

Antenas Microstrip de Alta Directividad Mediante Superestratos

Ángela Cortés Domínguez

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
Tecnología de antenas

Directores de Proyecto: Dra. Aurora Andújar, Dr. Jaime Anguera

Fecha Entrega: 20/01/2020



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-

SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

Los textos e imágenes publicados en esta obra están sujetos – excepto que se indique lo contrario – a una licencia de Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada (BY-NC-ND) v.3.0 España de Creative Commons. Podéis copiarlo, distribuirlos y transmitirlos públicamente siempre que citéis a la autora (Ángela Cortés Domínguez) y la fuente (UOC, Universitat Oberta de Catalunya), no hagáis de ellos un uso comercial y ni obra derivada.

A mi familia, por ser el impulso que he necesitado siempre.

A Pepe, por formar parte de mi vida y ser partícipe de todos los momentos

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	<i>Antenas Microstrip de Alta Directividad Mediante Superestratos</i>
Nombre del autor:	<i>Ángela Cortés Domínguez</i>
Nombre del consultor/a:	<i>Jaume Anguera, Aurora Andújar</i>
Nombre del PRA:	<i>Germán Cobo Rodríguez</i>
Fecha de entrega (mm/aaaa):	01/2020
Titulación:	<i>Máster en Ingeniería de Telecomunicaciones</i>
Área del Trabajo Final:	<i>Tecnología de antenas</i>
Idioma del trabajo:	<i>Español</i>
Palabras clave	<i>Antenas microstrip, directividad, ancho de banda</i>
<p>Resumen del Trabajo: <i>Con la finalidad, contexto de aplicación, metodología, resultados i conclusiones del trabajo.</i></p>	
<p>En los últimos años, ha surgido la necesidad de desarrollar sistemas de telecomunicaciones integrados, miniaturizados y de bajo coste debido al incremento de dispositivos cada vez más compactos y reducidos.</p> <p>Para ello, se requiere la implementación de antenas microstrip con alimentación mediante sonda posicionada para lograr adaptación de impedancias.</p> <p>Así, este trabajo se centra en el estudio de antenas microstrip, ya que son antenas que cumplen con estos requerimientos. Sin embargo, éstas presentan algunos inconvenientes entre ellas banda estrecha y baja eficiencia. Es por ello, que nos centraremos en mejorar las prestaciones de éstas, teniendo en cuenta los inconvenientes que presentan.</p> <p>Las tareas que se llevarán a cabo son la modificación de las estructuras, partiendo del escenario 5 del trabajo “Tècniques d’alta directivitat en antenes microstrip amb superstrat” [1] a través del software IE3D.</p> <p>Se modificará la estructura (escenario 5) para conseguir mejores prestaciones: aumentar el ancho de banda, eficiencia y directividad. En concreto, se analizan y simulan seis casos (aumentando el número de elementos), comparando los parámetros más importantes que intervienen en el diseño real de una antena (directividad, eficiencia, corrientes, diagramas de radiación, etc.).</p> <p>El objetivo principal será analizar y estudiar a través de artículos relacionados técnicas que permitan mejorar los parámetros de antenas, introduciendo geometrías, formas y técnicas.</p>	

Abstract:

In recent years, the need has emerged to develop integrated, miniaturized and low-cost telecommunications systems due to the increase in increasingly compact and reduced devices.

To this way, the implementation of microstrip antennas with probe feeding is required to achieve impedance matching.

Thus, this work focuses on the study of microstrip antennas, since they are antennas that meet these requirements. However, these have some drawbacks including narrow band and low efficiency. That is why, we will focus on improving their performance, taking into account the inconvenience they present.

The tasks to be carried out are the modification of the structures, starting from scenario 5 of the work "Tècniques d'alta directivitat in microstrip amb superstrat antennas" [1] through the IE3D software.

The structure (scenario 5) will be modified to achieve better performance: increase bandwidth, efficiency and directivity. Specifically, six cases are analyzed and simulated (increasing the number of elements), comparing the most important parameters involved in the actual design of an antenna (directivity, efficiency, currents, radiation diagrams, etc.).

The main objective will be to analyze and study through technical related articles that improve antenna parameters, introducing geometries, shapes and techniques.

Índice

1.	Introducción	1
1.1	Contexto y justificación del Trabajo	1
1.2	Objetivos del Trabajo	1
1.3	Enfoque y método seguido	1
1.4	Estructura de la memoria	1
1.5	Planificación del trabajo	2
1.6	Conceptos básicos de antenas microstrip	2
1.6.1.	Ventajas y desventajas de antenas microstrip	4
1.6.2.	Parámetros de antena	4
1.6.2.1.	Coeficiente de reflexión	4
1.6.2.2.	Eficiencia de antena	4
1.6.2.3.	Directividad	5
1.6.2.3.	Ancho de banda.....	5
1.6.3.	Aplicaciones	5
2.	Estado del arte	7
2.1	Introducción.....	7
2.2	Revisión de los artículos estudiados	7
2.2.1.	Artículo 1: A Novel High-Directivity Microstrip Patch Antenna Based on Zero-Index Metamaterial [8].....	7
2.2.2.	Artículo 2: Use of low-cost patch antenas in modern wireless technology [9].....	8
2.2.3.	Artículo 3: Small and High-directivity Bow-Tie Patch Antenna Based on the Sierpinski Fractal [10].....	10
2.2.4.	Artículo 4: High-directivity microstrip antenna with Mandelbrot fractal boundary [11].....	12
2.2.5.	Artículo 5: An Undersampled Highdirectivity Microstrip Patch Array With A Reduced Number Of Radiating Elements Inspired On The Sierpinski Fractal [12].....	13
2.2.6.	Artículo 6: Genetic Algorithm Optimization of a High-Directivity Microstrip Patch Antenna Having a Rectangular Profile [13].....	14
2.2.7.	Artículo 7: A High-Gain Microstrip Patch Array Antenna Using a Superstrate Layer [14].....	15
3.	Simulaciones electromagnéticas	18
3.1	Introducción.....	18
3.2	Diseño	18
3.3	Simulaciones	20
3.3.1	Caso 1: Estructura con un parche	21
3.3.1.1	Estructura	21
3.3.1.2	Corriente	21
3.3.1.3	Directividad.....	22
3.3.1.4	Diagrama de radiación	22
3.3.1.5	Eficiencia.....	23
3.3.2	Caso 2: Estructura con dos parches	24
3.3.2.1	Estructura	24
3.3.2.2	Corriente	24

3.3.2.3 Directividad.....	25
3.3.2.4 Diagrama de radiación.....	26
3.3.2.5 Eficiencia.....	26
3.3.3 Caso 3: Estructura con cuatro parches.....	27
3.3.3.1 Estructura.....	27
3.3.3.2 Corriente.....	27
3.3.3.3 Directividad.....	28
3.3.3.4 Diagrama de radiación.....	28
3.3.3.5 Eficiencia.....	29
3.3.4 Caso 4: Estructura con ocho parches.....	29
3.3.4.1 Estructura.....	29
3.3.4.2 Corriente.....	30
3.3.4.3 Directividad.....	30
3.3.4.4 Diagrama de radiación.....	31
3.3.4.5 Eficiencia.....	31
3.3.5 Caso 5: Estructura con dieciséis parches.....	32
3.3.5.1 Estructura.....	32
3.3.5.2 Corriente.....	32
3.3.5.3 Directividad.....	33
3.3.5.4 Diagrama de radiación.....	33
3.3.5.5 Eficiencia.....	34
3.3.5 Caso 6: Estructura con treinta y dos parches.....	35
3.3.5.1 Estructura.....	35
3.3.5.2 Corriente.....	35
3.3.5.3 Directividad.....	36
3.3.5.4 Diagrama de radiación.....	36
3.4 Comparativa de cada caso simulado.....	37
3.4.1 Estructuras.....	37
3.4.2 Corrientes.....	38
3.4.3 Directividad.....	40
3.4.4 Diagramas de radiación.....	40
3.4.5 Eficiencia.....	42
3.5 Comparativa eliminando el superestrato.....	42
4. Conclusiones.....	43
5. Bibliografía.....	45

Lista de figuras

Ilustración 1: Cronograma de las tareas del proyecto	2
Ilustración 2: Estructura de una antena microstrip	3
Ilustración 3: Antena microstrip alimentada por sonda coaxial	3
Ilustración 4: Geometría de la estructura de la antena vista desde el lado (a) y desde arriba (b)	7
Ilustración 5: Diagramas de radiación simulados y medidos de la antena con ZIM a 8.75 GHz	8
Ilustración 6: Antena microstrip	9
Ilustración 7: Técnicas de alimentación de antenas microstrip	9
Ilustración 8: Antenas Square, bow-tie, and Sierpinski bow-tie	10
Ilustración 9: Diagramas de radiación de la antena de tipo Sierpinski bow-tie	11
Ilustración 10: Directividad simulada para la antena basada en Mandelbrot a 2,75 GHz, directividad de un array de tres elementos de parche rectangulares que ocupan la misma área que la antena Mandelbrot con y sin red de alimentación	12
Ilustración 11: Radiación medida en (a) $\phi = 0^\circ$ a 2.57 GHz, (b) $\phi = 90^\circ$ a 2.57 GHz.	13
Ilustración 12: Antenas microstrip de tipo circular y Sierpinski bowtie	14
Ilustración 13: Configuraciones de antenas. (a) Alimentación con sonda coaxial. (b) Alimentación en paralelo . (c) Alimentación en serie	15
Ilustración 14: Estructura de antena con superestrato	16
Ilustración 15: Resultados simulados con y sin el superestrato	16
Ilustración 16: Estructura del parche en IE3D	19
Ilustración 17: Diseño teórico del parche alimentado con una sonda coaxial	19
Ilustración 18: Parámetros de la capa del sustrato en IE3D	20
Ilustración 19: Estructura con un parche en IE3D	21
Ilustración 20: Corriente a 3,85 GHz de la estructura con un parche en IE3D	21
Ilustración 21: Directividad de la estructura con un parche en IE3D	22
Ilustración 22: Diagrama de radiación de la estructura con un parche en IE3D	23
Ilustración 23: Eficiencia de antena y de radiación de estructura con un parche en IE3D	23
Ilustración 24: Estructura con dos parches en IE3D	24
Ilustración 25: Corriente a 3,85 GHz de la estructura con dos parches en IE3D	25
Ilustración 26: Directividad de la estructura con dos parches en IE3D	25
Ilustración 27: Diagrama de radiación de la estructura con dos parches en IE3D	26
Ilustración 28: Eficiencia de antena y de radiación de estructura con dos parches en IE3D	26
Ilustración 29: Estructura con cuatro parches en IE3D	27
Ilustración 30: Corriente a 3,85 GHz de la estructura con cuatro parches en IE3D	27
Ilustración 31: Directividad de la estructura con cuatro parches en IE3D	28
Ilustración 32: Diagrama de radiación de la estructura con cuatro parches en IE3D	28

Ilustración 33: Eficiencia de antena y de radiación de estructura con cuatro parches en IE3D	29
Ilustración 34: Estructura con ocho parches en IE3D	29
Ilustración 35: Corriente a 3,85 GHz de la estructura con ocho parches en IE3D	30
Ilustración 36: Directividad de la estructura con ocho parches en IE3D	30
Ilustración 37: Diagrama de radiación de la estructura con ocho parches en IE3D.	31
Ilustración 38: Eficiencia de antena y de radiación de estructura con ocho parches en IE3D	31
Ilustración 39: Estructura con dieciséis parches en IE3D	32
Ilustración 40: Corriente a 3,85 GHz de la estructura con dieciséis parches en IE3D	33
Ilustración 41: Directividad de la estructura con dieciséis parches en IE3D	33
Ilustración 42: Diagrama de radiación de la estructura con dieciséis parches en IE3D	34
Ilustración 43: Eficiencia de antena y de radiación de estructura con dieciséis parches en IE3D	34
Ilustración 44: Estructura con treinta y dos parches en IE3D	35
Ilustración 45: Corriente a 3,85 GHz de la estructura con treinta y dos parches en IE3D	35
Ilustración 46: Directividad de la estructura con treinta y dos parches en IE3D	36
Ilustración 47: Diagrama de radiación de la estructura con treinta y dos parches en IE3D	36
Ilustración 48: Eficiencia de antena y de radiación de estructura con treinta y dos parches en IE3D.	37
Ilustración 49: Comparación de estructuras de los casos estudiados	38
Ilustración 50: Comparativa de corrientes a la frecuencia de 3,85 GHz de los casos estudiados	39
Ilustración 51: Comparativa de la directividad en los distintos casos con IE3D	40
Ilustración 52: Comparativa del diagrama de radiación de los casos estudiados	41

1. Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

Este trabajo surge de la necesidad de estudiar el comportamiento de la directividad de las antenas basándonos en diferentes estructuras. Concretamente, nos centramos en el estudio de antenas microstrip (partiendo del estudio “Tècniques d’alta directivitat en antenes microstrip amb superstrat” [1]) para conseguir aumentar el ancho de banda, así como también la directividad (mediante superestratos) sin la necesidad de utilizar agrupaciones de antenas.

1.2 Objetivos del Trabajo

Los objetivos fundamentales del presente trabajo son:

- Estudiar diferentes técnicas para mejorar tanto el ancho de banda como la directividad de las antenas sin la necesidad de tener una red de alimentación para cada parche.
- Adquirir conocimientos de la herramienta IE3D para poder analizar, diseñar y simular estructuras.

1.3 Enfoque y método seguido

Para poder llevar a cabo este trabajo de investigación, se han estudiado varios artículos relacionados con la temática de éste. En concreto, artículos que explican como aumentar la directividad y el ancho de banda a través de estructuras geométricas utilizando diferentes técnicas para conseguir el resultado esperado.

Para poder analizar, diseñar y simular las estructuras, se ha utilizado la herramienta IE3D. Este software nos permite crear estructuras complejas en 2D y 3D, además de estudiar y analizar los parámetros de las antenas (directividad, diagrama de radiación, ancho de banda, eficiencia, corrientes eléctricas).

1.4 Estructura de la memoria

La memoria de este trabajo se divide en 4 capítulos. En el primero, se realiza una breve introducción donde se especifican los objetivos, así como la metodología a seguir y los conceptos básicos. En el segundo, se realiza un resumen de los artículos seleccionados para el estudio del tema en cuestión. Seguidamente, en el capítulo 3, se parte del estudio de un artículo donde trata una técnica concreta para aumentar la directividad de la antena microstrip. Teniendo en cuenta este artículo, se ha replicado en el entorno de simulación (con el software IE3D) y se han extraído las simulaciones analíticas.

Finalmente, en el capítulo 4, se presentan los resultados obtenidos, así como las conclusiones tomadas y las cuestiones pendientes.

1.5 Planificación del trabajo

El plan de trabajo seguido se ha basado en la propuesta de los tutores. A continuación, se muestra el diagrama de Gantt donde se puede ver el cronograma con las tareas realizadas:

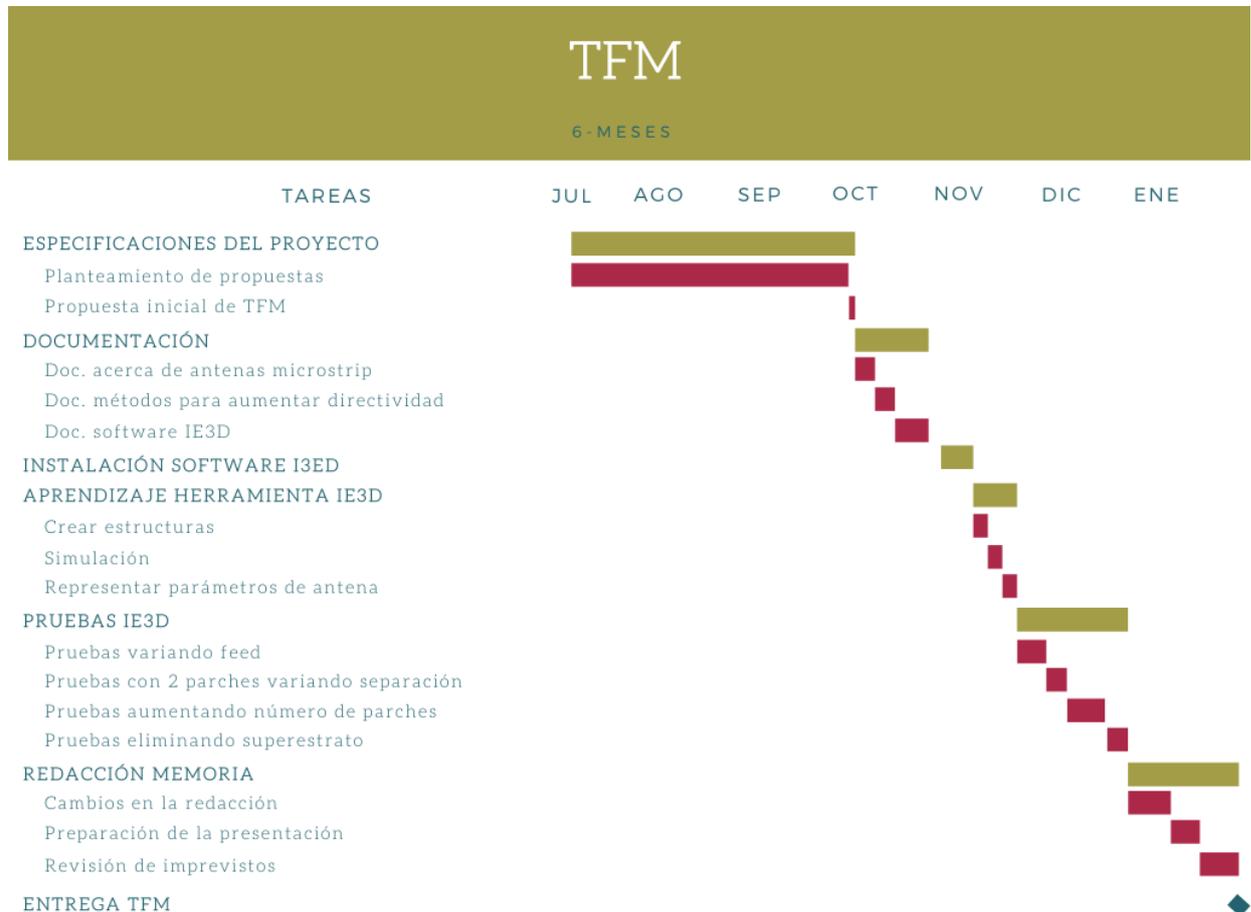


Ilustración 1: Cronograma de las tareas del proyecto

1.6 Conceptos básicos de antenas microstrip

Las antenas microstrip empezaron a desarrollarse a principios de los años 50 de forma muy teórica [2], pero no fue hasta los años 70 cuando se construyeron las primeras [3], y hasta mediados de los 90 cuando comenzaron a usarse en diferentes escenarios. A partir de ese momento, se han investigado y desarrollado ampliamente mejorando sus prestaciones.

Hoy, podemos encontrarlas en infinidad de aplicaciones como telefonía, sistemas radar, biomedicina e incluso comunicaciones satélites.

La configuración básica de una antena microstrip está formada por cuatro elementos: el plano de masa, el material dieléctrico (con constante dieléctrica, ϵ_r), el plano conductor (en el que se sitúa un parche metálico) y el alimentador o feed.

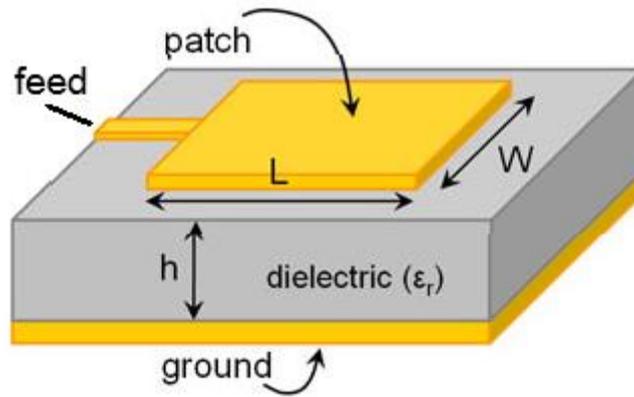


Ilustración 2: Estructura de una antena microstrip

El sustrato se encuentra entre el parche y el plano de masa y se trata de una lámina de material dieléctrico cuya constante dieléctrica suele variar entre 1 y 11. La elección del tipo de dieléctrico depende de varios factores, pero generalmente hay que establecer un compromiso dependiendo de las especificaciones de la antena. El parche es una metalización cuyo espesor debe ser despreciable en relación con la longitud de onda (normalmente entre $0.04\lambda_0$ y $0.05\lambda_0$). Existen diferentes geometrías de parche y frecuencias de radiación fundamental de la antena (modos TM_{10} o TM_{01}) dependiente de sus dimensiones. El plano de masa es simplemente una capa de metal que se encuentra en la capa inferior de la capa de sustrato y que consigue crear una condición de plano conductor perfecto.

En cuanto a la alimentación de antenas, se pueden realizar de diversas formas, las más usadas son a través de línea microstrip, mediante sonda coaxial, mediante ranura en el plano de masa o con doble excitación de la línea microstrip.

La alimentación por sonda coaxial conecta los parches directamente mediante el conductor central del cable coaxial atravesando el material dieléctrico, como puede observarse en la siguiente figura [4].

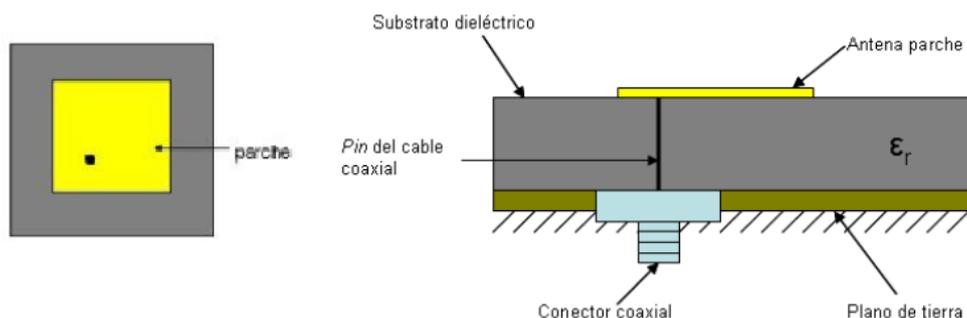


Ilustración 3: Antena microstrip alimentada por sonda coaxial

La posición del conector influirá directamente en la polarización y adaptación de la antena. Además, es posible alimentar el parche en el punto de

impedancia que se elija, como veremos en la realización de las pruebas de este trabajo.

1.6.1. Ventajas y desventajas de antenas microstrip

Las antenas microstrip presentan multitud de ventajas y las más destacadas son [5] [6]:

- Tamaño: el tamaño es mucho más pequeño si lo comparamos con otro tipo de antenas.
- Eficiencia: presentan una alta eficiencia en su modo fundamental, aunque influirá la alimentación elegida.
- Construcción: la construcción es relativamente sencilla debido a que sus características son planas.
- Coste: si se usan técnicas estándar sobre circuitos impresos, pueden ser construidas a un coste bajo.

Sin embargo, este tipo de antenas también presentan algunos inconvenientes como son [5] [6] [7]:

- Ancho de banda reducido: presentan un ancho de banda reducido, lo que descarta su uso para ciertas aplicaciones.
- Excitación de ondas de superficie: presentan una excitación de las ondas de superficie debido al sustrato dieléctrico. Este hecho puede provocar un efecto de difracción en el plano de masa que conllevaría a aparición de radiación indeseada, o al aumento del acoplo mutuo cuando las antenas pertenecen a un array.

1.6.2. Parámetros de antena

1.6.2.1. Coeficiente de reflexión

El coeficiente de reflexión se utiliza para medir la relación entre la amplitud de la onda reflejada y la amplitud de la onda incidente. Para calcularlo matemáticamente, se usa la siguiente fórmula:

$$S_{11} = \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0}$$

Ecuación 1: Coeficiente de reflexión

Donde Z_i es la impedancia de entrada y Z_0 es la impedancia del generador, habitualmente 50Ω .

1.6.2.2. Eficiencia de antena

La eficiencia de radiación se define como la relación entre la resistencia de radiación y la suma de la resistencia de radiación y las pérdidas óhmicas. Matemáticamente se define como:

$$\eta_r = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_\Omega}$$

Ecuación 2: Eficiencia de radiación

La eficiencia de antena se define como la relación entre la potencia radiada por parte de la antena hacia el espacio y la potencia que entrega el propio generador. Matemáticamente se define como:

$$\eta_a = \eta_r(1 - |s_{11}|^2)$$

Ecuación 3: Eficiencia de antena

1.6.2.3. Directividad

La directividad de una antena se define como la capacidad de radiar la potencia hacia direcciones determinadas. Dependen de la función que se quiera dar a una antena, su directividad será menos o más directiva.

1.6.2.3. Ancho de banda

Este término se utiliza para describir el intervalo de frecuencias sobre el cual una antena funcionará satisfactoriamente. No existe una definición única para el rendimiento satisfactorio, ya que tal rendimiento depende de la aplicación de la antena.

1.6.3. Aplicaciones

Debido a las múltiples ventajas y características que presentan las antenas microstrip, su uso se ha extendido en los últimos años y las aplicaciones más usadas son [5] [6] [7]:

- Comunicaciones móviles (estaciones base, teléfono, automóvil)
- Antena en aviones (navegación, altímetros, telefonía)
- Satélites de comunicaciones
- Radares (phased array) con conformado electrónico de haz
- Biomédicas
- Telemetría (guiado de misiles, sensores)
- Observación de la tierra

2. Estado del arte

2.1 Introducción

En este segundo capítulo del trabajo, realizaremos un breve resumen de los artículos estudiados que tratan diferentes técnicas para aumentar la directividad de las antenas, así como el ancho de banda.

2.2 Revisión de los artículos estudiados

2.2.1. Artículo 1: A Novel High-Directivity Microstrip Patch Antenna Based on Zero-Index Metamaterial [8]

En este artículo se tratan las ventajas de antenas planas de alta directividad, entre ellas la de poder fabricarse fácilmente mediante la tecnología de placa de circuito impreso (PCB).

Así, se propone una antena de alta directividad utilizando un nuevo tipo de estructura ZIM (materiales de índice cero) de dos capas. Primero se diseña una estructura ZIM basada en la simulación de la celda unitaria. A partir de los resultados, se encuentra que se produce un índice de refracción cero a 8,75 GHz. Entonces, se utiliza la estructura ZIM como el superestrato de una antena de parche microstrip y se realizan las simulaciones correspondientes.

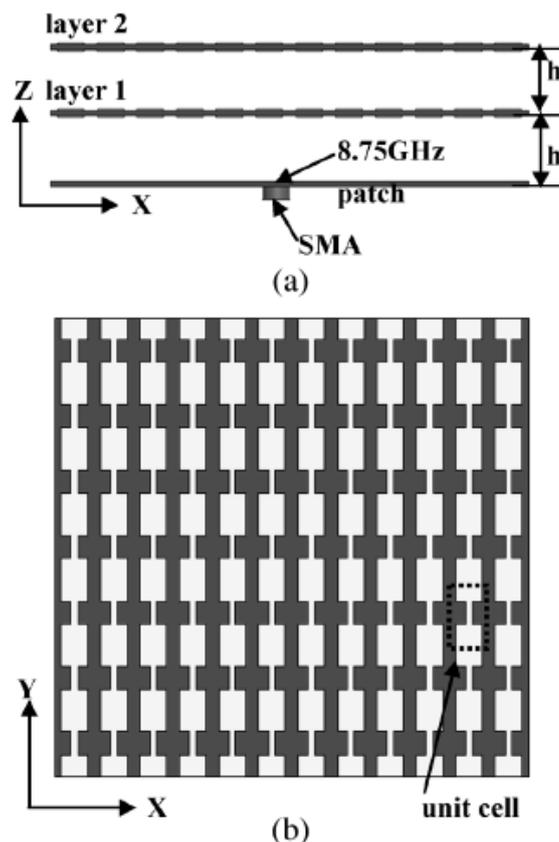


Ilustración 4: Geometría de la estructura de la antena vista desde el lado (a) y desde arriba (b)

Finalmente, los resultados de la simulación obtenidos muestran que la directividad de la antena se mejora efectivamente en comparación con la de la antena de parche sola.

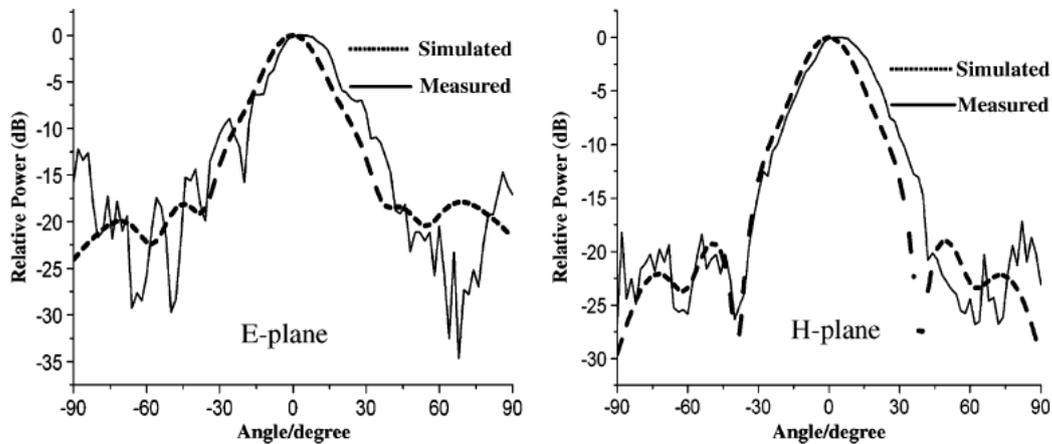


Ilustración 5: Diagramas de radiación simulados y medidos de la antena con ZIM a 8.75 GHz

2.2.2. Artículo 2: Use of low-cost patch antennas in modern wireless technology [9]

Este artículo trata la estructura, diseño, parámetros y aplicaciones de las antenas microstrip.

La antena microstrip consta de cuatro partes principales: el parche conductor (patch), el sustrato dieléctrico, el plano de tierra y la línea de alimentación. El parche conductor y el plano de tierra generalmente están hechos del mismo material. Además, el conductor de parche más utilizado para antenas de parche de bajo coste y bajo perfil es el cobre. El material del parche afecta a la eficiencia de la antena, mientras que el tipo de sustrato juega un papel muy importante en el cálculo de las dimensiones de la antena.

Una antena microstrip se constituye teniendo un parche conductor (rectangular y circular son muy utilizados) en un sustrato dieléctrico por encima de un plano de tierra conductor. Cuando el parche es excitado por la alimentación, la parte inferior del parche en un determinado momento tendrá una carga positiva, y el plano de tierra tendrá una distribución de carga negativa. Las fuerzas atractivas entre estas cargas mantendrán la mayoría de ellas en las superficies inferior y superior del parche y material de tierra, respectivamente. En la superficie del parche, las cargas repulsivas dentro de la misma polaridad tienden a empujar algunas de las cargas hacia los bordes. Estas cargas causarán un efecto de franjas en los bordes, causando radiación.

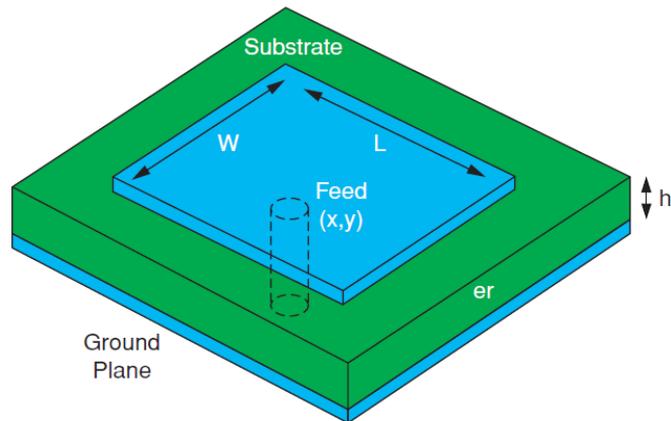


Ilustración 6: Antena microstrip

Algunas de las ventajas de las antenas microstrip son: bajo costo de fabricación y complejidad, facilidad de adaptación a superficies curva de vehículos o producto, resistentes a golpes y vibraciones, posibilidad de producir polarización lineal y circular basada en las posiciones de alimentación, pequeño grosor de la antena, etc. Sin embargo, tienen algunas limitaciones como ancho de banda estrecho, perdidas dielectricas y de conductores grandes en antenas delgadas, afectando a la eficiencia de la antena y sensibles a factores ambientales como la temperatura y la humedad.

Además, en este artículo se detallan los mecanismos principales de alimentación utilizados en los diseños de antenas microstrip: alimentación de la sonda desde el suelo (a), línea de alimentación de microstrip (b) y alimentación acoplada a la apertura (o alimentación de línea de banda) (c).

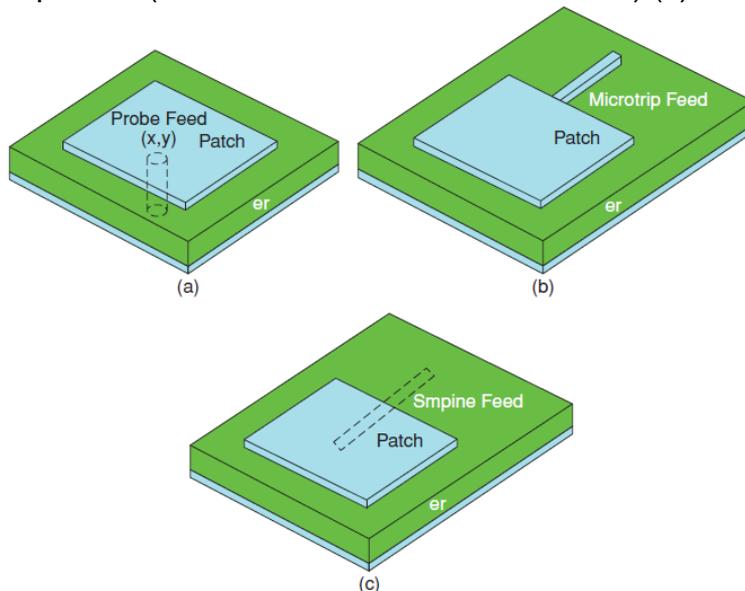


Ilustración 7: Técnicas de alimentación de antenas microstrip

También se detallan los métodos que se usan ampliamente en el análisis, diseño y modelado de antenas microstrip como son: modelo de línea de transmisión, modelo de cavidad y modelo de onda completa.

Los parámetros de la antena dependen de los materiales, las dimensiones del parche, la frecuencia de operación, la altura del parche, etc. Así, cuanto mayor es la permitividad relativa del dieléctrico o mayor es la frecuencia de operación, más pequeño es el tamaño del parche.

La eficiencia disminuye a medida que la altura del sustrato o la constante del dieléctrico aumenta.

El ancho de banda aumenta a medida que el grosor del sustrato aumenta y disminuye para constantes dieléctricas más altas.

2.2.3. Artículo 3: Small and High-directivity Bow-Tie Patch Antenna Based on the Sierpinski Fractal [10]

En este artículo se estudia el comportamiento radioeléctrico que presentan las antenas con forma fractal (Square, BowTie, SPK-BowTie1-3).

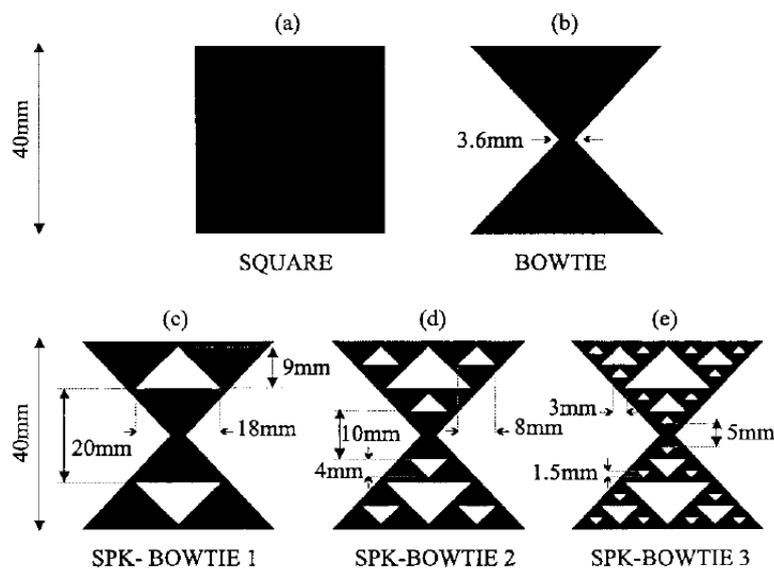


Ilustración 8: Antenas Square, bow-tie, and Sierpinski bow-tie

En concreto, en la primera parte, se analiza el comportamiento en miniatura de la antena Sierpinski Bow Tie y la segunda, explica las características de alta directividad de la misma antena (Sierpinski Bow Tie) a frecuencias más altas en función de las iteraciones fractales.

Así, como resultado, se obtiene que la frecuencia de resonancia se reduce de 1.947 GHz (correspondiente al square patch), a 1.247 GHz (en la antena bow-tie convencional) y a 1.128 GHz (para la antena Sierpinski Bow Tie 3).

Antenna	Square	Bow Tie	SPK Bow Tie 3
Resonant freq. [GHz]	1.947	1.247	1.128
BW [%, $SWR = 2$]	1.12	0.44	0.40
Electrical size [λ]	0.259	0.166	0.150
Area reduction [A/A_{square}]	1	0.40	0.33

Tabla 1: Evolución de Square patch a SPK Bow Tie 3

Esta reducción de un 42% de la frecuencia de resonancia es muy interesante para aplicaciones donde se requieren pequeñas antenas, como, por ejemplo, terminales móviles.

Por otro lado, la iteración fractal permite la aparición del modo fractón, que permite una directividad mayor y lóbulos (sidelobes) más pequeños manteniendo un pequeño tamaño eléctrico. Además, a medida que aumenta la iteración fractal, la frecuencia de resonancia del modo fractón disminuye, manteniendo la misma directividad.

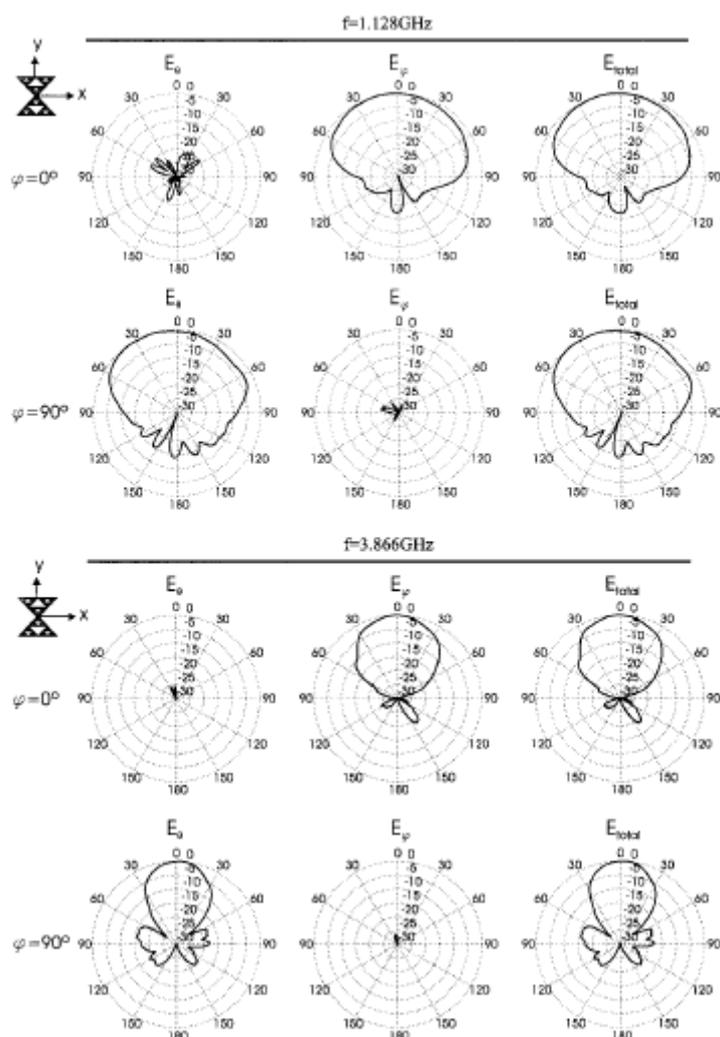


Ilustración 9: Diagramas de radiación de la antena de tipo Sierpinski bow-tie

2.2.4. Artículo 4: High-directivity microstrip antenna with Mandelbrot fractal boundary [11]

Este artículo se centra en las antenas de alta directividad que utilizan un único elemento radiante. Éstas son atractivas ya que no es necesario incluir una red de alimentación, especialmente interesante si es imprescindible un bajo costo, bajo peso y simplicidad (para WiFi, IoT, etc).

La red de alimentación agrega complejidad mecánica y, en algunos casos, puede generar radiación espuria que distorsiona el patrón de radiación, por ejemplo, aumentando el componente contrapolar debido a la radiación de la red de alimentación.

En este sentido, se han propuesto antenas microstrip basadas en fractales para obtener alta directividad en modos de orden superior llamados modos focalizados y conocidos como fractinos. Sin embargo, presentan una radiación simétrica. Es por ello, que el presente artículo investiga una antena basada en fractales inspiradas en el fractal de Mandelbrot.

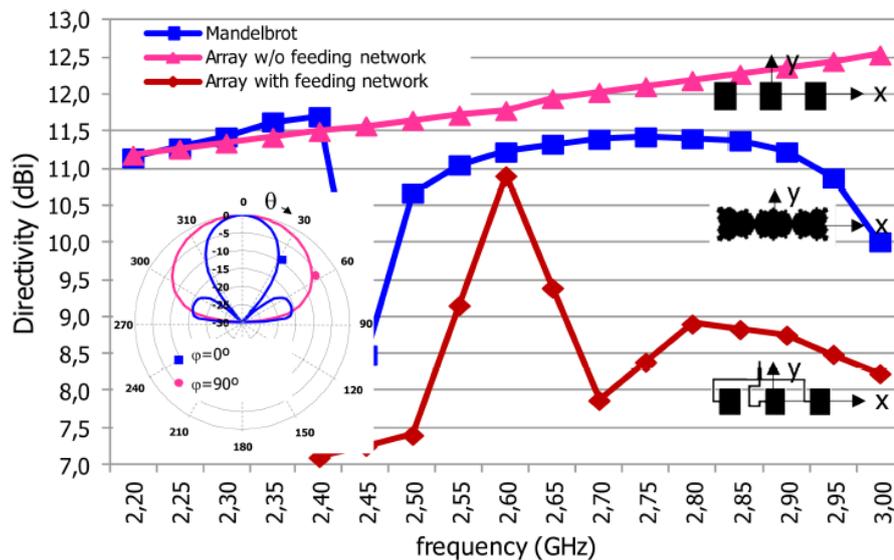


Ilustración 10: Directividad simulada para la antena basada en Mandelbrot a 2,75 GHz, directividad de un array de tres elementos de parche rectangulares que ocupan la misma área que la antena Mandelbrot con y sin red de alimentación

El objetivo de la investigación se centra en encontrar modos de orden superior capaces de proporcionar una directividad más alta que la ofrecida por un parche clásico que opera en su modo fundamental, proporcionando restricciones como haz estrecho en un plano y haz ancho en el plano perpendicular.

Finalmente, se concluye que la ecuación de Mandelbrot ha sido útil para sintetizar una antena microstrip rectangular con límite fractal. La forma rectangular junto con el límite fractal se ha utilizado para admitir modos de orden superior con patrones de radiación de lado ancho y alta directividad.

Para la antena estudiada, se encontraron al menos dos modos de alta directividad, uno a 2,75 GHz y otro a 4,85 GHz, con directividades de 11,5 dB y 15,1 dBi, respectivamente

La modificación de la ecuación de Mandelbrot ha sido útil para sintetizar una antena de microstrip rectangular con límite fractal. La forma rectangular junto con el límite fractal se ha utilizado para admitir modos de orden superior con patrones de radiación de lado ancho y alta directiva. Para la antena bajo análisis, se han encontrado al menos dos modos de alta directividad de lado ancho, uno a 2.75 GHz y otro a 4.85 GHz con directividades de 11.5 dB y 15.1 dBi, respectivamente.

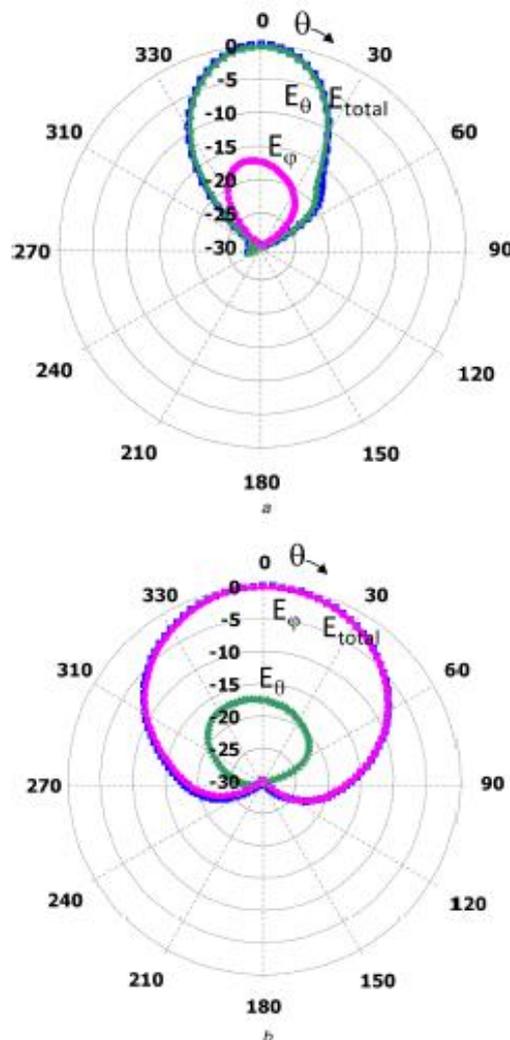


Ilustración 11: Radiación medida en (a) $\phi = 0^\circ$ a 2.57 GHz, (b) $\phi = 90^\circ$ a 2.57 GHz.

El diseño propuesto tiene aplicaciones prácticas de ingeniería tales como hotspots donde se necesita una antena simple con un patrón de alta directiva.

2.2.5. Artículo 5: An Undersampled Highdirectivity Microstrip Patch Array With A Reduced Number Of Radiating Elements Inspired On The Sierpinski Fractal [12]

En este artículo se comienza analizando el uso de arrays de antenas de alta directividad, ya que están siendo una alternativa a las antenas reflectoras parabólicas. Esto es debido a que presentan un perfil delgado y menor complejidad mecánica, sin embargo, es un problema importante la complejidad de la red de alimentación utilizada para alimentar la gran cantidad de elementos. Así, se necesita un gran espacio para la red de alimentación.

Por tanto, en este artículo, se presenta un esquema de submuestreo para conjuntos de microstrip que utilizan elementos de antenas multinivel basados en geometría fractal.

Como conclusión, se demuestra que el uso de una antena microstrip multinivel de alta directividad con geometría del tipo Sierpinski bow-tie es útil para diseñar matrices con menos elementos radiantes y la misma directividad que los arrays euclídeos circulares (en este artículo).

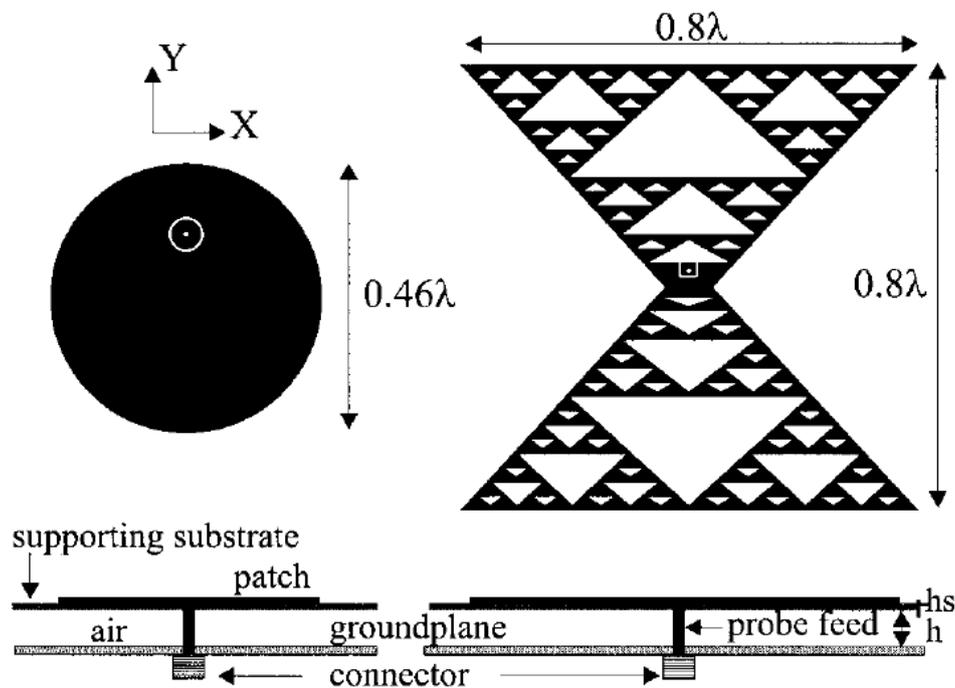


Ilustración 12: Antenas microstrip de tipo circular y Sierpinski bowtie

El número de elementos se ve reducido en un factor de 2.84, y será menor la complejidad, así como el espacio de la red de alimentación. Esto puede ser una ventaja para integrar filtros, cambiadores de fase, amplificadores y otros componentes de microondas con menos problemas que aquellos que usan parches euclidianos. El peso total de la antena puede reducirse, lo que será una ventaja, especialmente para antenas de satélite.

2.2.6. Artículo 6: Genetic Algorithm Optimization of a High-Directivity Microstrip Patch Antenna Having a Rectangular Profile [13]

Este artículo estudia el comportamiento de una antena microstrip de alta directividad con un perfil rectangular comparándolo con una agrupación de antenas lineales. Para el diseño, se hace uso del algoritmo genético (GA) ya que este hace que no sea necesario una red de alimentación.

En la siguiente figura se pueden observar las configuraciones propuestas en este artículo:

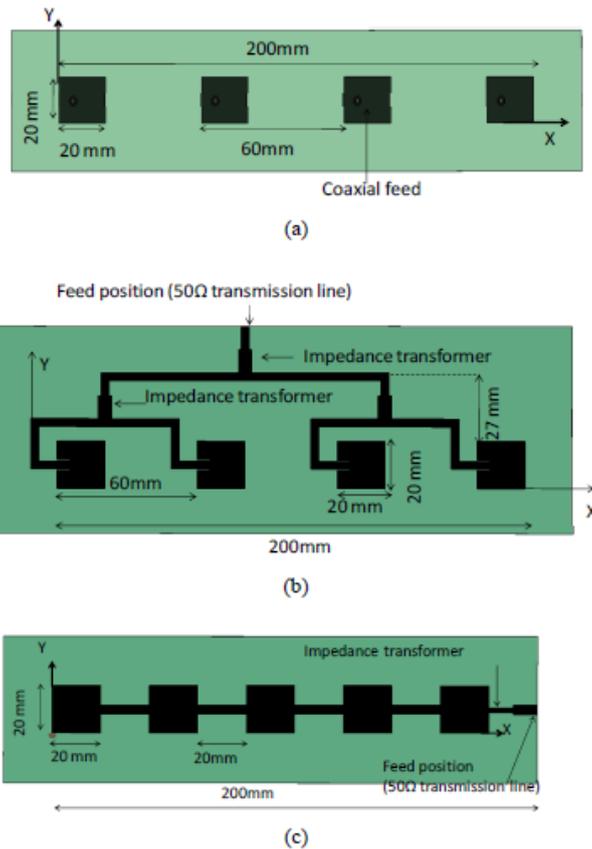


Ilustración 13: Configuraciones de antenas. (a) Alimentación con sonda coaxial. (b) Alimentación en paralelo . (c) Alimentación en serie

Como resultado, se obtiene que la antena microstrip (MPA) estudiada obtiene casi la misma directividad que los arrays lineales que utilizan alimentaciones en serie (series feeding) o paralelo (corporate feeding). Además, el diseño de GA tiene la ventaja que se obtiene un ancho de banda mayor, concretamente un factor 2 en comparación con una matriz alimentada en paralelo (corporate feeding) y un factor 3 en comparación con arrays lineales alimentados en serie (series feeding).

La antena GA es atractiva para antenas con directividad moderada como las utilizadas en hot-spots.

2.2.7. Artículo 7: A High-Gain Microstrip Patch Array Antenna Using a Superstrate Layer [14]

En este artículo se analizan los efectos de los superestratos sobre una antena microstrip en relación a la ganancia y al ancho de banda.

En concreto, se compara un patch con el superestrato (array 2x8) y un patch sin el superestrato (array 4x8).

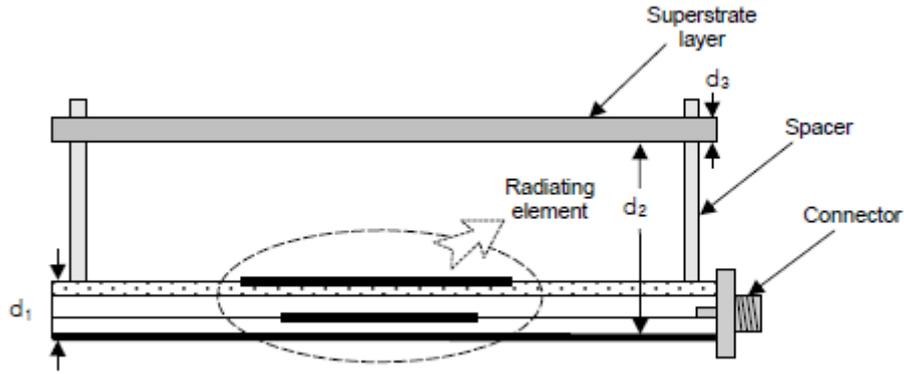


Ilustración 14: Estructura de antena con superestrato

Por tanto, en este artículo se comprueba experimentalmente el efecto de una capa de sustrato para obtener una alta ganancia en una antena de parche microstrip.

Después del experimento, se demuestra que el patch con el superestrato tiene una alta ganancia de más de 22.5 dBi y un ancho de banda de impedancia un 17% mayor.

La antena propuesta puede ser útil para sistemas de alta ganancia que requieren un gran ancho de banda.

Array antenna	Return loss bandwidth		Gain (12 GHz)	
	Simulation	Measurement	Simulation	Measurement
4×8 Antenna without superstrate	11.15-13.05 GHz (15.7%)	10.35-12.8 GHz (21.1%)	24.3 dBi	22.6 dBi
2×8 Antenna with superstrate	11.35-13.2 GHz (15.1%)	11.45-13.65 GHz (17.5%)	23.9 dBi	22.65 dBi

Tabla 2: Comparación de ancho de banda de impedancia y ganancia

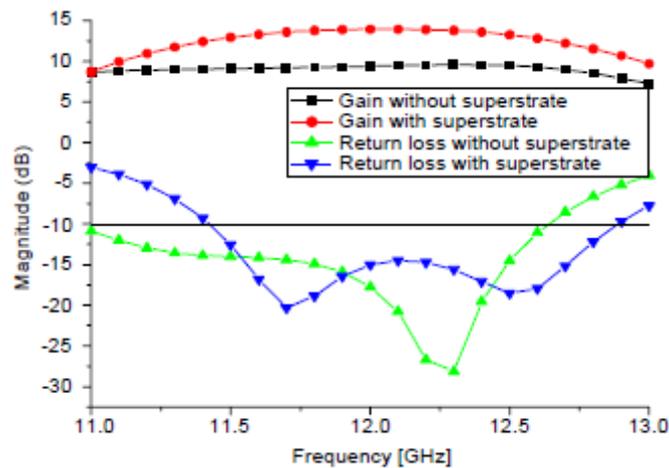


Ilustración 15: Resultados simulados con y sin el superestrato

2.3 Conclusiones

Mediante el estudio de los artículos mostrados, se han conocido algunas de las técnicas utilizadas para mejorar las prestaciones de las antenas microstrip.

Se ha comprobado como las dimensiones de las antenas (área, espesor, parámetros básicos, tipo de alimentación, etc.), las estructuras y las técnicas para su diseño hacen que resulte interesante profundizar más en la experimentación.

Así, vemos que aplicando técnicas concretas se puede lograr aumentar el ancho de banda de directividad de las antenas utilizando estructuras menos complejas.

3. Simulaciones electromagnéticas

3.1 Introducción

En este tercer capítulo, se ha tenido en cuenta el artículo “A novel High-Directivity Microstrip Patch Antenna Based on Zero-Index Metamaterial” [8] para realizar el diseño y las simulaciones. Además, se ha considerado el estudio titulado “Tècniques d’alta directivitat en antenes microstrip amb superstrat [1]”

Es decir, partiendo de este artículo, así como los diseños y conclusiones del trabajo mencionado, se ha realizado este apartado de simulaciones electromagnéticas.

En primer lugar, se diseña una antena microstrip única. Luego, teniendo en cuenta el estudio y partiendo de una estructura determinada (de este estudio), se realizarán una serie de experimentos para ver el efecto (en cuanto a corrientes, ancho de banda, directividad, diagrama de radiación, eficiencia) que tiene incorporar más parches a la estructura analizada.

Finalmente, se realizarán comparaciones de todos los experimentos realizados.

3.2 Diseño

En primer lugar, para poder realizar el diseño, se calculan los valores que necesitamos para poder trabajar a la frecuencia 3.85GHz. Como la frecuencia elegida es diferente a la utilizada en el artículo, se deben redimensionar los valores. En este caso, el factor de escala será de 2.2, que es el resultado de dividir la frecuencia utilizada en el artículo entre la frecuencia elegida (8.75 GHz / 3.85 GHz). Así, habrá que aplicar este factor de escala a todos los cálculos para diseñar adecuadamente las estructuras basadas en el artículo.

Para calcular el tamaño del parche, se ha utilizado la ecuación siguiente:

$$L = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

Ecuación 4: Cálculo de longitud L del parche

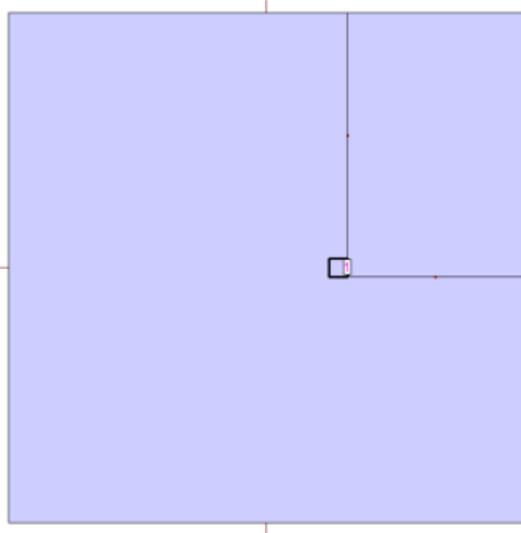


Ilustración 16: Estructura del parche en IE3D

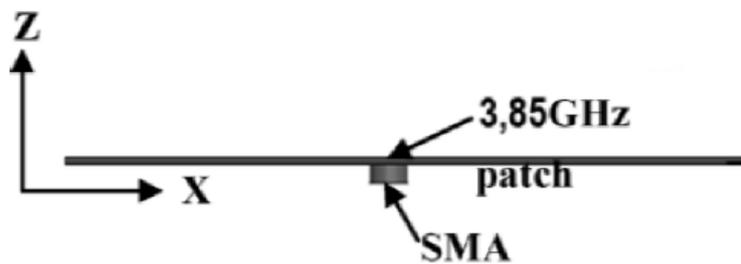


Ilustración 17: Diseño teórico del parche alimentado con una sonda coaxial

El diseño está formado por una capa de dieléctrico con un grosor 1,52mm, con una constante dieléctrica de valor 3,38 con una tangente de pérdidas de 0.001. El parche (con dimensiones 20mm x 20mm) está situado sobre esta capa y está alimentado con una sonda coaxial de 50 ohmios.

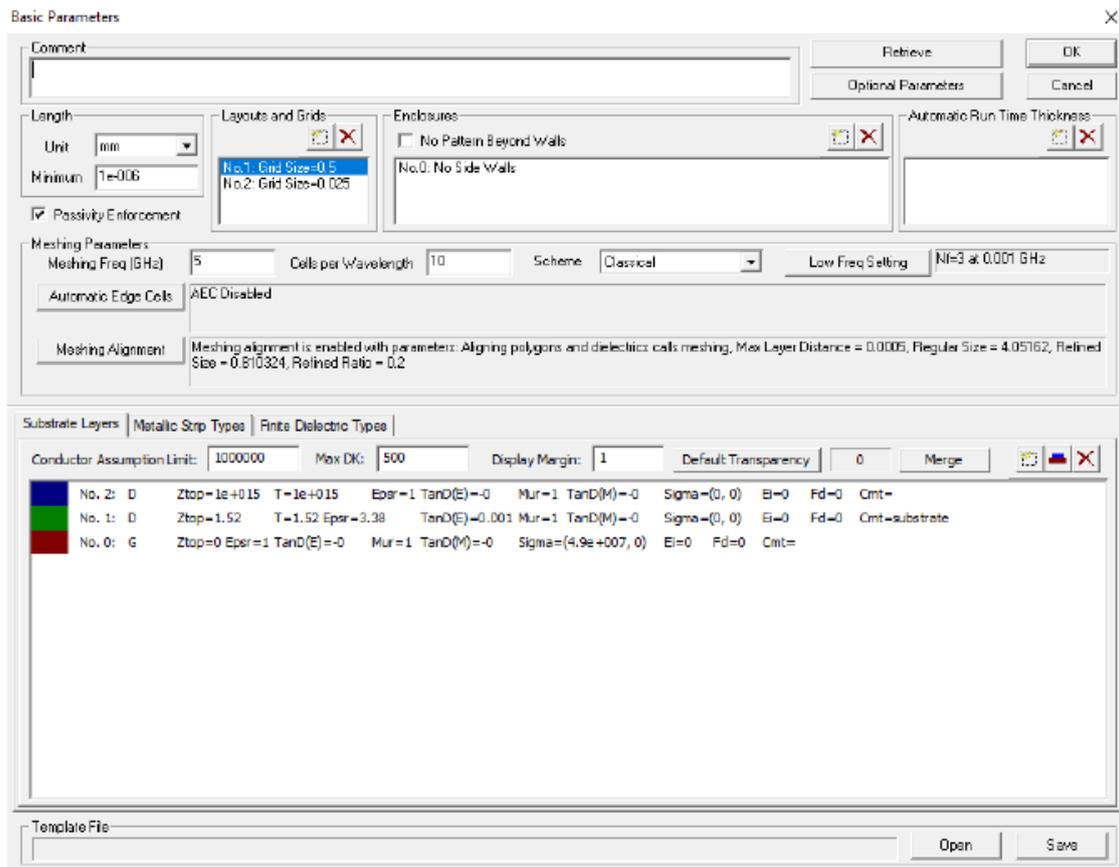


Ilustración 18: Parámetros de la capa del sustrato en IE3D

El diseño de la estructura (layer) se ha hecho teniendo en cuenta el factor igual a 2,2 tanto en el diseño de la celda con la que se trabajará como la distancia $h = 36,52$ mm que en términos de la longitud de onda equivale a $0,46\lambda$.

En todos los casos estudiados a continuación, se trata el parche con una estructura de tamaño $242\text{mm} \times 237,6\text{mm}$ diseñada a través de la unión de la celda mencionada anteriormente y con el mismo tamaño. Se han tratado el/los parche/s rodeado de aire además de un sustrato donde se encuentra la estructura a la distancia de $h = 36,52$. El dielectrico tendrá un espesor de $0,787\text{mm}$, con una constante dieléctrica de valor 2,2.

3.3 Simulaciones

Una vez que se ha definido la estructura del parche que se va a utilizar para las simulaciones realizadas en este apartado, se plantean una serie de experimentos para ver el efecto que tiene cada uno de ellos en cuanto a corrientes, ancho de banda, directividad, diagrama de radiación y eficiencia. Finalmente, se realizarán las conclusiones de todos estos escenarios mostrados.

3.3.1 Caso 1: Estructura con un parche

3.3.1.1 Estructura

Una vez que hemos realizado el diseño, podemos ver un solo parche utilizando la estructura definida (con área 242mm x 237,6mm).

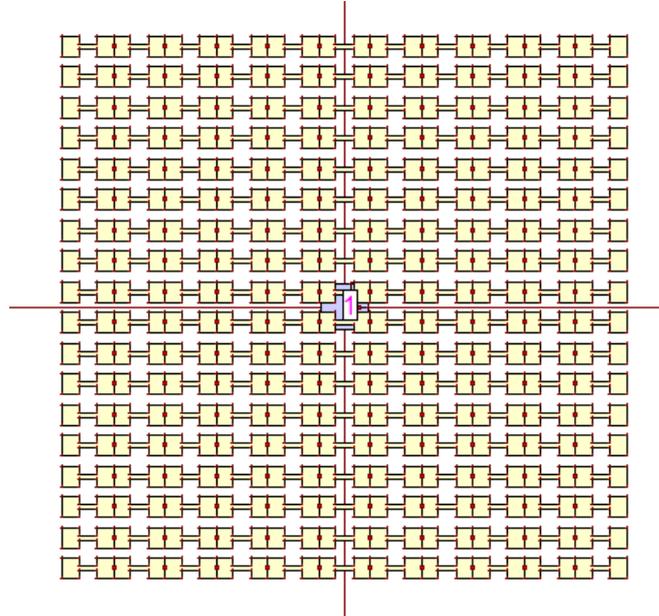


Ilustración 19: Estructura con un parche en IE3D

3.3.1.2 Corriente

Si una vez realizada la simulación de la estructura detallada en el subapartado anterior cargamos el fichero ".cur" en IE3D, podemos ver la corriente que circula por la estructura diseñada para la frecuencia elegida (3,85GHz).

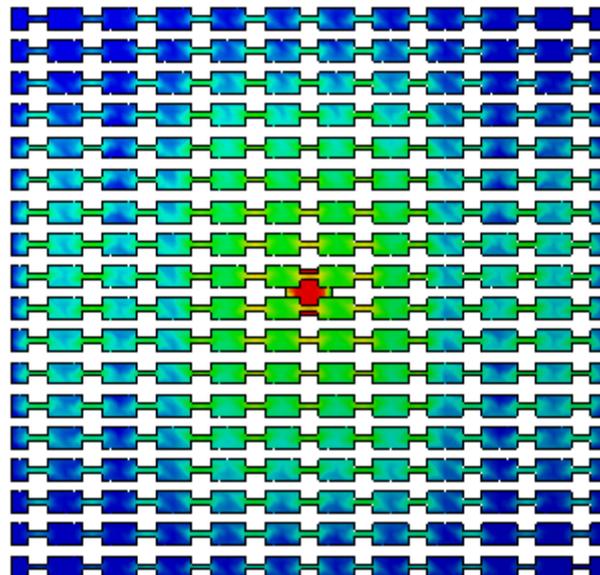


Ilustración 20: Corriente a 3,85 GHz de la estructura con un parche en IE3D

3.3.1.3 Directividad

A través de la carga del archivo con extensión “.pat” en IE3D podemos observar la comparativa de directividad para cada una de las frecuencias simuladas.

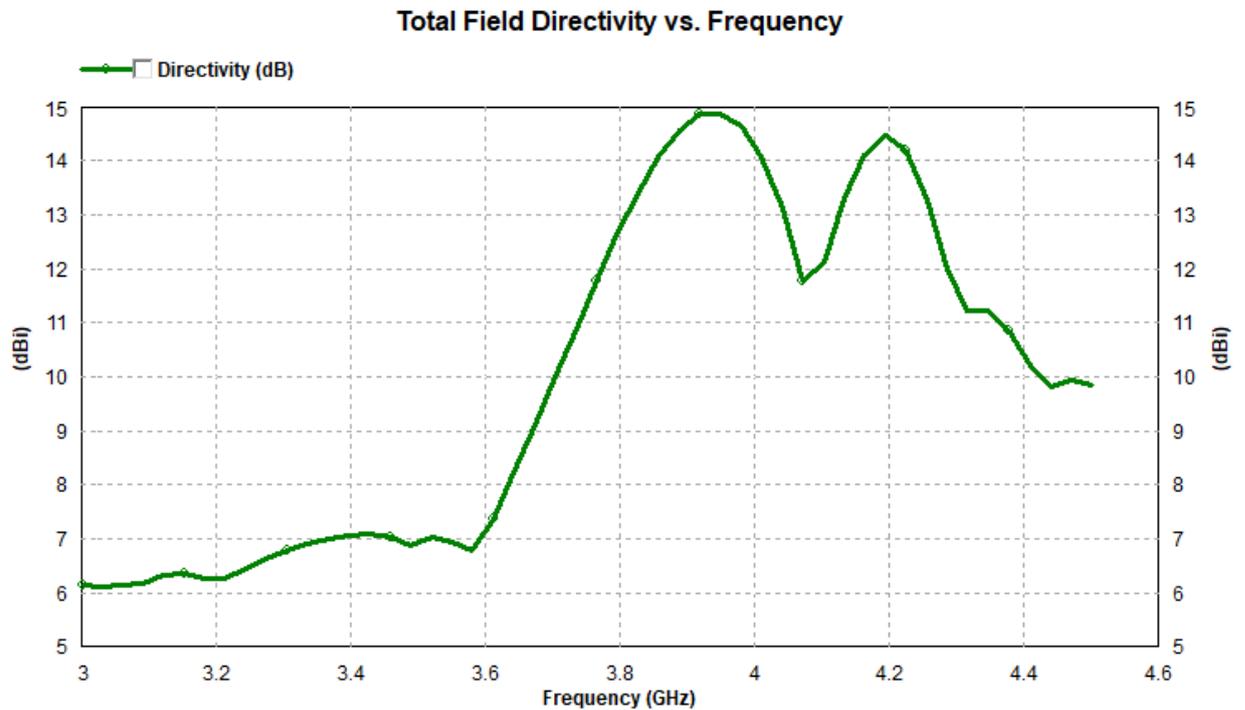


Ilustración 21: Directividad de la estructura con un parche en IE3D

Así, podemos ver en la figura que la directividad alcanza valores máximos de casi 15 dB para la frecuencia 3,9 GHz.

3.3.1.4 Diagrama de radiación

Si cargamos el archivo .pat en IE3D, podemos observar el diagrama de radiación.

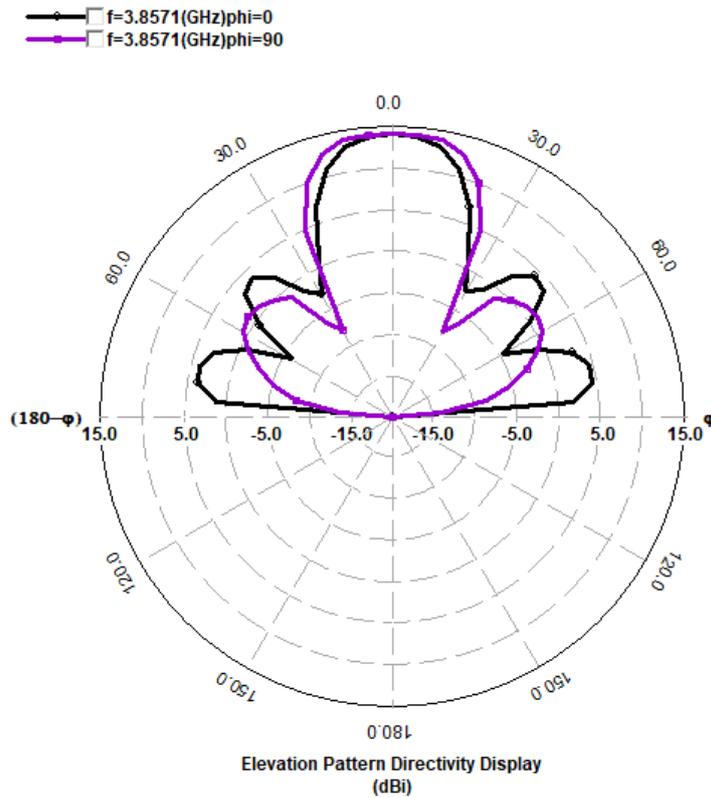


Ilustración 22: Diagrama de radiación de la estructura con un parche en IE3D

3.3.1.5 Eficiencia

Mediante la carga del archivo .pat en el software IE3D, se puede ver la eficiencia de antena y la eficiencia de radiación que se muestran a continuación.

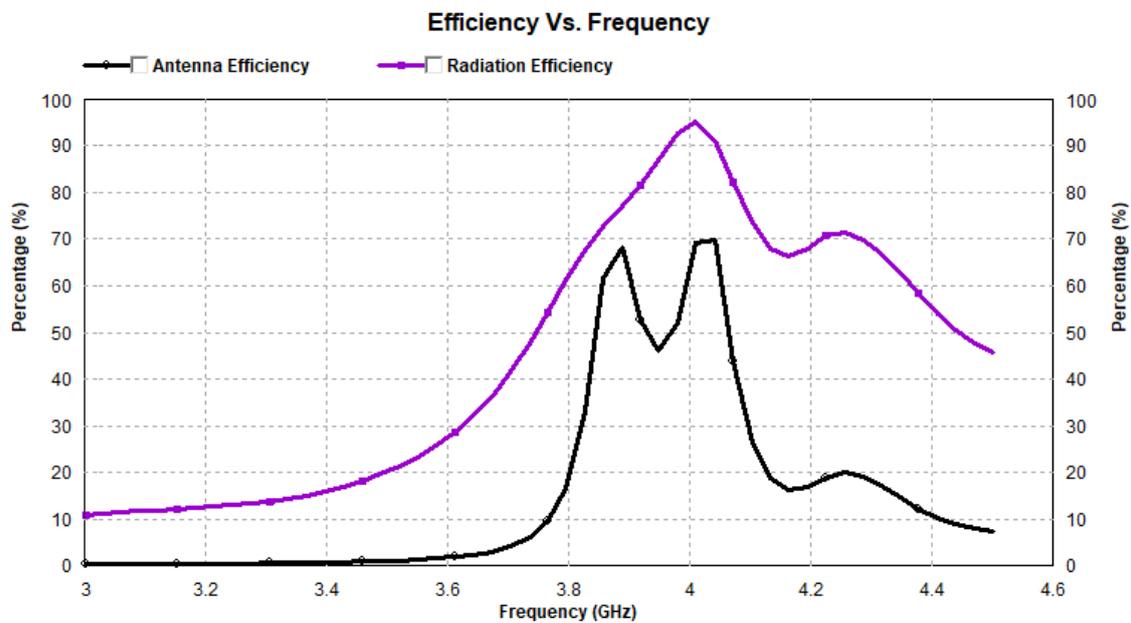


Ilustración 23: Eficiencia de antena y de radiación de estructura con un parche en IE3D

3.3.2 Caso 2: Estructura con dos parches

Este primer caso analizado ha sido tomado de referencia para las posteriores pruebas. Para ello, en los siguientes escenarios se ha decidido aumentar el número de parches para conseguir mejores prestaciones en las antenas microstrip.

Por tanto, a continuación, se detalla el caso usando dos parches con la estructura definida (con área 242mm x 237,6mm). Ambos parches operan en su modo fundamental TM_{10} y están alimentados de forma uniforme.

3.3.2.1 Estructura

Una vez que hemos realizado el diseño, podemos ver la estructura utilizando dos parches.

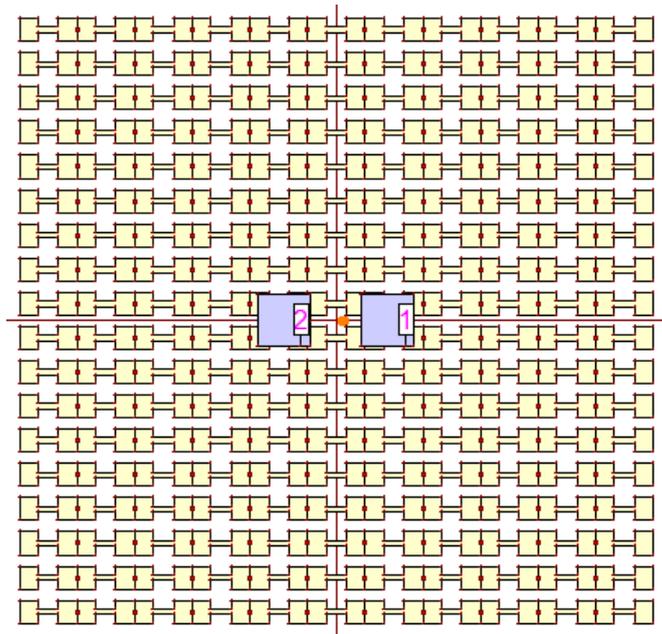


Ilustración 24: Estructura con dos parches en IE3D

3.3.2.2 Corriente

Si una vez realizada la simulación de la estructura detallada en el subapartado anterior cargamos el fichero ".cur" en IE3D, podemos ver la corriente que circula por la estructura diseñada para la frecuencia elegida (3,85GHz).

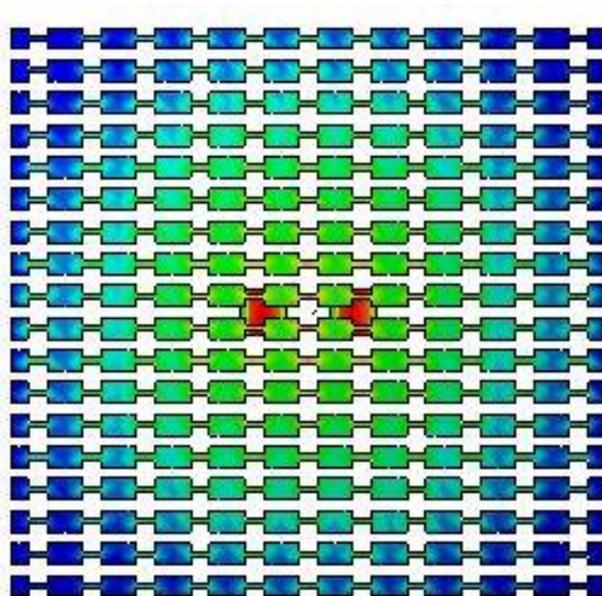


Ilustración 25: Corriente a 3,85 GHz de la estructura con dos parches en IE3D

3.3.2.3 Directividad

A través de la carga del archivo con extensión “.pat” en IE3D podemos observar la comparativa de directividad para cada una de las frecuencias simuladas.

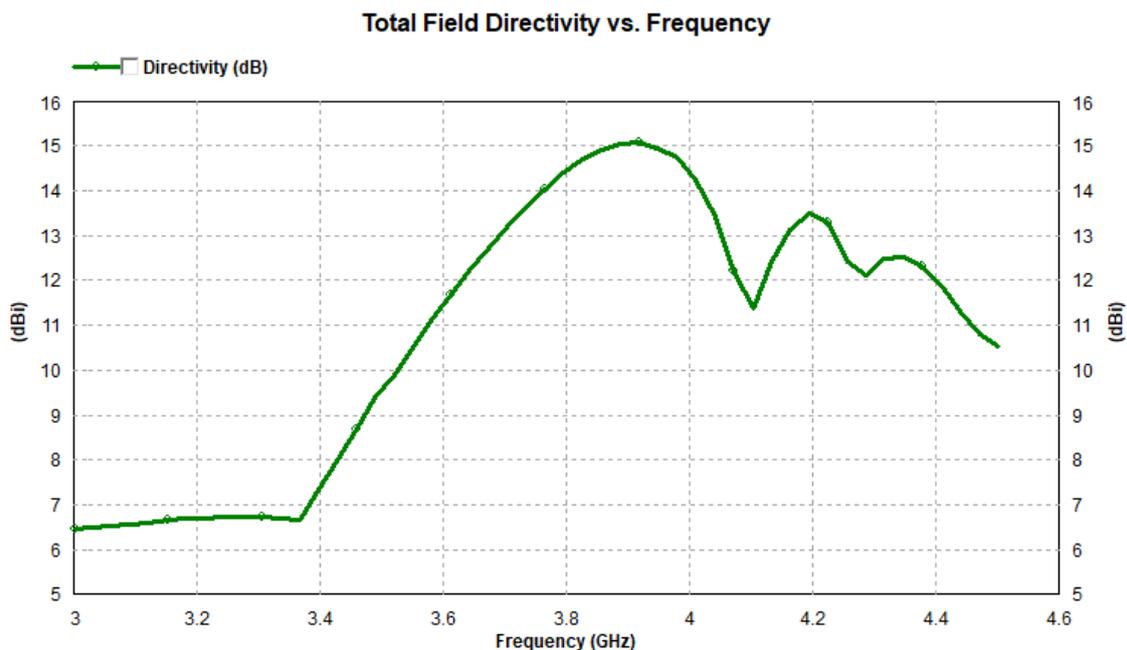


Ilustración 26: Directividad de la estructura con dos parches en IE3D

3.3.2.4 Diagrama de radiación

Si cargamos el archivo .pat en IE3D, podemos observar el diagrama de radiación.



Ilustración 27: Diagrama de radiación de la estructura con dos parches en IE3D

3.3.2.5 Eficiencia

Mediante la carga del archivo .pat en el software IE3D, se puede ver la eficiencia de antena y la eficiencia de radiación que se muestran a continuación.

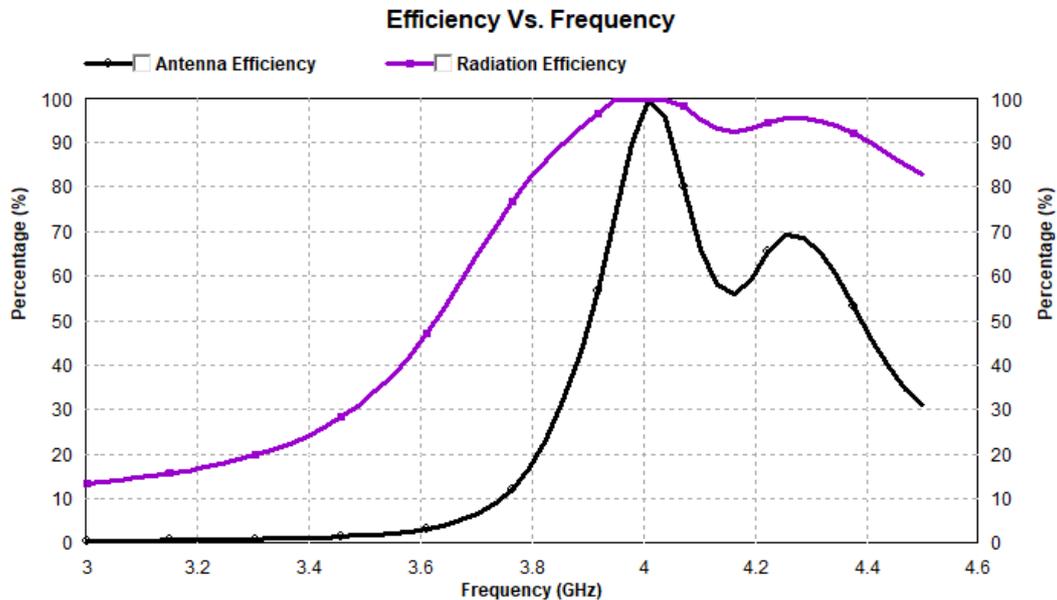


Ilustración 28: Eficiencia de antena y de radiación de estructura con dos parches en IE3D

3.3.3 Caso 3: Estructura con cuatro parches

A continuación, se detalla el caso usando cuatro parches con la estructura definida (con área 242mm x 237,6mm). Todos los parches operan en su modo fundamental TM_{10} y están alimentados de forma uniforme.

3.3.3.1 Estructura

Una vez que hemos realizado el diseño, podemos ver la estructura con IE3D utilizando cuatro parches.

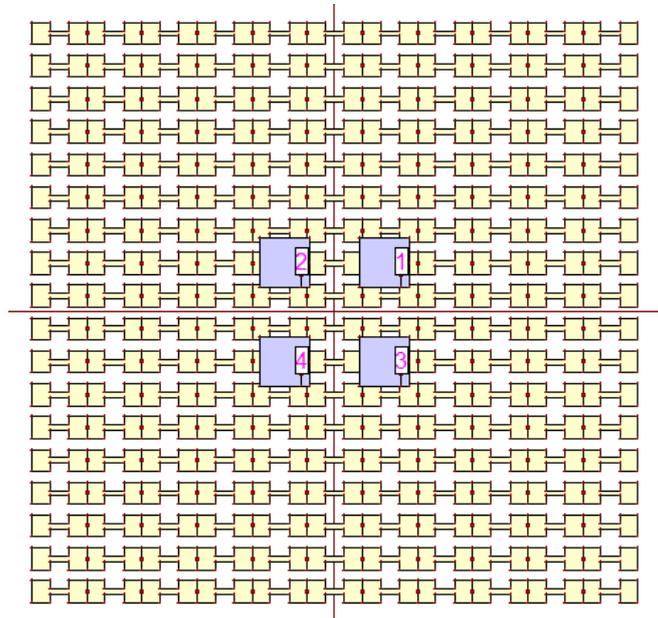


Ilustración 29: Estructura con cuatro parches en IE3D

3.3.3.2 Corriente

Si una vez realizada la simulación de la estructura detallada en el subapartado anterior cargamos el fichero ".cur" en IE3D, podemos ver la corriente que circula por la estructura diseñada para la frecuencia elegida (3,85GHz).

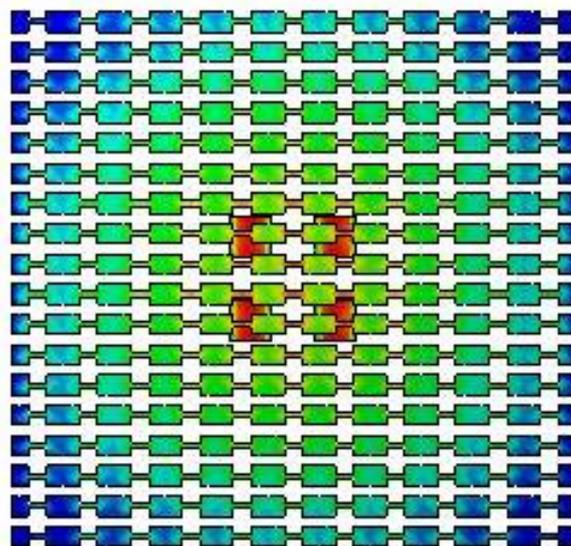


Ilustración 30: Corriente a 3,85 GHz de la estructura con cuatro parches en IE3D

3.3.3.3 Directividad

A través de la carga del archivo con extensión “.pat” en IE3D podemos observar la comparativa de directividad para cada una de las frecuencias simuladas.

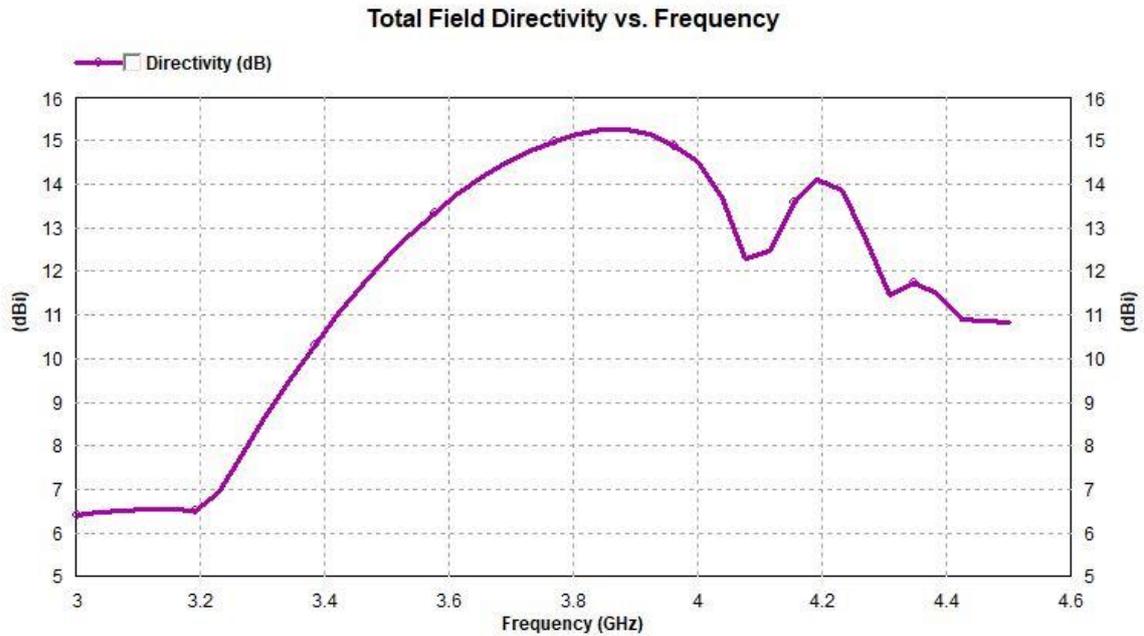


Ilustración 31: Directividad de la estructura con cuatro parches en IE3D

3.3.3.4 Diagrama de radiación

Si cargamos el archivo “.pat” en IE3D, podemos observar el diagrama de radiación.

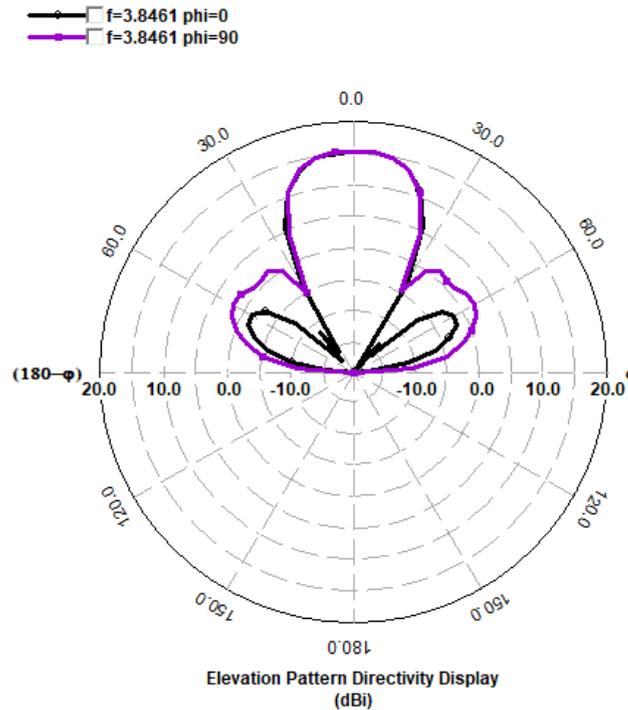


Ilustración 32: Diagrama de radiación de la estructura con cuatro parches en IE3D

3.3.3.5 Eficiencia

Mediante la carga del archivo “.pat” en el software IE3D, se puede ver la eficiencia de antena y la eficiencia de radiación que se muestran a continuación.

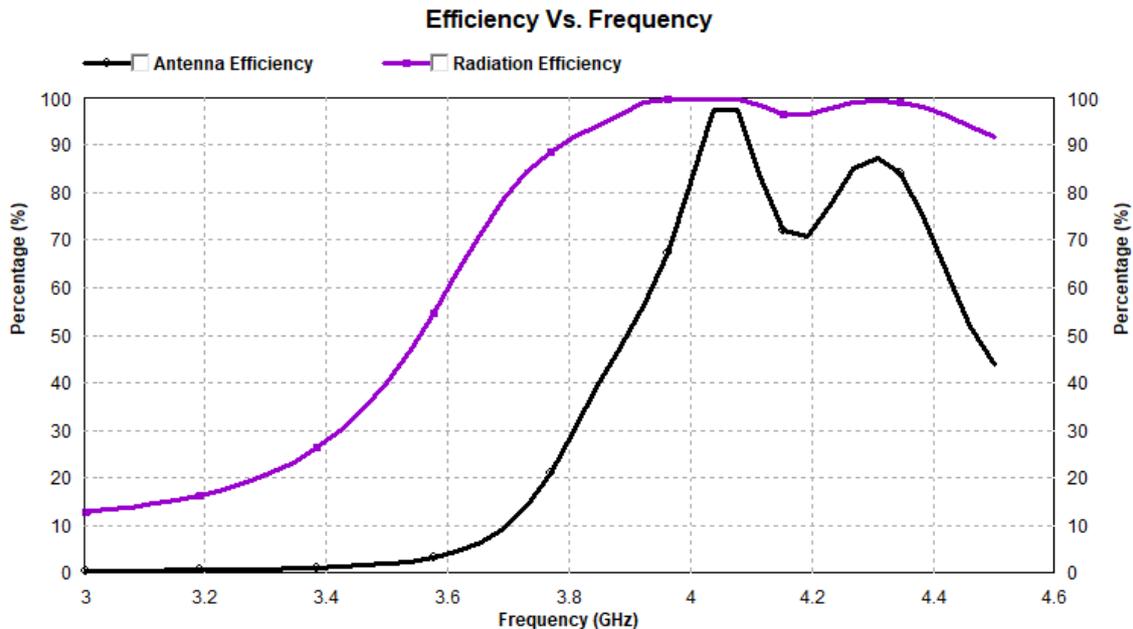


Ilustración 33: Eficiencia de antena y de radiación de estructura con cuatro parches en IE3D

3.3.4 Caso 4: Estructura con ocho parches

A continuación, se detalla el caso usando ocho parches con la estructura definida (con área 242mm x 237,6mm). Todos los parches operan en su modo fundamental TM_{10} y están alimentados de forma uniforme.

3.3.4.1 Estructura

Una vez que hemos realizado el diseño, podemos ver la estructura utilizando ocho parches.

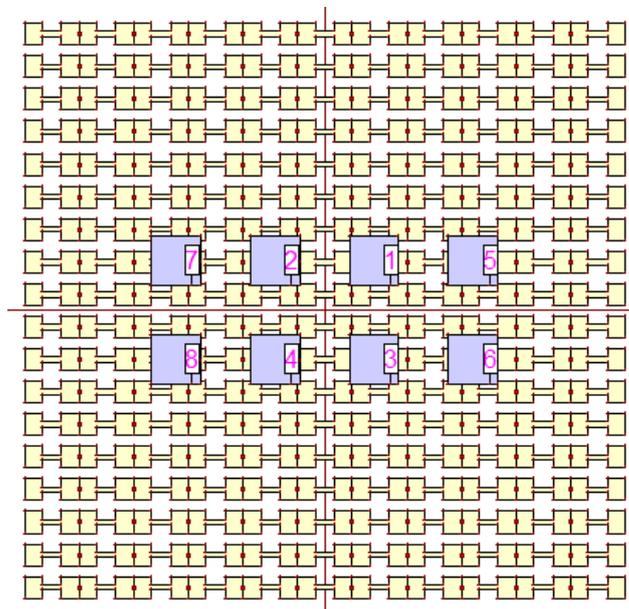


Ilustración 34: Estructura con ocho parches en IE3D

3.3.4.2 Corriente

Si una vez realizada la simulación de la estructura detallada en el subapartado anterior cargamos el fichero “.cur” en IE3D, podemos ver la corriente que circula por la estructura diseñada para la frecuencia elegida (3,85GHz).

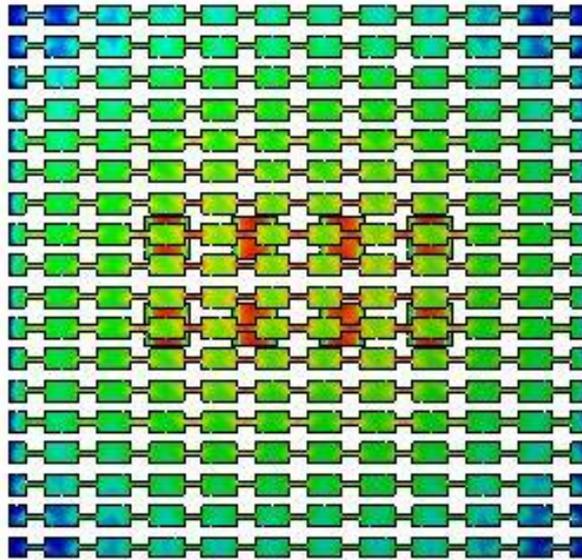


Ilustración 35: Corriente a 3,85 GHz de la estructura con ocho parches en IE3D

3.3.4.3 Directividad

A través de la carga del archivo con extensión “.pat” en IE3D podemos observar la comparativa de directividad para cada una de las frecuencias simuladas.

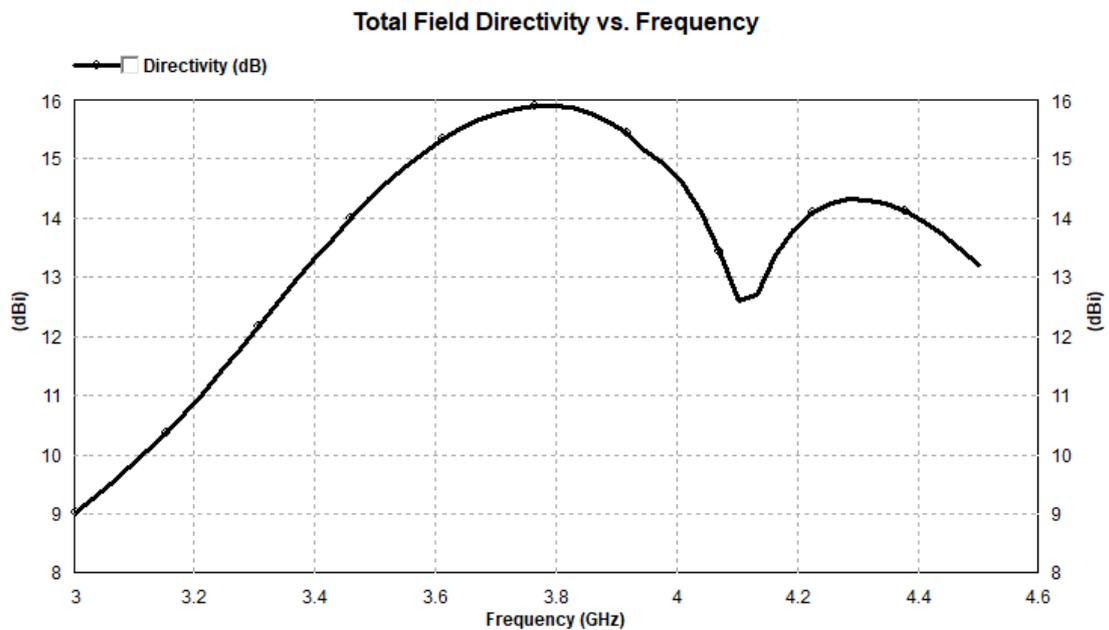


Ilustración 36: Directividad de la estructura con ocho parches en IE3D

3.3.4.4 Diagrama de radiación

Si cargamos el archivo “.pat” en IE3D, podemos observar el diagrama de radiación.

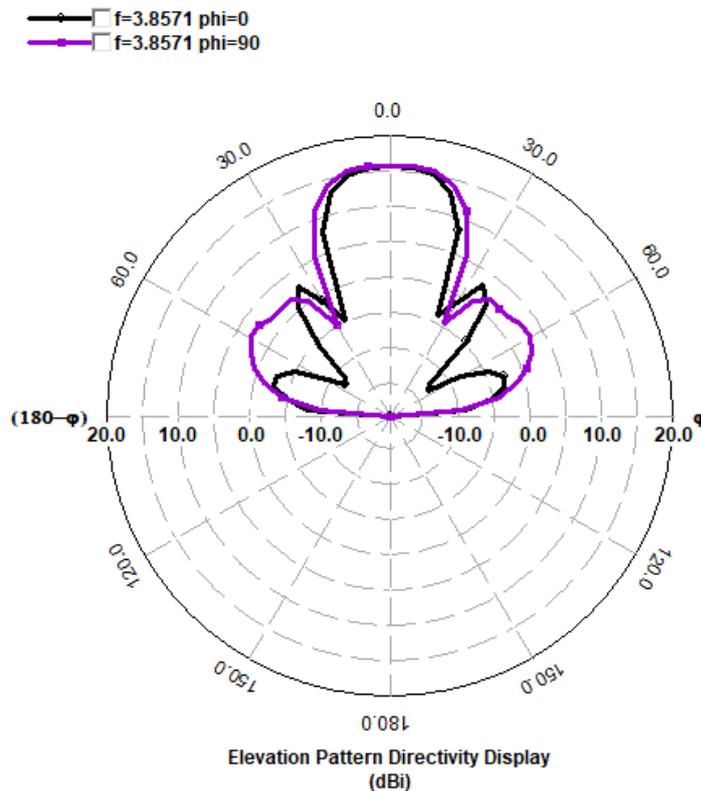


Ilustración 37: Diagrama de radiación de la estructura con ocho parches en IE3D.

3.3.4.5 Eficiencia

Mediante la carga del archivo “.pat” en el software IE3D, se puede ver la eficiencia de antena y la eficiencia de radiación que se muestran a continuación.

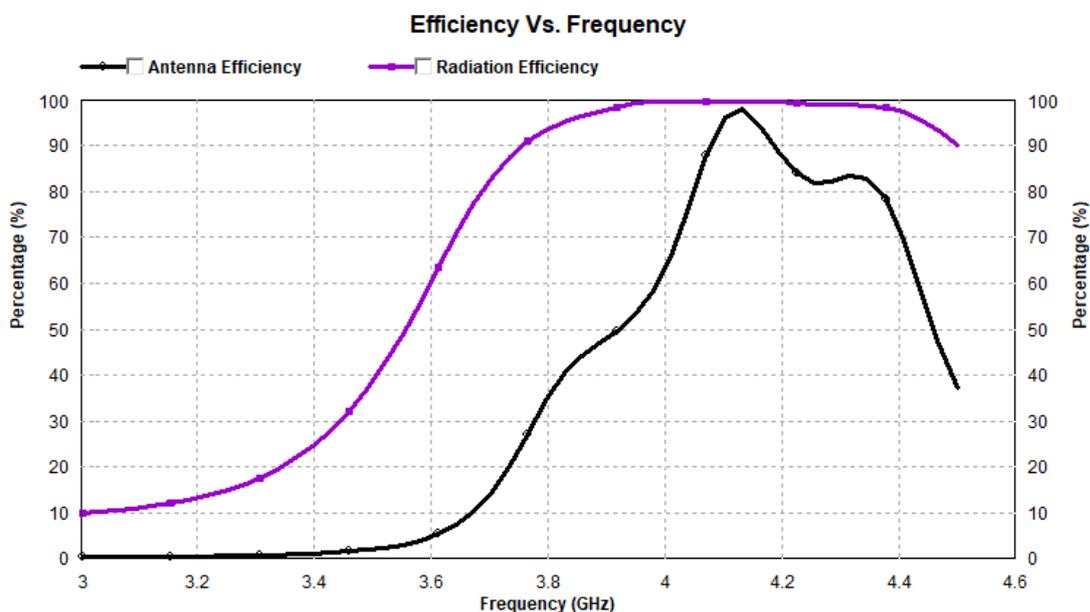


Ilustración 38: Eficiencia de antena y de radiación de estructura con ocho parches en IE3D

3.3.5 Caso 5: Estructura con dieciséis parches

A continuación, se detalla el caso usando dieciséis parches con la estructura definida (con área 242mm x 237,6mm). Todos los parches operan en su modo fundamental TM_{10} y están alimentados de forma uniforme.

3.3.5.1 Estructura

Una vez que hemos realizado el diseño, podemos ver la estructura utilizando dieciséis parches.

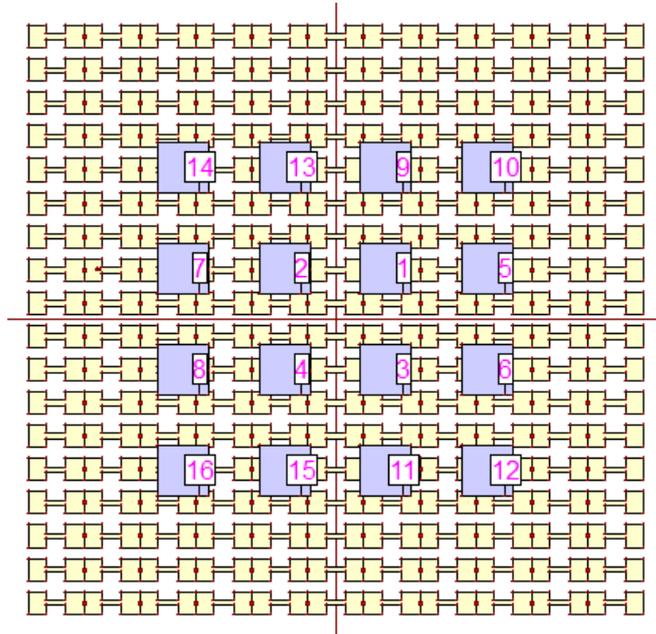


Ilustración 39: Estructura con dieciséis parches en IE3D

3.3.5.2 Corriente

Si una vez realizada la simulación de la estructura detallada en el subapartado anterior cargamos el fichero “.cur” en IE3D, podemos ver la corriente que circula por la estructura diseñada para la frecuencia elegida (3,85GHz).

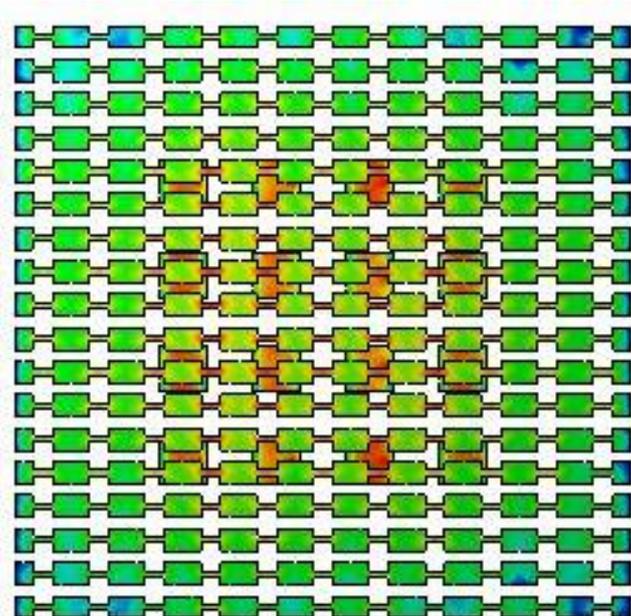


Ilustración 40: Corriente a 3,85 GHz de la estructura con dieciséis parches en IE3D

3.3.5.3 Directividad

A través de la carga del archivo con extensión “.pat” en IE3D podemos observar la comparativa de directividad para cada una de las frecuencias simuladas.

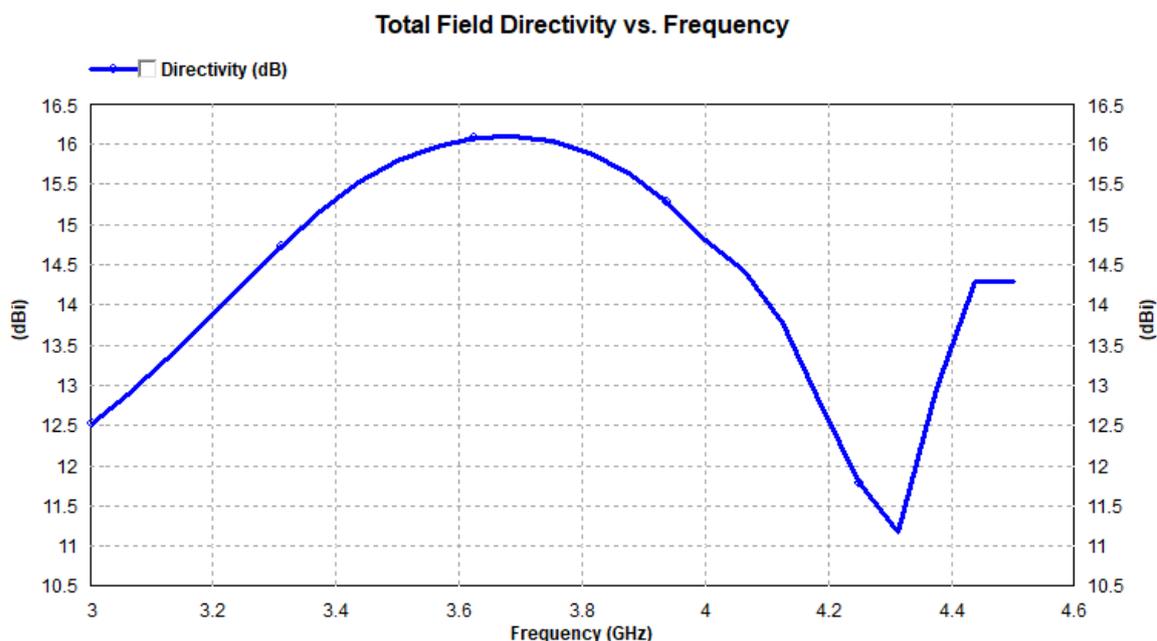


Ilustración 41: Directividad de la estructura con dieciséis parches en IE3D

3.3.5.4 Diagrama de radiación

Si cargamos el archivo “.pat” en IE3D, podemos observar el diagrama de radiación.

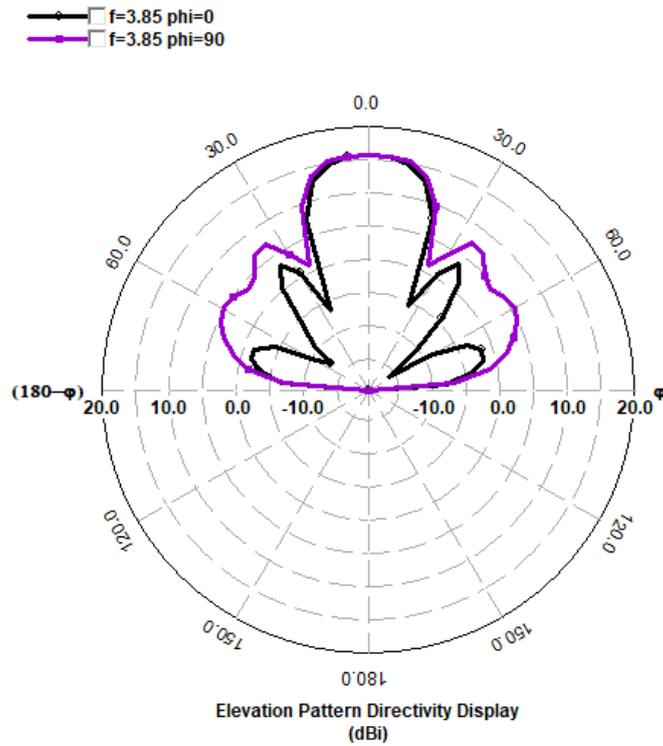


Ilustración 42: Diagrama de radiación de la estructura con dieciséis parches en IE3D
3.3.5.5 Eficiencia

Mediante la carga del archivo “.pat” en el software IE3D, se puede ver la eficiencia de antena y la eficiencia de radiación que se muestran a continuación.

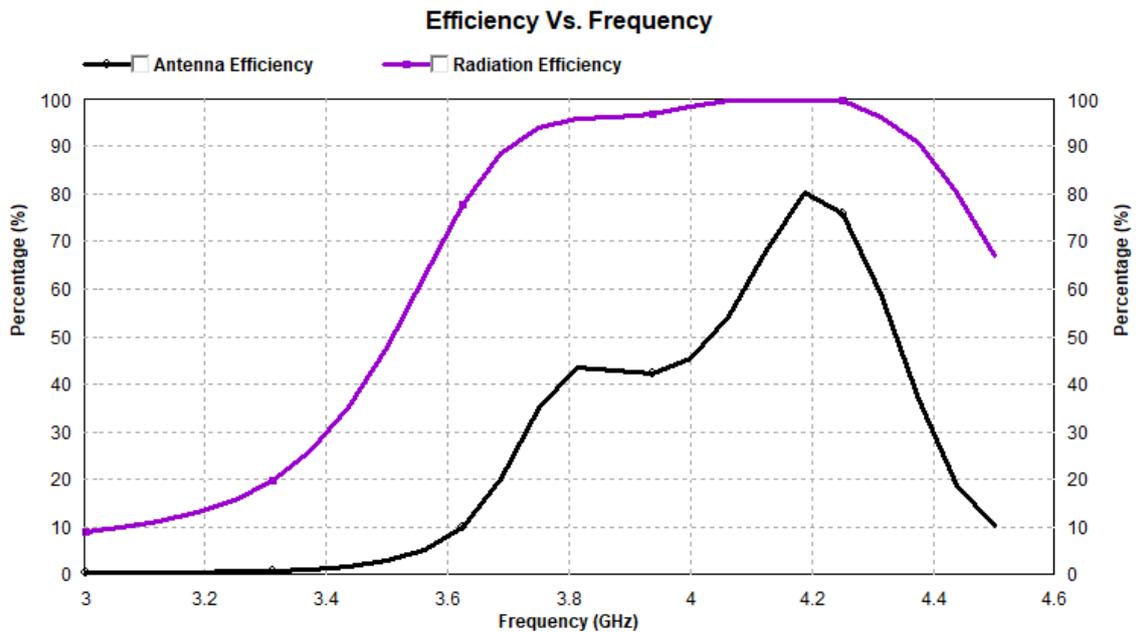


Ilustración 43: Eficiencia de antena y de radiación de estructura con dieciséis parches en IE3D

3.3.5 Caso 6: Estructura con treinta y dos parches

A continuación, se detalla el caso usando treinta y dos parches con la estructura definida (con área 242mm x 237,6mm). Todos los parches operan en su modo fundamental TM_{10} y están alimentados de forma uniforme.

3.3.5.1 Estructura

Una vez que hemos realizado el diseño, podemos ver la estructura utilizando treinta y dos parches.

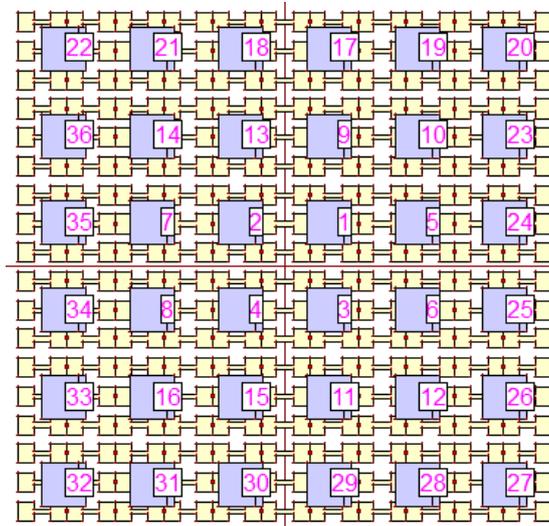


Ilustración 44: Estructura con treinta y dos parches en IE3D

3.3.5.2 Corriente

Si una vez realizada la simulación de la estructura detallada en el subapartado anterior cargamos el fichero ".cur" en IE3D, podemos ver la corriente que circula por la estructura diseñada para la frecuencia elegida (3,85GHz).

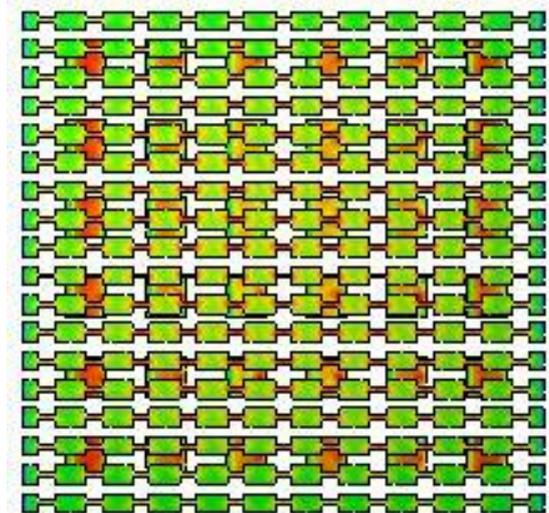


Ilustración 45: Corriente a 3,85 GHz de la estructura con treinta y dos parches en IE3D

3.3.5.3 Directividad

A través de la carga del archivo con extensión “.pat” en IE3D podemos observar la comparativa de directividad para cada una de las frecuencias simuladas.

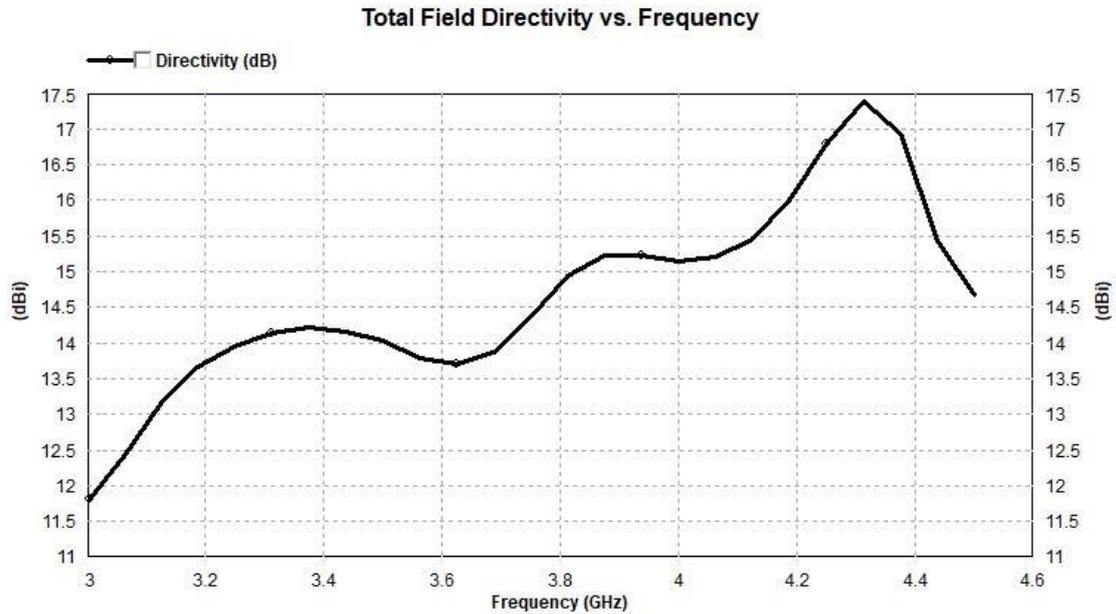


Ilustración 46: Directividad de la estructura con treinta y dos parches en IE3D

3.3.5.4 Diagrama de radiación

Si cargamos el archivo “.pat” en IE3D, podemos observar el diagrama de radiación.

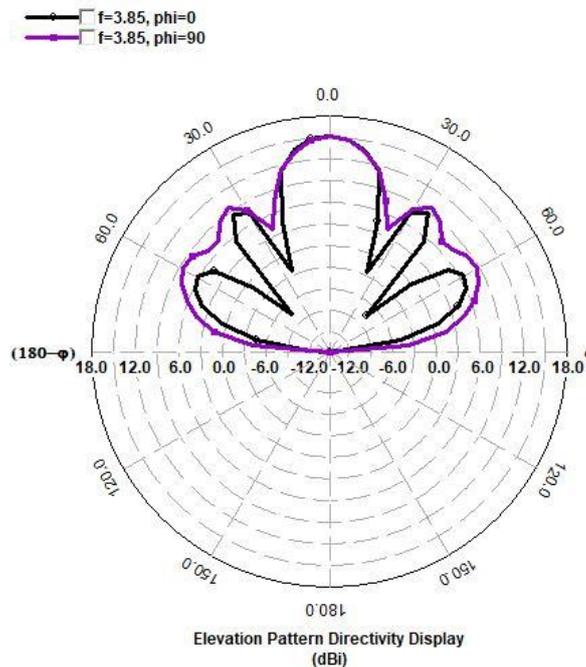


Ilustración 47: Diagrama de radiación de la estructura con treinta y dos parches en IE3D

3.3.5.5 Eficiencia

Mediante la carga del archivo “.pat” en el software IE3D, se puede ver la eficiencia de antena y la eficiencia de radiación que se muestran a continuación.

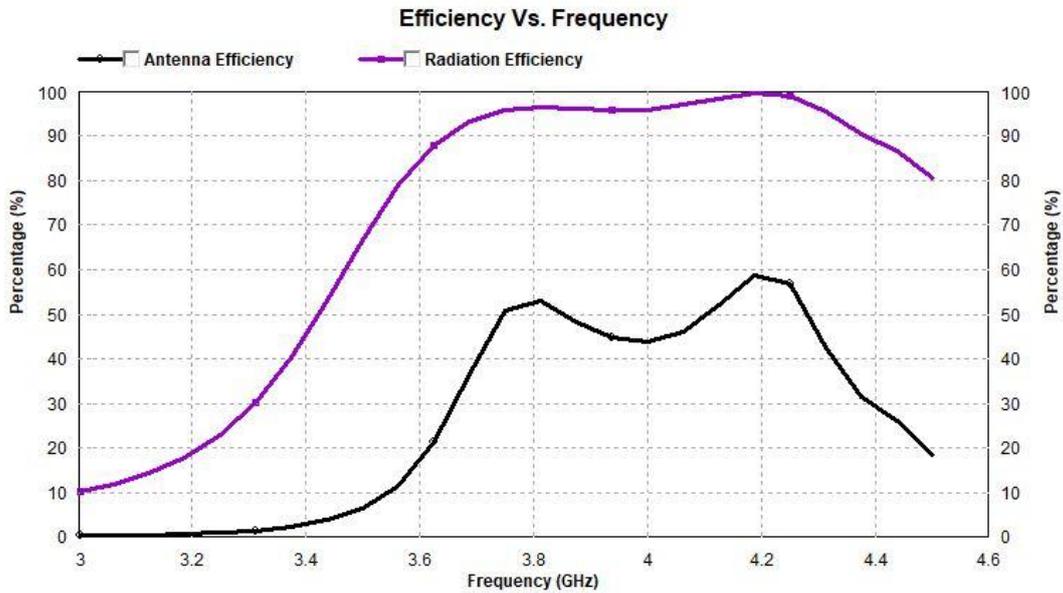
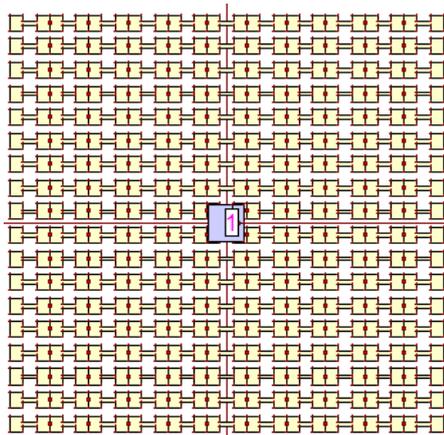


Ilustración 48: Eficiencia de antena y de radiación de estructura con treinta y dos parches en IE3D.

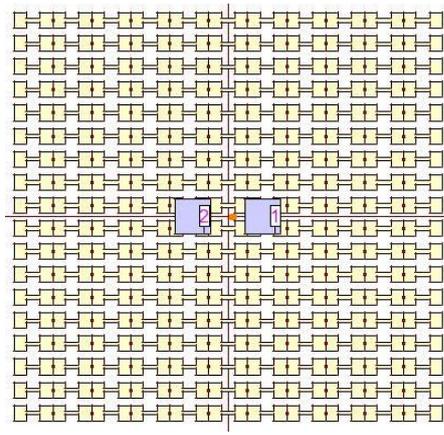
3.4 Comparativa de cada caso simulado

3.4.1 Estructuras

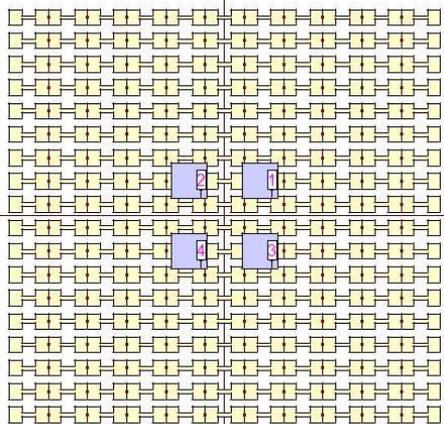
En la siguiente ilustración podemos observar la comparativa de las diferentes estructuras de los casos analizados utilizando el software IE3D.



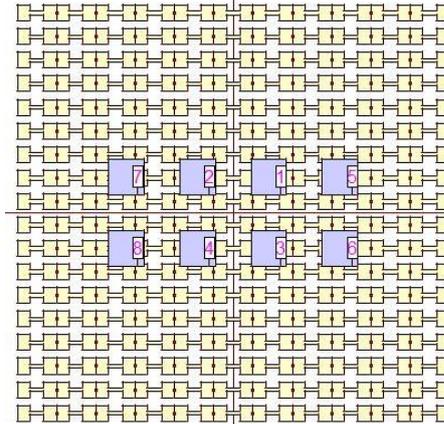
Estructura con un parche



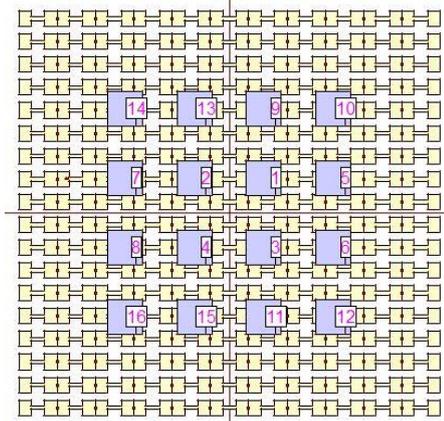
Estructura con dos parches



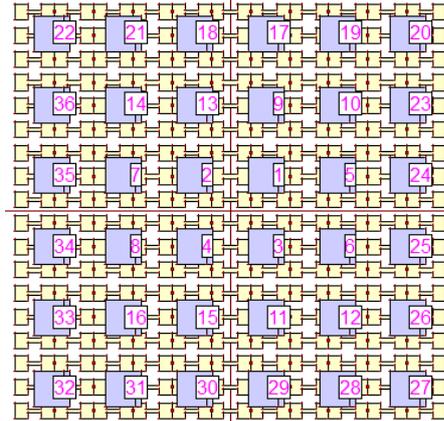
Estructura con cuatro parches



Estructura con ocho parches



Estructura con dieciséis parches

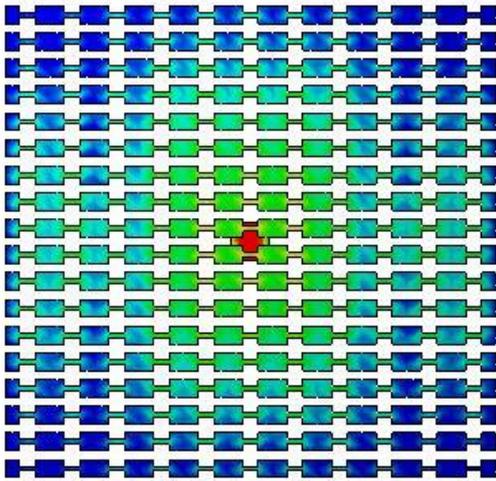


Estructura con treinta y dos parches

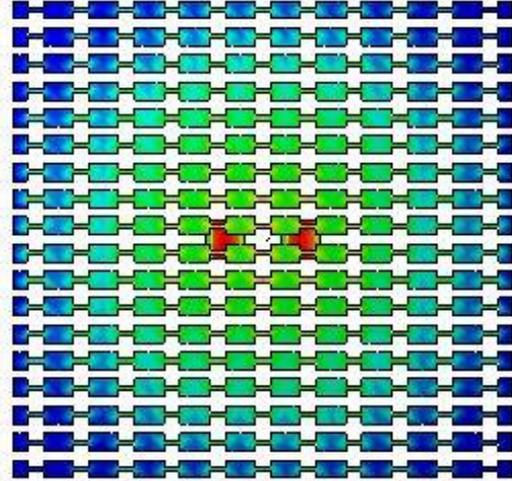
Ilustración 49: Comparación de estructuras de los casos estudiados

3.4.2 Corrientes

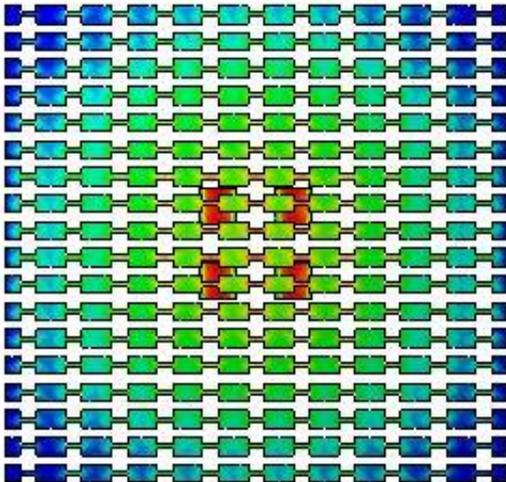
En la siguiente ilustración podemos observar la comparativa de las diferentes corrientes de los casos analizados utilizando el software IE3D.



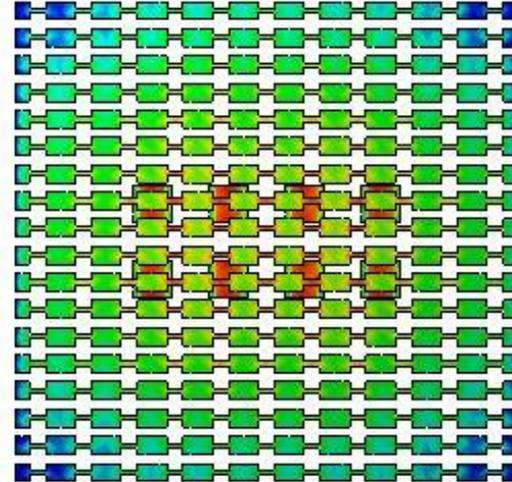
Corriente de la estructura con un parche



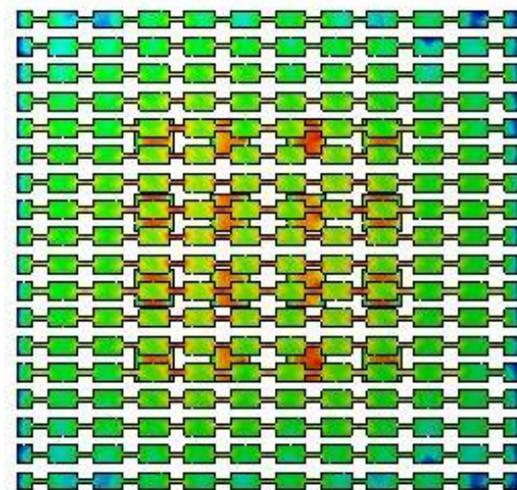
Corriente de la estructura con dos parches



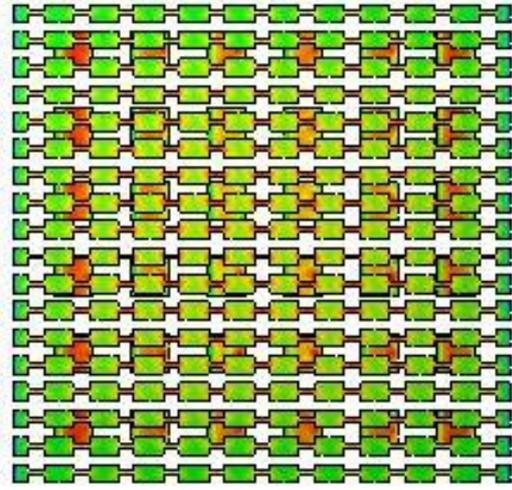
Corriente de la estructura con cuatro parches



Corriente de la estructura con ocho parches



Corriente de la estructura con dieciséis parches



Corriente de la estructura con treinta y dos parches

Ilustración 50: Comparativa de corrientes a la frecuencia de 3,85 GHz de los casos estudiados

Se observa (en la ilustración 50) como, a medida que se añaden más elementos, el superestrato está más iluminado.

3.4.3 Directividad

A continuación, podemos observar la comparativa de las directividades de los casos analizados utilizando el software IE3D.

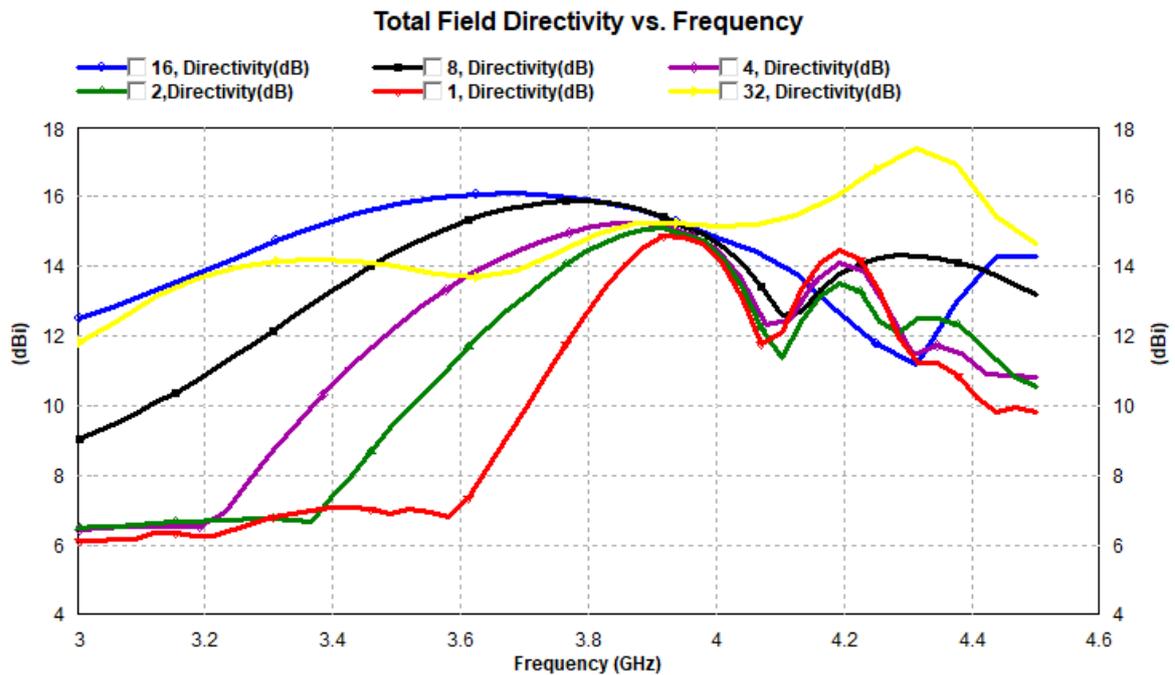


Ilustración 51: Comparativa de la directividad en los distintos casos con IE3D

Podemos observar en la ilustración 50 que, a medida que se añade más parches a estructura definida, aumenta considerablemente el ancho de banda de directividad hasta el caso del uso de 16 parches.

3.4.4 Diagramas de radiación

En la siguiente ilustración, podemos observar la comparativa de los diferentes diagramas de radiación de los casos analizados.

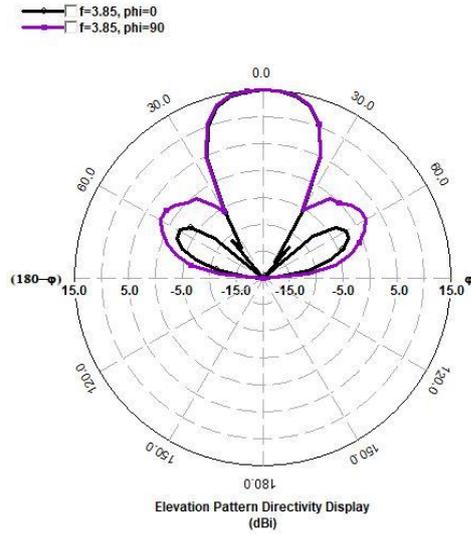
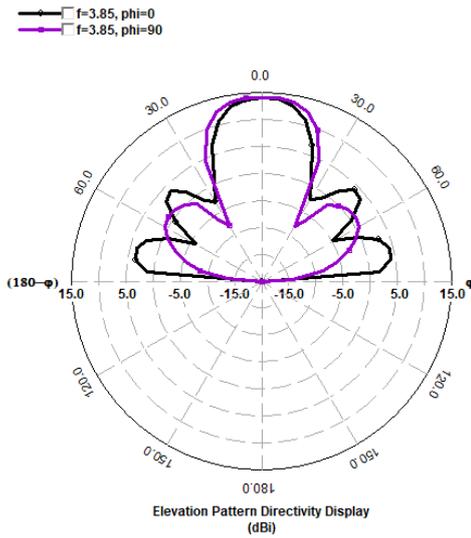


Diagrama de radiación con un parche

Diagrama de radiación con dos parches

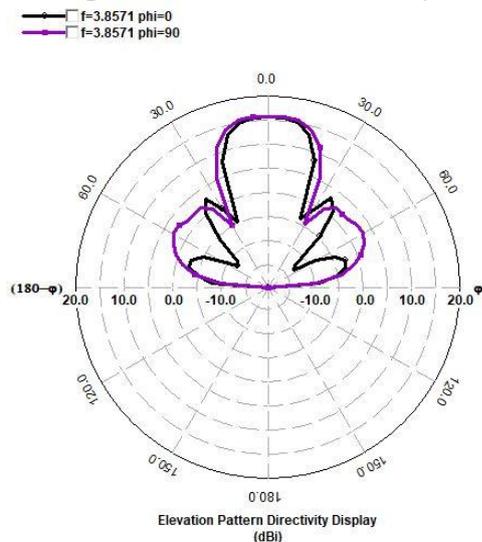
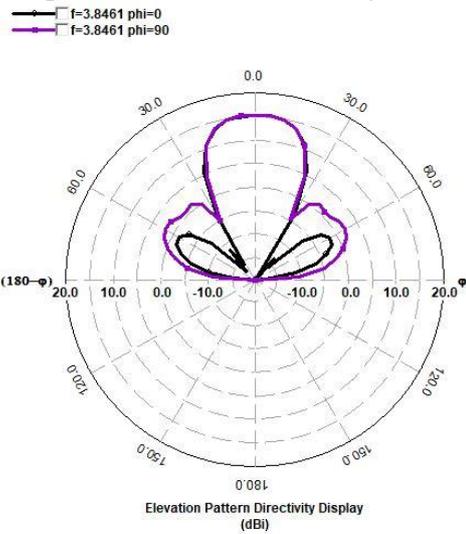


Diagrama de radiación con cuatro parches

Diagrama de radiación con ocho parches

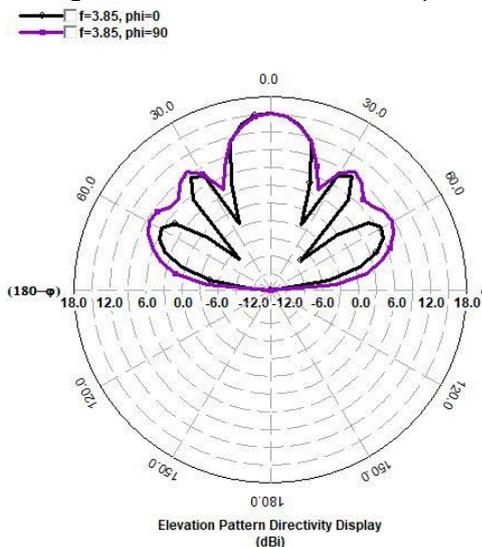
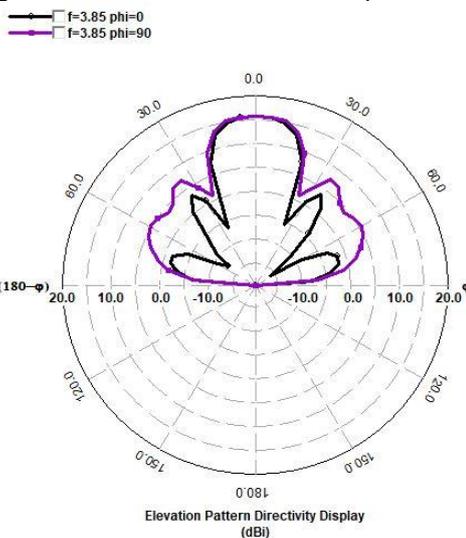


Diagrama de radiación con dieciséis parches

Diagrama de radiación con treinta y dos parches

Ilustración 52: Comparativa del diagrama de radiación de los casos estudiados

Extraemos como conclusión que, a medida que se aumenta el número de elementos parches a la estructura, el haz es cada vez más ancho. Por tanto, se puede decir que, aumentar el número de elementos mejora considerablemente el ancho de banda de directividad de la antena.

3.4.5 Eficiencia

En la siguiente tabla, podemos observar la comparativa de la eficiencia de antena y radiación de los casos estudiados a la frecuencia aproximada de 4 GHz.

	Eficiencia de antena	Eficiencia de radiación
Caso 1	70 %	95%
Caso 2	100%	100%
Caso 3	97%	100%
Caso 4	99%	100%
Caso 5	80%	100%
Caso 6	58%	100%

Tabla 3: Comparativa de la eficiencia de antena y de radiación de los casos estudiados

La eficiencia de antena aumenta a medida que se añaden elementos a la estructura. Sin embargo, podemos comprobar que, para el último caso (utilizando 32 parches), la eficiencia de la antena disminuye considerablemente.

3.5 Comparativa eliminando el superestrato

Como podemos ver en el subapartado anterior, tanto la eficiencia de la antena como la directividad y el ancho de banda, empeoran en el último caso (utilizando 32 parches). Es por ello, que ante esta problemática se ha decidido analizar los mismos casos simulados, pero eliminando el superestrato y observar los resultados obtenidos.

Por tanto, a continuación, se analiza la simulación de los casos anteriores eliminando el superestrato y se obtienen los siguientes resultados.

	CON SUPERESTRATO			SIN SUPERESTRATO		
	Eficiencia de antena	Eficiencia de radiación	Directividad (dB)	Eficiencia de antena	Eficiencia de radiación	Directividad
Caso 1	70 %	95%	15	79%	81%	7
Caso 2	100%	100%	15	52%	92%	9,6
Caso 3	97%	100%	15,2	58%	93%	11,8
Caso 4	99%	100%	16	58%	93%	15
Caso 5	80%	100%	16,2	80%	100%	18
Caso 6	58%	100%	15,25	58%	90%	21,25

Tabla 4: Comparativa de resultados de estructura con y sin superestrato

Podemos observar en la tabla 4, como la directividad que depende de su área, llega un punto en el no compensa aumentar el número de elementos, ya que esto no hará que aumente la directividad.

Por tanto, a partir del caso 5 (estructura con 16 parches), es conveniente no usar superestrato, ya que esto no hará que aumente la directividad. Por ello, para los dos últimos casos, es conveniente realizar las simulaciones sin superestrato (aumenta la directividad).

4. Conclusiones

Finalmente, para concluir haremos un breve resumen de las simulaciones realizadas, así como de las conclusiones tomadas.

En primer lugar, y como ya se ha comentado, se ha tomado como referencia la antena microstrip con la estructura del escenario 5 [1] y se han ido realizando diferentes pruebas para conseguir una mejora en las prestaciones de la antena. De las todas las pruebas realizadas, las más relevantes han sido mostradas en el apartado anterior, y han consistido en aumentar el número de elementos de la estructura.

Por ello, se muestra en cada caso los resultados obtenidos en cuanto a los parámetros que intervienen en el diseño real de una antena, entre ellos directividad, corrientes, eficiencia y diagramas de radiación.

Una vez que han sido simulados todos los casos, se llegan a una serie de conclusiones relevantes.

En cuanto a la directividad, podemos concluir que, a medida que aumenta el número de parches, aumenta el ancho de banda de la antena, así como la directividad del sistema (hasta el caso de 16 elementos).

El hecho de aumentar el ancho de banda, así como la directividad hasta el caso de 16 en vez de hasta el de 32, nos lleva a analizar el diseño eliminando el superestrato. Así, podemos concluir que como la directividad depende del área, existe un punto en el que no compensa aumentar el número de elementos en la estructura del superestrato. Esto puede observarse en la siguiente ilustración.

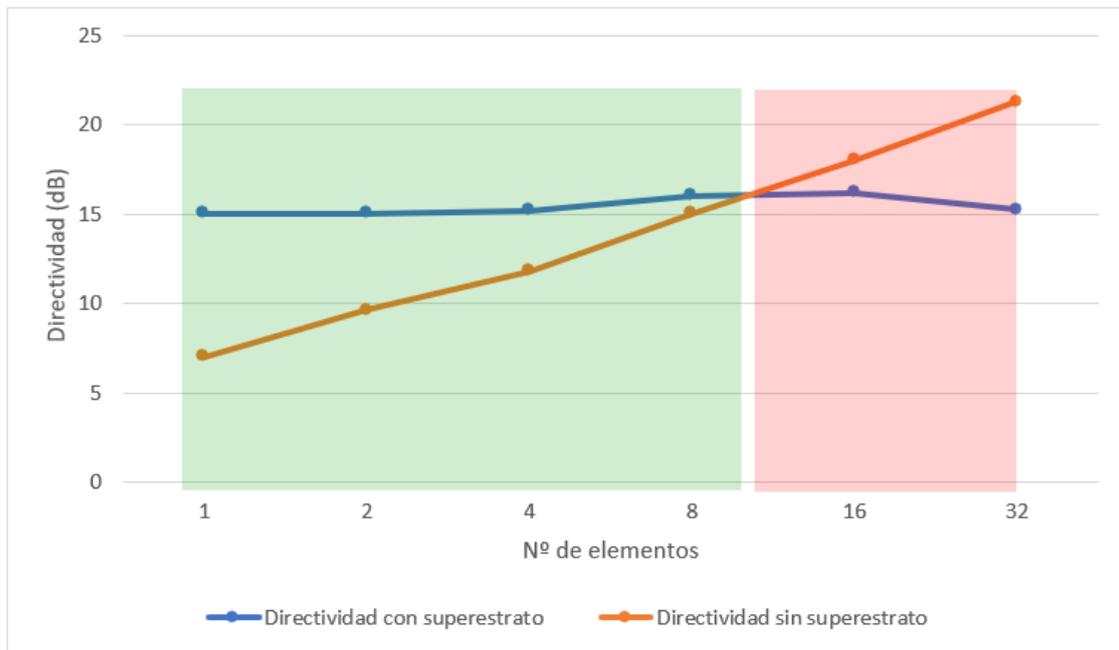


Ilustración 53: Representación directividad vs nº de elementos

Así, podemos observar en la ilustración 53, como en la zona verde (antena con superestrato), a medida que se aumenta el número de elementos, aumenta la directividad. Sin embargo, llega un punto (zona roja) que, aunque aumente el número de elementos de la estructura, la directividad no aumenta, sino que se mantiene o disminuye.

Sin embargo, en el caso de la antena sin superestrato, podemos observar como la directividad es menor que en caso anterior en la zona verde. Sin embargo, llega un punto (zona roja) en la que la directividad es mayor que en el caso de la antena con superestrato.

El hecho de utilizar más elementos parche con superestrato es ventajoso con respecto al caso de un array cuando el área de los parches no es excesiva pues permite mejorar el ancho de banda de directividad.

5. Bibliografía

- [1] Víctor Carrillo, “Tècniques d’alta directivitat en antenes microstrip amb superstrat”, 2019, Universitat Oberta de Catalunya.
- [2] G.A. Deschamps. “Microstrip microwave antennas. Third USAF symposium on antenas”, 1953.
- [3] R. E. Munson. “Conformed microstrip antennas microstrip phased arrays. IEEE Trans. On Antennas and Propagation”, vol.22, pág:74-78, 1974.
- [4] Rubén de Salas Corregidor. “Diseño de una antena compacta implantable en bandas ISM y MICS”, 2010, Universidad Carlos III de Madrid.
- [5] R. B. Waterhouse. “Microstrip patch antenas”. A designer’s guide. Kluwer Academic Publishers Boston, 2003.
- [6] C.Martin-Pascual, E. Rajo-Iglesias and V. González-Posadas, Patches: The most versatile radiator, presentado en IASTED Int. Conf. Advanced in Communications, 2001.
- [7] R. Garg, P. Barthia, I. Bahl and A. Ittipoboon. “Microstrip antenna design handbook”. Artech house publishers, 2001.
- [8] Hang Zhou, Zhibin Pei, Shaobo Qu, Song Zhang, Jiafu Wang, Zhangshan Duan, Hua Ma, and Zhuo Xu. “A Novel High-Directivity Microstrip Patch Antenna Based on Zero-Index Metamaterial” in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2009.
- [9] Mohammad S. Sharawi. “Use of low-cost patch antennas in modern wireless technology”, in IEEE Potentials. 2006.
- [10] Jaume Anguera, Carles Puente, Carmen Borja, Raquel Montero, y Jordi Soler. “Small and high-directivity bow-tie patch antenna based on the sierpinski fractal”, MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 31, No. 3, November 2001.
- [11] Jaume Anguera, Aurora Andújar, Sergio Benavente, Jeevani Jayasinghe, Sungtek Kahng. “High-directivity microstrip antenna with Mandelbrot fractal boundary”. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2017.
- [12] Jaume Anguera, Gemma Montesinos, Carles Puente, Carmen Borja y Jordi Soler. “An undersampled highdirectivity microstrip patch array with a reduced number of radiating elements inspired on the sierpinski fractal” microwave and optical technology letters, Vol. 37, No. 2, April 20 2003.
- [13] Jeevani JAYASINGHE, Jaume ANGUERA, Disala UDUWAWALA. “Genetic Algorithm Optimization of a High-Directivity Microstrip Patch Antenna Having a Rectangular Profil Radioengineering, Vol. 22, No. 3, September 2013.

[14] Wonkyu Choi, Yong Heui Cho, Cheol-Sik Pyo, y Jae-Ick Choi. "A High-Gain Microstrip Patch Array Antenna Using a Superstrate Layer" ETRI Journal, 2003.