3)='r';  
x(z+4)='o';  
x(z+5)='u';  
x(z+6)='n';  
x(z+7)='d';  
else  
x(z+1)=58;  
x(z+2)='a';  
x(z+3)='u';  
x(z+4)='x';  
end  
end
```

ORDEN DE EMPASTADO