



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“MODELADO DE LA CORRECCIÓN DEL PATRÓN DE
RADIACIÓN DE UNA ANTENA TIPO PARCHE MEDIANTE LA
MODIFICACIÓN DE PARÁMETROS”

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO/A EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

ALEXIS VICENTE CHIQUI ÁVILA

XAVIER ENRIQUE TANDAZO TINOCO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias primero a Dios por permitirme convertirme en un profesional, porque en los momentos difíciles y donde todo parecía perdido siempre me dio fuerzas para seguir mi carrera Universitaria.

En segundo lugar mi agradecimiento a mis padres que fueron mi apoyo principal, sin ellos no habría podido alcanzar este logro.

Finalmente agradezco a mis compañeros, amigos y profesores que fueron un elemento fundamental en mi vida académica.

Alexis Vicente Chiqui Ávila

En primer lugar mis infinitos agradecimientos a Dios, por haberme dado fuerza y valor para no decaer frente a las adversidades que se presentaron durante mi carrera universitaria como Ingeniero Electrónica y Telecomunicaciones.

Agradezco la confianza y apoyo brindado por mis padres, Carlos Tandazo y Beatriz Tinoco, que gracias a sus sabios consejos me permitieron salir adelante.

A mis amigos y profesores que brindaron su apoyo y conocimiento con lo cual permitieron culminar esta gran etapa de mi vida.

Xavier Enrique Tandazo Tinoco

DEDICATORIA

Dedico de manera especial a mi padre Ángel Chiqui pues él fue mi principal apoyo e inspiración para que haya dado cada escalón que permitió construirme como profesional, él es mi eterno maestro y mi verdadero amigo. A mi madre que siempre mostró preocupación e interés en mi vida académica, quien siempre comprendió el duro camino que fue para mí el culminar la carrera. A mis hermanos que a pesar de las diferencias me acompañaron siempre y son parte de mis logros.

Alexis Vicente Chiqui Ávila

El presente proyecto va dedicado a mi padre y madre, Carlos Tandazo y Beatriz Tinoco, que hicieron posible que este sueño de haga realidad, ya que ellos fueron fundamento importante en cada paso de mi carrera universitaria. También dedico este proyecto a mi hermano, mi tía y mi primo que ayudaron a formarme como persona. A todos ellos les dedico cada minuto de esfuerzo y empeño que puse a lo largo de este proyecto.

Xavier Enrique Tandazo Tinoco

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....
Msc. Ronald Ponguillo Intriago

PROFESOR EVALUADOR

.....
Msc. Vladimir Sánchez Padilla

PROFESOR COLABORADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

.....
Alexis Vicente Chiqui Ávila

.....
Xavier Enrique Tandazo Tinoco

RESUMEN

La presente investigación de proyecto integrador tiene como objetivo fundamental implementar un diseño de antena microstrip, que pueda operar en las bandas milimétricas (30-300 GHz) y su patrón de radiación se bien directivo y con alta ganancia, para un posible uso en aplicaciones como la banda móvil 5G y aplicaciones médicas de escaneo en tres dimensiones. La propuesta del proyecto surgió a raíz del gran auge de redes inalámbricas que se vive actualmente y los múltiples problemas de interferencia que se suelen presentar, por tal razón optamos por proponer este diseño de antena que brinde un patrón de radiación que evite estos problemas y no sólo eso, que nos permita trabajar en una banda de frecuencias que aún no están siendo totalmente utilizadas.

El diseño de la antena es basado en una antena microstrip de ranura impresa o también conocida debido a su tipo de alimentación como antena parche de ranura acoplada por apertura, en la cual hacemos uso de dos tipos de sustratos (Ro 5880 y Ro 3006), parches circulares y ranura en forma de cruz, permitiéndonos alcanzar una antena con patrón de radiación muy directivo con una ganancia de 10.6 dB y su frecuencia de operación comprendía aproximadamente desde los 28-32 GHz. A esta antena propuesta modificamos sus parámetros con el fin de obtener mejores en cuanto a directividad y ganancia, sin tratar de perder de vista la frecuencia de operación. Realizamos varias pruebas que nos permitan mejorar el patrón de radiación, sin agrandar las dimensiones de la antena, experimentamos con los diodos pin colocados sobre los elementos parásitos para tratar de conseguir una antena cuyo patrón de radiación se configurable, para cual desistimos su uso debido a que nos varía mucho la frecuencia de operación y disminuía la ganancia. Después de varios intentos de prueba y error llegamos a la conclusión que lo mejor era usar arreglos de antenas, para el cual como resultado final obtuvimos un arreglo lineal de antenas formado por dos elementos. Mejorando un poco la ganancia y la directividad respecto a la antena un solo elemento, en cuanto a la frecuencia de operación esta antena operaba en dos bandas de frecuencias cerca de los 25 GHz y 31 GHz. Para el respectivo diseño de las antenas usamos el software computacional HFSS y nos apoyamos para ciertas pruebas de arreglos lineales con la herramienta Matlab.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
CAPÍTULO 1	1
1. ESTUDIO DEL PROBLEMA	1
1.1 Antecedente	1
1.2 Justificación	1
1.3 Alcance del proyecto	3
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivos generales	3
1.4.2 Objetivos específicos.....	3
1.5 Resultados Esperados.....	3
CAPÍTULO 2	4
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Parámetros Fundamentales de una Antena	4
2.1.1 Ganancia	4
2.1.2 Directividad.....	5
2.1.3 Patrón de Radiación	5
2.1.4 Intensidad de Radiación	6
2.1.5 Ancho del Haz	6
2.1.6 Ancho de Banda	6
2.2 Tipos de Antena	7
2.2.1 Antenas Microstrip	7
2.2.2 Tipos de Antena Microstrip	7

2.2.3	Antenas Microstrip de Ranura Impresa	8
2.2.4	Polarización Circular	8
2.3	Arreglos de antenas.....	9
2.3.1	Red de Alimentación de un arreglo.....	10
2.4	Diodos PIN RF.....	10
2.4.1	Funcionamiento del Diodo	11
2.5	Aplicaciones en las bandas milimétricas	12
2.5.1	Radars en bandas milimétricas.....	12
2.5.2	Bandas milimétricas en 5G.....	13
CAPÍTULO 3.....		14
3. RESULTADOS DE SIMULACIONES Y DISEÑOS DESDE LA ANTENA BASE HASTA LA ANTENA FINAL.		14
3.1	Diseño de una antena microcinta con parche rectangular a 30Ghz de frecuencia de operación.....	14
3.2	Diseño de una antena microcinta con parche circular a 30Ghz de frecuencia de operación	17
3.3	Comparación entre parches rectangulares y circulares.....	18
3.4	Aumentando la ganancia e implementación de polarización circular	18
3.5	Adición de elementos parásitos.....	21
3.6	Manipulación del haz principal.....	24
3.7	Arreglo lineal de antenas	25
3.8	Resultado final.....	31
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		35
BIBLIOGRAFÍA		37
ANEXOS		39
Anexo A		39
Anexo B		40

CAPÍTULO 1

1. ESTUDIO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedente

Es inevitable notar que ha existido una tendencia hacia la masificación de comunicaciones inalámbricas, según un análisis realizado por CISCO [1] las redes inalámbricas han experimentado una importante transformación en los últimos años. A este análisis realizado por CISCO lo podemos asociar con otro estudio realizado por el organismo especializado en Telecomunicaciones ITU [2], recalca un pronóstico de tráfico en redes celulares y redes WiFi; Deja en claro que en el 2016, 1 de cada 7 personas tiene acceso a Internet mediante teléfonos inteligentes, aproximadamente cerca 1 billón de personas y se tiene previsto que para el 2017 habrá más de 1.4 billones de personas. Con esto podemos notar que la demanda de redes inalámbricas sigue en aumento y por eso las operadoras buscan perfeccionar las redes para obtener una capacidad más grande y mejorar la calidad del servicio, debido a eso, los avances tecnológicos han mantenido a las antenas en una constante evolución.

En nuestro país de acuerdo con las cifras brindadas por el Ministerio de Telecomunicaciones y de la sociedad de la Información [3], en el año 2016 el 55,63% de las personas usan internet y los abonados que cuentan con servicio de internet fijo son 1.613.358 y los que cuenta con servicio de internet móvil son 7.774.484, al igual que las tendencias mundiales se espera que la demanda en nuestro país siga en aumento. A estas cifras las podemos complementar con la reciente informe publicado por el "El Universo" que habla de un incremento en el servicio de internet fijo, llegando a un 36% de los hogares en el Ecuador [4].

1.2 Justificación

Debido a la demanda creciente de las redes inalámbricas y el aumento exponencial de abonados que requieran servicios de comunicación inalámbrica, ha provocado que las operadoras busquen mejorar sus servicios inalámbricos, ofreciendo redes de mayor alcance, capacidad y calidad (Seguridad y Estabilidad). A esto se le suman desafíos comunes en la redes inalámbricas,

también problemas de interferencia con otros sistemas inalámbricos como RFID [5] y sistemas de cámaras de seguridad inalámbricas [6].

Como alternativa de solución frente al crecimiento mundial de redes inalámbricas, que por ende conllevarían demandas de mayor tasa de transmisión y acceso de datos, por tal razón se están realizando investigaciones sobre nuevas tecnologías inalámbricas en las bandas milimétricas (30 a 300 GHz) [7] que buscan cubrir la demanda que sigue en crecimiento. Se sabe que en toda comunicación las antenas juegan un papel importante, es por eso que también se encuentran en constante evolución, específicamente se está tratando de diseñar antenas que brinden un mayor alcance, cobertura y directividad.

Para ello se realizan múltiples pruebas y simulaciones sobre los patrones de radiación de las antenas que se están diseñando, para asegurarse que cumpla con los requisitos que ayuden a brindar un mejor servicio inalámbrico.

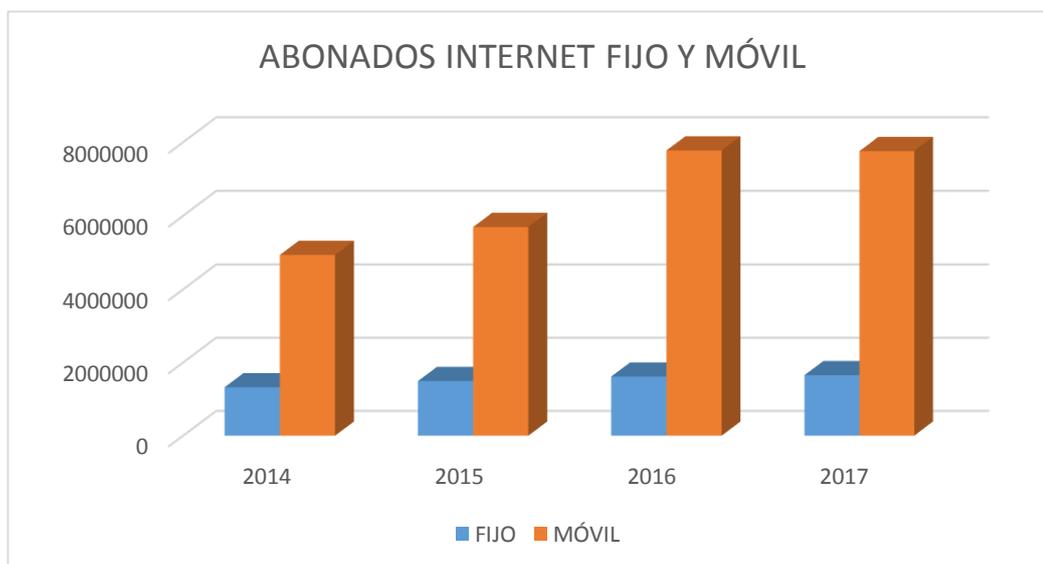


Figura 1.1: Abonados de Internet en el Ecuador

1.3 Alcance del proyecto

Debido a que el proyecto es de naturaleza teórica, como primer punto debemos establecer los fundamentos teóricos de las antenas de microcinta y el tipo de arreglo de antenas más adecuado a utilizarse, para que de esta manera se logre mejorar el alcance y cobertura de la red inalámbrica.

Para ello con la ayuda de softwares de simulación, analizaremos los patrones de radiación (Directividad, Ancho del Haz, etc). Por limitaciones del software de simulación no se llegue a visualizar los datos deseados para establecer de una manera concreta una mejor solución.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos generales

- Diseñar una antena microstrip de ranura acoplada (Antena de ranura impresa) cuyo patrón de radiación sea más directivo que las antenas comunes de este mismo tipo.
- Diseñar un arreglo de antenas parche de ranura acoplada que corrija el patrón de radiación haciéndolo más directivo y de mayor ganancia

1.4.2 Objetivos específicos

- Análisis y estudio de características de la antena parche.
- Implementación de elementos radiantes en la antena, para observar su efecto en los distintos patrones de radiación.

1.5 Resultados Esperados

Los resultados que esperamos obtener con este proyecto son:

- Obtener un diseño de arreglo de antenas lineal, basado en antenas microstrip de ranura acoplada.
- Graficar la variación de los distintos patrones de radiación que se generan a medida que aumentamos el número de elementos radiantes en la antena.
- Obtener una aproximación del patrón de radiación que permita darle una mejor cobertura a nuestra red inalámbrica.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO.

Según el diccionario Webster, define la antena como un dispositivo, generalmente metálico que sirve para irradiar o recibir ondas de radio [8], por otro lado según “Las Definiciones Estándar IEEE de Términos para Antenas” define a las antenas como un medio para radiar o recibir ondas de radio [9].

En otras palabras podemos decir que una antena es una estructura transicional entre el espacio libre y un dispositivo de guía. Las antenas juegan un rol importante en cualquier tipo de comunicación inalámbrica, tanto en la parte de transmisión y recepción, es por eso que recalcamos la importancia y diseño de las mismas ya que influyen bastante dependiendo del tipo de comunicación o aplicación que se les quiera dar.

En base a los fundamentos teóricos de diseño de antenas, procedemos a especificar las respectivas características: tipo de antena parche, el tipo de alimentación, tipo de polarización, número de elementos radiantes, entre otros.

A continuación se describirá de manera concisa los parámetros fundamentales de una antena: Ganancia, Directividad, Patrón de Radiación, Intensidad de Radiación, Ancho del Haz y Eficiencia de la antena. [10]

2.1 Parámetros Fundamentales de una Antena

2.1.1 Ganancia

Uno de los parámetros muy utilizados al momento de describir el desempeño de una antena es su ganancia. La ganancia de una antena está estrechamente relacionada con la directividad. Se ha definido la ganancia de una antena como la relación entre la intensidad de radiación en una dirección dada y la intensidad de radiación que se podría obtener si la potencia de entrada de la antena fuera irradiada isotrópicamente.

$$D = 4\pi \frac{\text{Intensidad de radiación}}{\text{Potencia de entrada total}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.1)$$

2.1.2 Directividad

La directividad de una antena es la relación entre intensidad de radiación una dirección dada y la intensidad de radiación promedio en todas las direcciones. La intensidad de radiación promedio es igual al total de potencia irradiada por la antena dividido para 4π .

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.2)$$

2.1.3 Patrón de Radiación

El patrón de radiación de una antena está definido “como una función matemática o representación gráfica sobre las propiedades de la antena en función de las coordenadas espaciales. El patrón de radiación es determinado en la región de campo lejano, las propiedades del patrón de radiación incluyen densidad de flujo de potencia, intensidad de radiación, campo de fuerza, directividad, fase o polarización.

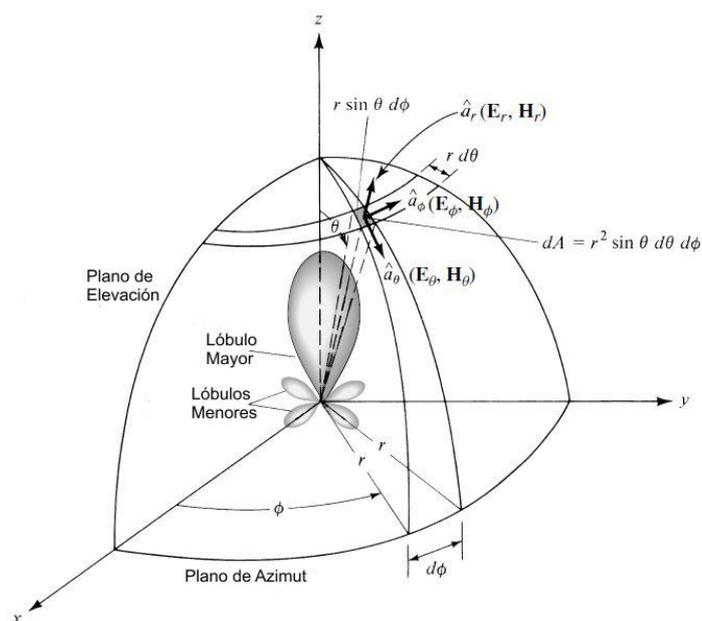


Figura 2.1: Patrón de Radiación de 3-Dimensiones.

2.1.4 Intensidad de Radiación

La intensidad de radiación en una dirección dada se define la potencia radiada de una antena por unidad de ángulo sólido. La intensidad de radiación es un parámetro de campo lejano, se obtiene multiplicando la densidad de radiación por el cuadrado de la distancia.

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.3)$$

2.1.5 Ancho del Haz

Uno de los parámetros que tiene que ver mucho con patrón de radiación se conoce como ancho del haz. Está definido como la separación angular entre 2 puntos idénticos en el lado opuesto del patrón máximo. Existen distintos anchos de haz, el más utilizado es Ancho de Haz para la mitad de potencia (HPBW), definido como el ángulo entre 2 direcciones en la cual la intensidad de radiación es la mitad del valor del haz.

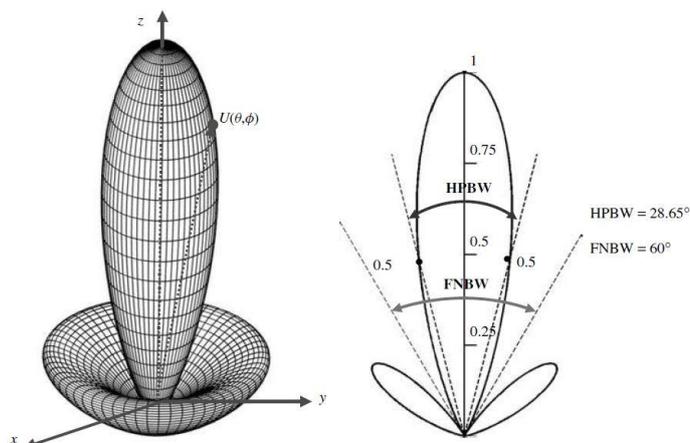


Figura 2.2: Ancho del Haz.

2.1.6 Ancho de Banda

Toda antena trabaja en cierto rango de frecuencias dicho rango de frecuencias se denomina ancho de banda. Por lo general este rango de frecuencias varía de acuerdo a las dimensiones y configuración de la antena

2.2 Tipos de Antena

Existen varios tipos de antenas, de distintas formas debido a las múltiples aplicaciones y tipos de comunicaciones inalámbricas que existen. Para este proyecto nos enfocaremos en tipo de antena en particular: Las antenas microstrip o antenas de microcinta.

2.2.1 Antenas Microstrip

En aplicaciones de alto rendimiento como aviones, naves espaciales, satélites y aplicaciones de misiles, en donde el tamaño, peso, costo, rendimiento, facilidad de instalación y perfil aerodinámico son limitantes, puede que se requieran antenas de bajo perfil. Actualmente hay otras aplicaciones comerciales radio móvil y comunicaciones inalámbricas, que también tienen especificaciones similares. [11]

En los últimos años el estudio de las antenas parche ha logrado un gran progreso. Las antenas microstrip en comparación con las antenas convencionales. Son antenas ligeras en peso, de poco volumen, bajo costo, de perfil bajo, pequeñas dimensiones y fácil fabricación y conformidad. Además las antenas parche microstrip pueden polarizaciones dobles y circulares, frecuencia de operación dual, agilidad de frecuencia, buen ancho de banda y flexibilidad en la línea de alimentación. [12]

2.2.2 Tipos de Antena Microstrip

Las antenas de microcinta se caracterizan por tener una gran cantidad de parámetros físicos a diferencia de las antenas convencionales, se las puede diseñar de distintas formas geométricas y dimensiones. Las antenas de microcinta se las puede clasificar en cuatro grandes grupos:

- Antenas Parche Microstrip
- Dipolos Microstrip
- Antenas Microstrip de Ranura Impresa
- Antenas Microstrip de Onda Viajera

Nosotros nos enfocaremos en las antenas de ranura impresa o también conocidas como antenas de ranura acoplada.

2.2.3 Antenas Microstrip de Ranura Impresa

Las antenas microstrip de ranura impresa o de ranura acoplada, también conocidas por su tipo de alimentación como antena parche de alimentación acoplada por apertura. Esta antena está compuesta por dos sustratos, separados por un plano de tierra. En la parte baja del sustrato inferior se coloca la línea de alimentación cuya energía suministrada es acoplada al parche por medio de una ranura en el plano de la tierra que separa a los dos sustratos [12], como se puede ver en la Figura 2.3.



Figura 2.3: Antena parche de alimentación acoplada por apertura.

El acoplamiento por proximidad ofrece un mejor ancho de banda y una baja radiación espuria. La fabricación de este tipo de antenas es un poco difícil. El mecanismo de acoplamiento es de naturaleza capacitiva.

2.2.4 Polarización Circular

La polarización en una antena indica la forma como varía la orientación del vector del campo eléctrico en un punto fijo del espacio al transcurrir el tiempo [13].

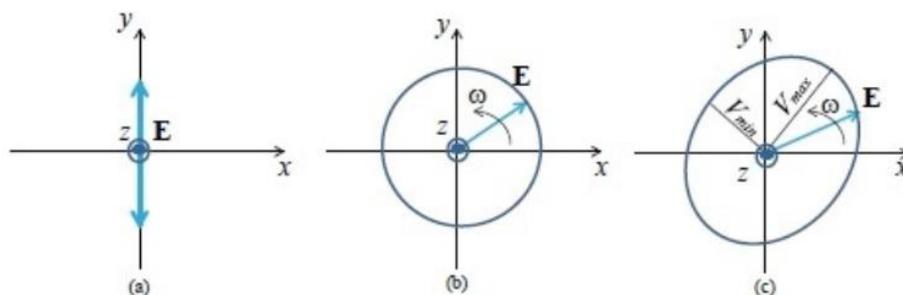


Figura 2.4: En la figura a) Onda polarizada linealmente, en b) Onda polarizada circularmente y c) Onda polarizada elípticamente.

Se puede obtener polarizaciones circulares y elípticas se realizando ciertas configuraciones en la alimentación o hacer pequeñas modificaciones en los elementos. Debido a que manipulamos antenas microstrip de ranura impresa, se puede conseguir de manera muy práctica una polarización circular, mediante el corte de ranuras muy delgadas como los mostrados en la Figura 2.5 [11].

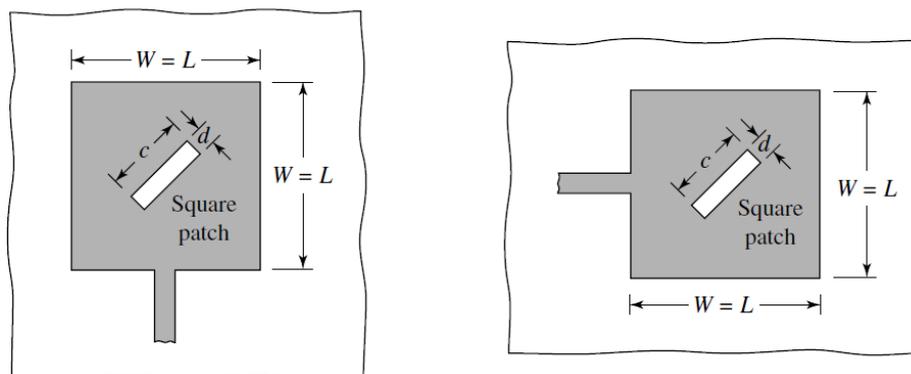


Figura 2.5: Ejemplos de ranuras para obtener una polarización circular.

2.3 Arreglos de antenas

Las antenas microstrip no solo son usados como elementos únicos, también son muy populares al momento de crear arreglos de antenas. Se acostumbra a utilizar arreglos de antenas debido a su versatilidad para poder llegar a patrones de radiación que no se pueden obtener al usar un solo elemento.

Usualmente los patrones de radiación de antenas de un solo elemento suelen ser muy amplios y proveen valores bajos de directividad y ganancia, pero estos

patrones de radiación no son útiles para ciertos tipos de aplicaciones en los que requiera patrones con gran ganancia y directividad.

Para ello se tienen dos opciones, aumentar las dimensiones de la antena de un solo elemento, lo cual derivaría en una antena cuyas dimensiones sean demasiado grandes; La otra opción para evitar una antena con grandes dimensiones es mediante la formación de elementos radiantes configurados de manera eléctrica y geométrica esta nueva antena formada por múltiples elementos radiantes se llama arreglo.

2.3.1 Red de Alimentación de un arreglo

Una parte fundamental de un arreglo de antenas es su red de alimentación, es decir la manera de cómo se le va suministrar energía a los distintos elementos que conforman un arreglo. Existen varias maneras de alimentar un arreglo de antenas, una de ellas es basada en una sola línea de alimentación o también haciendo uso de múltiples líneas de alimentación tal y como se puede ver en la Figura 2.6.

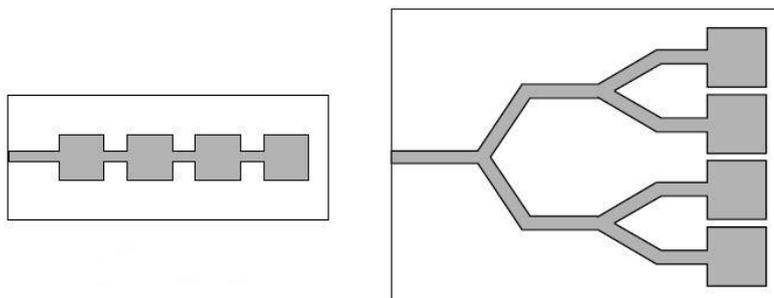


Figura 2.6: Red de Alimentación para arreglos parche.

2.4 Diodos PIN RF

Un diodo PIN es un diodo semiconductor, que está formado de dos regiones, una tipo P y otra tipo N altamente dopadas y separadas por una región intrínseca como se puede visualizar en la Figura 2.7. Estos dispositivos, comúnmente utilizados como desplazadores de fase y conmutadores de señales microonda. Dispositivos diseñados en base a diodos pin, se destacan por sus bajas pérdidas de inserción y elevado desempeño en señales de alta frecuencia [14].

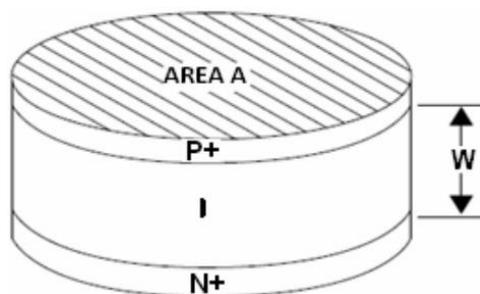


Figura 2.7: Diagrama de un diodo PIN.

2.4.1 Funcionamiento del Diodo

Para tener un mejor control sobre las señales RF se utilizan los diodos pin, sus distintas aplicaciones se basan debido a la polarización del diodo. Cuando se trata de antenas los diodos pin, generalmente se colocan en los elementos parásitos y parches de la antena.

En polarización directa (Estado "ON"- Encendido), el diodo hace que los parches y elementos parásitos actúen como elementos reflectores, como consecuencia obtendremos un aumento de ganancia y directividad en el patrón de radiación de la antena. Además su modelo electrónico al ser polarizado de manera directa, consta de un inductor en serie con una resistencia tal y como vemos en la Figura 2.8.

En la polarización inversa (Estado "OFF"- Apagado), para este caso el diodo hace que el parche y los elementos parásitos actúen como elementos directores, cuyo resultado veremos reflejado con una ligera desviación en el patrón de radiación de la antena. Su modelo electrónico en polarización inversa está formado de un inductor en serie con una capacitancia en paralelo con una resistencia, ver Figura 2.8.

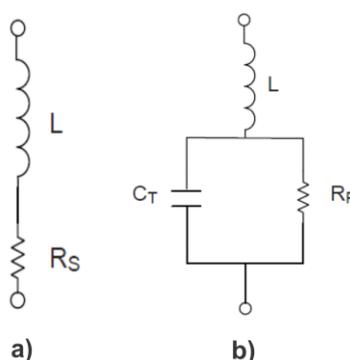


Figura 2.8: Modelo electrónico del diodo pin: a) Polarización Directa (Estado “On” Encendido), b) Polarización Inversa (Estado “Off” Apagado).

2.5 Aplicaciones en las bandas milimétricas

El gran auge de las comunicaciones inalámbricas en estos últimos años, ha impulsado a trabajar en nuevas bandas de frecuencia, tales como las bandas milimétricas situadas entre 30 y 300 GHz considerada como la banda EHF (Extremely High Frequency), en el ámbito de las Telecomunicaciones se tiene previsto trabajar en esta banda, prácticamente libre para su pleno uso tanto en aplicaciones de telefonía móvil y radioastronomía.

2.5.1 Radares en bandas milimétricas

La mayoría de las aplicaciones que hacían uso de las bandas milimétricas estaban orientadas en el campo de la radioastronomía. Específicamente los radares operan a lo largo del espectro de las bandas milimétricas. Para ello mencionemos lo que es un radar y sus componentes.

El término “RADAR” proviene de las palabras Radio Detection and Ranging, básicamente un radar es un sistema electromagnético conformado por un transmisor y un receptor de radio sincronizados. En un principio los radares fueron desarrollados como dispositivos de detección de aeronaves y también para saber en qué dirección lanzar armas antiaéreas [15].

Hablando en términos del funcionamiento, según la Universidad de Alcalá, los radares tiene como objetivo principal descubrir la presencia de blancos a una cierta distancia gracias a la detección de ecos producidos por los

mismos en respuesta a la emisión de señales electromagnéticas, que pueden ser de diferentes tipos (formas de onda), que son transmitidas por antenas de marcada directividad. Además de la presencia de blancos, a menudo se desea conocer alguna característica de los mismos, como, por ejemplo: su posición, su velocidad, su forma, etc. [16]

Con esto sabemos que los radares se caracterizan por trabajar con antenas de marcada directividad, para ello las antenas comúnmente empleadas en radares son reflectores tipo parabólico otra opción es utilizando arreglos desfasados que permitan obtener un patrón de radiación muy directivo. Con ello podemos corroborar que para aplicaciones de radioastronomía se necesitan antenas directivas que operen en las bandas milimétricas.

Con los últimos avances tecnológicos en los últimos años, la Ing. Beatriz Mencía Oliva, en su tesis doctoral propuso “Desarrollo y Aplicaciones de Radares de Alta Resolución en Bandas Milimétricas”, incentivando al uso de radares en bandas milimétricas comprendidas entre los 100 y 300 GHz proporcionándole mejor resolución al radar [17].

2.5.2 Bandas milimétricas en 5G

En futuro cercano se estima que la telefonía móvil seguirá creciendo exponencialmente, debido crecimiento tecnológico de los últimos años a esto se le suma la demanda de mejores dispositivos móviles, aumento de tráfico de datos entre otros, tanto así que va llegar un punto en que la banda actual en la que opera la tecnología 4G no cubrirá tal demanda a tal punto que podría saturarse. Es por eso que mediante los estudios de las bandas milimétricas se tiene pensado ubicar ahí la tecnología 5G, que permita satisfacer la demanda móvil.

Un grupo de miembros del Colegio Oficial De Ingenieros De Telecomunicación (COIT), en un artículo realizaron un análisis exhaustivo de en qué bandas pueden ubicar la tecnología 5G y todos los caminos apuntaban a las bandas milimétricas [18]. El artículo se enfoca principalmente en las bandas milimétricas entre 6 GHz y 100 GHz.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS DE SIMULACIONES Y DISEÑOS DESDE LA ANTENA BASE HASTA LA ANTENA FINAL.

A medida que pasa el tiempo se busca desarrollar sistemas de comunicación con menor costo posible, menor peso, de reducido tamaño y que tengan mejor rendimiento. Es por esa razón que el diseño de las antenas microcinta ha sido de suma importancia en la tecnología.

Las dos principales configuraciones de la forma del parche de microcinta es la circular y rectangular. Analizaremos los parámetros fundamentales diseñando estos dos tipos de antenas para una toma de decisión conveniente.

3.1 Diseño de una antena microcinta con parche rectangular a 30Ghz de frecuencia de operación

Requerimos una antena parche rectangular simple que opere en 30 Ghz, para esto hemos escogido el sustrato dieléctrico RT/duroid 5880 el cual tiene una constante de permitividad relativa (ϵ_r) de 2.2, tomamos como altura del dieléctrico (h) 0.787 mm, tomando como referencia las características del dieléctrico y la frecuencia a la que se espera que trabaje, se conocen las dimensiones mediante las siguientes ecuaciones:

$$W = \frac{c}{2f_o \sqrt{\frac{\epsilon_R + 1}{2}}} \quad (3.1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_R + 1}{2} + \frac{\epsilon_R - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{w} \right)}} \right] \quad (3.2)$$

$$L = \frac{c}{2f_o \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.824h \left(\frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \right) \quad (3.3)$$

Donde W y L son los lados del parche rectangular. Una vez obtenido la geometría del parche $W = 3.953\text{mm}$ y $L = 2.819\text{mm}$ procedemos a elegir cual método de alimentación tendrá, debido a que el objetivo ahora es simplemente de comparar las dos formas de parche se escogerá la alimentación mediante una línea microcinta con transformador de cuarto de onda, consiste en alimentar al parche con una línea de impedancia de 50Ω , teniendo la impedancia de la antena de 144Ω calculamos la impedancia de la línea de $\lambda/4$ para hallar su ancho:

$$Z_{in}(-L) = Z_o \left[\frac{Z_L + jZ_o \tan(\beta L)}{Z_o + jZ_L \tan(\beta L)} \right] \quad (3.4)$$

$$Z_{in} \left(L = \frac{\lambda}{4} \right) = Z_o \left[\frac{Z_L + jZ_o \tan\left(\frac{2\pi\lambda}{4\lambda}\right)}{Z_o + jZ_L \tan\left(\frac{2\pi\lambda}{4\lambda}\right)} \right] \quad (3.5)$$

La ecuación se reduce a la siguiente considerando la longitud de onda como $\lambda/4$:

$$Z_{in} \left(L = \frac{\lambda}{4} \right) = \frac{Z_o^2}{Z_L} \quad (3.6)$$

Finalmente hallamos la impedancia de la línea con lo siguiente:

$$Z_o = \sqrt{Z_L Z_{in}} \quad (3.7)$$

$$Z_o = 84.853 \Omega$$

Con estos valores, simulamos en el software HFSS para ver los resultados.

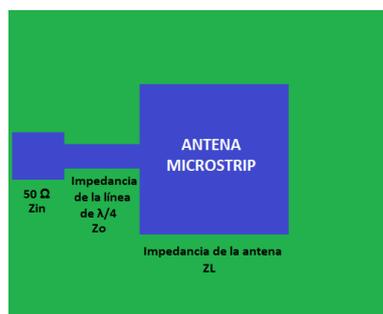


Figura 3.1: Esquema de la antena parche microcinta con transformador cuarto de onda.

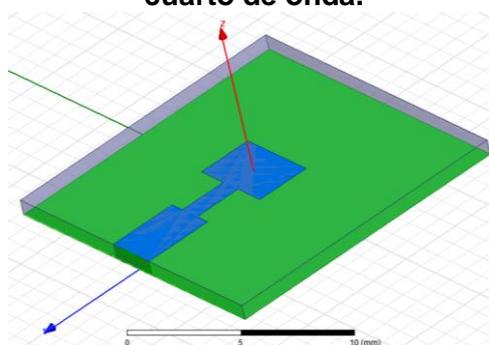


Figura 3.2: Diseño de la antena (Parche rectangular), simulado en el software HFSS 15.

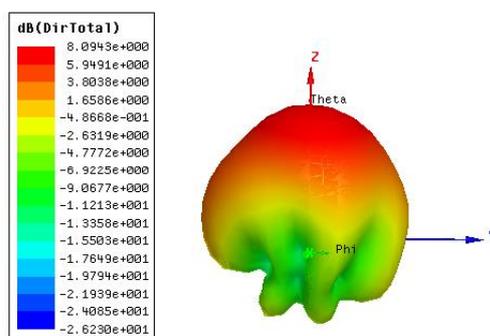


Figura 3.3: Patrón de Radiación 3D.

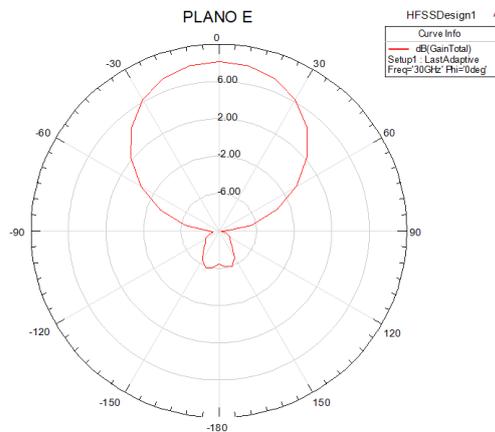


Figura 3.4: Plano E.

3.2 Diseño de una antena microcinta con parche circular a 30Ghz de frecuencia de operación

Bajo los mismos parámetros y características diseñamos la antena ahora con el parche en forma circular, obteniendo los siguientes resultados:

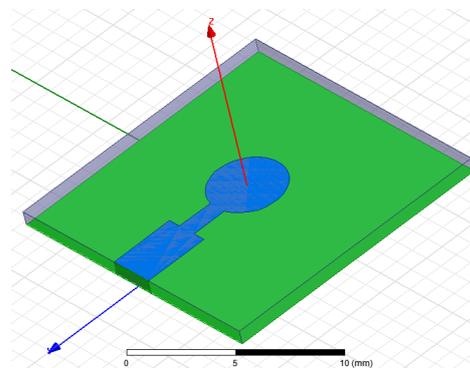


Figura 3.5: Diseño de la antena (Parche circular), simulado en el software HFSS.

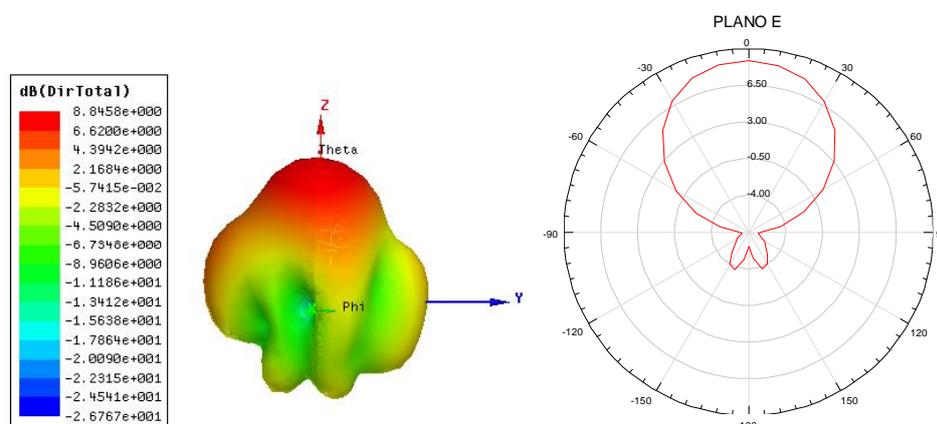


Figura 3.6: Patrón de Radiación 3D y Plano E.

3.3 Comparación entre parches rectangulares y circulares

Por medio de resultados de simulaciones y análisis del patrón de radiación (Figura 3.3 y Figura 3.6); se evidencia que una antena microcinta circular tiene mejores características con respecto a la directividad y levemente en ganancia (Figura 3.4 y Figura 3.6), por lo tanto para el proyecto optamos por parches circulares, en vista que nos ofrecen resultados deseados. Tomando como base esta antena manipularemos los parámetros de su patrón de radiación.

3.4 Aumentando la ganancia e implementación de polarización circular

Como habíamos explicado en el anteriormente, la forma circular del parche aumenta la directividad y ganancia, pero una manera adicional de mejorar aún más la ganancia es introduciendo sustratos multicapas, para esto se utilizan diferentes materiales dieléctricos. En otras palabras diseñaremos una antena microstrip de ranura acoplada o mejor conocidas como antenas microstrip de ranura impresa.

Básicamente las antenas parche tienen polarización lineal, pero con técnicas de manipulación de ancho de banda y alimentación se puede conseguir polarización circular. Construiremos la antena de tal manera que tenga una forma de radiar intrínsecamente circular. Elegimos el uso de la polarización por el motivo de que tiene la ventaja de impedir sustracción o adición entre señales, por lo tanto la recepción recibe la menor la cantidad de desvanecimiento de la señal. Con el fin de generar onda electromagnética circularmente polarizada (CP) en la superficie

de la tierra de la antena parche realizamos una ranura o slot en forma de cruz y la alimentación será mediante acoplo por apertura dado que nuestra antena dispone de dos sustratos. El tamaño de los sustratos y el plano de la tierra son 15x15 mm.

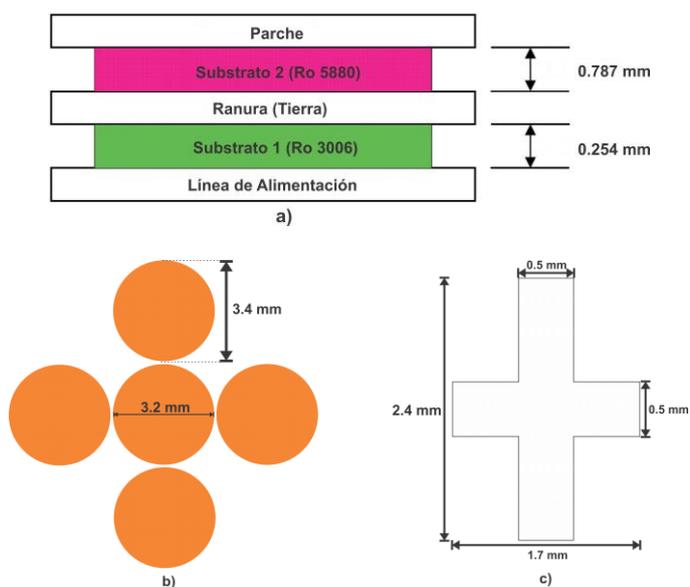


Figura 3.7: En la figura a) Detallamos la altura de cada sustrato, en b) los diámetros del parche y los elementos parásitos; y c) las dimensiones del slot.

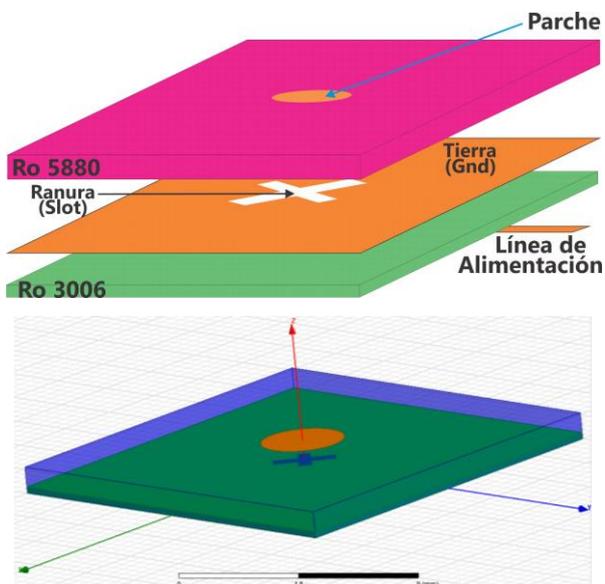


Figura 3.8: Esquemático de la antena propuesta.

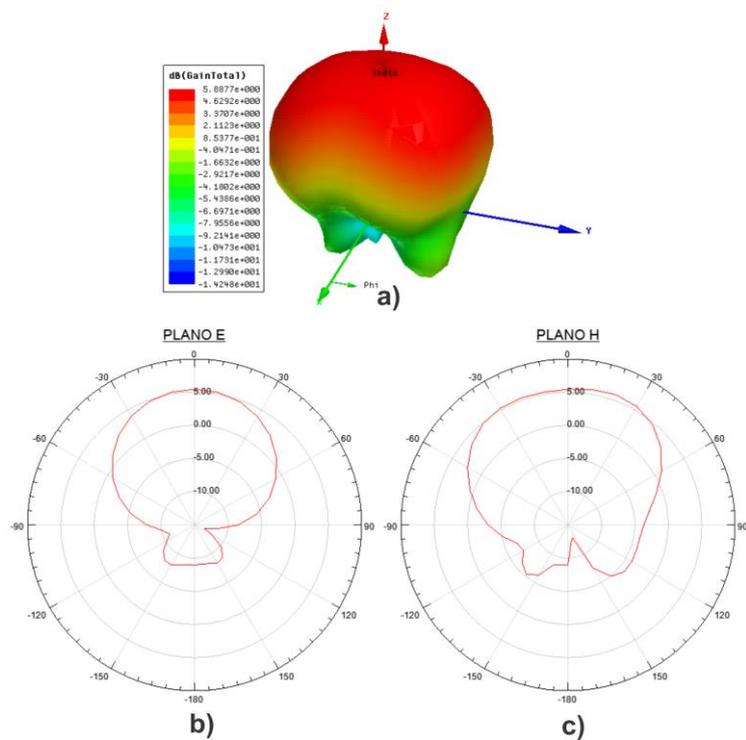


Figura 3.9: Patrones de Radiación 3D y 2D (Plano E y H)

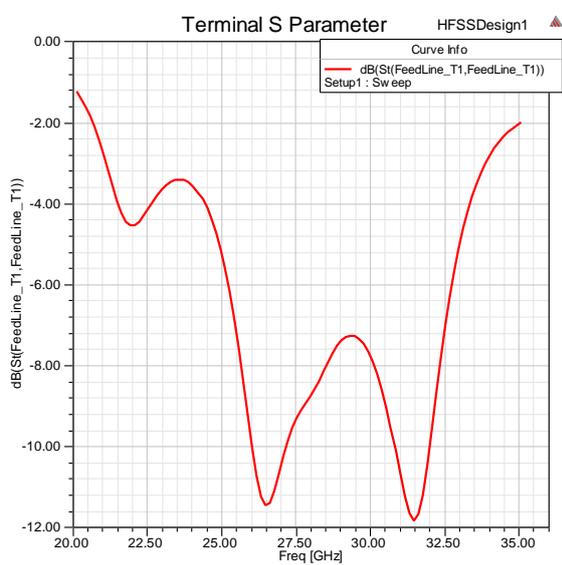


Figura 3.10: Gráfico del parámetro S_{11} .

Notamos en la Figura 3.9 que nuestra antena opera cerca de los 30 GHz aunque no precisamente en esa frecuencia. Así también vemos que la ganancia está en

5.88 dB (Figura 3.8) y notamos que el patrón de radiación no es muy directivo, es más, se parece mucho al patrón de radiación de una antena omnidireccional.

3.5 Adición de elementos parásitos

Un elemento parásito es un material radiante que aporta a la antena sin estar excitado, varios de estos elementos en conjunto con el elemento principal excitado de la antena (parche central) apoyan a una mejora en la directividad de la antena.

Para observar cómo afectan los elementos parásitos en la antena, utilizamos sólo una parte de cada elemento hasta tenerlo completo, es decir analizamos los elementos como corona circular hasta que va creciendo el área y ya tenga forma completa circular.

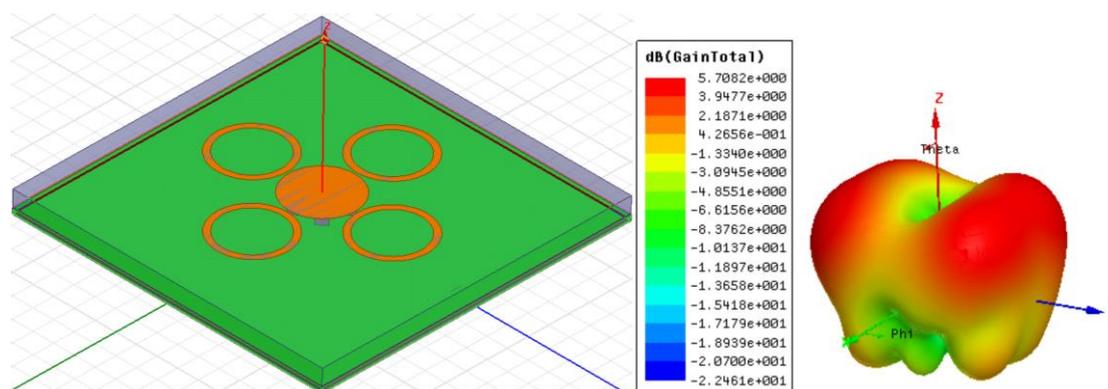


Figura 3.11: Diseño de la antena con el parche y su respectivo patrón de radiación originado con el 30% del área de los elementos parásitos.

Con el 30% del área (Figura 3.7) vemos que el lóbulo principal del patrón empieza a decaer, esto se puede ver reflejado en la ganancia cuyo valor es ligeramente menor a diferencia cuando la antena estaba formada por un solo parche.

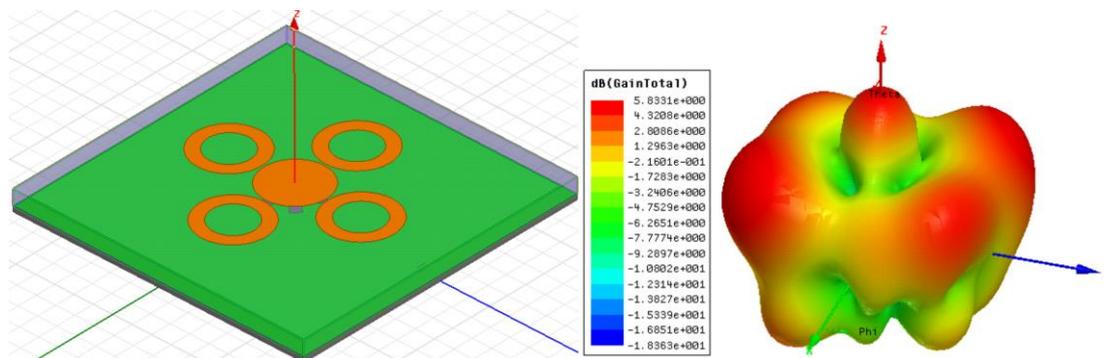


Figura 3.12: Diseño de la antena con el parche y su respectivo patrón de radiación originado con el 60% del área de los elementos parásitos.

Al tener el 60% del área de los elementos parásitos aparece el lóbulo principal con un haz más estrecho aunque siguen presentes los lóbulos secundarios.

Existe una ligera mejora en la ganancia (Figura 3.8).

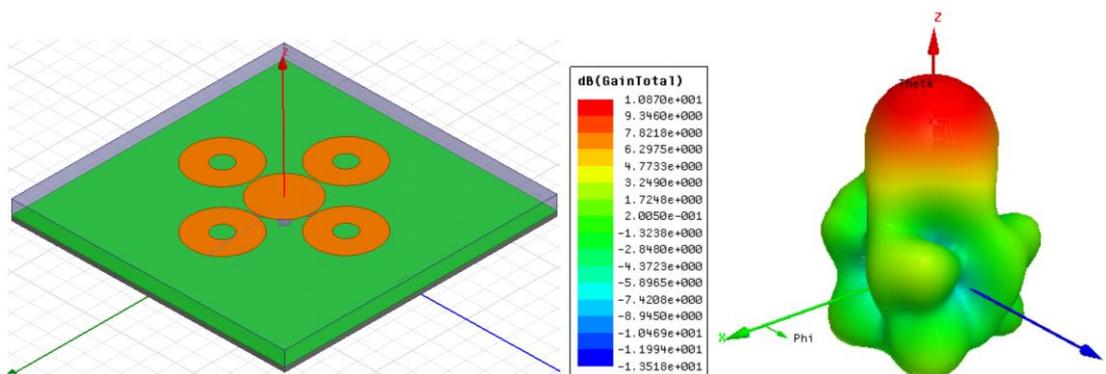


Figura 3.13: Diseño de la antena con el parche y su respectivo patrón de radiación originado con el 90% del área de los elementos parásitos.

Cuando los elementos parásitos toman el 90% del área se aprecia el patrón de radiación ya de manera bien directiva y los lóbulos secundarios con gran ancho de haz desaparecen, aún se puede apreciar pequeños lóbulos secundarios. La ganancia aumentó de manera considerable (Figura 3.9).

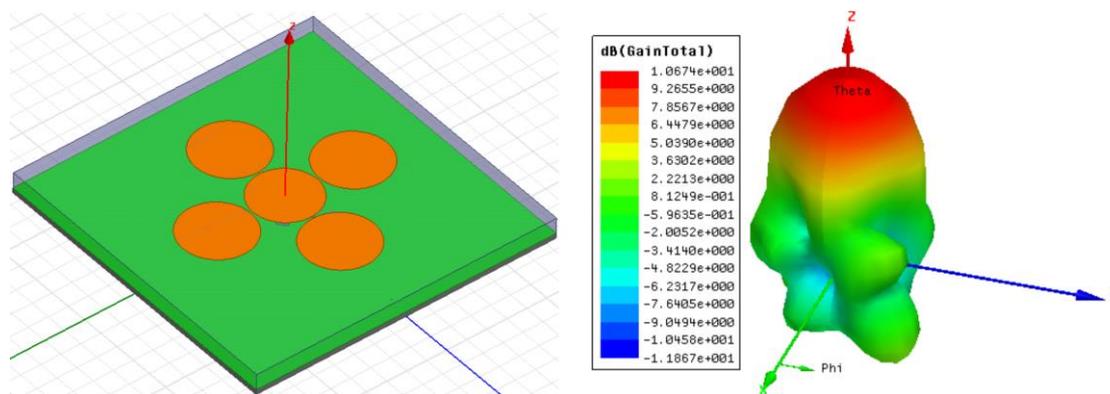


Figura 3.14: Diseño de la antena con el parche y su respectivo patrón de radiación originado con el 100% del área de los elementos parásitos

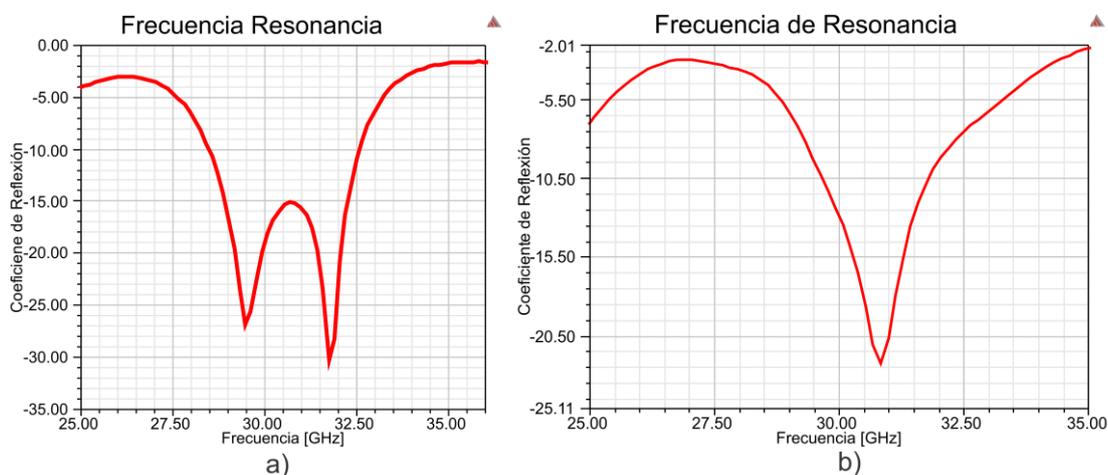


Figura 3.15: Frecuencias de resonancia a) Antena al 100% del área de sus elementos parásitos y b) Antena al 90% del área de sus parásitos

Con los parásitos completamente circulares se aprecia casi el mismo patrón que el anterior caso con 90% de área. Podemos decir que la ganancia aumentó el doble comparado con la antena que consta de un solo parche (Figura 3.10). En la Figura 3.11 visualizamos las frecuencias de operación cuando la antena tiene 100% y el 90% del área respectivamente, a pesar de que la ganancia de la antena del 90% del área es ligeramente mayor, vemos que no trabajan en el mismo rango de frecuencias. Cabe recalcar que este diseño de antena fue propuesto previamente en una Conferencia Europea de antenas y propagación [16], nosotros hemos justificado, la razón por la cual decidimos optar por utilizar este diseño de antena para poder aplicarle ciertas mejoras y optimizar sus parámetros.

3.6 Manipulación del haz principal.

Mediante elementos conmutadores de RF podemos manipular y controlar la dirección del haz principal, al diseño de la antena agregaremos esta característica para demostrar el funcionamiento de reconfiguración del haz, para esto aplicamos el método basado en cortocircuito de PIN diodos que estarán ubicados entre los elementos radiantes no excitados y la tierra. Los PIN diodos funcionan de tal manera que por la línea de cortocircuito se dirige flujo de corriente dirigiendo el haz al lado contrario.

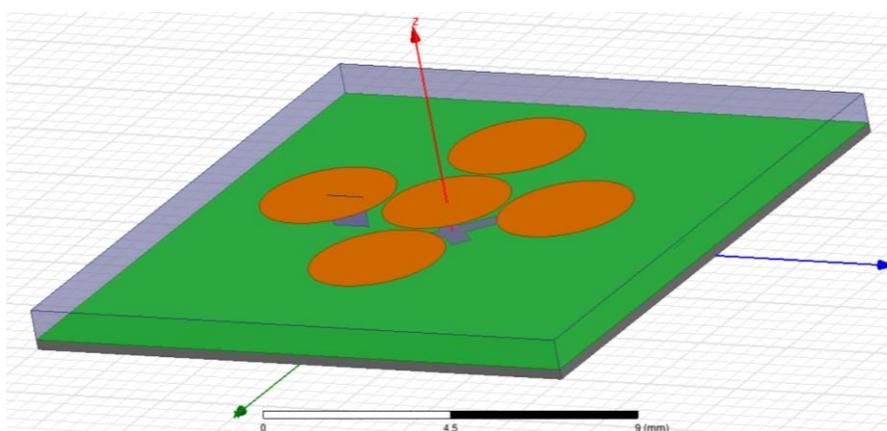


Figura 3.16: Diseño de la antena parche con elementos parásitos y diodo PIN simulado en el software HFSS.

Con diodos PIN	Sin diodos PIN

Tabla 1: Efectos del Diodo PIN en el patrón de radiación.

Le agregamos un PIN diodo en un elemento parásito (Figura 3.18) y como vemos en la Figura 3.19 y Figura 3.20 donde se compara el antes y después de colocar el elemento conmutador, el haz del patrón de radiación cambia su dirección al lado opuesto de la posición del PIN diodo. Esto confirma al conmutador RF como una herramienta más para manipular el patrón de una antena parche, en este caso la dirección. La antena es capaz de dirigir el haz principal en distintas direcciones de acuerdo a la posición del diodo PIN y la cantidad presente de estos.

3.7 Arreglo lineal de antenas

Las configuraciones y modos de arreglos de antenas son muy diversos y de acuerdo a la posición donde se coloque cada elemento radiante las características y las frecuencias de operación de la antena se ven afectados. La configuración más básica es el arreglo lineal y es el más usado cuando se requiere un ancho de haz estrecho y específico para una sola dirección.

Para la demostración del comportamiento del arreglo de antenas lineal conforme se aumentan los elementos utilizamos el software Matlab 2016b, a pesar que esta herramienta es muy limitante en cuanto a diseñar antenas nos referimos, en este caso la usaremos porque vamos a diseñar antenas microcintas básicas e ideales.

Como prueba usamos una antena microcinta rectangular con dimensiones $L=7.5\text{cm}$ y $W=3.75\text{m}$, el aire como dieléctrico sustrato y plano de tierra infinito. Los resultados se analizan con una frecuencia de operación de 2.4 GHz.

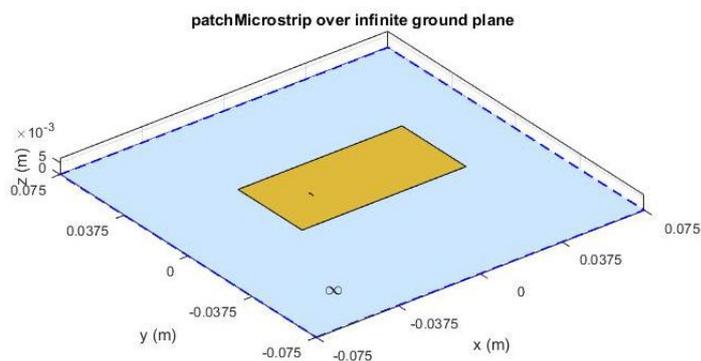


Figura 3.17: Diseño de una antena microcinta simulado en el software Matlab 2016b.

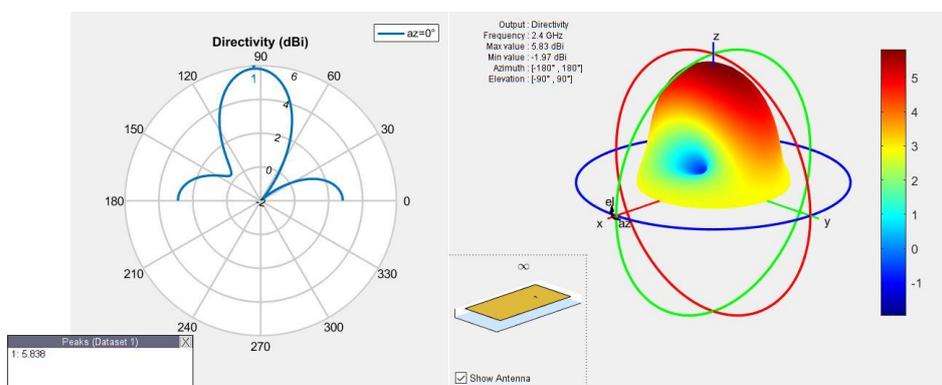


Figura 3.18: Plano E y su respectivo patrón de radiación.

El lóbulo principal se encuentra como es común paralelo al parche (Figura 3.14), con un valor de 5.83 dB. Tomando como base esta antena, diseñamos el arreglo lineal de 2, 3 y 4 elementos.

Referente a la directividad del arreglo Broadside (llamado así porque su máxima directividad se encuentra en la dirección perpendicular al plano del arreglo) se puede apreciar en el plano E que mientras más elementos estén presentes en el arreglo, el lóbulo principal tenderá a ser más directivo, También se aprecia como el plano H (Plano Y-Z) no se ve afectado, esto se debe a que los elementos del arreglo fueron distribuidos a lo largo del eje X (Figura 3.15).

Para saber cómo se comporta el ancho del haz frente al número de antenas dentro del arreglo se analizaron los resultados para 10 casos distintos.

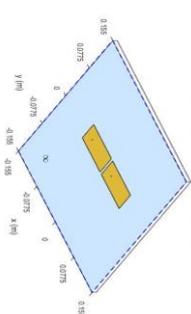
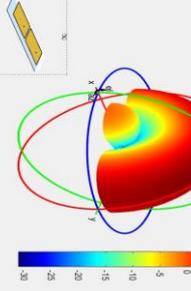
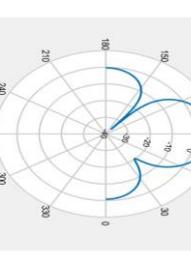
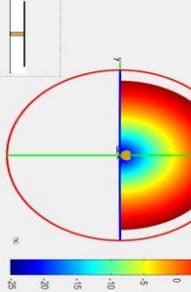
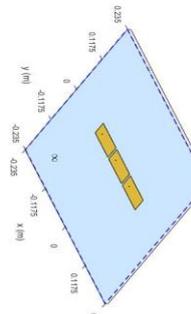
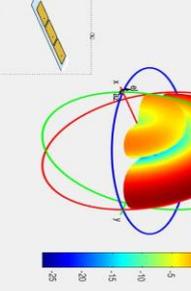
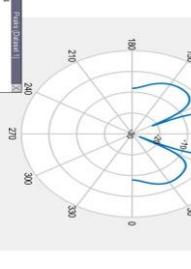
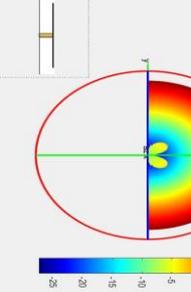
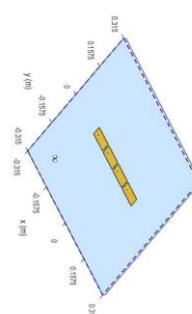
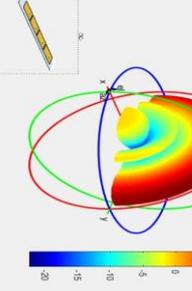
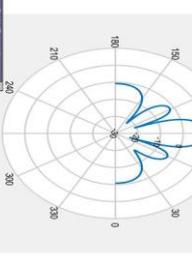
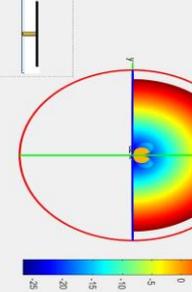
Arreglo	Patrón en 3D	Plano E	Plano H
 <p>Inventory of patchelements over infinite ground plane</p>	 <p>Global Statistics Frequency: 2.4 GHz Wavelength: 0.125 m Max Gain: 31.8 dBi Main Beam: 0° Beamwidth: 100° x 100° Directivity: 10.77</p>	 <p>Directivity (dBi)</p>	 <p>Directivity (dBi)</p>
 <p>Inventory of patchelements over infinite ground plane</p>	 <p>Global Statistics Frequency: 2.4 GHz Wavelength: 0.125 m Max Gain: 37.8 dBi Main Beam: 0° Beamwidth: 100° x 100° Directivity: 19.77</p>	 <p>Directivity (dBi)</p>	 <p>Directivity (dBi)</p>
 <p>Inventory of patchelements over infinite ground plane</p>	 <p>Global Statistics Frequency: 2.4 GHz Wavelength: 0.125 m Max Gain: 43.8 dBi Main Beam: 0° Beamwidth: 100° x 100° Directivity: 28.77</p>	 <p>Directivity (dBi)</p>	 <p>Directivity (dBi)</p>

Tabla 2: Cambios del Arreglo lineal a medida que se van aumentando los números de elementos.

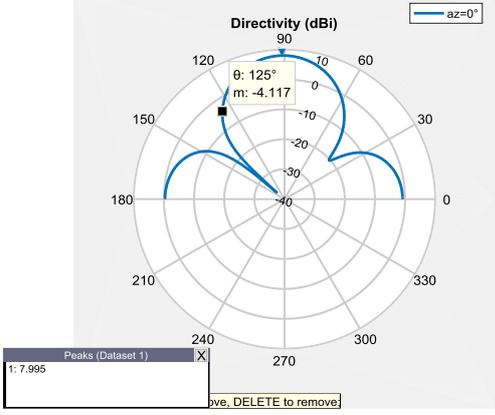
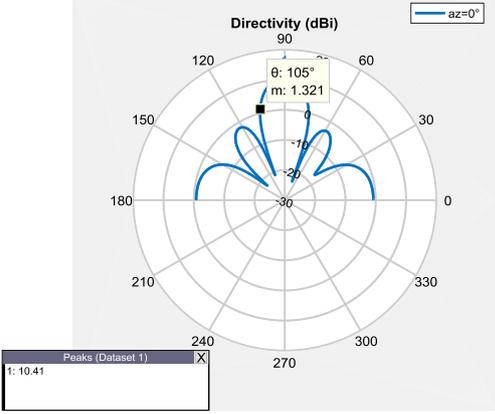
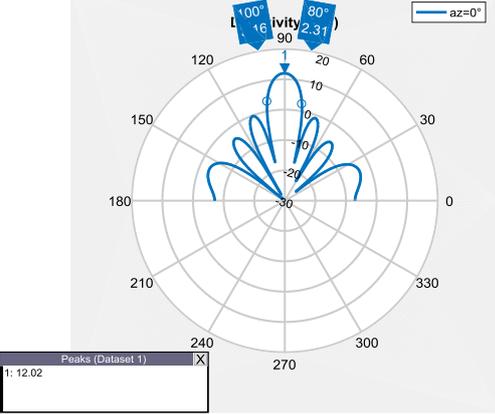
Datos	Plano E
<p>Número de antenas: 2 Ancho del haz: 69 grados</p>	 <p>Directivity (dBi) az=0°</p> <p>θ: 125° m: -4.117</p> <p>Peaks (Dataset 1) 1: 7.995</p>
<p>Número de antenas: 4 Ancho del haz: 30 grados</p>	 <p>Directivity (dBi) az=0°</p> <p>θ: 105° m: 1.321</p> <p>Peaks (Dataset 1) 1: 10.41</p>
<p>Número de antenas: 6 Ancho del haz: 20 grados</p>	 <p>Directivity (dBi) az=0°</p> <p>θ: 90° m: 2.31</p> <p>Peaks (Dataset 1) 1: 12.02</p>

Tabla 3: Variación del patrón de radiación a medida que se aumenta el número de elementos (l).

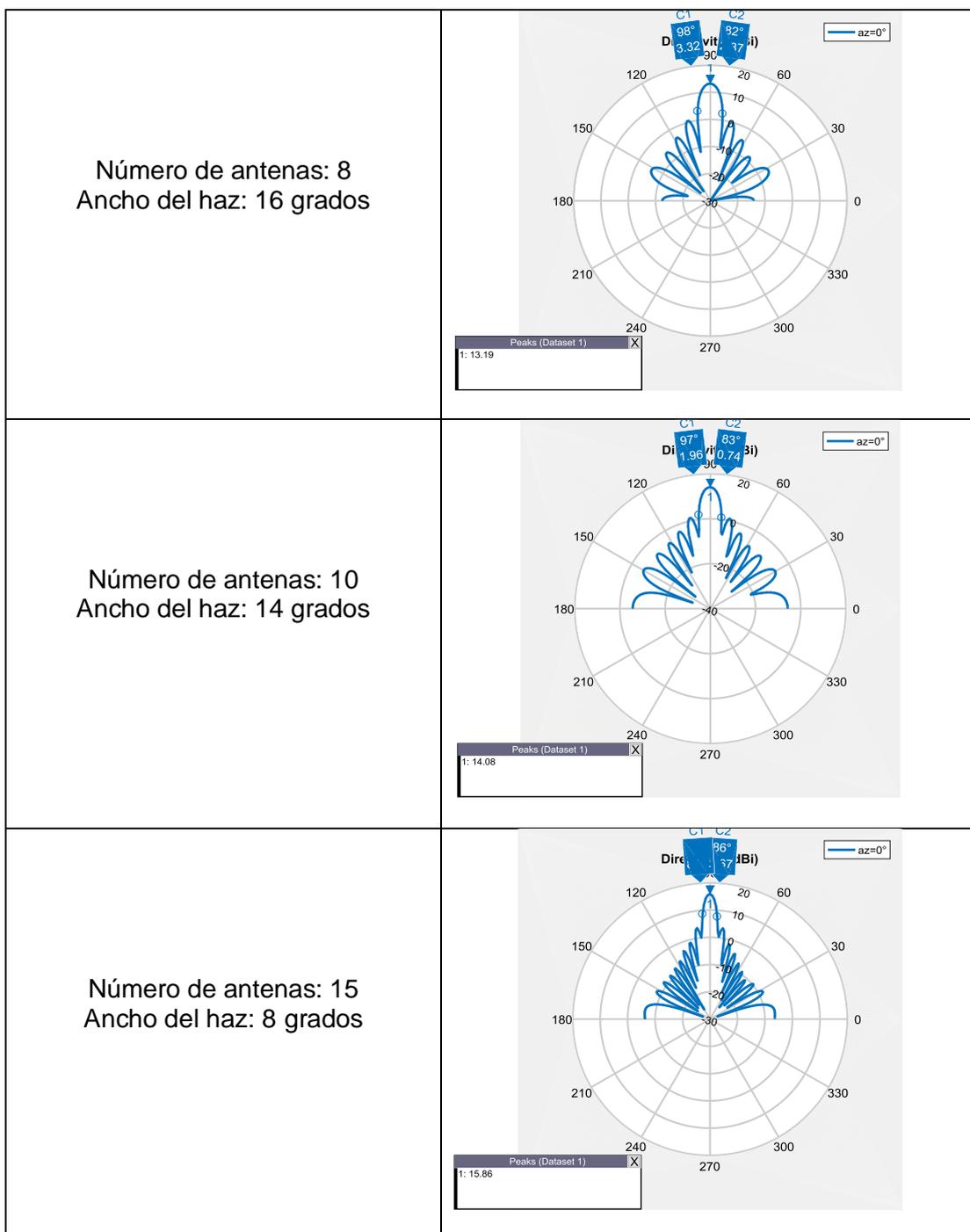


Tabla 4: Variación del patrón de radiación a medida que se aumenta el número de elementos (II).

Dado que no manejamos parámetros de potencia de entrada y potencia radiada, no podemos hablar exactamente de valores de eficiencia pero si podemos determinar que el caso con mayor eficiencia es el arreglo con mayor número de

elementos por el hecho de que su ganancia es mayor, y cabe recalcar que la ganancia está directamente relacionado con la eficiencia.

Para un número de elementos del arreglo mayor a 15, el patrón en este plano empieza a tener exceso de lóbulos secundarios por lo que no es recomendable un gran número de antenas además de que se tiene la desventaja de que el tamaño tiende a ser más grande y por lo tanto menos eficiente, para ciertas aplicaciones. Tomando los datos para generar la curva, se tiene lo siguiente:

NUMERO ELEMENTOS	ANCHO DEL HAZ
2	69
3	39
4	30
5	26
6	20
7	18
8	16
9	16
10	14
15	8

Tabla 5: Datos de los números de elementos y ancho del haz.

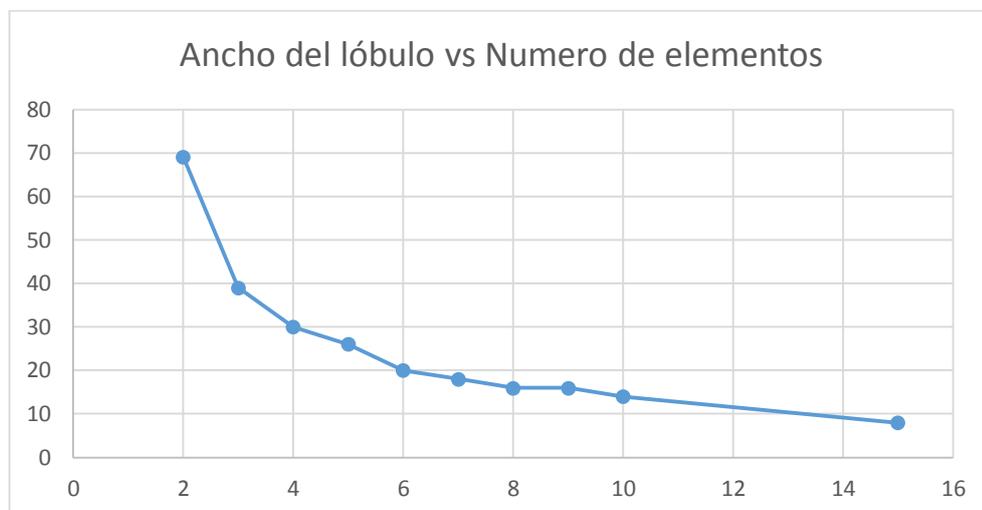


Figura 3.19: Gráfico de la curva: Ancho del lóbulo vs Número de elementos.

Para este caso particular observamos que la curva tiene la forma de un modelo de potencia que cumple con los siguientes parámetros:

$$f(x) = ax^b \quad (3.8)$$

Variables:

- **x**: Número de elementos
- **f(x)**: Ancho del haz

Coeficientes: (Con límites de confianza del 95%):

$$a = 138.8 \text{ (120.5, 157.2)}$$

$$b = -1.061 \text{ (-1.17, -0.9517)}$$

Cabe recalcar que este modelo matemático es simplemente para esta antena base en particular. Nos ayuda a tener un conocimiento predictivo del ancho del haz a medida que se añadan más elementos (antena base diseñada).

3.8 Resultado final.

Como habíamos mencionado anteriormente partiendo de una antena base de cualquier forma podemos realizar distintas configuraciones de arreglos que nos

permiten manipular el patrón y demás características. En este caso utilizamos la antena base propuesto al inicio de la sección.

Al armar el arreglo de 2 antenas se producen 2 frecuencias resonantes: 25.3 GHz y 32 GHz tal y como se ve en la Figura 3.21, descubrimos que la antena es de tipo LHCP (polarización circular sentido anti-horario) Figura 3.21 y la ganancia es 12.38 dB en la Figura 3.27, es un aumento significativo de ganancia, con esto se comprueba que a mayor número de elementos cerca del parche colocados a una distancia considerable causan aumento de ganancia y directividad en el patrón.

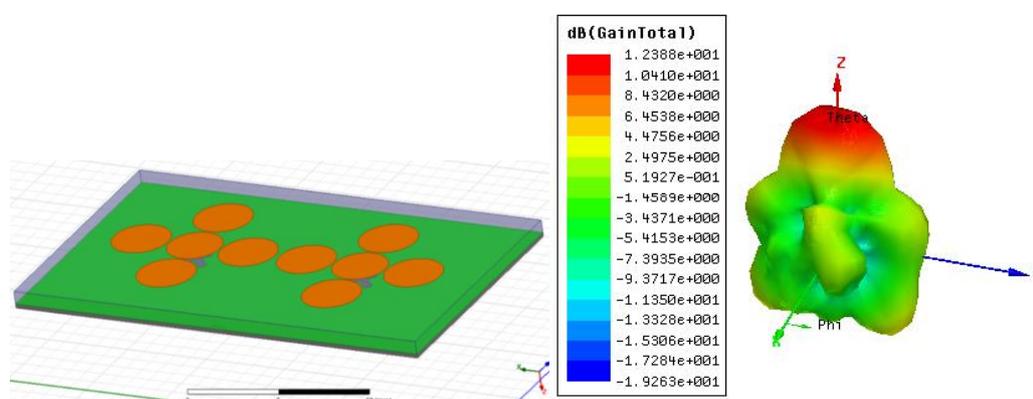


Figura 3.20: Arreglo lineal de 2 antenas con su respectivo patrón de radiación en 3D.

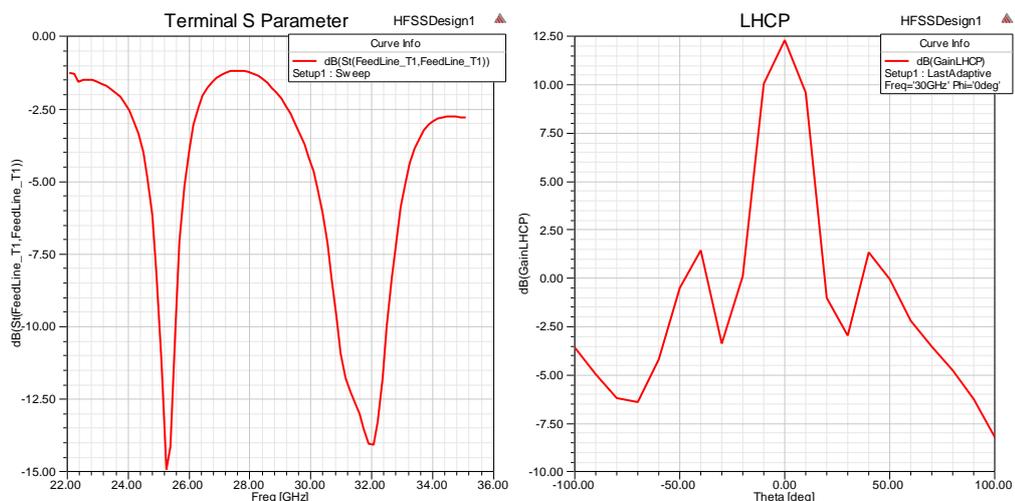


Figura 3.21: Gráfico del parámetro S_{11} del arreglo lineal y gráfico de la polarización del arreglo (LHCP).

Con la finalidad de aumentar aún más la ganancia de antena y mejorar el ancho de banda de polarización circular, sugerimos la idea de construir una matriz. Este diseño es una antena basada en la técnica de alimentación secuencial. La antena base que representa cada elemento es la misma que la antena propuesta al inicio de la sección con elementos parasitarios. Cada elemento base tiene una diferencia de fase de 90° entre ellos. Cada una de las líneas de alimentación secuencial termina en el parche central de radiación rodeado por cuatro elementos parasitarios. Para observar el efecto de la nueva configuración sobre las características que cambian tenemos en la Figura 3.32 que se evidencian dos bandas de frecuencia operables entre 25.6 GHz y 26.2, y entre 27.2 GHz y 28.2 GHz. La Figura 3.22 muestra el ligero aumento de ganancia a 11.48 GHz y que sigue manteniendo la característica de LHCP (Figura 3.23).

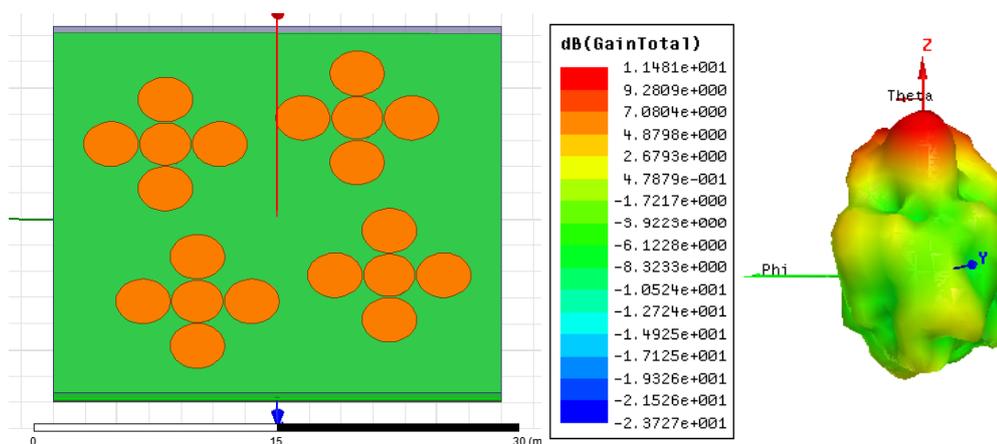


Figura 3.22: Arreglo de antenas plano de 4x4 desfasado y su respectivo patrón de radiación 3D.

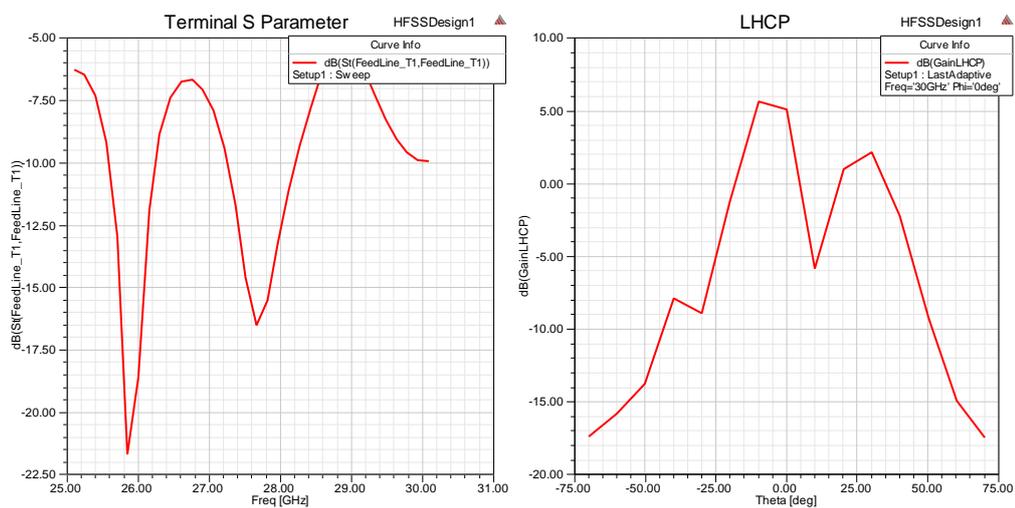


Figura 3.23: Gráfico del parámetro S_{11} del arreglo plano y gráfico de la polarización del arreglo (LHCP).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos de la simulación de arreglo de antenas lineal, vemos que hay concordancia con los resultados esperados, ya que nuestro arreglo de antenas lineal trabaja en la banda de 30-300 GHz, mejorando un poco la directividad y la ganancia respecto a la antena propuesta.

El estado de funcionamiento del diodo pin no solo influye en el patrón de radiación de la antena, también puede o no mejorar el tipo de polarización que se esté dando en la antena.

La polarización de una antena microstrip es lineal, pero concluimos en el gráfico LHCP Y RHCP que se puede lograr generar onda electromagnética polarizada circularmente mediante técnicas como realizar una ranura en forma de cruz sobre superficie de la tierra.

Las dimensiones (longitud y grosor) de las líneas de alimentación de un arreglo de antenas influye bastante en el patrón de radiación, ya que al probar los distintos tipos de líneas, los patrones iban variando, así mismo su frecuencia de operación.

Se comprobó que no es necesario agrandar dimensionalmente una antena de solo elemento para obtener un patrón de radiación con más directividad y ganancia, mediante el uso de arreglos lineales se pudo obtener una mejor antena como un patrón de radiación más directivo y con más ganancia.

Los distintos tipos de configuraciones de arreglos causan una variación bastante considerable en la directividad del patrón de radiación y en la banda de frecuencia en la que este puede operar.

Recomendaciones

Es recomendable que en futuros trabajos sobre esta antena, se optimice mejor la alimentación del arreglo, ya que por límites del software, no se implementó mejoras en las líneas de alimentación.

Implementar la antena de manera física para poder establecer sus respectivas comparaciones con los resultados obtenidos de manera simulada.

Realizar una pequeña investigación para una óptima implementación el uso de diodos pin, para obtener una antena cuyo patrón de radiación sea reconfigurable.

Complementar el proyecto con pruebas de medición de los parámetros de la antena y si es realmente útil para una buena transmisión de datos.

Con un mayor tiempo de investigación y un análisis más profundo se pueden determinar ecuaciones que servirán para tener un modelo matemático específico para este tipo de antena parche.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Meza, «Blog Cisco Cansac,» CISCO, 11 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <https://gblogs.cisco.com/cansac/experiencia-inalambrica-de-alta-densidad-parte-1/>. [Último acceso: 18 Junio 2017].
- [2] ITU-R, «IMT Traffic estimates for the years 2020 to 2030,» 2015. [En línea]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2370-2015-PDF-E.pdf. [Último acceso: 18 Junio 2017].
- [3] Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información, «Observatorio TIC,» 31 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://www.observatoriotic.mintel.gob.ec/estadistica/>. [Último acceso: 23 Junio 2017].
- [4] El Universo, *Internet fijo llega al 36% de los hogares en Ecuador*, 2 Julio 2017.
- [5] D. G. H. P. Julián Botero D, «La interferencia como un factor que afecta el desempeño de una sistema RFID,» 13 Noviembre 2009. [En línea]. Available: <http://www.redalyc.org/html/2570/257020617014/>. [Último acceso: 26 Junio 2017].
- [6] M. V. A. Marchán, «Análisis de la Interferencia provocada por Cámaras Inalámbricas de Video a 2.4 GHz en la Coexistencia con REDES WLAN,» Diciembre 2013. [En línea]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4054/1/20T00454.pdf>. [Último acceso: 26 Junio 2016].
- [7] P. Piestraski, D. Britz, A. Roy, R. Pragada y G. Charlton, «Milimeter Wave,» *ZTE Communications and Terahertz Communications: Feasibility and Challenges*, vol. 10, nº 4, p. 64, 2012.
- [8] C. A. Balanis, «Antenna Theory: Analysis and Design 3rd Edition,» de *Antennas*, New Jersey, John Wiley & Sons, 2005, p. 1050.

- [9] IEEE, «IEEE Xplore Digital Library,» 6 Marzo 2014. [En línea]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6758443/?reload=true&part=1>. [Último acceso: 10 Julio 2017].
- [10] C. A. Balanis, «Fundamental Parameters of Antennas,» de *Antenna Theory: Analysis and Design*, New Jersey, John Wiley & Sons, 2005, p. 1072.
- [11] C. A. Balanis, «Microstrip Antennas,» de *Antenna Theory: Analysis and Design*, New Jersey, John Wiley & Sons, 2005, p. 1072.
- [12] D. V. T. Indrasen Singh, «Micro strip Patch Antenna and its Applications: a Survey,» Octubre 2011. [En línea]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/eac3/1e83c9408b03b47f6ab34d71ff221cd9d1af.pdf>. [Último acceso: 20 Julio 2017].
- [13] O. Parra, «Análisis de antenas microstrip con polarización circular para fines educativos,» 14 Diciembre 2013. [En línea]. Available: <https://prezi.com/jy-q392w6mqw/analisis-de-antenas-microstrip-de-parche-circular-con-polarizacion-circular-para-fines-educativos/>. [Último acceso: 7 Agosto 2017].
- [14] Alpha Industries, «Design With PIN Diodes,» 1999.
- [15] I. L. Espejo, «IVÁN LOPEZ. PH.D,» Abril 2011. [En línea]. Available: <http://www.ilopez.es/proyectos/telematica/RADAR.pdf>. [Último acceso: 20 Julio 2017].
- [16] M. F. A. R. S. a. T. A. D. M. Akbari, «A 30GHz High-Gain Circularly-polarized Pattern-Steerable Antenna Based on Parasitic Patches,» 2017. [En línea]. [Último acceso: 15 Junio 2017].

ANEXOS

ANEXO A

Código de Matlab para el diseño de un parche microcinta con los gráficos del patrón de radiación:

```
%Longitud del parche (Eje x): 7.50 cm
%Ancho del parche (Eje y): 3.75 cm
%Sustrato (dieléctrico): Aire
%Altura del sustrato: 6 mm
p = patchMicrostrip('GroundPlaneWidth', inf);
show(P)
figure
pattern(la,2.4e9); %PLANO EN 3D
figure
patternElevation(la,2.4e9); %PLANO E
figure
pattern(la,2.4e9,90:1:270,90:1:270); %PLANO H
[bw,angles]=beamwidth(la,2.4e9,0,1:1:360); %Ancho del haz
disp(bw);
```

Código de Matlab para el diseño de un arreglo lineal de parches microcinta de 4 elementos con 8 cm de espacio entre elementos:

```
p = patchMicrostrip('GroundPlaneWidth', inf);
la = linearArray('Element',p, 'NumElements',4,
'ElementSpacing',80e-3)
show(la)
```

ANEXO B

Resultados de Antenas Fallidas

A lo largo de todo el proceso de simulación, hubo varias antenas que al simularlas no obtuvimos los resultados esperados, por tal razón le denominamos antenas fallidas. Cabe recalcar que dichas antenas sirvieron para mejorar o aprender de nuestros errores, hasta lograr obtener una antena acorde a los resultados esperados.

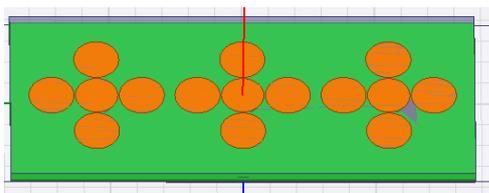


Figura B.1: Arreglo lineal de 3 elementos.

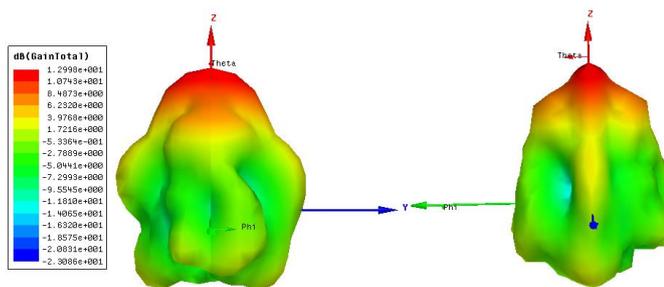


Figura B.2: Patrón de Radiación 3D del arreglo lineal de 3 elementos.

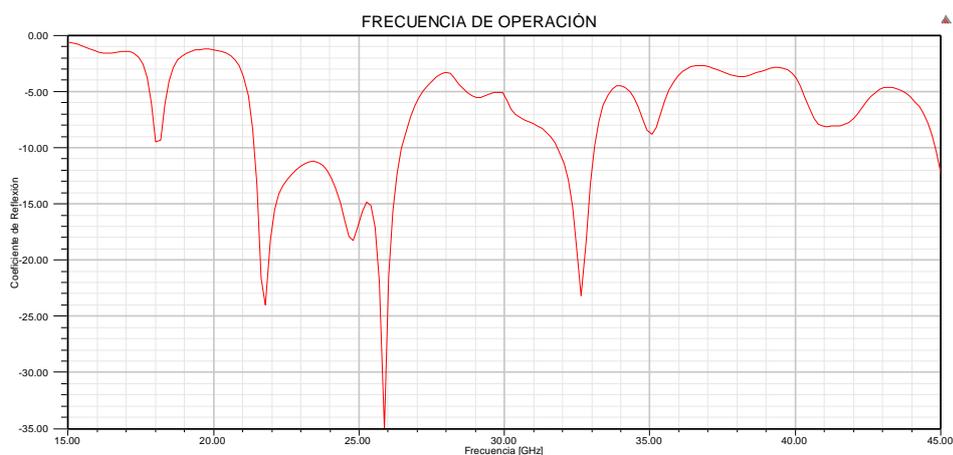


Figura B.3: Frecuencia de Operación del arreglo lineal de 3 elementos.

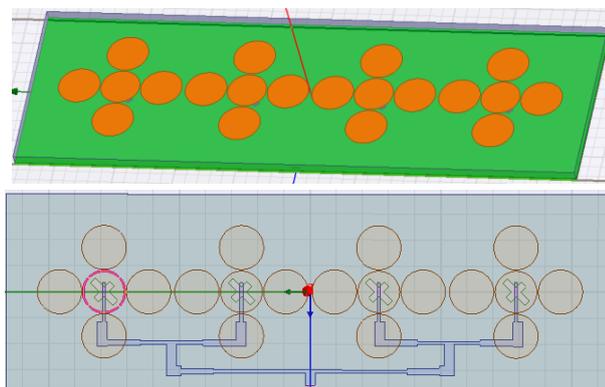


Figura B.4: Arreglo lineal de 4 elementos.

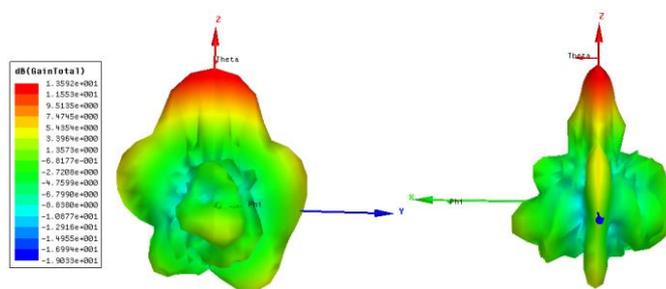


Figura B.5: Patrón de Radiación 3D del arreglo lineal de 4 elementos.

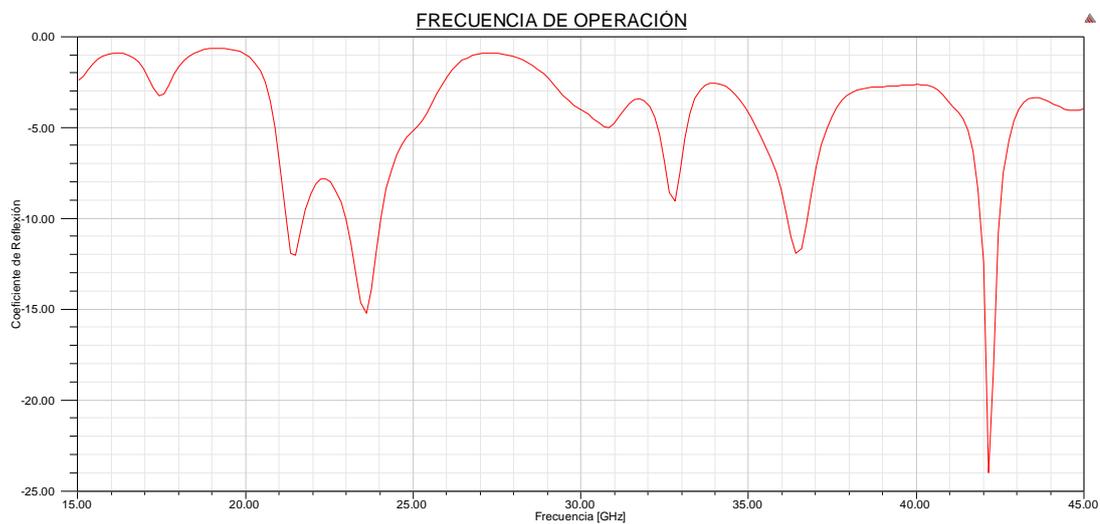


Figura B.6: Frecuencia de Operación del arreglo lineal de 4 elementos.

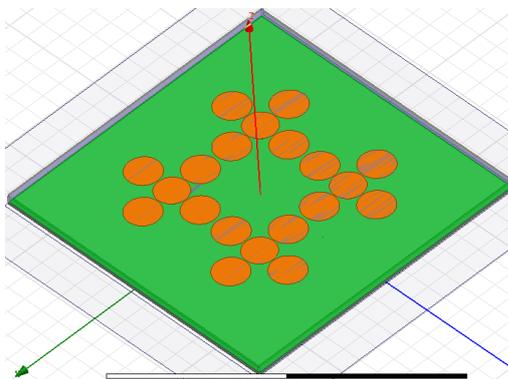


Figura B.7: Arreglo Plano de 4 (2x2) elementos

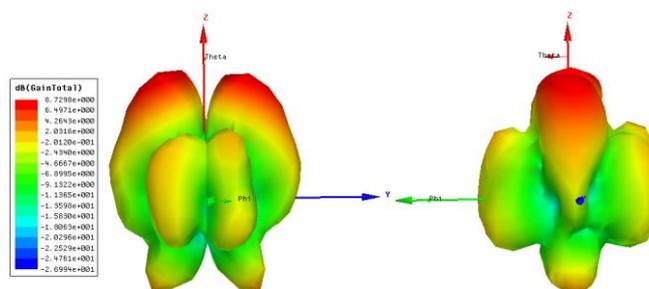


Figura B.8: Patrón de Radiación 3D del arreglo plano de 4 elementos.

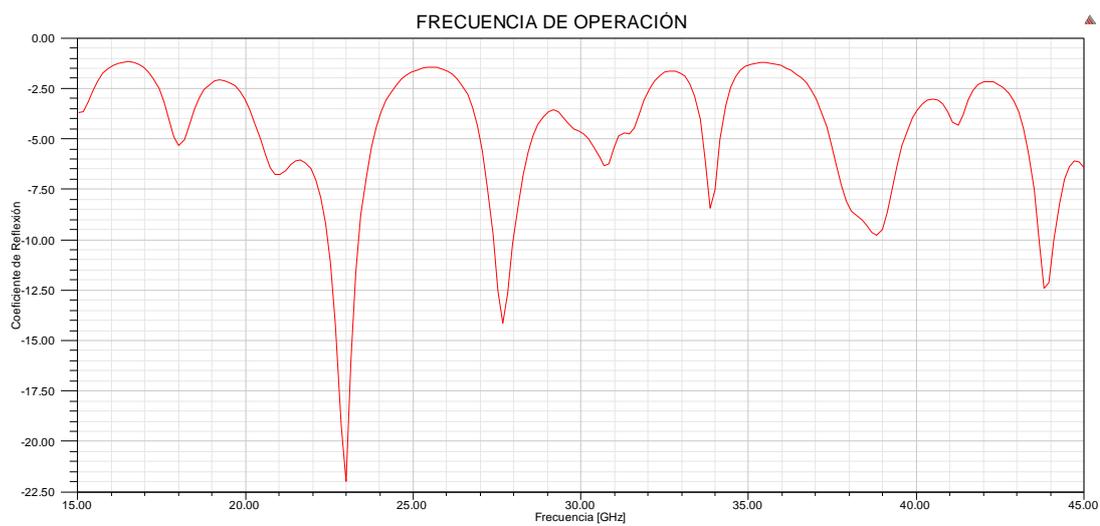


Figura B.9: Frecuencia de Operación del arreglo plano de 4 elementos.