

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE 3 ARREGLOS DE
ANTENAS CADA UNO CON 3 ELEMENTOS IGUALES TIPO
PARCHE RECTANGULAR, PARCHE CIRCULAR Y PARCHE TIPO
E COMO PARTE CONSTITUTIVA DE UN SISTEMA PARA EL
CÁLCULO DEL DoA A LA FRECUENCIA DE 1,85 GHz.**

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

ALEXIS FABRICIO QUISHPE COLIMBA

DIRECTOR: PABLO ANÍBAL LUPERA MORILLO

Quito, octubre 2021

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Alexis Fabricio Quishpe Colimba, bajo mi supervisión.

PhD. PABLO ANIBAL LUPERA MORILLO
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

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

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

Alexis Fabricio Quishpe Colimba

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación va dedicado con todo mi amor y cariño a mis padres, Juan Carlos y Gloria sin ellos y su enorme sacrificio nada de esto sería posible.

A mis amores Eydan y Katy que con su apoyo y cariño me han dado las fuerzas y ánimos para lograr este objetivo, por ser la inspiración en cada uno de mis pasos, y por la felicidad que me dan día a día.

A mi hermana Carlota por su compañía en las largas noches de estudio, espero poder ser un ejemplo para ella.

A mis amigos que me acompañaron en mi carrera, por su ayuda y apoyo, por los buenos y gratos momentos que pasamos juntos.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por estar conmigo en cada paso de mi vida y no abandonarme en los momentos más difíciles.

A mis padres Juan Carlos y Gloria, no tengo palabras para agradecerles las incontables veces que estuvieron a mi lado brindándome su ayuda, gracias infinitas por todo el esfuerzo y sacrificio, gracias por su apoyo en los momentos más difíciles de mi vida. Gracias por cultivar en mí valores y principios que los llevaré el resto de mi vida.

A mi pareja Katy por su apoyo incondicional, por inculcar en mí el espíritu de lucha para cumplir nuestros sueños sea cual sea la barrera, por su amor y respaldo para lograr mis objetivos y por estar conmigo desde siempre.

A la Escuela Politécnica Nacional por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

Al Dr. Pablo Lupera por su excelente trabajo como docente de la EPN, por su ayuda y asesoramiento en el presente trabajo de titulación, su experiencia y paciencia ha logrado en mí que pueda culminar este trabajo con éxito.

A mis amigos con los que compartí buenos y malos momentos en esta hermosa etapa, de una u otra manera formaron una parte muy importante para lograr mis objetivos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	1
1.2 ALCANCE	1
1.3 MARCO TEÓRICO	3
1.3.1 TEORÍA DE ANTENAS MICROSTRIP	3
1.3.2 TIPOS DE ANTENAS MICROSTRIP TIPO PARCHE.....	4
1.3.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ANTENAS MICROSTRIP.....	5
1.3.4 TIPOS DE ONDAS EN LAS LÍNEAS MICROSTRIP	13
1.3.5 SELECCIÓN DEL SUSTRATO.....	16
1.3.6 MÉTODOS DE ALIMENTACIÓN DE LAS ANTENAS MICROSTRIP	18
1.3.7 MODELO DE ANÁLISIS DE UNA ANTENA MICROSTRIP.....	22
1.3.8 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS ANTENAS MICROSTRIP.....	25
1.3.9 USOS COMUNES DE LAS ANTENAS MICROSTRIP	26
1.3.10 ARREGLO DE ANTENAS MICROSTRIP	35
1.3.11 PROCESO DE DISEÑO DE LA ANTENA PARCHE TIPO RECTANGULAR .	37
1.3.12 PROCESO DE DISEÑO DE LA ANTENA PARCHE TIPO E.....	38
1.3.13 PROCESO DE DISEÑO DE LA ANTENA PARCHE TIPO CIRCULAR	39
2. METODOLOGÍA.....	40
2.1. DISEÑO DEL ARREGLO CON EL PARCHE TIPO RECTANGULAR	40
2.1.1 DISEÑO DEL ELEMENTO BASE DEL ARREGLO	40
2.1.2 DISEÑO DEL ARREGLO LINEAL.....	42
2.1.3 DISEÑO DEL ELEMENTO RECTANGULAR DE REFERENCIA CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP	43
2.2. DISEÑO DEL ARREGLO CON EL PARCHE TIPO E.....	45
2.2.1 DISEÑO DEL ELEMENTO BASE E DEL ARREGLO.....	45

2.2.2	DISEÑO DEL ARREGLO LINEAL.....	46
2.2.3	DISEÑO DEL ELEMENTO BASE DEL ARREGLO CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP	46
2.3.	DISEÑO DEL ARREGLO CON EL PARCHE TIPO CIRCULAR	47
2.3.1	DISEÑO DEL ELEMENTO BASE DEL ARREGLO	48
2.3.2	DISEÑO DEL ARREGLO LINEAL.....	49
2.3.3	DISEÑO DEL ELEMENTO BASE CIRCULAR DEL ARREGLO CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP	49
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
3.1	SIMULACIÓN DEL ELEMENTO RECTANGULAR BASE DEL ARREGLO	52
3.1.1	SIMULACIÓN DE LOS ARREGLO LINEALES 1x3 y 3x1 CON EL PARCHE RECTANGULAR.....	56
3.2	SIMULACIÓN DEL ELEMENTO RECTANGULAR BASE DEL ARREGLO CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP	64
3.2.1	SIMULACIÓN DEL ARREGLO LINEAL 1x3 y 3x1 CON EL PARCHE RECTANGULAR Y LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP.	67
3.3	SIMULACIÓN DEL ELEMENTO E BASE DEL ARREGLO.....	76
3.3.1	SIMULACIÓN DEL ARREGLO LINEAL 1x3 y 3x1 CON EL PARCHE TIPO E. 78	
3.4	SIMULACIÓN DEL ELEMENTO E BASE DEL ARREGLO CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP.....	87
3.4.1	SIMULACIÓN DEL ARREGLO LINEAL TIPO E 1x3 y 3x1 CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP	89
3.5	SIMULACIÓN DEL ELEMENTO CIRCULAR BASE DEL ARREGLO	98
3.5.1	SIMULACIÓN DEL ARREGLO LINEAL 1x3 y 3x1 CON PARCHES CIRCULARES.....	100
3.6	SIMULACION DEL ELEMENTO CIRCULAR BASE DEL ARREGLO CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP.....	108
3.6.1	SIMULACIÓN DEL ARREGLO LINEAL CIRCULAR 1x3 y 3x1 CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP	111
3.7	DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ARREGLOS	120
3.8	CONSTRUCCIÓN DE LAS ANTENAS TIPO PARCHE.....	144
3.8.1	MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS ANTENAS.....	145
3.8.2	PASOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS ANTENAS	146
3.8.3	PUERTOS DE ALIMENTACIÓN.....	149
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	151
4.1.	CONCLUSIONES	151
4.2.	RECOMENDACIONES	153

5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	154
	ANEXOS.....	158

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se presenta el estudio, diseño, simulación y construcción de 3 arreglos de antenas cada uno con 3 elementos iguales tipo parche rectangular, parche circular y parche tipo E como parte constitutiva de un sistema para el cálculo del DoA a la frecuencia de 1.85 GHz.

En el Capítulo 1 se presenta la introducción, objetivos, así como también el alcance del trabajo, posteriormente se detalla el marco teórico, el cual contiene las características de las antenas microstrip, parámetros característicos de estas antenas y los procesos de diseño de cada antena estudiada en el proyecto.

En el capítulo 2 se detalla la metodología utilizada para diseñar los elementos base rectangular, tipo E y circular para formar los arreglos. Se empieza con el diseño del elemento base, para así obtener el diseño del arreglo 1x3 y 3x1 con cada una de las geometrías utilizadas. Además, se detalla el proceso de diseño de una línea de alimentación para cada geometría y de igual manera se diseñan los arreglos 1x3 y 3x1 de los elementos con línea de alimentación.

En el capítulo 3 se muestran las simulaciones de los elementos únicos con las 3 diferentes geometrías utilizadas haciendo uso del software ADS, así como también las simulaciones de los arreglos 1x3 y 3x1 con y sin línea de alimentación, además se presenta en detalle el análisis de resultados y el proceso de construcción de las antenas.

Finalmente, en el capítulo 4 se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo de titulación.

PALABRAS CLAVE: arreglos de antenas, parche rectangular, parche circular, parche tipo E, DoA, antenas microstrip, software ADS.

ABSTRACT

In this degree work, the study, design, simulation and construction of 3 antenna arrays each with 3 equal elements rectangular patch type, circular patch and E type patch are presented as a constitutive part of a system for calculating DoA at the same time at 1.85 GHz frequency.

Chapter 1 presents the introduction, objectives, as well as the scope of the work, later the theoretical framework is detailed, which contains the characteristics of the microstrip antennas, characteristic parameters of these antennas and the design processes of each antenna studied in this project.

Chapter 2 details the methodology used to design the rectangular base, E-type and circular elements to form the arrays. It begins with the design of the base element, in order to obtain the design of the 1x3 and 3x1 array with each of the geometries used. In addition, the design process of a power line for each geometry is detailed and the 1x3 and 3x1 arrays of the elements are designed with power line too.

Chapter 3 shows the simulations of the unique elements with the 3 different geometries used making use of the ADS software, as well as the simulations of the 1x3 and 3x1 arrays with and without power line, in addition, the analysis of results and the antenna construction process.

Finally, in chapter 4 the conclusions and recommendations of the degree work are presented.

KEYWORDS: antenna arrays, rectangular patch, circular patch, E type patch, DoA, microstrip antennas, ADS software.

1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presenta la teoría relacionada al proyecto, en donde se inicia con una breve descripción de la teoría básica, parámetros y características generales de las antenas microstrip, además, se revisan los métodos de diseño de los elementos radiantes utilizados en este proyecto, los cuales serán utilizados en el capítulo 2.

Finalmente, se muestran los usos más comunes de este tipo de antenas y los principales métodos para la detección del DoA en base a sistemas de antenas.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

- Implementar 3 arreglos de antenas, cada uno con 3 elementos iguales tipo parche rectangular, parche circular y parche tipo E, como parte constitutiva de un sistema para el cálculo del DoA a la frecuencia de 1,85 GHz.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Describir los fundamentos teóricos del cálculo del DoA, antenas con tecnología impresa y, además, se revisarán los métodos de diseño de elementos radiadores de 3 diferentes formas: rectangular, tipo E y circular.
- Diseñar una antena microstrip de forma rectangular, una antena microstrip en forma de E (E-shape) y una antena microstrip de forma circular para la frecuencia de 1,85 GHz.
- Simular en Advanced Design System (ADS) de KEYSIGHT y realizar las modificaciones necesarias a las agrupaciones de 3 parches rectangulares, 3 antenas de forma E y 3 parches circulares.
- Construir las antenas.

1.2 ALCANCE

En el presente trabajo de titulación se propone diseñar, simular y construir 3 arreglos de antenas diferentes, cada uno con elementos radiantes iguales para la frecuencia de 1,85 GHz con el objetivo de que sean probados para la detección del ángulo de arribo (DoA) en el proyecto de investigación PIS-18-06. Los sistemas de antenas estarán conformados por

los siguientes tipos de elementos radiantes: el primer sistema de parches rectangulares, el segundo sistema de parches en forma de E y el tercer sistema de parches circulares.

Como se indicó, la primera geometría de antena tipo parche será de forma rectangular, que es un modelo típico utilizado en la tecnología microstrip, al ser un modelo típico se dispone de diferentes estudios como en [1], para poder comparar sus características como directividad, ganancia y ancho de banda. En el segundo arreglo con geometría en forma de una letra E para los elementos se espera obtener un mejor rendimiento en parámetros eléctricos y de radiación, esto según [2], mediante la simulación de un arreglo con este tipo de antenas se determinará el ancho de banda y la ganancia del arreglo, estos resultados deberán ser analizados posteriormente para la aplicación específica. En cuanto a la geometría del tercer elemento de forma circular se indica que presenta atractivas características de radiación [1]. La tercera agrupación de antenas también se simulará con la finalidad de obtener sus características eléctricas y de radiación.

El diseño de las antenas se realizará de acuerdo a procedimientos ya establecidos. La simulación de cada uno de los elementos radiantes y de las agrupaciones de antenas se ejecutará mediante el software ADS de KEYSIGHT. Además, cuando se lo requiera se procederá con el diseño de la línea de alimentación para cada geometría con la finalidad de que cada uno de los elementos radiantes presente una impedancia de 50 Ohmios.

En primer lugar, la simulación consistirá en la obtención de los parámetros de un solo elemento de cada arreglo o agrupación, para después simular un conjunto de 3 antenas que conformarán el arreglo lineal 1x3 y arreglo lineal 3x1. Por ende, se obtendrán los parámetros eléctricos y de radiación de cada uno de los elementos que conforman el arreglo.

En este trabajo se obtendrán y presentarán las características de los 3 arreglos para que puedan ser analizadas en el proyecto de investigación PIS 18-06: "Evaluación del sistema MASSIVE MIMO para la detección de ángulo de llegada de señales incidentes en redes de comunicación móvil". Además, se construirán 9 antenas de tecnología impresa como producto final demostrable, de la siguiente manera:

- 3 antenas tipos parche rectangular.
- 3 antenas tipo parche en forma de E.
- 3 antenas tipo parche circular.

Las antenas se construirán con la inclusión de conectores SMA. Para que la construcción sea posible, se impondrá como requerimiento que la línea de alimentación tenga dimensiones mayores a 1[mm], ya que si la línea de alimentación es muy estrecha no disponemos del equipamiento para poder construir líneas tan delgadas. En el proyecto de investigación PIS 18-06 se dispone de los materiales para la construcción, entre los cuales se cuenta con el sustrato FR-4 Epoxi fibra de Vidrio, conectores SMA, cloruro férrico y papel termotransferible. No se realizará ningún proceso de caracterización del sustrato, sino que los parámetros utilizados en el diseño corresponderán a un material de características genéricas.

De existir problemas de acoplamiento en las antenas se indicará la impedancia de acuerdo a la simulación y quedará como parte del proyecto de investigación PIS 18-06 la construcción de algún circuito de acoplamiento. Finalmente, debido a que el consejo de educación superior considerando: que, a través de Decreto Ejecutivo No. 1017, del 16 de marzo de 2020, el presidente de la República del Ecuador decretó "(...) el estado de excepción por calamidad pública en todo el territorio nacional, por los casos de coronavirus confirmados y la declaratoria de pandemia de COVID-19 por parte de la Organización Mundial de la Salud, que representan un alto riesgo de contagio para toda la ciudadanía y generan afectación a los derechos a la salud y convivencia pacífica del Estado, a fin de controlar la situación de emergencia sanitaria para garantizar los derechos de las personas ante la inminente presencia del virus COVID-19 en Ecuador (...)"; [3] debemos subrayar que no se podrá hacer uso de laboratorios y equipos para realizar pruebas ni mediciones en este proyecto.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 TEORÍA DE ANTENAS MICROSTRIP

Inicialmente el concepto de antena microstrip fue propuesta por G.A Deschamps en el año de 1953, pero 20 años más tardes fue cuando Robert E. Munson y algunos de sus compañeros investigadores lo desarrollaron utilizando un sustrato con bajas pérdidas, este tipo de antenas también son conocidas como antenas tipo parche las cuales principalmente se utilizan a frecuencias microondas, por encima de 1 GHz [4].

Las antenas tipo parche con tecnología microstrip están compuestas por dos capas conductoras paralelas, separadas por un dieléctrico conocido como sustrato, la capa superior viene a ser el parche radiador al cual se le suministra cierta potencia para que pueda ser radiada, el plano inferior es conocido como plano de masa o plano de tierra [5].

En la Figura 1.1 se presenta la estructura de una antena microstrip tipo parche de forma rectangular.

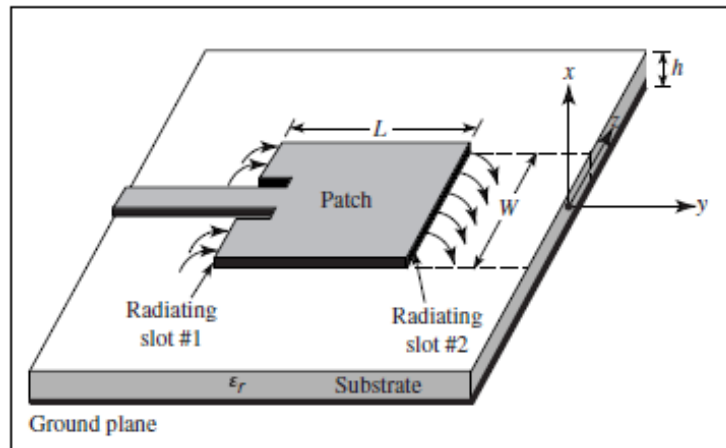


Figura 1.1. Antenas Microstrip tipo parche [1].

1.3.2 TIPOS DE ANTENAS MICROSTRIP TIPO PARCHES

Existen varias formas geométricas que puede tener el parche radiador, las formas más comunes se presentan en la Figura 1.2; sin embargo, se puede realizar cualquier tipo de geometría, esto varía de acuerdo a los requerimientos que se necesiten como, ancho de banda, frecuencia de operación, etc. El parche se caracteriza por ser de un material conductor generalmente de cobre u oro, debido a sus buenas características como baja resistividad, facilidad de soldadura y la capacidad de adherirse bien al sustrato [6].

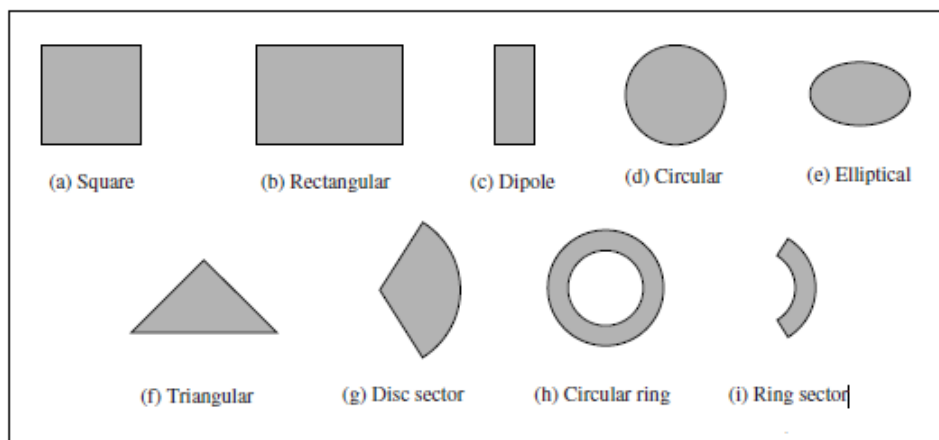


Figura 1.2. Diferentes formas de parches radiadores microstrip [1].

1.3.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ANTENAS MICROSTRIP

Las características generales de las antenas microstrip se las puede mostrar en base a sus parámetros como: impedancia, directividad, ganancia, eficiencia, VSWR, parámetros S, ancho de banda, patrón de radiación, los cuales se presentan a continuación.

1.3.3.1 Impedancia

La impedancia de entrada de la antena (Z_a) se define como la impedancia presentada por una antena en sus terminales o la relación de voltaje y corriente en un par de terminales, matemáticamente, la impedancia de entrada está dada por la Ecuación 1.1 [1].

$$Z_a = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_a + jX_a \quad (1.1)$$

Donde:

Z_a : impedancia de la antena.

R_a : resistencia de la antena en sus terminales.

X_a : reactancia de la antena en sus terminales.

Si la impedancia se denota en forma fasorial, se tendrá parte real y una parte imaginaria, las dos partes dependen de la frecuencia. Si en la impedancia no se presenta una parte reactiva o imaginaria a una frecuencia, es una antena resonante. [7]

Por otra parte, la resistencia de la antena (R_a) puede separarse en dos resistencias diferentes: [7]

$$R_a = R_r + R_l \quad (1.2)$$

Donde:

R_r : resistencia de radiación de la antena.

R_l : resistencia de pérdidas óhmicas de la antena.

Esto permite distinguir entre la potencia radiada por la antena (P_r) y la potencia disipada en forma de calor (P_l) como: [7]

$$Pa = Pr + Pl = I^2 * Rr + I^2 * Rl \quad (1.3)$$

Donde:

Pa : potencia entregada a la antena.

I : corriente de entrada a la antena.

1.3.3.2 Parámetros de dispersión (Parámetros S)

Los parámetros de dispersión también conocidos como parámetros S se encargan de describir el comportamiento de cualquier dispositivo de microondas [8]. Se basan en los niveles de potencia existentes en los puertos, según las ondas de tensión incidente a_n y reflejada b_n , ambas normalizadas a la impedancia del puerto correspondiente [8]. En la Figura 1.3 se observan las ondas incidentes que se consideran las entrantes al circuito, y las ondas reflejadas consideradas como las salientes del circuito [9].

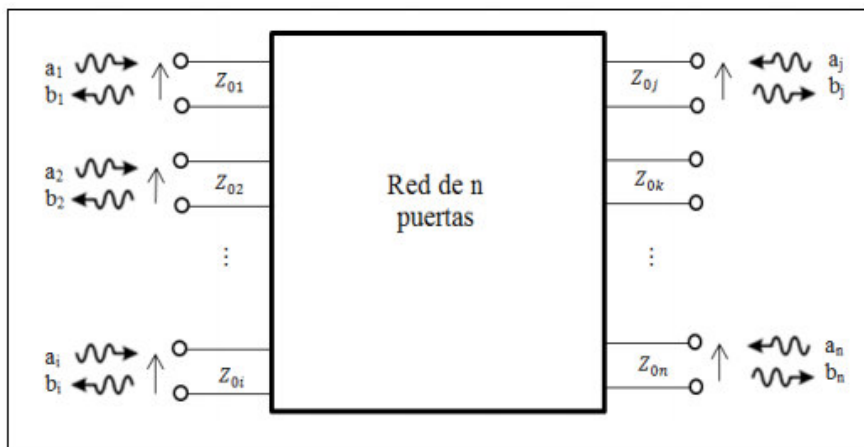


Figura 1.3. Diagrama de una red de n puertos [9].

Para calcular cada parámetro de dispersión S_{ij} es necesario colocar una carga con la impedancia característica en cada uno de los puertos a excepción del puerto i-ésimo, en el que se colocará un generador que produzca una onda incidente a_i [9].

$$S_{ji} = \left(\frac{b_j}{a_i} \right)_{a_j=0, \forall j \neq i} \quad (1.4)$$

Las antenas como circuitos microondas generalmente se representan como redes de un puerto, sin embargo, pueden caracterizarse como una red de dos puertos, donde uno de ellos es el puerto físico de entrada de la antena (típicamente de valor 50Ω) y el otro es un puerto físico de radiación [9]. En la Figura 1.4 se presenta el diagrama de una red de dos puertos.

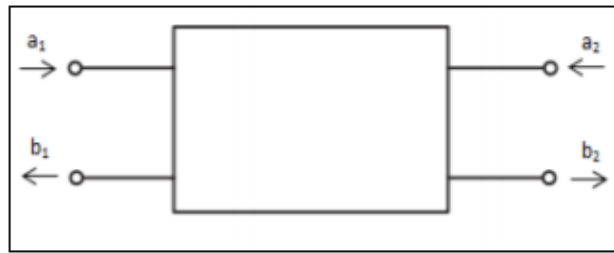


Figura 1.4. Diagrama de una red de 2 puertos [9].

Para el caso de la red de dos puertos, la relación entre onda incidente y onda reflejada según los parámetros S se presenta en la Ecuación 1.5 [9]:

$$b_1 = S_{11} \cdot a_1 + S_{12} \cdot a_2 \quad (1.5)$$

$$b_2 = S_{21} \cdot a_1 + S_{22} \cdot a_2$$

En la Figura 1.5 se presentan la descripción de los parámetros S de una red de dos puertos.

Parámetro	Coefficiente	Descripción	Fórmula
S11	Reflexión a la entrada	Potencia que se refleja en el puerto 1 cuando se genera una onda incidente en el puerto 1	$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right _{a_2=0}$
S12	Transmisión o ganancia inversa	Potencia que llega al puerto 1 cuando la red se alimenta por el puerto 2	$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right _{a_1=0}$
S21	Transmisión o ganancia directa	Potencia que llega al puerto 2 cuando la red se alimenta por el puerto 1	$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right _{a_2=0}$
S22	Reflexión a la salida	Potencia que se refleja en puerto 2 cuando se genera una onda incidente en dicho puerto	$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right _{a_1=0}$

Figura 1.5. Descripción de una red de 2 puertos [9].

A partir de estos parámetros S en una red de un puerto se pueden definir otros parámetros, como las pérdidas por retorno, cuyo cálculo se presenta con el Ecuación 1.6 [9].

$$\text{Pérdidas por retorno (dB)} = -20 \cdot \log_{10}(S_{ii}) \quad (1.6)$$

1.3.3.3 Relación de onda estacionaria.

La relación de onda estacionaria SWR (Standing Wave Ratio, en inglés) es la relación entre el máximo y mínimo de la onda estacionaria de tensión o de corriente que se crea en la salida de un generador. Para el caso específico de la relación en tensión, las siglas utilizadas son VSWR (Voltage Standing Wave Ratio). El parámetro VSWR está relacionado

con la adaptación de la antena, es decir con el coeficiente de reflexión de la siguiente manera [10]:

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad (1.7)$$

El coeficiente de reflexión de la antena con respecto a la línea de transmisión o generador se puede calcular como [10]:

$$S_{11} = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (1.8)$$

Donde Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión y Z_a la impedancia de entrada de la antena [10].

1.3.3.4 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación es la representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena en función de las distintas direcciones del espacio a una distancia fija. Comúnmente, se utilizan las coordenadas esféricas [7].

Con la antena ubicada en el punto de origen del sistema de coordenadas esféricas, y manteniendo constante la distancia se expresará el campo eléctrico en función de las variables angulares (θ, ϕ) . Como el campo magnético se deriva directamente del campo eléctrico, la representación podría realizarse a partir de cualquiera de los dos campos, siendo una norma habitual o común que los diagramas se refieran al campo eléctrico [7].

Cuando se habla de un patrón de radiación tridimensional existen dos planos sobre los que se grafican los puntos correspondientes a la energía radiada de la antena: el plano Azimutal y el plano de elevación. El plano Azimutal es aquel que está en función del ángulo ϕ ($f(\phi)$) y puede verse como un plano horizontal, mientras que el plano de elevación es aquel que está en función del ángulo θ ($g(\theta)$) y puede verse como un plano vertical [1][11].

En la Figura 1.6 se presentan las dimensiones para considerar el patrón de radiación de una antena (coordenadas esféricas): el radio donde se mide la radiación (r), el diferencial del plano azimutal ($d\phi$), el diferencial del plano de elevación ($d\theta$), el diferencial del área esférica (dA), así como los vectores unitarios de las coordenadas esféricas ($\hat{a}_r, \hat{a}_\phi, \hat{a}_\theta$) [1][11].

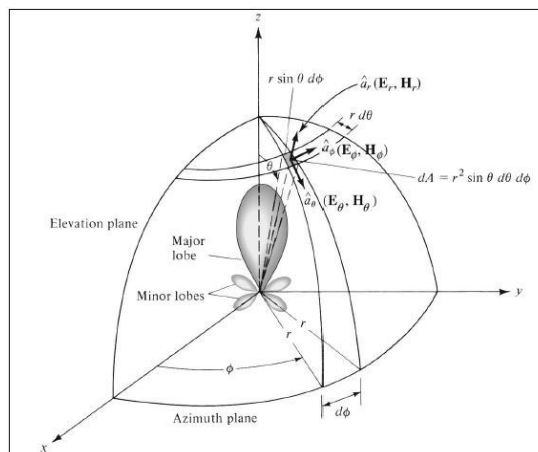


Figura 1.6. Patrón de radiación tridimensional [1].

Si bien el diagrama tridimensional resulta útil, también se puede realizar cortes bidimensionales del diagrama y se pueden representar en coordenadas polares o cartesianas. En la Figura 1.7 a el ángulo en el diagrama polar representa la dirección del espacio, mientras que el radio representa la intensidad del campo eléctrico o la densidad de potencia radiada. En la Figura 1.7 b se representa el ángulo en el eje de las abscisas y el campo o la densidad de potencia en el eje de las ordenadas [7].

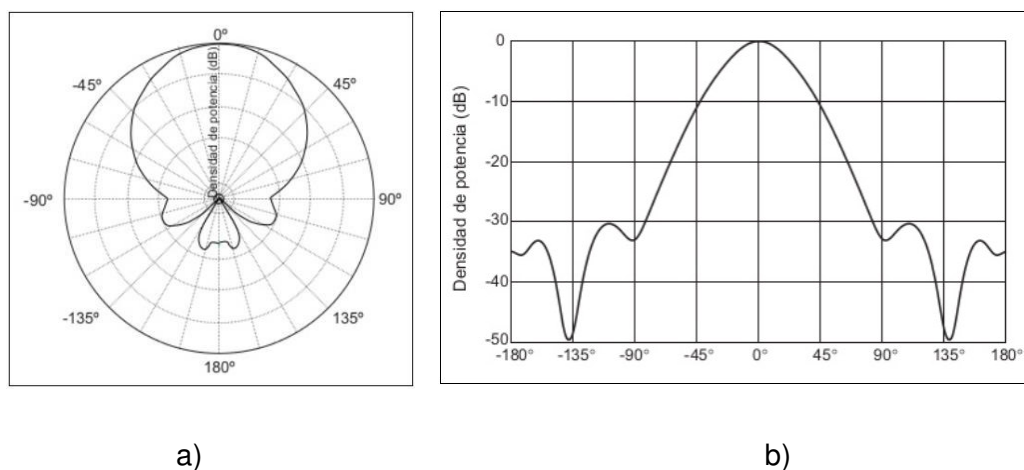


Figura 1.7 Diagrama de radiación: a) coordenadas polares, b) coordenadas cartesianas [7].

Las características principales que se pueden extraer de un diagrama de radiación son: lóbulo principal, lóbulos secundarios, lóbulos laterales, ancho de haz.

1.3.3.5 Intensidad de radiación

La intensidad de radiación se la puede definir como “la potencia radiada por una antena por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección”, sus unidades son vatios por

estereorradián y tiene la propiedad de ser independiente de la distancia a la que se encuentre la antena [7].

$$U = r^2 W_{rad} \quad (1.9)$$

Donde:

U es la intensidad de radiación ($W/\text{unidad de ángulo sólido}$)

r es el radio.

W_{rad} es la densidad de radiación (W/m^2).

1.3.3.6 Directividad y Ganancia.

La directividad se define como “la razón entre la intensidad de radiación en una dirección (U) y la intensidad de radiación promedio en todas las direcciones (U_0)” [1]. Este parámetro es adimensional o se lo mide en dBi cuando se lo expresa con relación al elemento isotrópico [1].

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi \cdot U}{P_{rad}} \quad (1.10)$$

En dBi se lo expresa de la siguiente manera:

$$D(\text{dBi}) = 10 \log_{10} D \quad (1.11)$$

Para hablar de la máxima directividad de una antena se relaciona a la dirección de máxima radiación y se expresa de la siguiente manera [1]:

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi \cdot U_{max}}{P_{rad}} \quad (1.12)$$

La definición de ganancia es similar a la de la directividad, pero la comparación no se establece con la potencia radiada, sino con la potencia entregada a la antena. Esto permite tener en cuenta las posibles pérdidas de la antena, ya que no toda la potencia entregada a la antena es radiada al espacio. La ganancia y la directividad están relacionadas, en consecuencia, por la eficiencia de la antena [7].

$$G = 4\pi \cdot \frac{\text{intensidad de radiación}}{\text{potencia de entrada(aceptada)}} = \frac{4\pi \cdot U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (1.13)$$

Como la eficiencia se relaciona con la potencia radiada y la potencia entregada de la siguiente manera:

$$P_{rad} = \eta \cdot P_{in} \quad (1.14)$$

Entonces la directividad y la ganancia se relacionan así [1]:

$$G_{(\theta, \phi)} = \eta \cdot D_{(\theta, \phi)} \quad (1.15)$$

Si la antena no posee pérdidas, ambos parámetros son equivalentes [1]. La ganancia se la puede medir en dBd¹.

1.3.3.7 Ancho de banda

El ancho de banda se define como un rango de frecuencias en donde se cumplen características deseadas como: una buena adaptación de impedancia con respecto a una determinada impedancia de referencia, ganancia, directividad, etc [12].

El ancho de banda (Band Width) puede ser calculado con la Ecuación 1.16 en forma de porcentaje de la siguiente manera [13]:

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_o} \quad (1.16)$$

Donde:

f_{max} : frecuencia máxima.

f_{min} : frecuencia mínima.

f_o : frecuencia central o frecuencia de resonancia.

Aunque esta expresión podría expresarse a veces como: $f_{max} - f_{min}$.

El ancho de banda de una antena microstrip oscilará entre el 2 % y 5 % de su frecuencia de resonancia, tomando en cuenta que en este tipo de antenas se depende mucho del sustrato empleado y de su grosor [13].

¹ dBd: medida de potencia que se lo expresa con respecto a un dipolo de media onda.

1.3.3.8 Polarización

La polarización es la curva trazada por el extremo de la flecha o vector que representa el campo eléctrico instantáneo en un punto de observación dado en función del tiempo. El campo debe ser observado a lo largo de la dirección de propagación [14], en la Figura 1.8 se presenta un trazado típico en función del tiempo [1].

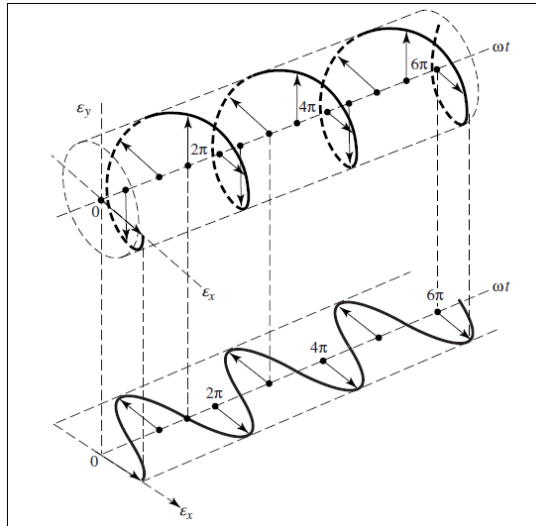


Figura 1.8 Rotación de una onda [1].

Existen tres tipos de polarizaciones: lineal, circular y elíptica.

Polarización lineal: Si el vector que describe el campo eléctrico en un punto del espacio en función del tiempo está siempre dirigido a lo largo de una línea, que es normal a la dirección de propagación, se dice que el campo está linealmente polarizado [14].

Polarización circular: Si el campo que se proyecta sobre el plano del observador se mueve sobre una circunferencia se trata de la polarización circular. En función del sentido de giro puede ser polarización circular a la derecha o a la izquierda [14].

Polarización elíptica: Se tiene si el campo que se proyecta sobre el plano del observador se mueve sobre una elipse. En función del sentido de giro puede ser polarización elíptica a la derecha o a la izquierda. [14].

En la Figura 1.9 se presentan los tipos de polarización del vector campo eléctrico.

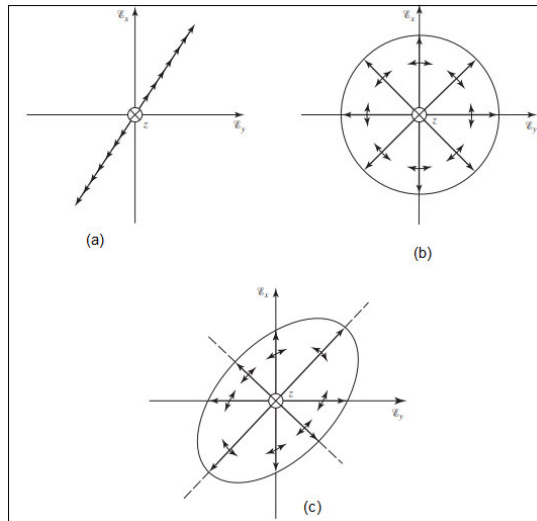


Figura 1.9 Polarización de un extremo del campo eléctrico en función del tiempo para una posición fija: (a) Lineal, (b) Circular, (c) Elíptica [14].

1.3.3.9 Factor de calidad (Q)

Este parámetro representa la relación entre la energía almacenada y la potencia consumida por la antena expresado en la ecuación (1.17). Este factor representa las pérdidas de radiación, dieléctrico de la antena y conducción, por lo que cuando el factor de calidad disminuye el ancho de banda también disminuye [1].

$$Q = \frac{2\pi * \text{energía almacenada}}{\text{Pérdida de energía por ciclo}} \quad (1.17)$$

1.3.4 TIPOS DE ONDAS EN LAS LÍNEAS MICROSTRIP

Existen 4 tipos de ondas en la tecnología microstrip, a continuación, se presenta una breve descripción de cada una [15]:

Ondas espaciales: son las ondas que son enviadas al espacio libre con ángulos de elevación de entre 0 y $\frac{\pi}{2}$ y conforme se distancian del origen estas ondas se atenúan. Al hablar de antenas estas representan las ondas radiadas y en líneas de transmisión representan pérdidas [15]. En la Figura 1.10 se presenta el tipo de onda espacial.

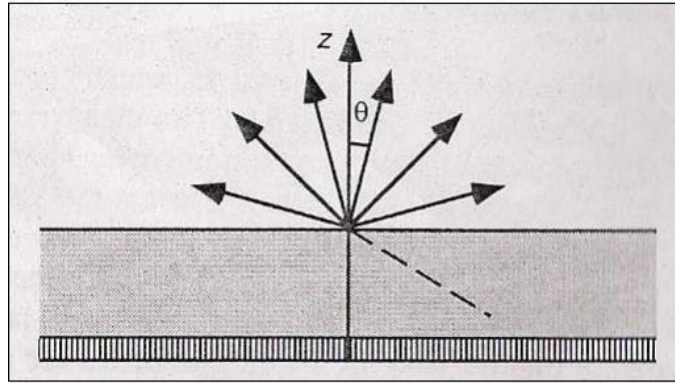


Figura 1.10. Ondas espaciales [15].

Ondas Superficiales: este tipo de ondas toman una dirección de propagación descendente, al encontrarse con el plano inferior (plano de tierra) se reflejan quedando confinadas dentro del material dieléctrico, este tipo de ondas pueden tomar parte de la energía de la señal enviada con lo cual se incrementan las pérdidas y se reduce la eficiencia [15]. Cuando este tipo de ondas confinadas en el dieléctrico llegan a la frontera de la estructura microstrip, las ondas se difractan por los extremos del sustrato y pueden afectar al patrón de radiación creando lóbulos laterales, así como también la polarización puede ser alterada; debido a esto es necesario minimizar este tipo de ondas [15]. En la Figura 1.11 se presenta el tipo de onda superficial.

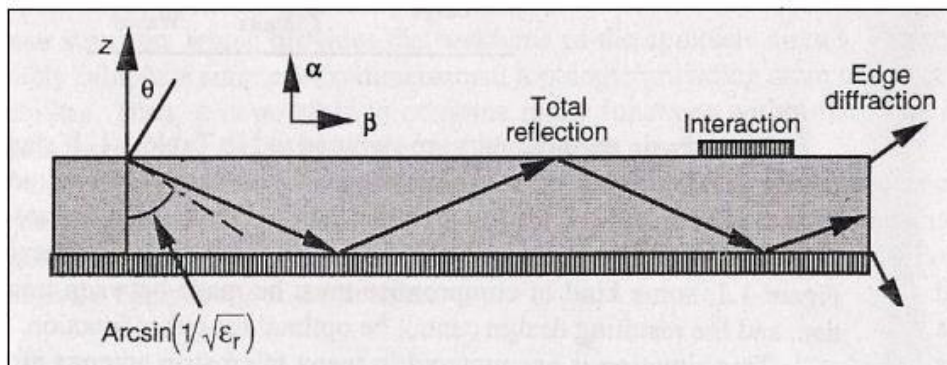


Figura 1.11. Ondas superficiales [15].

En la figura 1.11 se observa que el ángulo de elevación (θ)², está limitado en el rango de:

$$\frac{\pi}{2} < \theta < \pi - \sin^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}\right) \quad [6].$$

² Ángulo con el que la onda se dirige al plano de tierra.

Ondas de fuga: este tipo de ondas son parecidas a las ondas superficiales con la diferencia de que cuando la onda alcanza la cara superior del sustrato y el espacio libre una parte de la onda se refleja hacia el plano de tierra y una parte de la onda se fuga o sale al espacio, las ondas que quedan dentro del sustrato decrecen con la distancia hasta desaparecer [15]. En la Figura 1.12 se presenta el tipo de onda de fuga.

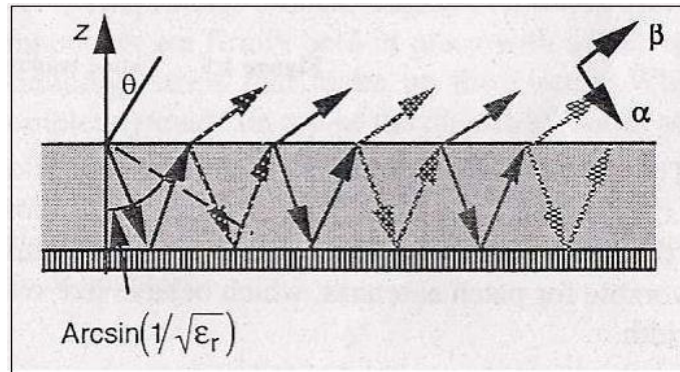


Figura 1.12. Ondas de fuga [15].

En la figura 1.12 se observa que el ángulo de elevación (θ), está limitado en el rango de:
 $\pi - \sin^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}\right) < \theta < \pi$ [6].

Ondas de guía: este tipo de ondas aparecen cuando la parte superior del sustrato se encuentra metalizado en su totalidad, se presentan para valores específicos del ángulo de incidencia, las cuales viajan entre el plano de tierra y la parte superior metalizada, esta estructura no es utilizada para aplicaciones de antenas [11]. En la Figura 1.13 se presenta el tipo de onda de guía.

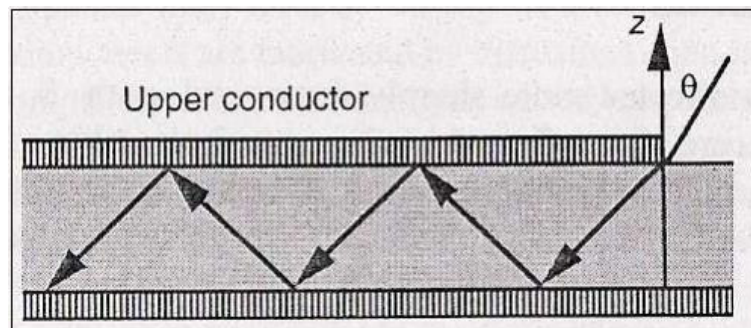


Figura 1.13. Ondas de guía [15].

1.3.5 SELECCIÓN DEL SUSTRATO

1.3.5.1 Influencia del sustrato

Como se indicó en la sección 1.3.1 existe una lámina dieléctrica que separa el parche radiador y el plano de tierra denominado sustrato. Existen numerosos tipos de sustratos que pueden utilizarse para el diseño de antenas microstrip, cuyas constantes dieléctricas suelen estar en el rango de $2.2 < \epsilon_r < 12$ [1]. Los sustratos gruesos (h) son los más deseables cuya constante dieléctrica se encuentra en el extremo inferior del rango debido a que proporcionan una mejor eficiencia, un mayor ancho de banda, campos poco ligados para la radiación hacia el espacio, pero acosta de un mayor tamaño de los elementos [1].

En cambio, los sustratos delgados con constantes dieléctricas más altas son deseables para los circuitos de microondas debido a que requieren campos estrechamente ligados para minimizar la radiación y el acoplamiento no deseado, además permiten reducir el tamaño de los elementos, sin embargo, debido a sus mayores pérdidas, son menos eficientes y presentan menores valores en sus anchos de banda [1].

1.3.5.2 Constante dieléctrica

El efecto de la constante dieléctrica se manifiesta en la capacidad total de un capacitor, se observa que cuando entre los conductores cargados o paredes que la forman se inserta un material dieléctrico diferente al aire (cuya permitividad es prácticamente la del vacío) la capacidad de almacenamiento de la carga del condensador aumenta. De hecho, la relación entre la capacidad inicial C_i y la capacidad final C_f viene dada por la constante dieléctrica [13] [16].

$$k = \frac{C_i}{C_f} = \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1.18)$$

Donde:

k : Constante dieléctrica igual a ϵ_r .

ϵ : Permitividad eléctrica absoluta del dieléctrico que se inserta.

ϵ_0 : Permitividad eléctrica del vacío.

C_f : Capacidad final de un capacitor.

C_i : Capacidad inicial de un capacitor.

1.3.5.3 Tangente de pérdidas

La tangente de pérdidas está definida como el inverso del factor de calidad [13] [16], en la Ecuación 1.19 se presenta su expresión:

$$\tan(\delta) = \frac{1}{Q} \quad (1.19)$$

Donde:

Q : Factor de calidad.

Además, como se observa en la ecuación 1.18 se muestra la permitividad relativa, como los materiales presentan algunas pérdidas, el valor ε_r se mostrará como un número complejo como se presenta en la ecuación 1.20 [13].

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (1.20)$$

Donde:

ε_r' : representa cuanta energía de un campo eléctrico externa se almacena en el material.

ε_r'' : representa cuanta energía pierde un material expuesto a un campo externo.

La relación entre estas dos magnitudes contiene información del dieléctrico por lo que se puede definir al valor de tangente de pérdidas con la ecuación 1.21 de la siguiente manera [13]:

$$\tan(\delta) = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (1.21)$$

Al ser ε_r un valor complejo se lo puede representar mediante vectores como se muestra en la figura 1.14, en donde se representa las pérdidas por el material o la tangente de pérdidas [14].

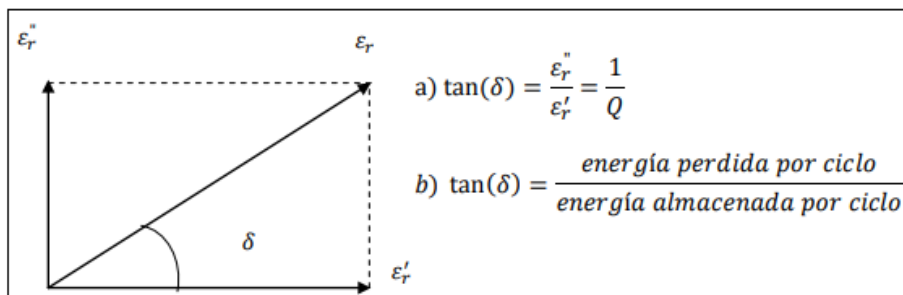


Figura 1.14. Diagrama vectorial de la constante eléctrica [14].

Donde:

δ : representa el ángulo entre los vectores ϵ_r y ϵ_r' .

1.3.5.4 Sustrato FR4

En el presente proyecto se utilizó como sustrato el material Epoxi Fibra de Vidrio (FR4) debido a sus características como: constante dieléctrica de bajo valor ($\epsilon_r = 4.4$), con el cual se garantiza un mejor funcionamiento de la antena en cuanto a eficiencia, buena resistencia a la temperatura, bajo peso y facilidad de mecanización. Este tipo de sustrato tiene un espesor de 1.5mm, valor muy bajo, que influirá directamente en el ancho de banda de la antena. Este punto es crítico, ya que si se desea aumentar el ancho de banda se deberán utilizar sustratos con el espesor más grande, por lo cual se optó por probar diferentes geometrías del parche radiador [17].

En la Tabla 1.1 se presentan las propiedades de algunos tipos de sustratos.

Tabla1.1 Propiedades de los sustratos [13] [16].

Sustrato	Constante Dieléctrica (ϵ_r)	Pérdidas: $\tan(\delta)$
Epoxy fibra de vidrio FR-4	4.4	0.01
RohacellFoam	1.07	0.001
Honeycomb	1.02	<0.0001
Kapton	3.5	0.002
RT Duroid 5880 (Teflón + glassfiber)	2.2	0.0009
Óxidos de Titanato de bario Ceramicdielectrics	>80	0.01

1.3.6 MÉTODOS DE ALIMENTACIÓN DE LAS ANTENAS MICROSTRIP

Los métodos de alimentación en las antenas Microstrip es un tema importante debido a que así se obtiene un diseño perfecto del parche radiador; sin una alimentación adecuada no se logrará obtener la eficiencia deseada de las antenas [18]. Existen diferentes métodos para alimentar una antena microstrip, a continuación, se presentan los métodos más populares.

1.3.6.1 Alimentación directa

A este método también se lo conoce como método con contacto, el cual consiste en que hay contacto directo entre la línea de alimentación y el parche radiador [19]. Entre los métodos de alimentación directa o alimentación de contacto se tiene 2 tipos [19]:

- **Alimentación por línea microstrip:** Este método de alimentación es muy utilizado debido a su facilidad en diseño, análisis y fabricación [18]. Consiste en conectar una línea conductora directamente al borde del parche microstrip, la línea de alimentación es más angosta en comparación con el parche debido a que se tiene que comportar como línea de alimentación y no como un elemento radiador, además este tipo de alimentación utiliza el mismo sustrato para proporcionar una estructura plana [19].

Existen dos formas de alimentar una antena por medio de una línea microstrip: conectando directamente en el borde de la antena o alimentando la línea microstrip por medio de inserciones en la antena. En el caso de la conexión directa en el borde de la antena, la variación en la posición de la línea microstrip en relación con el parche generará un mayor o mejor acoplamiento de impedancia. En el caso de la alimentación con microstrip por medio de inserciones, la profundidad de la inserción es la que dicta el acoplamiento de la impedancia [11]. En la Figura 1.15 se presentan los dos tipos de alimentaciones.

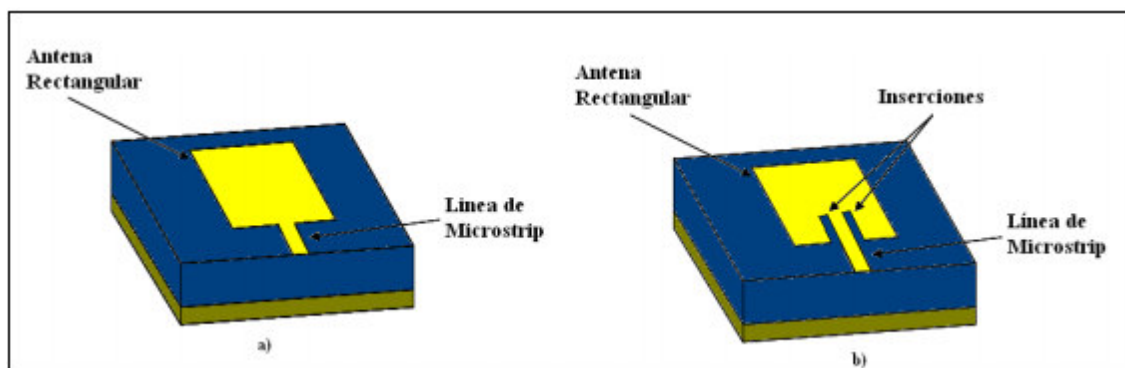


Figura 1.15. Alimentación por línea microstrip: a) Conexión directa a la línea microstrip, b) Conexión de línea microstrip con inserciones [11].

La impedancia Z_o de la línea microstrip viene dada por su ancho W_T y el grosor del dieléctrico de la siguiente manera:

Cuando $\frac{W_T}{h} < 1$, la impedancia característica de la línea es [20]:

$$Z_o = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{8d}{W_T} + \frac{W_T}{4d} \right) > \frac{126}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.22)$$

Cuando $\frac{W_T}{h} > 1$, la impedancia de la línea es [20]:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r} \left(\frac{W_T}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_T}{d} + 1.44 \right) \right)} \quad (1.23)$$

Una desventaja de utilizar este método es que a medida que aumenta el grosor del sustrato, se incrementan las ondas superficiales en la línea de alimentación lo que afecta a la eficiencia del parche radiador, y además limita el ancho de banda (normalmente 2-5%) [1].

- **Alimentación por sonda coaxial:** Este método consiste en conectar el conductor interno del conector coaxial al parche radiador, atravesándolo por todo el dieléctrico, mientras que el conductor exterior se conecta al plano de tierra de la antena. La ventaja en este tipo de alimentación es que se puede colocar en cualquier lugar deseado dentro del parche para adaptarse a su impedancia de entrada. Sin embargo, su mayor inconveniente es que proporciona un estrecho ancho de banda y es difícil de modelar, ya que hay que hacer un agujero perforado en el sustrato y el conector sobresale fuera del plano de tierra, por lo que no es completamente planar para sustratos gruesos [19]. En la Figura 1.16 se presenta el tipo de alimentación mencionado

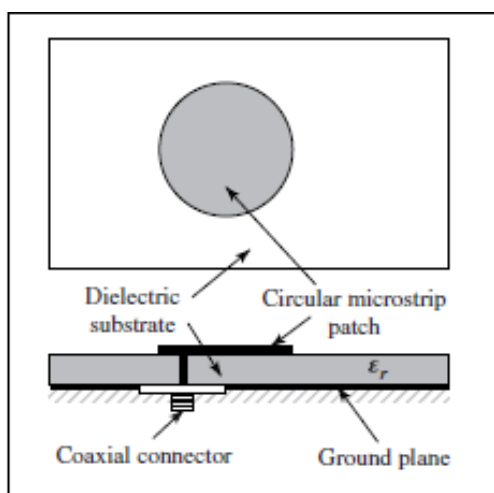


Figura 1.16. Alimentación por sonda coaxial [1].

1.3.6.2 Alimentación por proximidad

El acoplamiento de proximidad utiliza dos sustratos de permitividades ϵ_{r1} y ϵ_{r2} . El parche radiador se ubica en la parte superior, el plano de tierra en la parte inferior y una línea microstrip se conecta a la fuente de alimentación y se extiende entre los dos sustratos como se muestra en la Figura 1.17. Este tipo de alimentación se conoce también como

"alimentación microstrip acoplada electromagnéticamente", debido a que no se tiene contacto físico entre la línea de alimentación y el parche radiador [18].

Este esquema también permite elegir entre dos medios dieléctricos diferentes, uno para el parche y otro para la línea de alimentación para optimizar el rendimiento individual [1] [19].

Para optimizar las características de la antena se debe tener en cuenta que el sustrato del radiador debe ser de mayor grosor y con baja permitividad eléctrica y el sustrato de la alimentación debe ser de menor grosor y mayor permitividad eléctrica [1] [16].

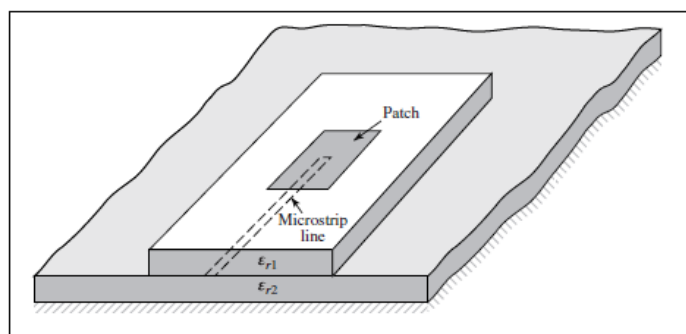


Figura 1.17. Alimentación por proximidad [1].

1.3.6.3 Alimentación por apertura

En la Figura 1.18 se presenta el acoplamiento de apertura, el cual consiste en dos sustratos separados por un plano de tierra. En la parte inferior del sustrato inferior hay una línea de alimentación microstrip, cuya energía se acopla al parche radiador a través de una ranura rectangular o circular en el plano de tierra que separa los dos sustratos. Normalmente, la adaptación se realiza controlando la anchura de la línea de alimentación y la longitud de la ranura [1] [18].

La alimentación por apertura es atractiva debido a las ventajas como la ausencia de contacto físico entre el alimentador y el radiador, anchos de banda más amplios y un mejor aislamiento entre la antena y la red de alimentación. Además, este tipo de alimentación permite la optimización independiente de las antenas y las redes de alimentación utilizando sustratos de diferentes espesores y permitividades [19].

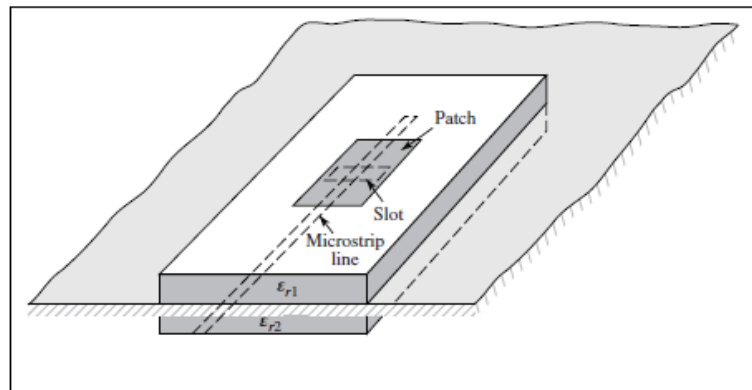


Figura 1.18. Alimentación por apertura [1].

1.3.7 MODELO DE ANÁLISIS DE UNA ANTENA MICROSTRIP

Existen varios métodos de análisis de una antena microstrip dependiendo la precisión y sencillez que se busque. Estos se clasifican en categorías: modelos empíricos, modelos semi-empíricos, modelos de onda completa y de línea de transmisión [11] [21].

1.3.7.1 Modelo empírico, semi-empírico y de onda completa

- **Modelo empírico:** este tipo de modelo es el menos preciso al momento de diseñar, pero a su vez el más sencillo de realizar. Se basa en la suposición de conceptos y estructuras de forma general sin tomar en cuenta las consideraciones de irregularidades en parámetros [11] [21]. Además, este tipo de modelo tiene buen nivel de precisión cuando se trabaja en rangos de frecuencias menores a los de las ondas milimétricas ($f < 30\text{GHz}$), pero en frecuencia mayores al rango se presentan imprecisiones por lo que es necesario utilizar otros modelos [11] [21].

Los 2 principales modelos empíricos son: modelos de línea de transmisión y modelo de cavidad.

- **Modelo semi-empírico:** estos modelos ocupan un lugar intermedio entre los modelos empíricos y los modelos de onda completa, lo mismo ocurre con su precisión y dificultad [11].

Entre los principales modelos tenemos: enfoque variacional, enfoque variacional generalizado, enfoque de ecuación integral dual, modelo de corriente superficial eléctrica, técnica de la transformada de Hankel, método de reciprocidad y técnica de condición de frontera de borde generalizada (GEBC) [11].

- Modelo de onda completa: estos modelos son los más precisos y complicados al momento de diseñar debido a su alto costo computacional que se necesita para llevar a cabo, entre los principales modelos de onda completa se pueden mencionar: método de momentos en el dominio del espacio, método de momentos en el dominio espectral, análisis en el dominio de la transformada, método de estados finitos (FEM), enfoque de ecuación integral potencial mixto (MPIE), técnica de la transformada rápida de Fourier en conjugado-gradiente (CGFFT) [11].

En este proyecto se utilizó el modelo de línea de transmisión con una aproximación rápida que se complementará con el software Advanced Design System (ADS) de KEYSIGHT.

1.3.7.2 Modelo de línea de transmisión

Este modelo se basa en considerar los bordes de la antena tipo parche como aperturas de dimensiones $W \times \Delta L$ que radian campos electromagnéticos. La longitud L del parche se elige para que la radiación de ambas aperturas se sume en fase, en donde $L = \lambda_g/2$ [21].

En la Figura 1.19 se presentan las dimensiones de la antena tipo parche rectangular.

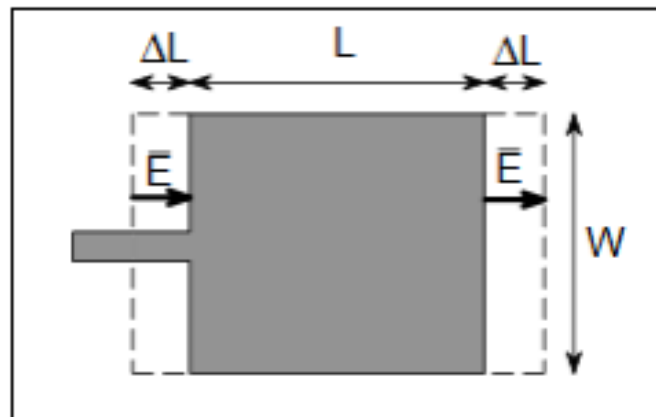


Figura 1.19. Dimensiones de antena tipo parche rectangular [21].

El circuito equivalente de este modelo considera las aperturas como admitancias complejas compuestas por una conductancia G , y una susceptancia B en paralelo [11] [21].

³ Longitud de onda de la microcinta o parche microstrip en función de la longitud de onda en el espacio libre, se la representa de la siguiente manera: $\lambda_g = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_r}}$.

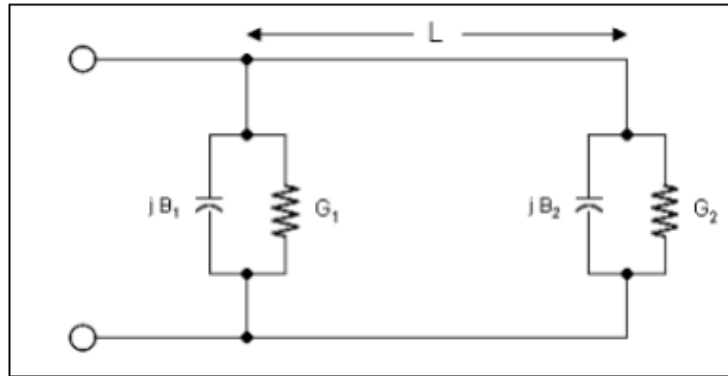


Figura 1.20. Circuito equivalente del modelo de línea de transmisión [21].

La distribución de campo electromagnético en los bordes de una antena tipo parche presenta fringing effects que forman líneas de radiación como se presenta en la Figura 1.21.

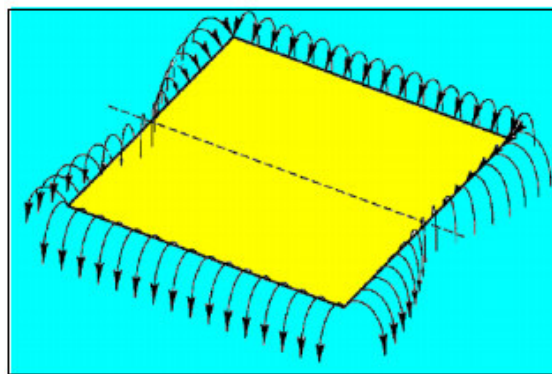


Figura 1.21. Fringing Effects o efecto de borde en una antena tipo parche [21].

Los fringing effects dependen de la frecuencia de trabajo y del sustrato dieléctrico utilizado y provocan que las dimensiones efectivas de una antena tipo parche no coincidan con las dimensiones físicas. Además, como los fringing effects están presentes en dos medios diferentes en una antena microstrip (aire y sustrato dieléctrico) la distribución de los campos serán diferentes y habrá que suponer una permitividad eléctrica relativa ϵ_{reff} que combine las permitividades eléctricas de ambos medios y así poder asumir que la antena se encuentra en un único medio con dicha permitividad eléctrica [11] [21]. Después de estas consideraciones en la sección 1.3.11 del presente trabajo se detallará y utilizará este método para el diseño del parche rectangular, el cual es el más sencillo de todos y ofrece una buena visión física.

1.3.8 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS ANTENAS MICROSTRIP

Las antenas microstrip presentan varias ventajas y desventajas en comparación con antenas microondas convencionales, por lo que muchas aplicaciones cubren el amplio rango de frecuencias de 100 MHz a 100 GHz. Entre las principales ventajas de las antenas microstrip en comparación con las antenas de microondas convencionales se tienen las siguientes [22]:

- Peso ligero, bajo volumen y configuraciones de perfil delgado.
- Se pueden fabricar fácilmente en serie.
- Las polarizaciones lineales y circulares son posibles.
- Pueden integrarse fácilmente con circuitos integrados de microondas.
- Las líneas de alimentación y las redes de adaptación pueden fabricarse simultáneamente con la estructura de la antena.
- Se pueden obtener múltiples resonancias.

Sin embargo, las antenas microstrip también tienen algunas limitaciones en comparación con las antenas de microondas convencionales como [22]:

- Estrecho ancho de banda y problemas de tolerancia⁴ asociados.
- Ganancias bajas (≈ 6 dBi).
- Grandes pérdidas óhmicas en la estructura de alimentación de los arrays.
- Estructuras de alimentación complejas necesarias para los arrays de alto rendimiento.
- La pureza de las polarizaciones es difícil de conseguir.
- Radiación extraña procedente de la alimentación y los empalmes.
- Menor capacidad de manejo de potencia (≈ 10 W).
- Reducción de la ganancia y de la eficiencia, así como valores inaceptables de acoplamiento mutuo en un entorno de conjunto a altas frecuencias.
- Excitación de las ondas superficiales.

⁴ Se refiere a que la tolerancia en la fabricación de antenas microstrip es crítica.

- Se prefieren las antenas microstrip fabricadas en un sustrato con una constante dieléctrica elevada para facilitar la integración con los circuitos de entrada y salida de RF MMIC⁵. Sin embargo, el uso de un sustrato de alta constante dieléctrica conduce a una eficiencia pobre y a un ancho de banda estrecho.

Hay formas de minimizar el efecto de algunas de estas limitaciones. Por ejemplo, el ancho de banda puede aumentarse hasta más del 60 % utilizando técnicas especiales⁶, y las limitaciones de menor ganancia y manejo de potencia pueden superarse mediante una configuración de matriz. Las limitaciones asociadas a las ondas superficiales, como la escasa eficiencia, el aumento del acoplamiento mutuo, la reducción de la ganancia y la degradación del patrón de radiación, pueden superarse mediante el uso de estructuras fotónicas de banda estrecha⁷ [22].

1.3.9 USOS COMUNES DE LAS ANTENAS MICROSTRIP

Para muchas aplicaciones, las ventajas de las antenas microstrip superan con creces sus limitaciones. Inicialmente, las antenas microstrip encontraron amplias aplicaciones en sistemas militares como misiles, cohetes, aviones y satélites. En la actualidad, estas antenas se utilizan cada vez más en el sector comercial debido al reducido coste del material de sustrato y a la madurez de la tecnología de fabricación. Con la investigación, el desarrollo continuo y el aumento de su uso, se espera que las antenas microstrip acaben sustituyendo a las convencionales en la mayoría de las aplicaciones [22].

Algunas aplicaciones de sistemas conocidos de comunicaciones para los que se han desarrollado antenas microstrip son [22]:

- Comunicación por satélite, servicios de difusión directa (DBS).
- Radares Doppler y otros.
- Sistema de mando y control.

⁵ Radio Frequency Monolithic Microwave Integrated Circuits (RF - MMIC): Circuitos integrados que operan a frecuencias de microondas.

⁶ Técnicas especiales como: - seleccionar el tipo de alimentación adecuado. – selección adecuada de la geometría del parche radiador. - técnica multimodo: la idea básica se enfoca en utilizar dos o más elementos radiantes y colocarlos de manera escalonada para cubrir el rango de frecuencias de interés y aumentando el ancho de banda. – selección de un sustrato adecuado para la aplicación a utilizarse.

⁷ Photonic Band-Gap (PBG) son estructuras que prohíben la propagación de todas las ondas electromagnéticas dentro de una banda particular de frecuencias llamada Band – Gap lo cual permite un control adicional al comportamiento de las ondas [22]. Este tipo de estructura consiste en una red cuadrada de pequeñas almohadillas de metal con vías puestas a tierra en el centro.

- Misiles y telemetría.
- Sensores a distancia e instrumentación medioambiental.
- Elementos de alimentación en antenas complejas.
- Receptores de navegación por satélite.
- Radio móvil (Gps, teléfonos y sistemas RF).
- Antenas integradas.
- Radiadores biomédicos y alarmas de intrusión.
- Aplicación en telemedicina.
- Aplicaciones medicinales del parche.

Una de las aplicaciones en las cuales nos enfocamos para realizar el trabajo de titulación es la radiolocalización, la cual se la explicará brevemente en la siguiente sección.

1.3.9.1 Métodos para la detección del DoA (radiolocalización)

Radiogoniometría o la radiolocalización se refiere al uso de instrumentos especiales, antenas y metodologías para determinar la ubicación de una fuente de energía de radiofrecuencia [23].

La exactitud de los resultados es uno de los diferenciadores claves, es decir, los métodos deben permitir la mayor exactitud posible. Para entender de mejor manera este concepto se introducen los términos de potencia de llegada y ángulo de arribo [23].

- **La potencia de llegada:** indica el nivel de la señal en un determinado lugar, por ejemplo, se puede generar un mapa de calor para encontrar la fuente de la señal, pero no es realmente goniometría, ya que no se tiene una dirección de donde llega la señal se podría encontrar una distancia [23].
- **Ángulo de llegada:** indica el azimut de la señal desde un determinado lugar, o se puede decir que se obtiene la dirección de donde llega la señal. Es más rápida, eficiente y mucho más exacta en comparación con la medición de potencia [23].

Para detectar el ángulo de arribo se tienen en cuenta 3 parámetros de la señal, amplitud, frecuencia, y fase, por lo que con la radiogoniometría se utilizan las variaciones de estos parámetros para determinar la dirección hacia la fuente (azimut). La mayoría de las metodologías miden las variaciones de solo 1 de los 3 parámetros [23].

Las marcaciones radio goniométricas, las cuales representan la dirección hacia la fuente, pueden ser utilizadas de dos maneras:

- **Una sola indicación de azimut:** puede ser utilizada cuando nos movemos hacia el objeto. Provee la dirección, pero no la distancia hacia el objetivo, la forma principal en este caso es siguiendo la marcación hasta llegar a la fuente [23].
- **Múltiples indicaciones de azimut desde diferentes ubicaciones:** puede ser utilizada para calcular la posición más probable del objetivo (triangulación), estas pueden ser calculadas mediante computación para obtener la ubicación más cercana [23].

Existen dos métodos para obtener las marcaciones radio goniométricas:

- **Proceso manual:** el operador mueve manualmente una antena hasta que observa el nivel de señal más alto. La exactitud del marcador depende de las habilidades y experiencia del operador [23].
- **Procesos automáticos:** el sistema calcula automáticamente el azimut en base a un método goniométrico (Doppler, Watson-Watt, Interferometría, etc.) [23].

Se debe tener en cuenta que uno de los problemas para la radiolocalización son las trayectorias múltiples que se trata en la recepción de una misma señal desde diferentes direcciones, causada por una o varias reflexiones muy comúnmente encontradas en entornos urbanos [23].

Finalmente, las metodologías más comunes utilizadas en radiogoniometría son: ángulo de arribo (manual), Doppler, Watson-Watt, Interferometría Correlativa, diferencia de tiempos de arribo, métodos híbridos. Estos métodos se explicarán brevemente a continuación [23].

- **Determinación manual del ángulo de arribo:** se basa en una comparación de amplitudes, es decir se debe mover o rotar la antena directiva hasta obtener el nivel máximo de la señal, la antena puede ser sostenida con la mano o montada, por ejemplo, en un trípode, en la Figura 1.22 se presenta un ejemplo.



Figura 1.22. Determinación manual del ángulo de arribo [23].

El ángulo de arribo se obtiene mediante la ayuda de un compás o una brújula, la mayor ventaja de este método es su bajo costo y portabilidad, pero su efectividad dependerá en gran medida del grado de habilidad del operador y su experiencia y la exactitud puede ser pobre para objetivos lejanos por las múltiples trayectorias. La antena debe tener una directividad apropiada y además es difícil de utilizar cuando las señales son de corta duración [23].

- **Doppler:** es un método automático que se basa en el efecto Doppler, el cual se puede considerar un tipo de modulación de frecuencia causada por el movimiento relativo, si un objeto se mueve hacia otro la frecuencia de una onda emitida por uno de ellos se verá aparentemente incrementada, de forma similar ocurre si el objeto se aleja del otro, la frecuencia se verá aparentemente decrementada. En el dominio de la frecuencia, el efecto Doppler se puede usar para la radiolocalización [23].

El uso del efecto Doppler en la radiogoniometría se constata a medida que nos movemos hacia la fuente de señal, la frecuencia recibida se incrementará (o viceversa), si se pudiera detectar y medir este cambio se podría detectar si se acercan o se alejan a la fuente de la señal. Por lo tanto, se necesita entender la manera de mover la antena, esta idea presenta problemas si el objetivo es estacionario se debería mover la antena del receptor para generar el fenómeno, pero se podría tener que el movimiento no es lo suficientemente rápido para crear un corrimiento medible. Entonces surge una pregunta, ¿De qué manera movemos la antena para generar el efecto? Se procede a montar una antena sobre un disco para posteriormente hacer girar el disco, la antena se va a acercar y alejar del transmisor

cuya posición se observa en la Figura 1.23, este movimiento genera la onda senoidal Doppler, esta onda es máxima cuando la antena está en la posición D y cruza el eje cero cuando la antena pasa por las posiciones A y C, el cruce por cero en la posición A representa la posición más cercana al transmisor, haciendo mediciones continuas en cada giro de la antena se puede determinar el ángulo hacia el objetivo [23].

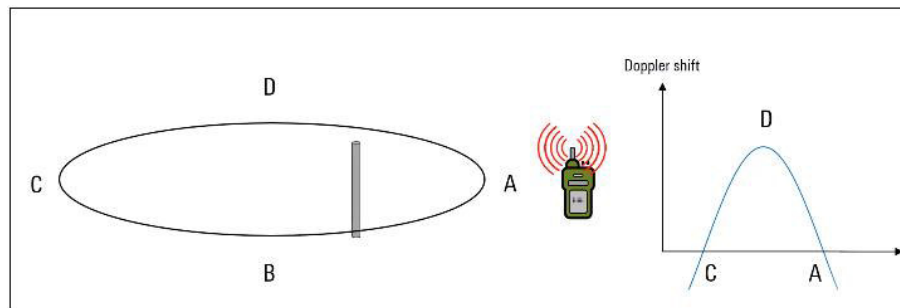


Figura 1.23. Principio de la antena rotativa de efecto Doppler [23].

Una antena en un disco rotativo no es algo muy práctico, además que se requiere una velocidad de rotación demasiado alta. Sin embargo, se puede simular conseguir el efecto de un disco rotativo colocando un arreglo de antenas, generalmente 4 antenas y conmutando rápidamente entre estas, las antenas generan los pulsos y el sistema los utiliza para sintetizar una forma de onda senoidal Doppler [23].

- **Watson-Watt:** es uno de los métodos más antiguos que se basa en la comparación de amplitudes, este método requiere un uso especial de antenas, la llamada Adcock (o antena de cuadros cruzados) que sirven para comparar los niveles de señal recibida por cada cuadro, en la figura 1.24 se presenta un ejemplo de una antena Adcock [23].

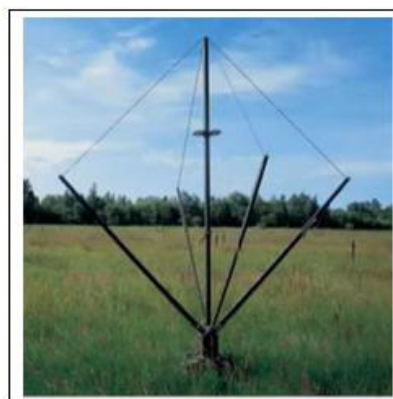


Figura 1.24. Antena Adcock [23].

Una antena Adcock consta de cuatro elementos verticales equi-espaciados en un arreglo de agrupación por pares con lo cual se crean dos lóbulos con forma de ocho teniendo máxima sensibilidad a lo largo de los ejes y nullos perpendiculares a los ejes, el patrón de radiación de la antena provee de valores de magnitudes para cada dirección, y para resolver la ambigüedad de 180°, se utiliza una antena omnidireccional [23].

Se definen dos ejes, uno norte-sur para el diagrama verde y este-oeste para el diagrama azul, una señal proveniente del oeste es decir 270° azimut tendrá una amplitud mayor con el arreglo del diagrama azul eje este-oeste y prácticamente nulo con el eje norte-sur, de la misma manera para una señal proveniente desde el norte con azimut de 0° se medirá una amplitud mayor en el eje norte-sur y nula en el eje este-oeste, para una señal proveniente del noreste resultaría en condiciones ideales con amplitudes iguales en ambos ejes, podemos ver que se podría determinar cualquier dirección con este tipo de diagramas de radiación, no obstante existe una ambigüedad de 180°, es decir si se tiene una señal del este y del oeste crearía una misma amplitud en ambos arreglos esta se resuelve con una antena omnidireccional que se ubica en el centro del arreglo, en la Figura 1.25 se presentan los ejemplos de lo explicado en el párrafo precedente [23].

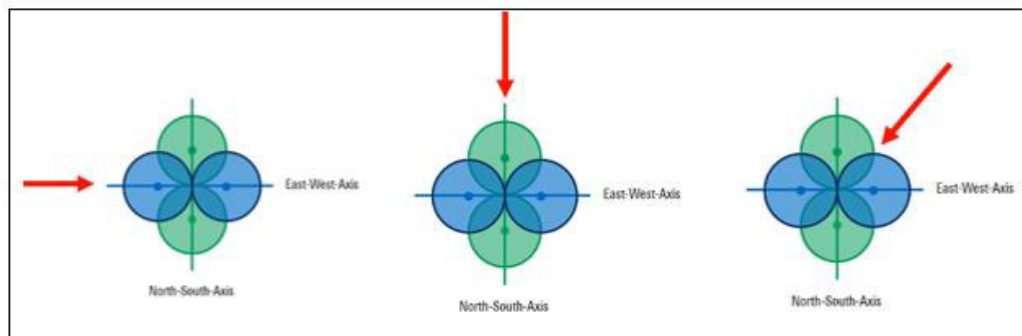


Figura 1.25. Principio del método Watson Watt [23].

Típicamente se utilizan monopolos (cuando está presente el plano de tierra) o dipolos (en aplicaciones donde se monta sobre un mástil), el espaciamiento entre los elementos es un compromiso entre la exactitud (cuanto más cerca es mejor) y la sensibilidad (cuanto más lejos es mejor) [23]. Este método es el elegido para radiogoniómetros de HF debido a la fácil implementación de antenas pequeñas para esas frecuencias, tiempo rápido de respuesta y la exactitud y sensibilidad son normalmente buenas dependiendo de la circularidad del diagrama de radiación de

la antena, su desventaja es que no es posible medir el ángulo de elevación con precisión, ya que decrece la exactitud cuando la elevación del transmisor se incrementa (o decrementa) [23].

- **Interferometría correlativa:** este método se basa en los cambios de fase, en sus comienzos se utilizó en radioastronomía, determina el ángulo de arribo midiendo la diferencia de fases de la señal recibida por múltiples elementos de antena. La cantidad de antenas utilizadas normalmente se encuentra en un número impar de elementos agrupados en una disposición circular y equidistantes [23].

Como un ejemplo base se puede utilizar un interferómetro de 5 elementos, cada uno de estos elementos está equidistante del otro en un círculo imaginario, el elemento número 1 se designa como canal de referencia, cuando una señal llega al arreglo de antenas con un ángulo dado, la señal recibida en los 5 elementos tendrá un desplazamiento de fase, esto se debe a que el frente de onda de la señal encontrará a cada elemento en posiciones diferentes, se puede guardar estos valores de desplazamiento de fase para el elemento de la antena y para cada ángulo, si se construye una tabla de calibración desde 0° hasta 360° en incrementos de un grado se tendrán todos los valores de desplazamiento de fase para todos los ángulos de llegada de una señal [23], en la Figura 1.26 se presenta este ejemplo.

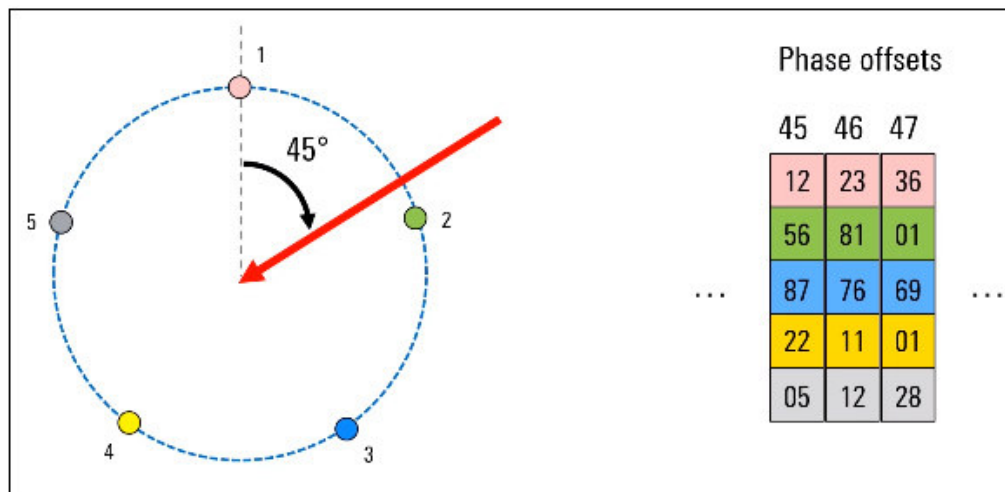


Figura 1.26. Principio de funcionamiento de la Interferometría Correlativa [23].

En el método correlativo cuando una señal llega al sistema de antena, primero se miden los desplazamientos de fase en cada elemento, luego se calcula la correlación entre estos valores medidos y se comparan con los valores de la tabla de calibración, este proceso da como resultado una curva de correlación cuyo pico

corresponde al conjunto de valores de desplazamiento de fases que más se parece al valor medido de aquí se extrae el ángulo de arribo correspondiente a ese conjunto de valores de la tabla [23], en la Figura 1.27 se presenta este proceso.

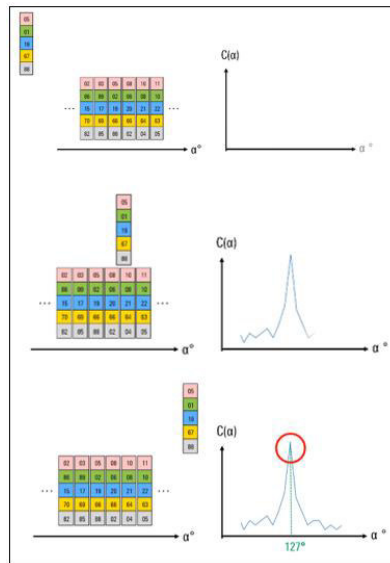


Figura 1.27. Medición y cálculo de la correlación en la interferometría correlativa [23].

Una de las diferencias de este método con respecto a los otros, es que además del ángulo, se puede obtener el grado de calidad de la marcación⁸, las antenas interferométricas normalmente tienen un número impar de elementos, comúnmente entre 5 y 9, además se pueden cubrir grandes rangos de frecuencia (>1GHz), tiene muy buena exactitud (menor a 1°) y alta inmunidad a reflexiones comparado con otros métodos [23].

- **Diferencia de tiempos de arribo:** este método es conocido como TDoA (Time Difference of Arrive), se basa en tres o más receptores ubicados en diferentes posiciones donde reciben una señal, los caminos entre el transmisor y cada receptor tienen normalmente diferentes longitudes, por lo tanto hay diferencias en los tiempos de arribo de la misma señal a cada estación de recepción, estas diferencias de tiempo pueden ser representadas como hipérbolas que se cruzan en la ubicación del transmisor como se presenta en la Figura 1.28 [23].

⁸ El grado de calidad de la marcación quiere decir que en este método se puede obtener un mayor grado de confianza sobre la exactitud y calidad del ángulo de arribo, por ejemplo, si se tiene un valor en la curva de correlación más alto en comparación con otro gráfico de correlación que corresponda al ángulo de arribo de la señal, indicará que se tiene mayor grado calidad, esta indicación de calidad es única en el método correlativo.

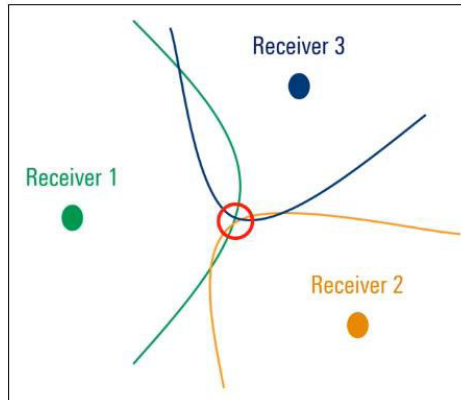


Figura 1.28. Principio básico del método de la diferencia de tiempos de arribo [23].

Para generar las hipérbolas es necesario dos receptores, posteriormente se debe medir el tiempo de llegada de la señal a cada uno de ellos, si la diferencia de tiempo es cero, la hipérbola generada será una línea recta entre los dos receptores debido a que cada punto de esta línea está a la misma distancia de ambos, sin embargo, la línea será una hipérbola en cualquier otro caso en donde la diferencia sea diferente de cero [23]. En la Figura 1.29 se presenta un ejemplo.

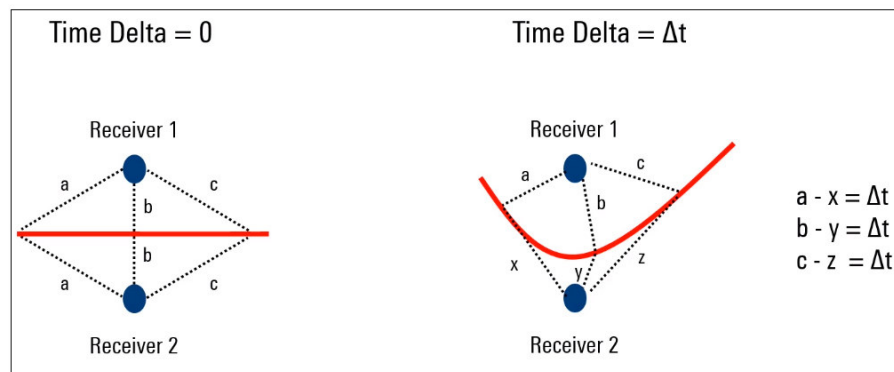


Figura 1.29. Formación de hipérbolas [23].

Un sistema de radiolocalización basado en TDoA está formado por una red de sensores interconectados y una estación maestra, la salida de frecuencia intermedia de las señales recibidas es digitalizada y transferida a través de una conexión de datos a la estación maestra. Hay que notar que se requiere que los datos transmitidos tengan una marca de tiempo precisa utilizando un reloj común, en la mayoría de las implementaciones la señal de sincronismo de los relojes es provista por un GPS, entonces la estación maestra calcula la correlación cruzada, estos cálculos arrojan diferencias de tiempo utilizadas para generar las hipérbolas [23].

Todas las metodologías discutidas hasta el momento como Doppler, Watson Watt o interferometría correlativa requieren de un tipo especial de antena o arreglo de antenas, en TDoA lo que interesa medir es el momento en el cual una señal arriba y no un ángulo con el que arriba, requiriendo datos referenciados en tiempo desde múltiples lugares y en forma simultánea, por lo tanto los radiogoniómetros TDoA están constituidos con dispositivos sensores para propósitos generales y simples antenas omnidireccionales, estos sensores pueden ser montados fijamente o de manera móvil y se necesita una red de comunicación de datos, energía y GPS; adicionalmente para lograr una buena exactitud se requiere un gran número de sensores [23].

- **Metodologías Híbridas:** es muy común que se utilice este tipo de métodos en los cuales se utiliza goniometría automática para determinar un área aproximada y después un método de goniometría manual para acotar la localización en el orden del metro, este tipo de metodología combina métodos automáticos como el ángulo de arribo (AoA) y el método de diferencia de tiempos de arribo (TDoA) [23].

Un escenario híbrido utiliza uno o más sensores TDoA y uno o más AoA de esta manera se puede proveer mayor flexibilidad y exactitud [23].

En el presente trabajo de titulación se construyeron arreglos de antenas para ser utilizadas como una parte constitutiva para el cálculo del ángulo de la señal de arribo en redes de comunicación móvil.

1.3.10 ARREGLO DE ANTENAS MICROSTRIP

El uso de una sola antena en muchos casos no puede satisfacer las necesidades eficientemente en lo que se refiere a parámetros como ganancia, ancho de banda, directividad, eficiencia, patrones de radiación, entre otros, ante estos problemas aparece el concepto de arreglos o agrupaciones de antenas, el cual se basa en implementar un conjunto de antenas para mejorar ciertos parámetros acorde a las necesidades y aplicaciones, las cuales no se podría lograr con un solo elemento. Con lo anterior lo que se quiere decir es que un arreglo de antenas se define como un conjunto de elementos radiantes, los cuales se colocan de una manera específica en el espacio para potenciar las características de radiación que una sola antena no lograría. El campo de radiación total de obtiene mediante la suma vectorial de los campos de cada uno de los elementos del arreglo, como consecuencia de esta agrupación las dimensiones de la antena individual se modifican [24] [25].

En la Figura 1.30 se muestra un arreglo de antenas con N elementos, en donde la fase y amplitud de cada elemento se pueden sintonizar eléctricamente o mecánicamente usando cambiadores de fase y atenuadores [6] [25].

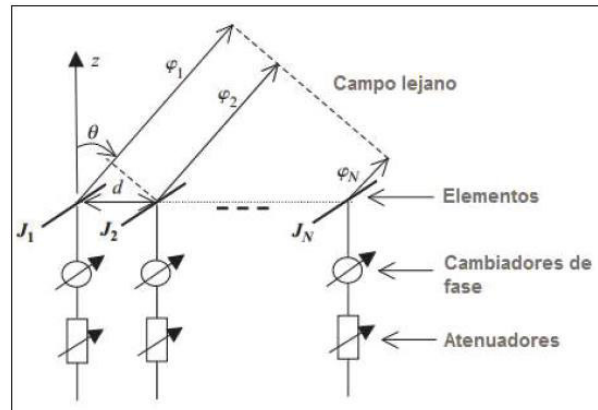


Figura 1.30. Arreglo de antenas de N elementos [25].

Las señales en cada elemento tienen algunas variables, incluyendo la amplitud y fase de su excitación. La ubicación de estos elementos es otra variable que puede permitir conseguir muchas formas geométricas diferentes para establecer las características de radiación deseadas. En la práctica, todos los elementos se colocan en una configuración específica para obtener un arreglo bien controlado en una, dos o incluso tres dimensiones [6].

1.3.10.1 Arreglos Broadside y End - Fire

Un arreglo broadside es un arreglo en donde su máxima radiación tiene una dirección perpendicular a su eje, en tanto un arreglo end-fire tiene su máxima radiación dirigida a lo largo del eje del arreglo [6].

Las condiciones específicas son:

Broadside: $\varphi_0 = 0$

End-fire: $\varphi_0 = 2\pi d/\lambda$

Donde:

φ_0 : es la fase relativa a una referencia común [24], como se observa en la figura 1.30.

d : espacio entre elementos.

Según [24], los arreglos broadside solo pueden producir dos lóbulos principales simétricos, mientras que los arreglos end-fire pueden generar un solo lóbulo principal cuando:

$$d < \frac{\lambda}{2} \left(1 - \frac{1}{2N}\right) \quad (1.24)$$

1.3.11 PROCESO DE DISEÑO DE LA ANTENA PARCHE TIPO RECTANGULAR

Para el diseño de la antena tipo parche rectangular se utilizó el método de línea de transmisión, en este método se introdujo el concepto de efectos de borde, en donde algunas ondas viajan por el sustrato y por el aire, razón por la cual aparece una constante dieléctrica efectiva ϵ_{reff} para tener en cuenta la propagación de borde y la propagación en la línea [6].

La Ecuación 1.25 muestra cómo se calcula la constante dieléctrica efectiva [1].

$$\epsilon_{reff} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \quad (1.25)$$

Debido a los efectos de borde, eléctricamente el parche microstrip parece mayor a sus dimensiones físicas, en donde las dimensiones del parche a lo largo de su longitud se amplían en cada extremo una distancia ΔL , que es función de la constante dieléctrica efectiva ϵ_{reff} y de la relación ancho-alto (W/h) [1]. La Ecuación 1.26 muestra una relación aproximada muy popular y práctica para la extensión normalizada de la longitud [1].

$$\Delta L = 0.412 * h * \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (1.26)$$

Dado que la longitud del parche se ha extendido en ΔL en cada lado, la longitud efectiva del parche viene dada por la Ecuación 1.27 de la siguiente manera [1]:

$$L_{eff} = L + 2 \Delta L \quad (1.27)$$

Para el modo TM_{010} ⁹, la frecuencia de resonancia de la antena microstrip depende de su longitud, y viene dado por la Ecuación 1.28 de la siguiente manera [1]:

⁹ Las ondas electromagnéticas dependiendo de su frecuencia, tiene el medio más óptimo para transportarse, teniendo así un modo fundamental (TEM - Modo Transversal Electromagnético) o modos superiores (Transversal Eléctrico TE y el transversal Magnético TM). En los modos TE y TM se analiza la forma de propagación de los campos a lo largo de la guía en este caso el dieléctrico, el modo TM10 es el modo fundamental de propagación en una cavidad rectangular [25].

$$f_r = \frac{c}{2L_{eff}\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1.28)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el espacio libre $c = \left(3 \times 10^8 \frac{m}{s}\right)$.

Finalmente, con la Ecuación 1.29 se puede calcular el ancho del parche microstrip [1]:

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1.29)$$

Con las expresiones descritas anteriormente se podrá obtener las dimensiones de la antena tipo parche rectangular para posteriormente realizar el arreglo de antenas, en el capítulo 2 se presenta el cálculo.

1.3.12 PROCESO DE DISEÑO DE LA ANTENA PARCHE TIPO E

En las secciones anteriores se muestra que las antenas microstrip pueden tener diferentes formas en su geometría, en el presente trabajo se utilizó la geometría de una letra E, que como se muestra en [26] presenta mejor rendimiento en parámetros eléctricos y de radiación. Para el proceso de diseño de la antena microstrip parche tipo E, se toman como referencia los estudios [26], [27], [28], en la Figura 1.31 se presenta el proceso de diseño.

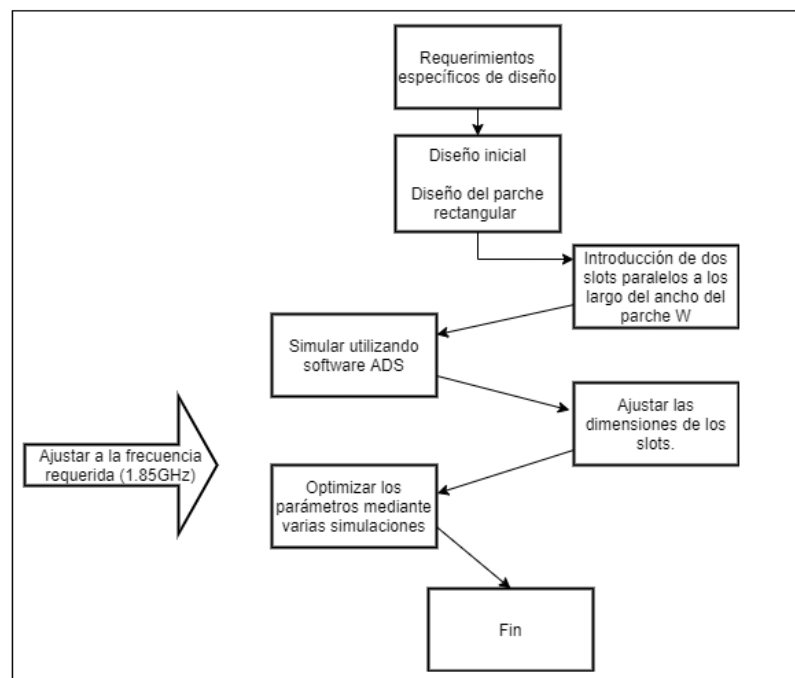


Figura 1.31 Diagrama de bloques del procedimiento de diseño de la antena tipo E.

En el presente trabajo se utilizó el software ADS para la simulación y diseño de los slots insertados en el parche rectangular para formar el parche tipo E.

1.3.13 PROCESO DE DISEÑO DE LA ANTENA PARCHÉ TIPO CIRCULAR

En el presente estudio se propuso diseñar adicionalmente un parche circular para ser probado en el sistema de detección de DoA, este tipo de parche presenta atractivas propiedades de radiación [1], además una ventaja de este tipo de geometría es que solo hay un grado de libertad que controlar (radio del parche), el cual cambiará y establecerá la frecuencia de resonancia de la antena [1].

El procedimiento para realizar el diseño de la antena circular consiste en especificar la información de la constante dieléctrica del sustrato (ϵ_r), la frecuencia de resonancia (f_r) y la altura del sustrato y con ayuda de la Ecuación 1.30 y la Ecuación 1.31 se determina el radio del parche [1].

$$a = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2h}{\pi\epsilon_r F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (1.30)$$

Donde:

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.31)$$

Hay que especificar que los siguientes valores deben encontrarse así: f_r (en Hz) y h (en cm) [1].

Donde:

f_r : frecuencia de resonancia.

h : altura del sustrato

Los diseños de las 3 geometrías que se utilizaron en el presente trabajo se los presenta en el capítulo 2.

2. METODOLOGÍA

Una vez abordados los conceptos teóricos de las antenas y arreglos tipo parche con tecnología microstrip, en este capítulo se procede a describir en detalle el proceso de diseño de las antenas tipo parche rectangular, parche tipo E y parche tipo circular, así como también la simulación de los arreglos con su respectiva geometría, las antenas se simulan con el software Advanced Design System ADS de KEYSIGHT. Para la alimentación se procederá con el diseño de la línea de alimentación para cada geometría con la finalidad de que cada uno de los elementos radiantes presente una impedancia de 50Ω .

Los requerimientos y condiciones a tomar en cuenta para el diseño de las antenas se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Requerimientos y condiciones de diseño para las antenas.

Parámetros	Especificación			
Frecuencia de resonancia	1,85 GHz			
Impedancia de entrada	50 Ω			
Sustrato: Epoxi fibra de vidrio (FR4), lámina (210mmx297mm)	Permitividad o constante dieléctrica (ϵ_r)	Espesor del material dieléctrico h (mm)	Espesor del material conductor t (um)	Tan (σ)
	4.4	1.5	17	0.01

2.1. DISEÑO DEL ARREGLO CON EL PARCHÉ TIPO RECTANGULAR

Con las expresiones obtenidas en el capítulo anterior se pueden calcular las dimensiones del parche rectangular básico para posteriormente formar los arreglos. El sustrato utilizado para el diseño y construcción de los arreglos de antenas es el FR4 Epoxi fibra de vidrio, cuyas características básicas se presentan en la Tabla 2.1.

2.1.1 DISEÑO DEL ELEMENTO BASE DEL ARREGLO

Utilizando el sustrato FR4 con constante dieléctrica de 4.4, $h = 1.5 \text{ mm}$ y la frecuencia de resonancia de la antena de 1,85 GHz se calcularon las dimensiones del parche rectangular de acuerdo a las especificaciones que se presenta en la Figura 2.1.

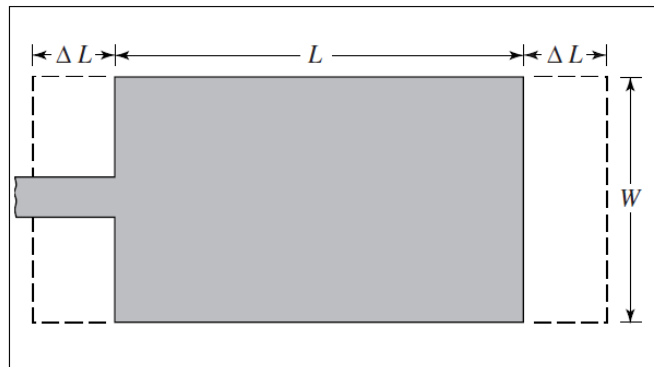


Figura 2.1. Dimensiones del parche rectangular [1].

Como primer paso tenemos el cálculo del ancho del parche (W), por lo que reemplazamos la frecuencia de operación y la constante dieléctrica o permitividad en la Ecuación 1.27.

$$W = \frac{3 * 10^8 \frac{m}{s}}{2 * (1.85 * 10^9 \text{ Hz}) \sqrt{\frac{(4.4 + 1)}{2}}} = 0.049344m = 4.934 \text{ cm} = 49.34 \text{ mm}$$

Después se realiza el cálculo de la permitividad efectiva o constante dieléctrica efectiva con la Ecuación 1.23

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2} * \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{0.15 \text{ cm}}{4.93 \text{ cm}} \right)}} \right) = 4.1550$$

Luego se realiza el cálculo de la variación en la longitud del parche ΔL con la Ecuación 1.24.

$$\Delta L = 0.412 * 1.5 \text{ mm} * \frac{(4.1550 + 0.3) \left(\frac{4.934 \text{ cm}}{0.15 \text{ cm}} + 0.264 \right)}{(4.1550 - 0.258) \left(\frac{4.934 \text{ cm}}{0.15 \text{ cm}} + 0.8 \right)} = 0.695250 \text{ mm}$$

Finalmente, para calcular la longitud del parche se necesita obtener la longitud efectiva que se calcula despejando la Ecuación 1.26, de la siguiente manera:

$$L_{\text{eff}} = \frac{3 * 10^8}{2(1.85 * 10^9) \sqrt{4.1550}} = 0.039777 \text{ m} = 3.9777 \text{ cm} = 39.777 \text{ mm}$$

A partir de lo anterior se obtiene la longitud L del parche con la Ecuación 1.25

$$L = 39.777 \text{ mm} - 2 * 0.695250 \text{ mm} = 38.3866 \text{ mm}$$

Los valores obtenidos en el proceso de diseño se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Valores obtenidos en el diseño del parche rectangular.

W(mm)	L(mm)	ϵ_{eff}	$\Delta L(\text{mm})$	$L_{\text{eff}}(\text{mm})$
49,344	38,386	4,155	0,6952	39,777

2.1.2 DISEÑO DEL ARREGLO LINEAL

Una vez calculados los valores del elemento base se procede a diseñar el arreglo de antenas, para ello es necesario conocer la distancia a la cual va a estar separado un parche del otro, tanto en el plano E como en el plano H, por lo que se debe conocer la longitud de onda en el espacio libre λ_0 , que se determina con la frecuencia de resonancia de 1,85 GHz y con el valor de la velocidad de propagación en el medio $c = 3 \times 10^8$. Para esto se utiliza la Ecuación 2.1:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{1.85 \times 10^9} = 162.162 \text{ mm}$$

Para garantizar el correcto funcionamiento del arreglo cada antena debe estar separada una distancia que sea submúltiplo de la longitud de onda calculada, de no cumplirse esto podría existir solapamiento entre las ondas, lo que influiría en el desempeño del arreglo [29].

Es por esto que se decidió tomar como separación entre antenas una distancia de $\frac{\lambda_0}{2}$, tanto en el plano E como en el plano H del arreglo, la separación se la realizó desde los bordes de las antenas tanto en el plano E y plano H, en la Figura 2.2 se presenta la disposición de los parches en los planos mencionados.

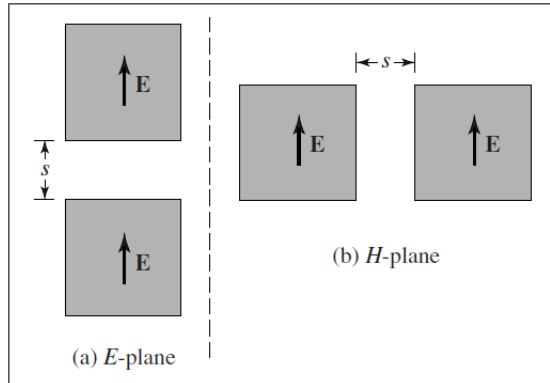


Figura 2.2. Disposición de los parches microstrip en los planos E y H [1].

$$\frac{\lambda_0}{2} = \frac{162.162}{2} = 81.081 \text{ mm} = s = dE$$

Para nuestro caso se decidió utilizar una separación tanto en el plano H como en el plano E del mismo valor, por lo tanto, tenemos que $dE = dH = 81.081 \text{ mm}$ con esto se logran los resultados de directividad y ganancia que se presentan en la etapa de simulación.

Donde:

dE : distancia entre los bordes de los parches en el plano E.

dH : distancia entre los bordes de los parches en el plano H.

2.1.3 DISEÑO DEL ELEMENTO RECTANGULAR DE REFERENCIA CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP

Una vez realizadas las simulaciones del arreglo lineal 1x3 y 3x1 con el parche rectangular sin línea de alimentación como elemento base, en esta sección se procede a diseñar una línea de alimentación microstrip para después realizar las simulaciones de la antena y disponer de las características del desempeño para su análisis.

La impedancia típica en el borde de un parche rectangular resonante va aproximadamente de 100Ω a 400Ω , es por esto que la impedancia de un parche en el borde puede ser aproximado con la Ecuación 2.2 [24].

$$Z_a = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W} \right)^2 \quad (2.2)$$

Aquí la eficiencia de radiación (una función del grosor) se supone que es del 100 %, por lo tanto, la impedancia está determinada por tres parámetros, la permitividad ϵ_r , el largo del

parche L y el ancho W [5]. Con los valores iniciales del parche rectangular que ya se diseñó y cuyos valores se encuentran en la Tabla 2.2, se empezó con el cálculo teórico de la impedancia de entrada dado por la Ecuación 2.2, llegando a tener:

$$Z_a = 90 \frac{4.4^2}{4.4 - 1} \left(\frac{38.386}{49.344} \right)^2 = 310.13 \Omega$$

Este valor de impedancia no coincide con un valor estándar de 50Ω , por lo tanto, se utilizó un transformador de impedancia de un cuarto de longitud de onda, la impedancia característica de la sección de transmisión debe ser:

$$Z_T = \sqrt{50 \times 310.13} = 124.53 \Omega$$

Con la impedancia de la línea de transmisión se puede determinar el ancho de la línea, para esto se utilizaron los valores característicos del sustrato FR-4 (Epoxy fibra de vidrio), los cuales se encuentran en la Tabla 2.1, así con el uso de la Ecuación 1.19 se tiene:

$$Z_o = \frac{60}{\sqrt{4.4}} \ln \left(\frac{8 \times 1.5}{W_T} + \frac{W_T}{4 \times 1.5} \right) = 124.53 [\Omega] > \frac{126}{\sqrt{4.4}}$$

Por lo tanto, despejando el ancho de la línea se obtiene el valor:

$$W_T = 0.154 \text{ mm}$$

La relación W/h es:

$$\frac{W}{h} = \frac{0.154 \text{ mm}}{1.5 \text{ mm}} = 0.103$$

Como se observa la relación $W/h < 1$, por lo que la fórmula utilizada es la correcta. Para obtener la longitud de la línea, primero se calculó la permitividad efectiva de la línea, la cual está dada por la Ecuación 1.22.

$$\epsilon_{reff} \approx \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2 \sqrt{1 + \frac{12 \times 1.5}{0.154}}} \approx 2.857$$

Así se tiene que la longitud de la línea es:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_o}{4 \sqrt{\epsilon_{reff}}} = \frac{162.162}{4 \sqrt{2.857}} = 23.985 \text{ mm}$$

2.2. DISEÑO DEL ARREGLO CON EL PARCHE TIPO E

En esta sección se realizó el diseño de la antena tipo parche en forma de E, para poder realizar el diseño del elemento base del arreglo se tomó en cuenta el mismo sustrato cuyas características se muestran en la Tabla 2.1. Se debe mencionar que este tipo de antena con geometría de una letra E no cuenta con un proceso matemático bien definido de diseño o un proceso con fórmulas como en el diseño del parche rectangular, por esta razón se utilizó el procedimiento de diseño que se muestra en la Figura 1.29 del capítulo anterior. Con esta metodología de prueba y error se logró obtener las dimensiones de la antena parche en forma de E.

2.2.1 DISEÑO DEL ELEMENTO BASE E DEL ARREGLO

Con las características del sustrato FR-4, primero se procedió con el diseño del parche rectangular básico, como este diseño ya fue realizado en la sección 2.1.1, únicamente nos referimos a la Tabla 2.2, la cual incluye las dimensiones del parche. Después se siguió el procedimiento de la Figura 1.29 con el cual se realizan las inserciones y se obtienen las dimensiones elemento base en forma de E del arreglo lineal, el parche se presenta en la Figura 2.3 y sus dimensiones de muestran en la Tabla 2.3.

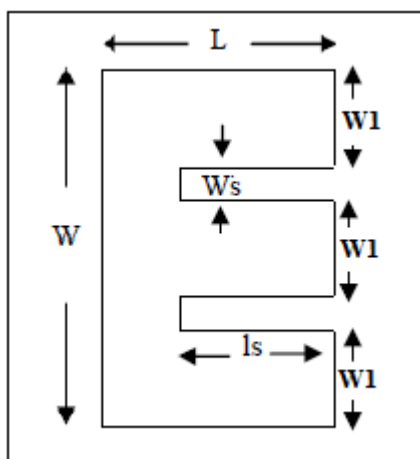


Figura 2.3. Parche en forma de E

Tabla 2.3. Dimensiones del parche tipo E diseñado a 1.85 GHz.

Frecuencia (GHz)	W(mm)	L(mm)	ls(mm)	Ws(mm)	W1(mm)
1.85	49.344	38.386	20.693	9.868	9.868

2.2.2 DISEÑO DEL ARREGLO LINEAL

Una vez obtenidos los valores del elemento E base del arreglo lineal se procedió a realizar el diseño del arreglo, como se estableció en la sección 2.1.2, la separación entre los parches tanto en el plano E como en el plano H es de $\lambda_0/2$, es decir 81.081mm, esta distancia se utilizó en los 3 arreglos lineales.

2.2.3 DISEÑO DEL ELEMENTO BASE DEL ARREGLO CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP

En esta sección se procedió a diseñar una línea de alimentación microstrip para posteriormente realizar las simulaciones correspondientes con el parche, pero ahora con línea de alimentación y así poder comparar en base a sus parámetros, especialmente de acoplamiento de impedancias, cuál es la mejor opción, arreglo lineal con línea de alimentación o arreglo lineal sin línea de alimentación.

Para el diseño de la línea de alimentación se aplicó el mismo procedimiento que se siguió para la línea del parche rectangular, ya que este tipo de antena es una modificación a su geometría básica, este procedimiento se observó en la sección 2.1.3. Como el parche tipo E tiene una geometría diferente se obtuvo el valor de la impedancia de la antena con la ayuda del software ADS, cuyo valor es de $195.53 - j8.44\Omega$ este valor se puede observar en la Figura 2.4. Este valor se lo obtuvo realizando la simulación del parche E diseñado en la sección 2.2.1

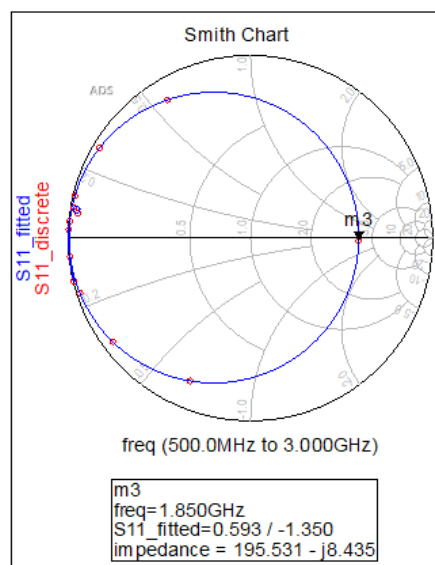


Figura 2.4. Impedancia del parche en forma de E a la frecuencia de 1.85 GHz.

Como este valor de impedancia no encaja bien con una línea microstrip estándar de 50Ω , se utilizó un transformador de impedancia de un cuarto de longitud de onda para conectarlos, la impedancia característica de la sección de transmisión debe ser:

$$Z_T = \sqrt{50 \times 195.53} = 98.88 \Omega$$

Con la impedancia de la línea de transmisión se puede determinar el ancho de la línea, para esto se utilizaron los valores característicos del sustrato FR-4 Epoxy fibra de vidrio, los cuales se encuentran en la Tabla 2.1, y así con el uso de la Ecuación 1.19 se tiene:

$$Z_o = \frac{60}{\sqrt{4.4}} \ln \left(\frac{8 \times 1.5}{W_T} + \frac{W_T}{4 \times 1.5} \right) = 98.88 \Omega > \frac{126}{\sqrt{4.4}}$$

Por lo tanto, despejando el ancho de la línea se obtiene el valor:

$$W_T = 0.379 \text{ mm}$$

La relación W/h es:

$$\frac{W}{h} = \frac{0.379 \text{ mm}}{1.5 \text{ mm}} = 0.2527$$

Como se observa la relación $W/h < 1$, se escogió esta relación debido al resultado menor a 1, caso contrario se debería utilizar la Ecuación 1.20. Para obtener la longitud de la línea primero se calculó la permitividad efectiva de la línea, la cual está dada por la Ecuación 1.22.

$$\epsilon_{re} \approx \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2 \sqrt{1 + \frac{12 \times 1.5}{0.2527}}} \approx 2.900$$

Así tenemos que la longitud de la línea es:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_o}{4 \sqrt{\epsilon_{reff}}} = \frac{162.162}{4 \sqrt{2.900}} = 23.806 \text{ mm}$$

2.3. DISEÑO DEL ARREGLO CON EL PARCHE TIPO CIRCULAR

En esta sección se realizó el diseño de la antena tipo parche circular, para poder realizar el diseño del elemento base del arreglo se tomó en cuenta el mismo sustrato cuyas características se muestran en la Tabla 2.1.

2.3.1 DISEÑO DEL ELEMENTO BASE DEL ARREGLO

Con las características del sustrato FR-4 y la frecuencia de operación de 1.85 GHz se procede a diseñar el parche circular, en la Figura 2.5 se presenta la geometría del parche circular.

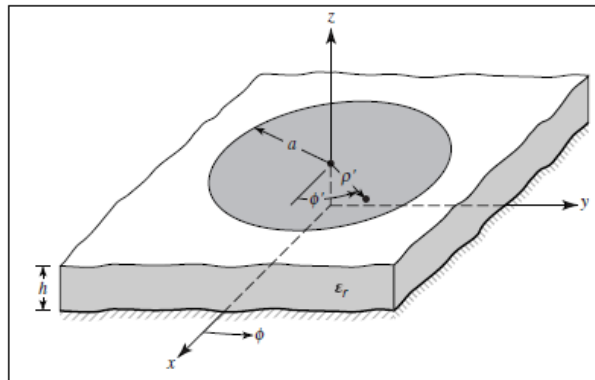


Figura 2.5. Geometría de la antena tipo parche circular [1].

Antes de realizar el cálculo del radio del parche circular se calcula F con la Ecuación 1.28 de la siguiente manera:

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{1.85 \times 10^9 \sqrt{4.4}} = 2.2654$$

Para el cálculo del radio del parche circular se hace uso de la Ecuación 1.27, pero hay que tener en cuenta que la altura del sustrato h debe estar en centímetros, por lo tanto, se tiene lo siguiente:

$$a = \frac{2.2654}{\left\{ 1 + \frac{2(0.15)}{(\pi)(4.4)(2.2654)} \left[\ln \left(\frac{\pi(2.2654)}{2(0.15)} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} = 2.2136 \text{ cm} = 22.136 \text{ mm}$$

Con el radio de $r=22.136$ mm, la antena tipo parche circular resuena a una frecuencia mayor (1.927 GHz) a la que se necesita (1.85 GHz) de acuerdo a la simulación, por lo que, por medio del software se probó el cambio del valor del radio hasta encontrar la frecuencia de resonancia de 1.85 GHz.

Cuando se aumentó el valor de radio, se observó que la frecuencia de resonancia bajaba, llegando así al valor de radio $r=22.975$ mm, que es donde se obtuvo la frecuencia de 1.85 GHz.

En la Tabla 2.5 se presentan los valores del diseño y los valores optimizados con ayuda del software ADS para llegar a que la antena tipo parche circular resuene a la frecuencia de 1.85 GHz.

Tabla 2.5. Dimensiones finales en el diseño del parche circular.

Radio del parche	Valor calculado	Valor optimizado
r	22.136 mm	22.975 mm

2.3.2 DISEÑO DEL ARREGLO LINEAL

Una vez obtenido el elemento base se procedió a realizar el diseño del arreglo lineal, esto se lo realizó en la sección 2.1.2, donde la separación entre parches como en todos los casos es de 81.081 mm entre los bordes de los parches.

2.3.3 DISEÑO DEL ELEMENTO BASE CIRCULAR DEL ARREGLO CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP

Después de las simulaciones de los arreglos lineales 1x3 y 3x1 con el parche circular como elemento base, en esta sección se procedió a diseñar una línea de alimentación microstrip para dicho elemento, posteriormente se realizan las simulaciones correspondientes del parche con línea de alimentación y así poder comparar en base a sus parámetros cuál es la mejor opción, arreglo lineal con línea de alimentación o arreglo lineal sin línea de alimentación.

Para el diseño de la línea de alimentación se sigue el mismo procedimiento aplicado en el caso de la línea del parche rectangular, este procedimiento se describió en la sección 2.1.3. Con la ayuda del software ADS se obtuvo el valor de la impedancia de la antena, cuyo valor es de $135.75 - j122.11 \Omega$, este valor se puede observar en la Figura 2.6

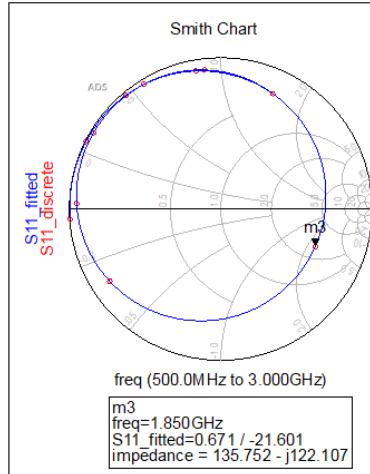


Figura 2.6. Impedancia del parche circular a la frecuencia de 1.85 GHz.

Como este valor de impedancia no encaja bien con una línea microstrip estándar de 50Ω , se utilizó un transformador de impedancia de un cuarto de longitud de onda para conectarlos, la impedancia característica de la sección de transmisión debe ser de:

$$ZT = \sqrt{50 \times 135.752} = 82.39 \Omega$$

Con la impedancia de la línea de transmisión se puede determinar el ancho de la línea, para esto se utilizaron los valores característicos del sustrato FR-4, Epoxy fibra de vidrio, los cuales se encuentran en la Tabla 2.1, así con el uso de la Ecuación 1.19 se tiene:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{4.4}} \ln \left(\frac{8 \times 1.5}{W_T} + \frac{W_T}{4 \times 1.5} \right) = 82.39 \Omega > \frac{126}{\sqrt{4.4}}$$

Por lo tanto, despejando el ancho de la línea tenemos:

$$W_T = 0.678 \text{ mm}$$

La relación W/h es:

$$\frac{W}{h} = \frac{0.678 \text{ mm}}{1.5 \text{ mm}} = 0.452$$

Como se observa la relación $W/d < 1$, por lo que la fórmula utilizada es la correcta. Para obtener la longitud de la línea primero se calculó la permitividad efectiva de la línea, la cual está dada por la Ecuación 1.22.

$$\epsilon_{\text{reff}} \approx \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2\sqrt{1 + \frac{12 \times 1.5}{0.678}}} \approx 3.024$$

Así se tiene que la longitud de la línea es:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} = \frac{162.162}{4\sqrt{3.024}} = 23.31 \text{ mm}$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta el resultado de las simulaciones de las antenas y de los arreglos de antenas con las 3 geometrías mencionadas, posteriormente se presentan tablas con los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones las cuales serán discutidas al final. Se debe tomar en cuenta que por lo general el ancho de banda se establece en un valor menor a -10 dB^{10} en la gráfica de los parámetros S_{11} , siempre y cuando la impedancia esté acoplada a 50Ω , caso contrario, como criterio asumido en este trabajo, se tomará en cuenta el ancho de banda para valores menores a -3 dB^{11} .

3.1 SIMULACIÓN DEL ELEMENTO RECTANGULAR BASE DEL ARREGLO

Con los valores de la Tabla 2.1 y la Tabla 2.2 se simula el elemento base del arreglo con el software Advanced Design System ADS. El elemento base se simula en un ambiente (aire - sustrato FR-4 - plano a tierra) como se presenta en la Figura 3.1 y las características del sustrato y del material conductor se indican en la Figura 3.2 y la Figura 3.3.

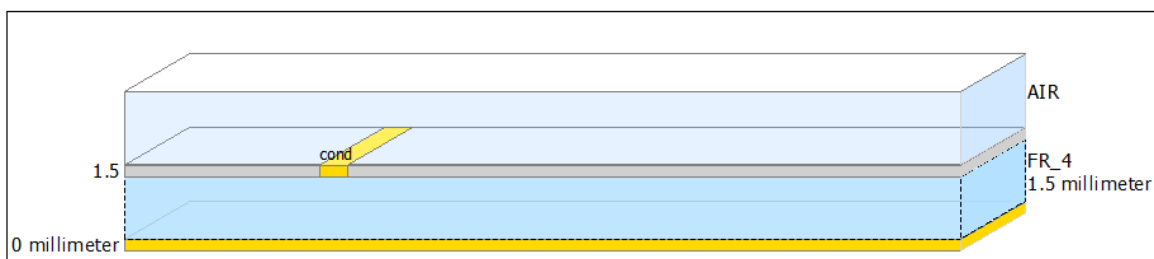


Figura 3.1. Ambiente de simulación.

Para simular el sustrato FR4 se utilizaron las características de acuerdo a la Tabla 2.1

¹⁰ -10 dB : valor estándar que se refiere a la cantidad de potencia que se refleja, se relaciona además con un valor aproximado de $VSWR = 2$ ($10 - 11 \%$ de energía reflejada) valor aceptable según [1], [19].

¹¹ -3 dB : En base al criterio de los -10 dB se tomó el valor de -3 dB debido a la no adaptación de impedancias por lo que aproximadamente se tendrá el 44% de energía reflejada.

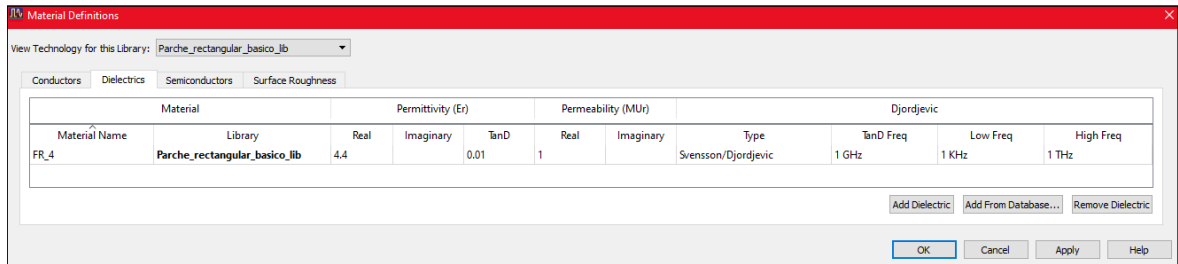


Figura 3.2. Características del sustrato FR-4.

En el caso del material conductor se utilizó el cobre con un espesor de 17 um.

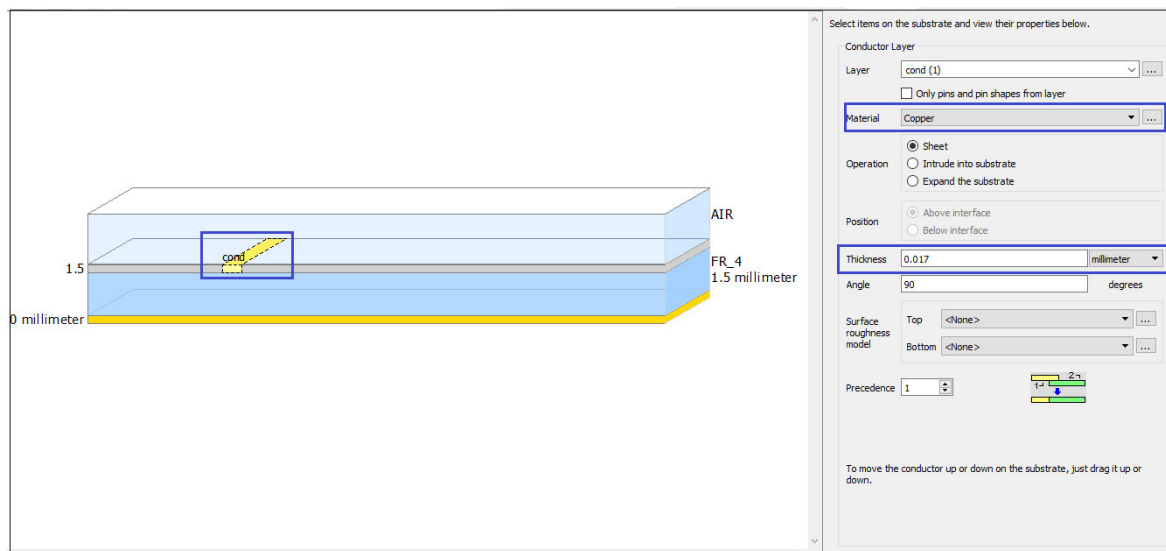


Figura 3.3. Características del material conductor.

Para simular se procedió a dibujar en el espacio de trabajo el parche rectangular con las dimensiones obtenidas en el diseño que se encuentran en la Tabla 2.2, obteniendo así el elemento radiador base como se presenta en la Figura 3.4. El punto de alimentación del parche se lo colocó en el borde a una distancia $W/2$, esto quiere decir a la mitad del ancho (W) del parche. Para la simulación se configuró un rango de frecuencias que van desde 0.5 GHz hasta los 2.6 GHz y una frecuencia central de 1.85 GHz para que en la simulación se pueda observar que ocurre a esta frecuencia. Los resultados de la simulación se presentan en la Figura 3.5.

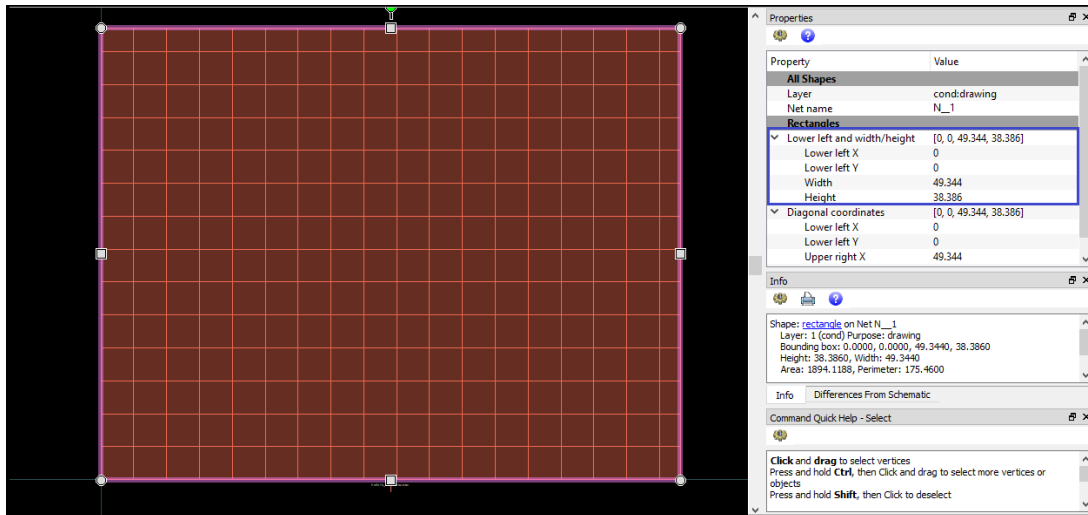


Figura 3.4. Parche rectangular base a la frecuencia de 1.85 GHz.

Como se puede ver, el parámetro S11 tiene un valor de -3.821 dB en magnitud y 22.197 grados en fase a una frecuencia de 1.85 GHz, además, se tiene una impedancia de entrada de $131.71 + j109.542 \Omega$ y para valores menores a -3 dB, el ancho de banda es de 65 MHz que en valor porcentual es 3.51 %.

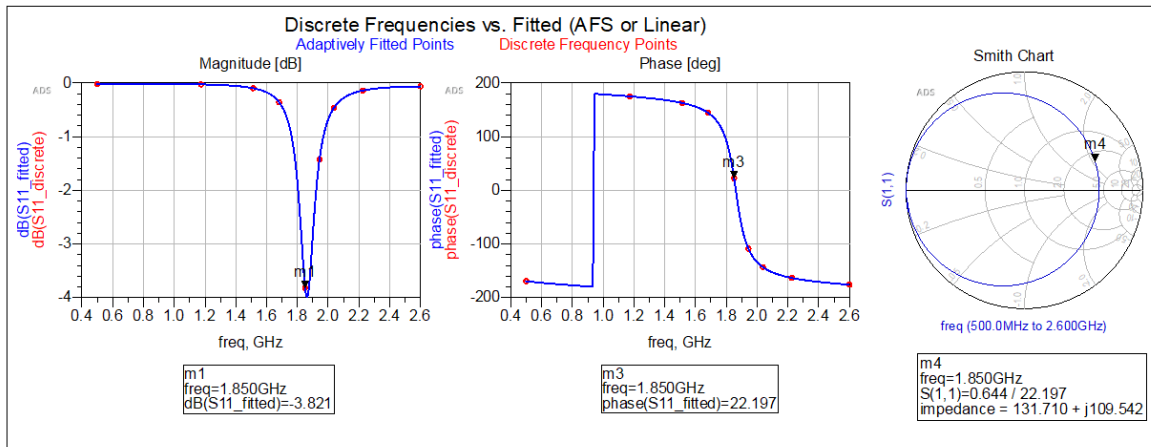


Figura 3.5. S11 e impedancia del parche rectangular a la frecuencia de 1.85 GHz.

La directividad del parche rectangular es de 6.38 dBi, tiene una ganancia de 5.08 dBi y una eficiencia de 74.128 %. En la Figura 3.6 se presenta el resultado de los parámetros mencionados, adicionalmente en la Figura 3.7 se muestran los patrones de radiación de la antena en 3D tanto en vista frontal como en vista posterior.

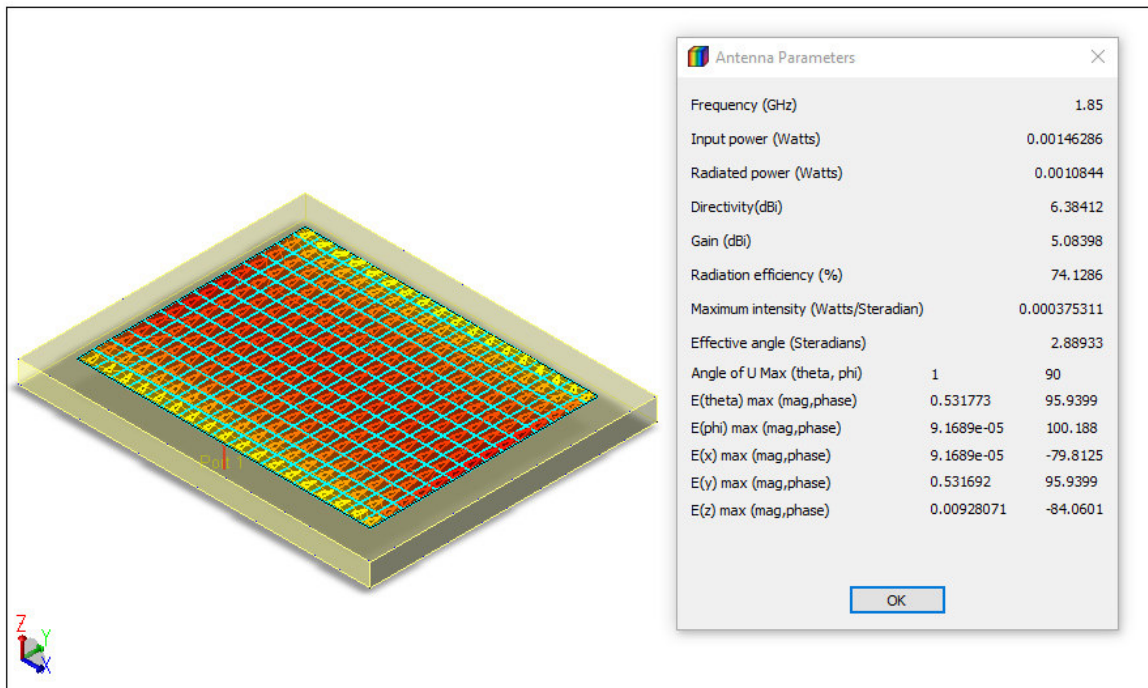


Figura 3.6. Parámetros de la antena tipo parche rectangular a la frecuencia de 1.85 GHz.

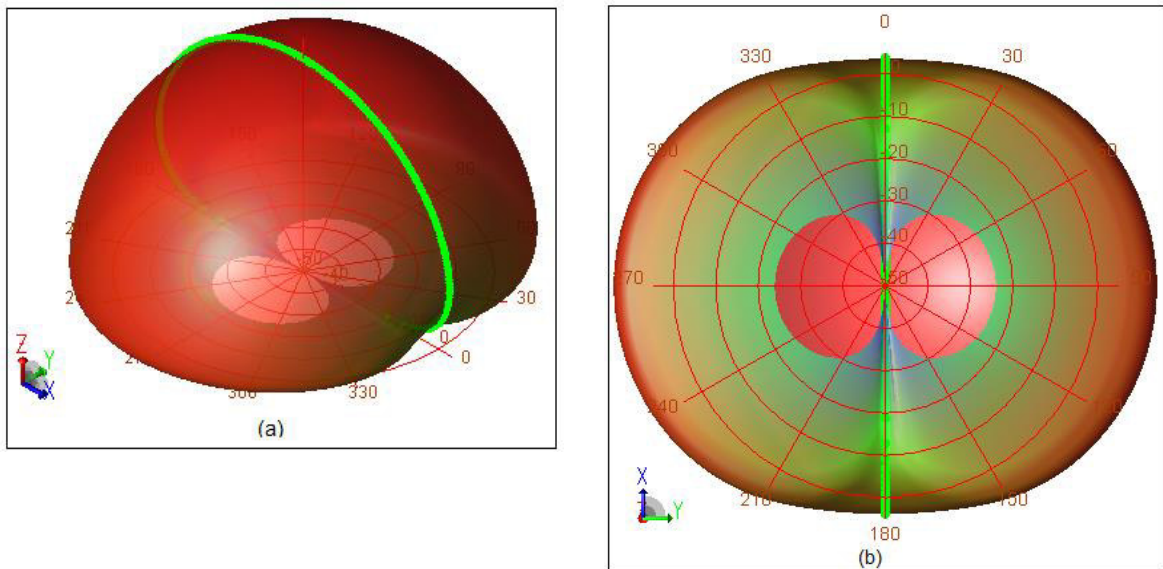


Figura 3.7. Patrón de radiación 3D: (a) vista frontal, (b) vista posterior.

3.1.1 SIMULACIÓN DE LOS ARREGLO LINEALES 1x3 y 3x1 CON EL PARCHÉ RECTANGULAR

Una vez obtenida la simulación del elemento base del arreglo, se presenta la simulación de los arreglos lineales 1x3 y 3x1 con el parche rectangular como elemento base de los arreglos; se presentan los parámetros de cada uno de los elementos que conforman el arreglo lineal, los resultados serán analizados al final del capítulo.

Se debe mencionar que, en las simulaciones de los arreglos, las antenas serán alimentadas simultáneamente, para posteriormente ser analizadas elemento por elemento y como un arreglo total.

3.1.1.1 Arreglo lineal 1x3 con elementos rectangulares

En este arreglo la separación entre parches rectangulares es de $\lambda/2$. En la Figura 3.8 se presenta el arreglo lineal 1x3 con elementos rectangulares con la separación calculada en la sección 2.1.2.

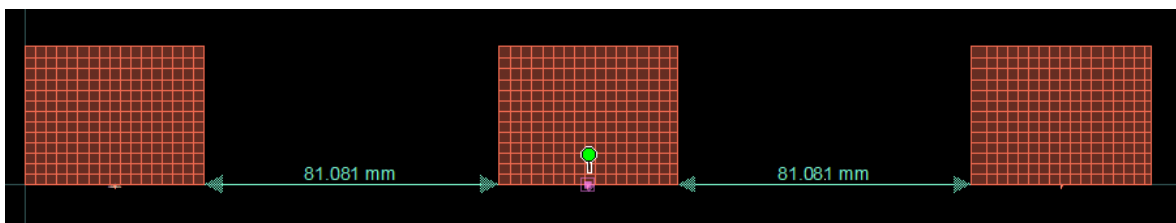


Figura 3.8. Arreglo lineal 1x3 con elementos rectangulares.

En la Figura 3.9 se presenta la simulación de los elementos rectangulares que conforman el arreglo 1x3, posteriormente en la Tabla 3.1 se presentan los valores de impedancia, parámetros S11 y ancho de banda simulados de cada uno de los elementos del arreglo.

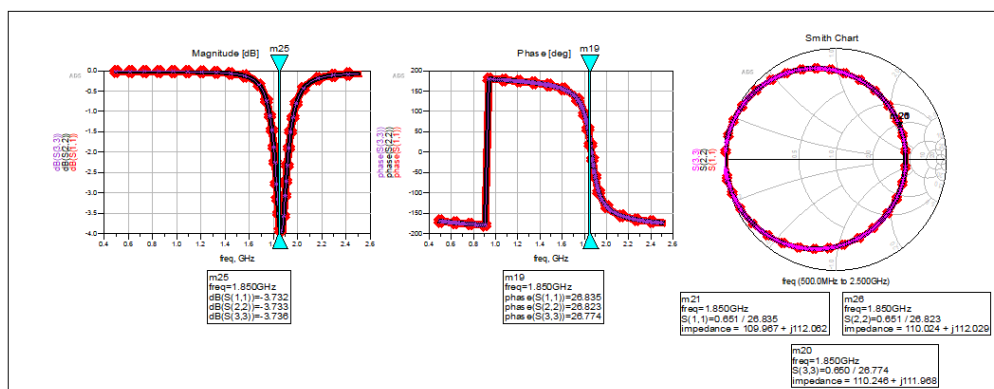
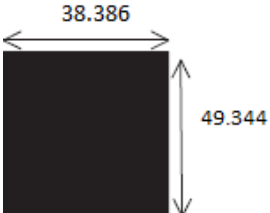


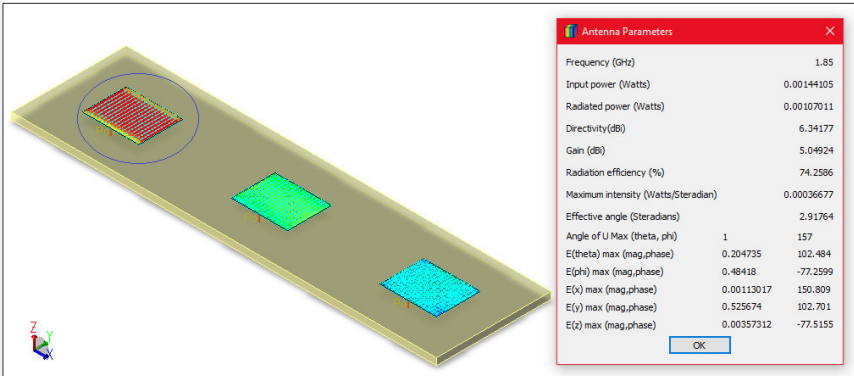
Figura 3.9. Parámetros S11 e impedancia de los elementos rectangulares del arreglo lineal 1x3.

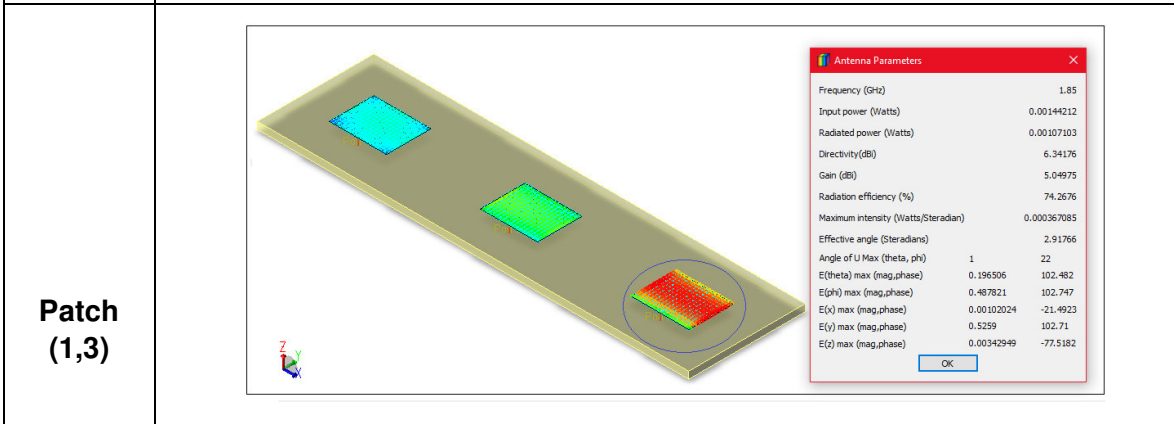
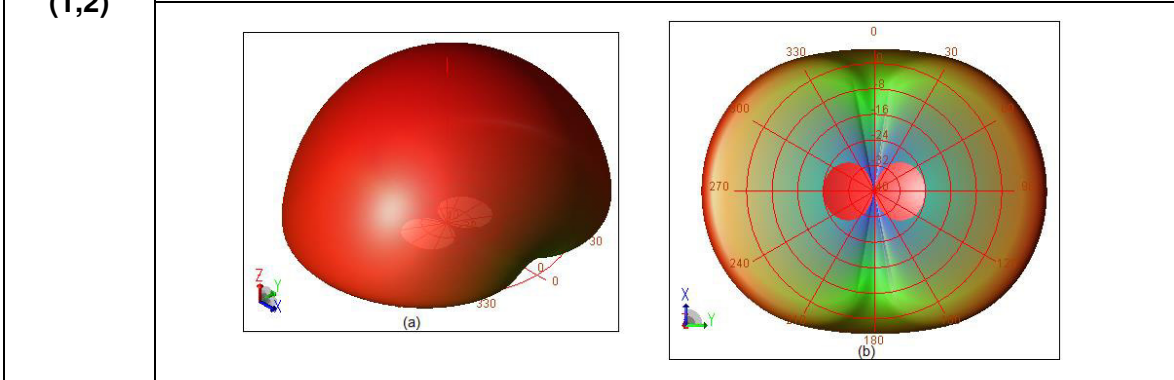
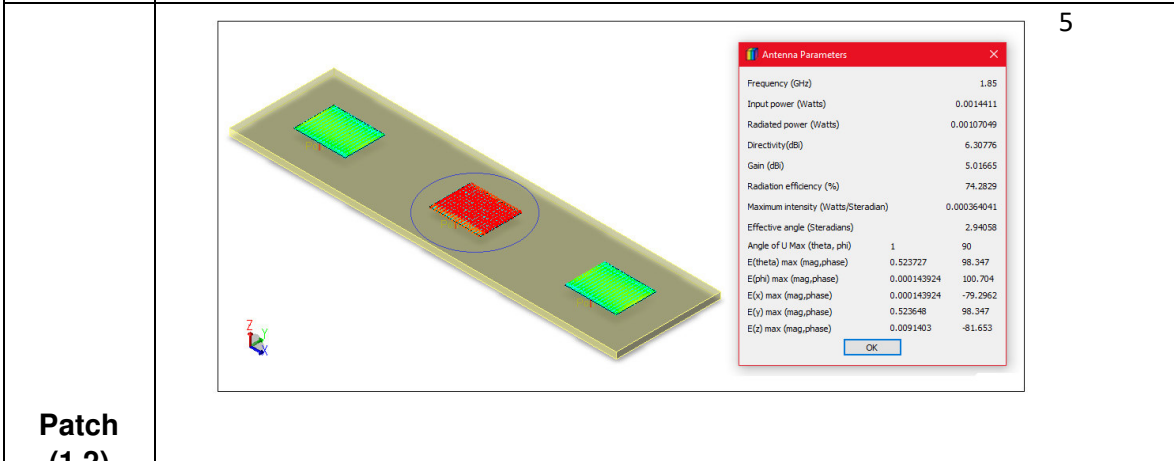
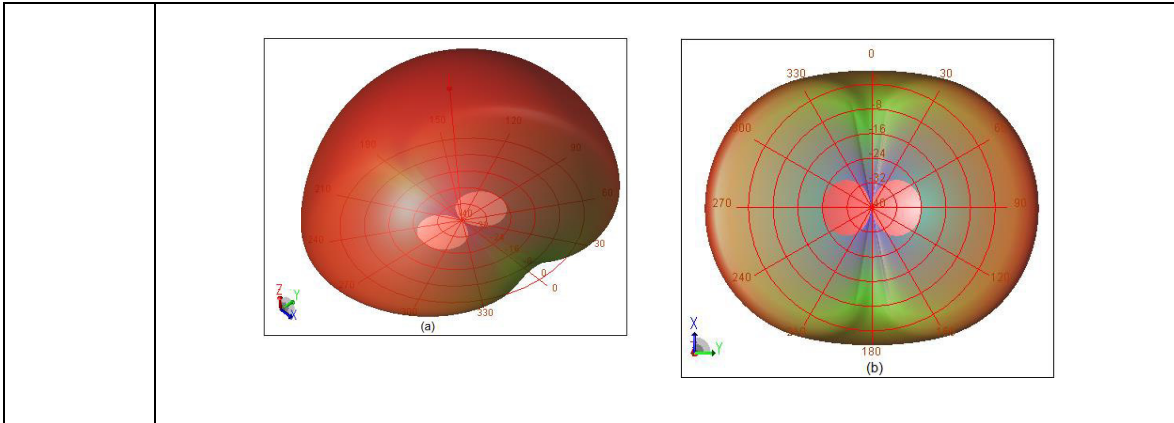
Tabla 3.1. Parámetros S11, impedancia de entrada y ancho de banda de cada uno de los elementos rectangulares del arreglo 1x3.

Arreglo 1x3		Impedancia Z (Ω)	S11 (dB)	Fase ($^\circ$)	Ancho de banda (a - 3dB)
Parche sin línea de alimentación 		131.71+j109.54	-3.82 dB	22.19	65 MHz (3.51 %)
Arreglo 1x3	Patch (1,1)	119.56+j111.75	-3.73 dB	26.84	67 MHz (3.62 %)
	Patch (1,2)	110.02+j112.03	-3.73 dB	26.82	67 MHz (3.62 %)
	Patch (1,3)	110.25+j111.968	-3.74 dB	26.77	67 MHz (3.62 %)

A continuación, se presenta la Tabla 3.2 que incluye los parámetros simulados como frecuencia de resonancia, potencia de entrada, potencia radiada, directividad, ganancia, y eficiencia de radiación para cada uno de los elementos del arreglo 1x3 y de todo el arreglo, además se muestran los lóbulos de radiación, tanto en vista frontal como en vista posterior de cada elemento y de todo el arreglo de elementos rectangulares, para posteriormente presentar la Tabla 3.3, donde se resumen todos los parámetros mencionados.

Tabla 3.2 Parámetros simulados y lóbulos de radiación del arreglo 1x3 de parches rectangulares.

Elemento	Parámetros y lóbulos de radiación
Patch (1,1)	



Arreglo completo
1x3

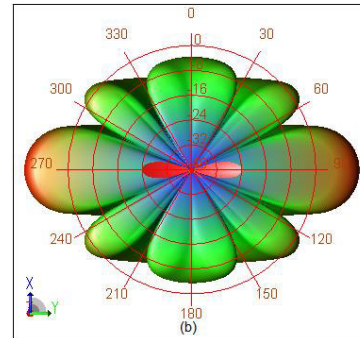
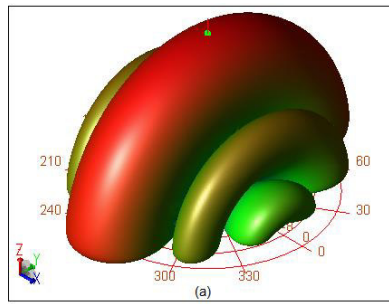
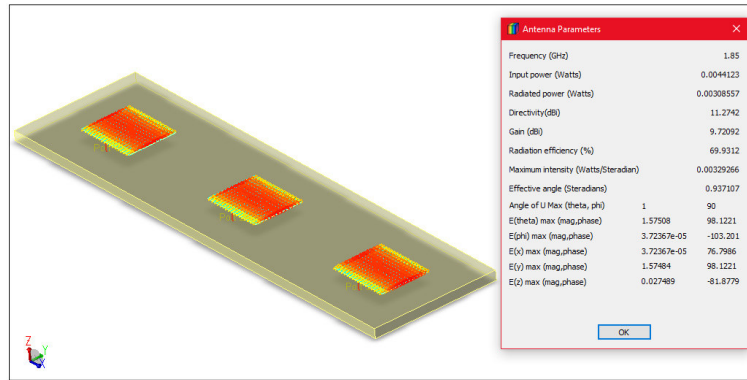
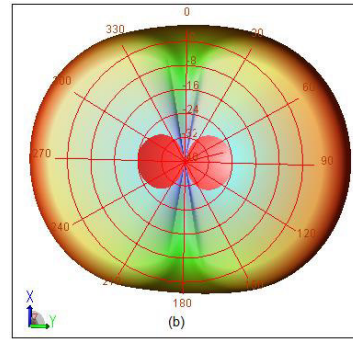
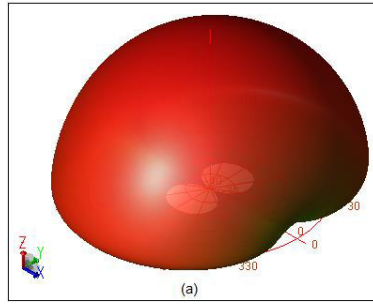
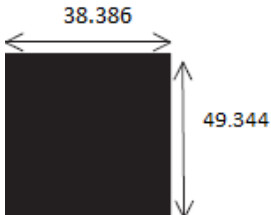


Tabla 3.3 Parámetros de los elementos del arreglo 1x3.

Arreglo 1x3		Directividad	Ganancia	Eficiencia
Parche sin línea de alimentación 		6.38 dBi	5.08 dBi	74.13 %
Arreglo 1x3	Patch (1,1)	6.34 dBi	5.05 dBi	74.26 %
	Patch (1,2)	6.31 dBi	5.02 dBi	74.28 %
	Patch (1,3)	6.34 dBi	5.05 dBi	74.27 %
	Arreglo completo	11.27 dBi	9.72 dBi	69.93 %

Como se observa en la Tabla 3.3, los valores de directividad, ganancia y eficiencia son muy similares al analizar los parches uno a uno, pero se observa un incremento notorio en los valores al obtener la simulación del arreglo completo, estos valores se analizarán en comparación con los demás arreglos al final del capítulo.

3.1.1.2 Arreglo lineal 3x1 de elementos rectangulares

Para este arreglo se estableció la misma separación entre parches, es decir la separación de 81.081mm equivalente a $\lambda/2$. En la Figura 3.10 se presenta el arreglo lineal 3x1 con parches rectangulares como elemento base.

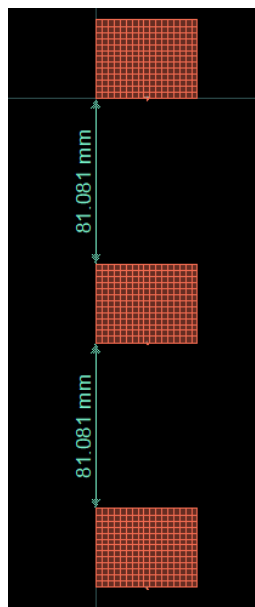


Figura 3.10. Arreglo lineal 3x1 con elementos rectangulares.

En la Figura 3.11 se presentan los resultados de la simulación que muestran los parámetros S11, impedancia y ancho de banda de cada uno de los elementos rectangulares del arreglo 3x1, posteriormente se presenta la Tabla 3.4, la cual contiene los valores de los parámetros mencionados.

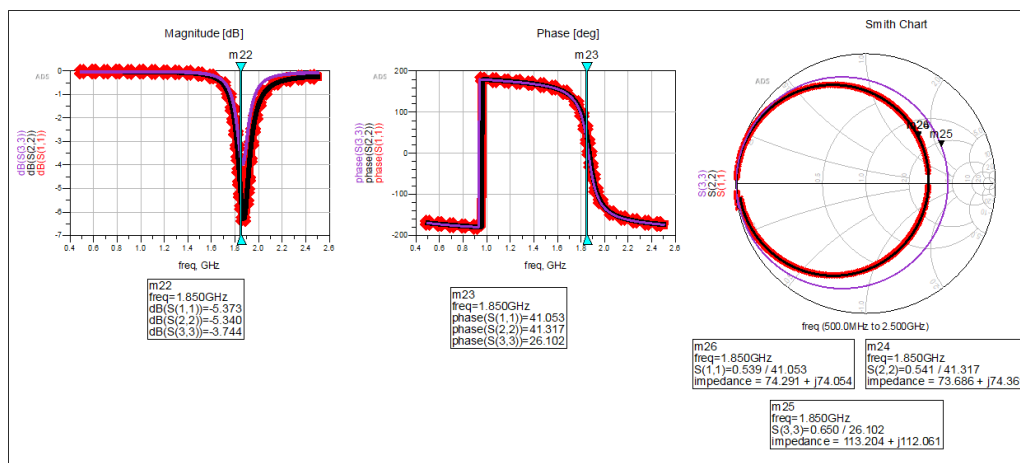


Figura 3.11. Parámetros S11 e impedancia de los elementos rectangulares del arreglo lineal 3x1.

Tabla 3.4. Parámetros S11 e impedancia de entrada de cada uno de los elementos del arreglo 3x1.

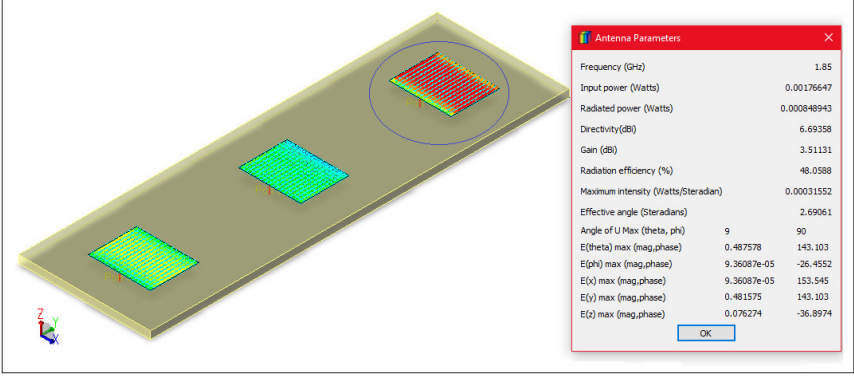
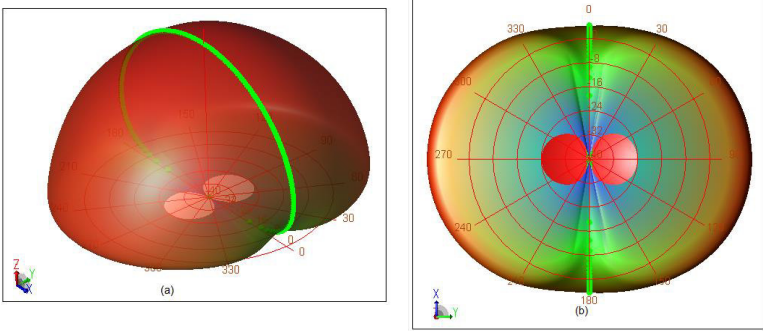
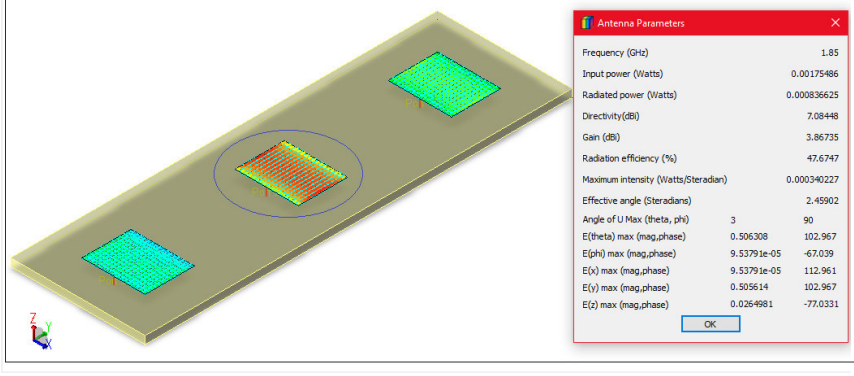
Arreglo 3x1		Impedancia Z (Ω)	S11 (dB)	Fase (°)	Ancho de banda (a - 3dB)
Arreglo 3x1	Patch (1,1)	74.29 + j74.05	-5.373 dB	41.05	125 MHz (6.76 %)
	Patch (2,1)	73.69 + j74.36	-5.34 dB	41.32	125 MHz (6.65 %)
	Patch (3,1)	113.20 + j112.06	-3.74 dB	26.10	65 MHz (3.51 %)

Como se puede observar en la Tabla 3.4 los valores de impedancia, S11 y ancho de banda en los elementos 1,1 y 2,1 del arreglo presentan valores similares, el elemento 3,1 presenta una menor adaptación de impedancia, disminuyendo notablemente el ancho de banda a - 3 dB, estos valores serán analizados al final del capítulo.

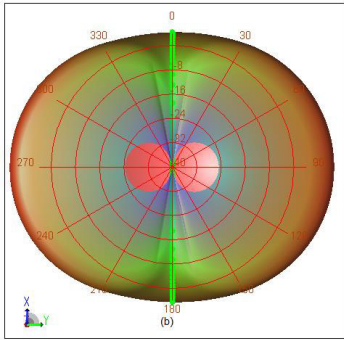
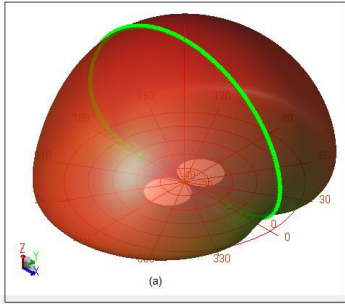
A continuación, se presenta la Tabla 3.5 en donde se detallan los parámetros de radiación obtenidos de la simulación de cada uno de los elementos del arreglo 3x1 y de todo el

arreglo en general, posteriormente se presenta la Tabla 3.6 que muestra el resumen de los parámetros mencionados.

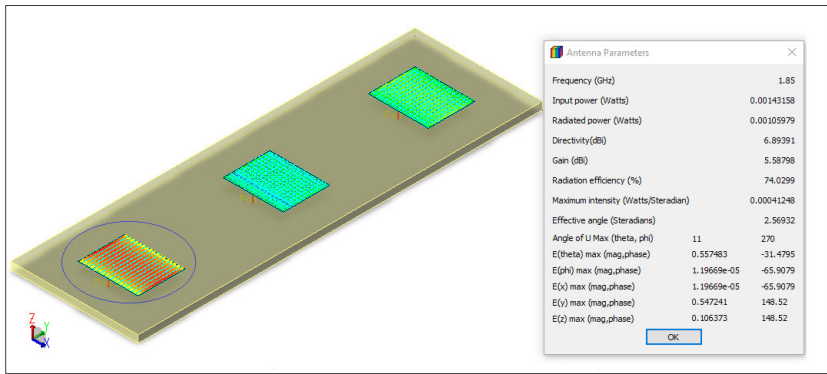
Tabla 3.5 Parámetros simulados y lóbulos de radiación del arreglo 3x1 con parches rectangulares.

Elemento	Parámetros y lóbulos de radiación																												
Patch (1,1)	 <table border="1" data-bbox="1038 629 1318 958"> <caption>Antenna Parameters</caption> <tr><td>Frequency (GHz)</td><td>1.85</td></tr> <tr><td>Input power (Watts)</td><td>0.00176647</td></tr> <tr><td>Radiated power (Watts)</td><td>0.000848943</td></tr> <tr><td>Directivity (dB)</td><td>6.69358</td></tr> <tr><td>Gain (dB)</td><td>3.51131</td></tr> <tr><td>Radiation efficiency (%)</td><td>48.0588</td></tr> <tr><td>Maximum intensity (Watts/Steradian)</td><td>0.00031552</td></tr> <tr><td>Effective angle (Steradians)</td><td>2.69061</td></tr> <tr><td>Angle of U Max (theta, phi)</td><td>9 90</td></tr> <tr><td>E(theta) max (mag,phase)</td><td>0.487578 143.103</td></tr> <tr><td>E(phi) max (mag,phase)</td><td>9.36087e-05 -26.4552</td></tr> <tr><td>E(x) max (mag,phase)</td><td>9.36087e-05 153.545</td></tr> <tr><td>E(y) max (mag,phase)</td><td>0.481575 143.103</td></tr> <tr><td>E(z) max (mag,phase)</td><td>0.076274 -36.8974</td></tr> </table> 	Frequency (GHz)	1.85	Input power (Watts)	0.00176647	Radiated power (Watts)	0.000848943	Directivity (dB)	6.69358	Gain (dB)	3.51131	Radiation efficiency (%)	48.0588	Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.00031552	Effective angle (Steradians)	2.69061	Angle of U Max (theta, phi)	9 90	E(theta) max (mag,phase)	0.487578 143.103	E(phi) max (mag,phase)	9.36087e-05 -26.4552	E(x) max (mag,phase)	9.36087e-05 153.545	E(y) max (mag,phase)	0.481575 143.103	E(z) max (mag,phase)	0.076274 -36.8974
Frequency (GHz)	1.85																												
Input power (Watts)	0.00176647																												
Radiated power (Watts)	0.000848943																												
Directivity (dB)	6.69358																												
Gain (dB)	3.51131																												
Radiation efficiency (%)	48.0588																												
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.00031552																												
Effective angle (Steradians)	2.69061																												
Angle of U Max (theta, phi)	9 90																												
E(theta) max (mag,phase)	0.487578 143.103																												
E(phi) max (mag,phase)	9.36087e-05 -26.4552																												
E(x) max (mag,phase)	9.36087e-05 153.545																												
E(y) max (mag,phase)	0.481575 143.103																												
E(z) max (mag,phase)	0.076274 -36.8974																												
	 <table border="1" data-bbox="1038 1503 1318 1832"> <caption>Antenna Parameters</caption> <tr><td>Frequency (GHz)</td><td>1.85</td></tr> <tr><td>Input power (Watts)</td><td>0.00175486</td></tr> <tr><td>Radiated power (Watts)</td><td>0.000836625</td></tr> <tr><td>Directivity (dB)</td><td>7.08448</td></tr> <tr><td>Gain (dB)</td><td>3.86735</td></tr> <tr><td>Radiation efficiency (%)</td><td>47.6747</td></tr> <tr><td>Maximum intensity (Watts/Steradian)</td><td>0.000340227</td></tr> <tr><td>Effective angle (Steradians)</td><td>2.45902</td></tr> <tr><td>Angle of U Max (theta, phi)</td><td>3 90</td></tr> <tr><td>E(theta) max (mag,phase)</td><td>0.506308 102.967</td></tr> <tr><td>E(phi) max (mag,phase)</td><td>9.53791e-05 -67.039</td></tr> <tr><td>E(x) max (mag,phase)</td><td>9.53791e-05 112.961</td></tr> <tr><td>E(y) max (mag,phase)</td><td>0.505614 102.967</td></tr> <tr><td>E(z) max (mag,phase)</td><td>0.0264981 -77.0331</td></tr> </table>	Frequency (GHz)	1.85	Input power (Watts)	0.00175486	Radiated power (Watts)	0.000836625	Directivity (dB)	7.08448	Gain (dB)	3.86735	Radiation efficiency (%)	47.6747	Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000340227	Effective angle (Steradians)	2.45902	Angle of U Max (theta, phi)	3 90	E(theta) max (mag,phase)	0.506308 102.967	E(phi) max (mag,phase)	9.53791e-05 -67.039	E(x) max (mag,phase)	9.53791e-05 112.961	E(y) max (mag,phase)	0.505614 102.967	E(z) max (mag,phase)	0.0264981 -77.0331
Frequency (GHz)	1.85																												
Input power (Watts)	0.00175486																												
Radiated power (Watts)	0.000836625																												
Directivity (dB)	7.08448																												
Gain (dB)	3.86735																												
Radiation efficiency (%)	47.6747																												
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000340227																												
Effective angle (Steradians)	2.45902																												
Angle of U Max (theta, phi)	3 90																												
E(theta) max (mag,phase)	0.506308 102.967																												
E(phi) max (mag,phase)	9.53791e-05 -67.039																												
E(x) max (mag,phase)	9.53791e-05 112.961																												
E(y) max (mag,phase)	0.505614 102.967																												
E(z) max (mag,phase)	0.0264981 -77.0331																												

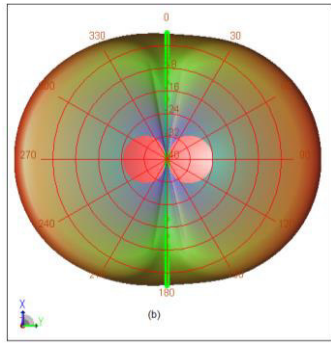
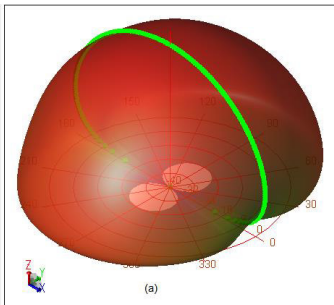
Patch (2,1)



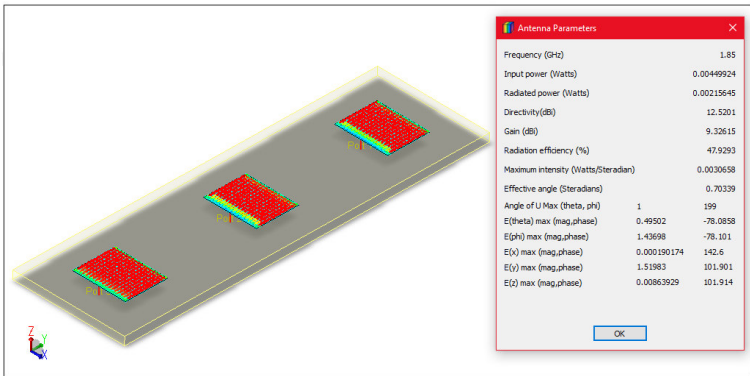
Patch (3,1)



Patch (3,1)



Arreglo completo 3x1



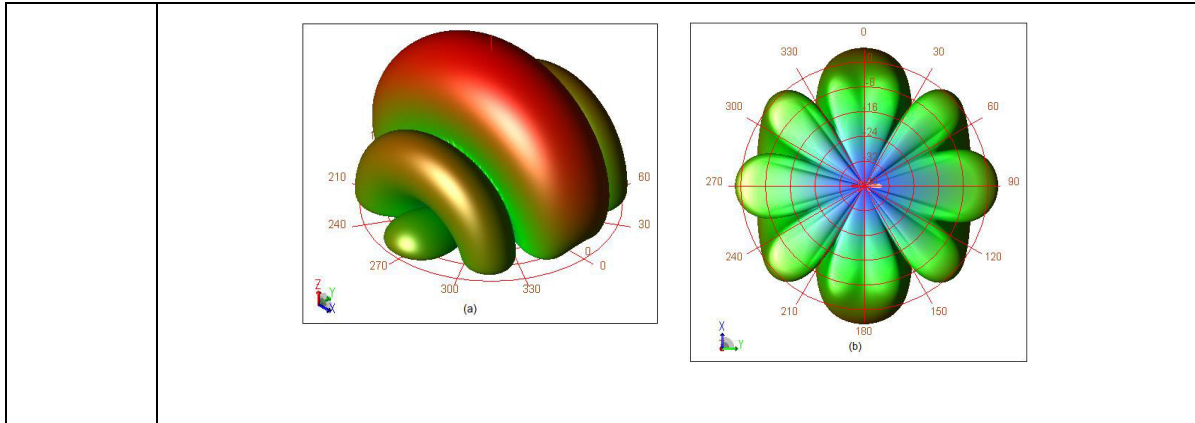


Tabla 3.6 Parámetros de los elementos del arreglo 3x1.

Arreglo 3x1		Directividad	Ganancia	Eficiencia
Arreglo 3x1	Patch (1,1)	6.69 dBi	3.51 dBi	48.06 %
	Patch (2,1)	7.08 dBi	3.87 dBi	47.67 %
	Patch (3,1)	6.89 dBi	5.59 dBi	74.03 %
	Arreglo completo	12.52 dBi	9.33 dBi	47.93 %

Como se observa en la Tabla 3.6 los parámetros de directividad y ganancia para los elementos 1,1 y 2,1 son similares, al igual que su eficiencia de radiación, pero en el elemento 3,1 se observa un aumento de ganancia y eficiencia notorio, esto se debe a la posición del elemento en el arreglo. En cuanto a los parámetros del arreglo completo se aprecia un valor alto de ganancia y directividad, pero un valor bajo en eficiencia.

3.2 SIMULACIÓN DEL ELEMENTO RECTANGULAR BASE DEL ARREGLO CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP

Con las dimensiones obtenidas en el diseño de la línea de alimentación se procedió a realizar la simulación, en la Figura 3.12 se muestran los valores del parámetro S11 que en magnitud muestra un valor de -6.71dB y en la fase un valor aproximado de 10 grados, además la impedancia de entrada del parche con la línea de alimentación tiene un valor de $156 + j86.51\Omega$.

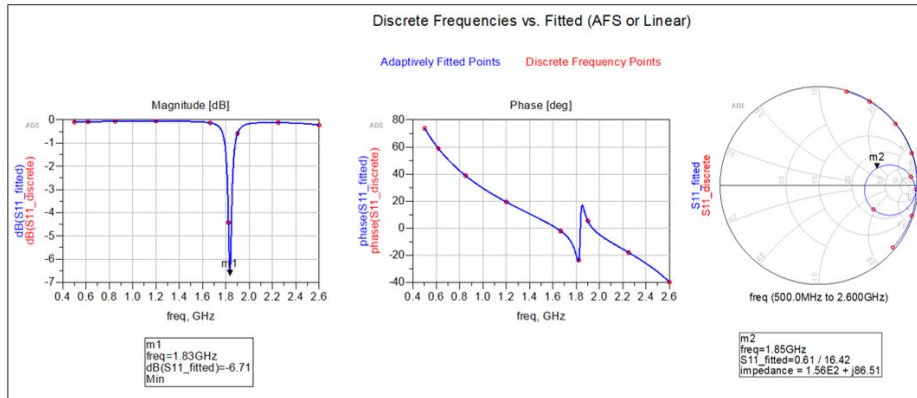


Figura 3.12. S11 e impedancia del parche rectangular a la frecuencia de 1.85 GHz.

Como podemos observar la línea de alimentación no cumple con su objetivo que es acoplar la antena a una impedancia característica de 50Ω , además se observa que la frecuencia de resonancia se ve desplazada a una frecuencia menor por lo que con la ayuda del software se procedió a modificar las dimensiones de la línea para obtener una buena adaptación a la frecuencia que se necesita. En la Tabla 3.7 se presentan los valores del diseño y los valores optimizados con la simulación de la línea de alimentación y en la Figura 3.13 se presentan las dimensiones del parche rectangular con la línea de alimentación, esta línea cuenta con sus dimensiones ya optimizadas para obtener mejores resultados

Tabla 3.7. Dimensiones de la línea de alimentación.

TL2 ($\lambda/4$)	Valor calculado	Valor optimizado
L	23.99 mm	11.5 mm
W	0.154 mm	0.6 mm

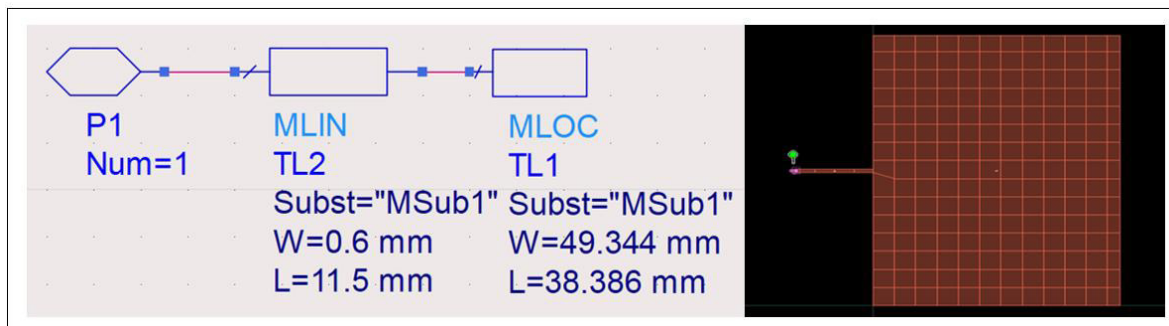


Figura 3.13. Parche rectangular con línea de alimentación ajustada a la frecuencia de 1.85 GHz.

Una vez obtenidas las dimensiones optimizadas de la línea se procedió a simular el parche rectangular. En la Figura 3.14 se presenta el parámetro S11 del parche que tiene un valor de -40.66 dB en magnitud y 103 grados en fase a una frecuencia de 1.85 GHz, además, se muestra una impedancia de entrada de $50.58 + j0.73 \Omega$ y para valores menores a -10 dB un ancho de banda de 25 MHz que en valor porcentual es 1.35 %.

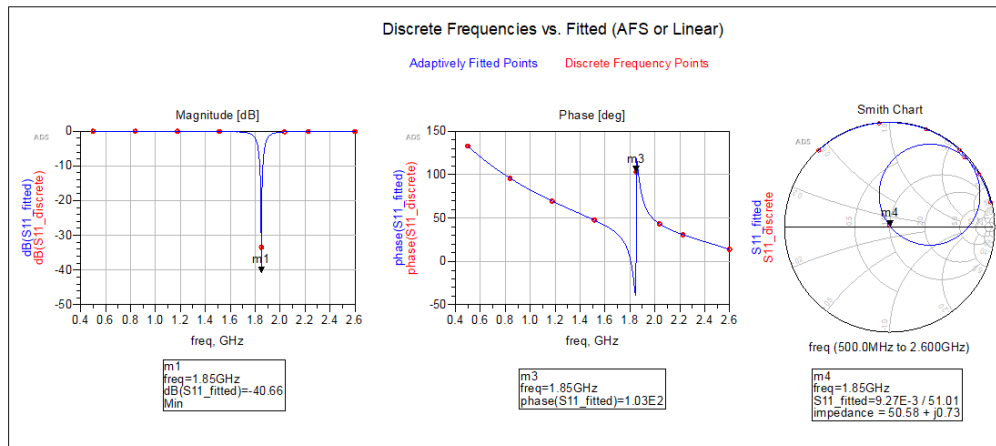


Figura 3.14. S11 e impedancia del parche rectangular con línea de alimentación ajustada a la frecuencia de 1.85 GHz.

En el parámetro de la directividad se presenta un valor de 6.37 dBi, una ganancia de 3.25 dBi y una eficiencia de 48.79 %, en la Figura 3.15 se presenta el resultado de los parámetros mencionados, adicionalmente en la Figura 3.16 se muestran los patrones de radiación de la antena en vista frontal y en vista posterior.

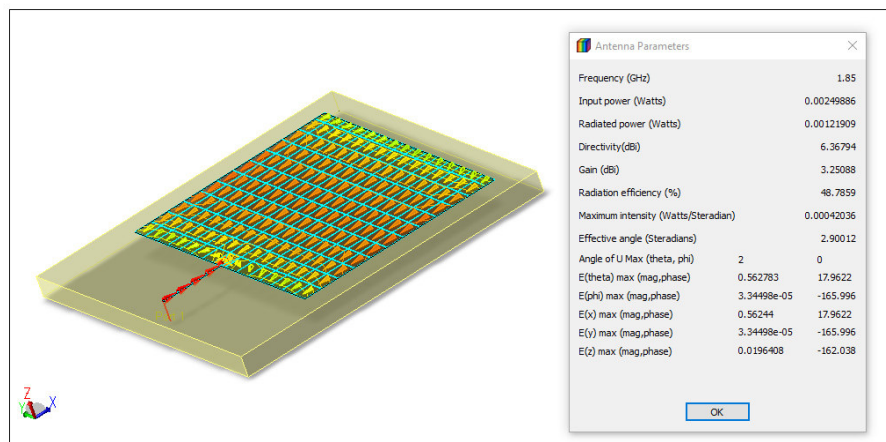


Figura 3.15. Parámetros de la antena tipo parche rectangular con línea de alimentación a la frecuencia de 1.85 GHz.

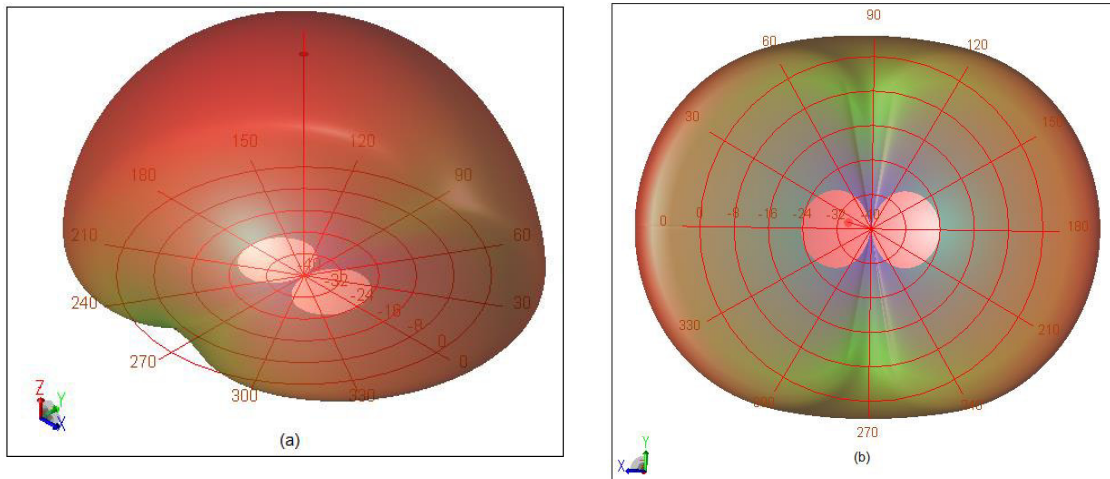


Figura 3.16. Patrón de radiación 3D del parche rectangular con línea de alimentación: (a) vista frontal, (b) vista posterior.

3.2.1 SIMULACIÓN DEL ARREGLO LINEAL 1x3 y 3x1 CON EL PARCHO RECTANGULAR Y LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP.

Se presenta la simulación de los arreglos lineales 1x3 y 3x1 conformados por el parche rectangular con línea de alimentación como elemento base de los arreglos y se indica los parámetros de cada uno de los elementos que conforman el arreglo lineal, los resultados se analizarán al final del capítulo.

3.2.1.1 Arreglo lineal 1x3

Para este arreglo se utilizó la misma separación entre parches, es decir la distancia de 81.081mm equivalente a $\lambda/2$, en la Figura 3.17 se presenta el arreglo lineal 1x3 de parches rectangulares con línea de alimentación.

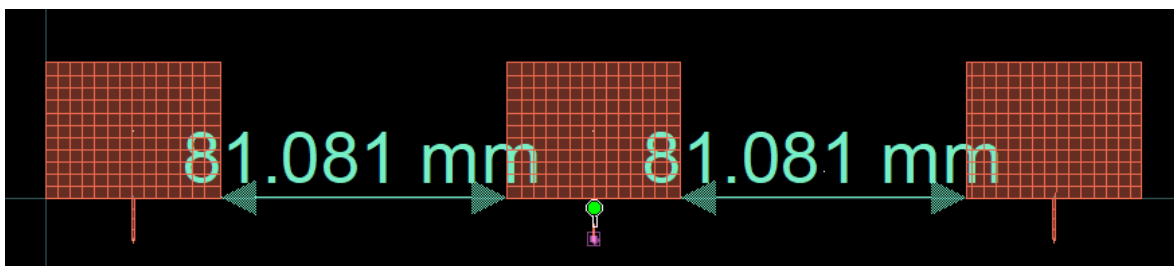


Figura 3.17. Arreglo lineal 1x3 de elementos rectangulares con línea de alimentación.

En Figura 3.18 se presentan las simulaciones de los elementos que conforman el arreglo 1x3 con línea de alimentación, posteriormente en la Tabla 3.8 se presentan los valores de impedancia, S11 y ancho de banda de cada uno de los elementos del arreglo 1x3.

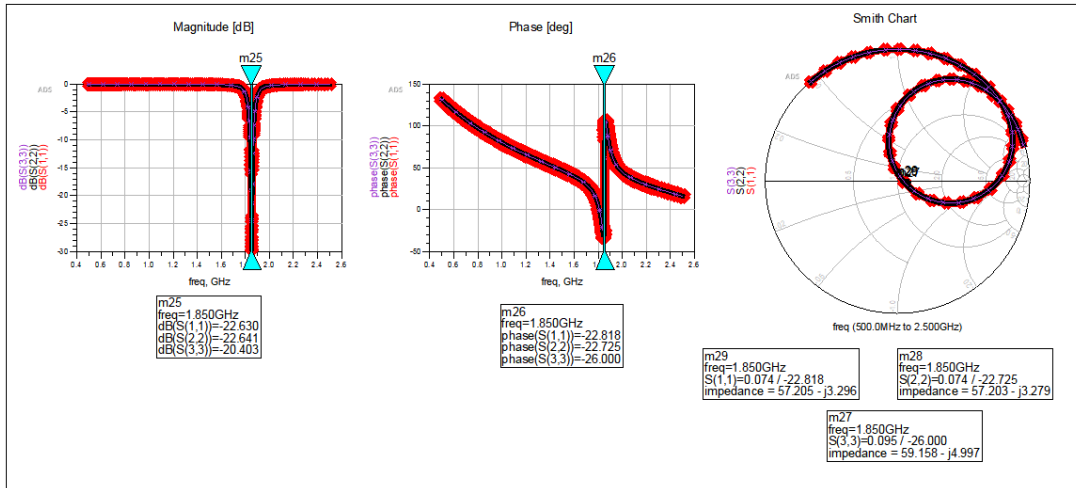


Figura 3.18. Parámetros S11 e impedancia de los elementos del arreglo lineal 1x3 con línea de alimentación.

Tabla 3.8. Parámetros S11 e impedancia de entrada de cada uno de los elementos del arreglo 1x3 con líneas de alimentación.

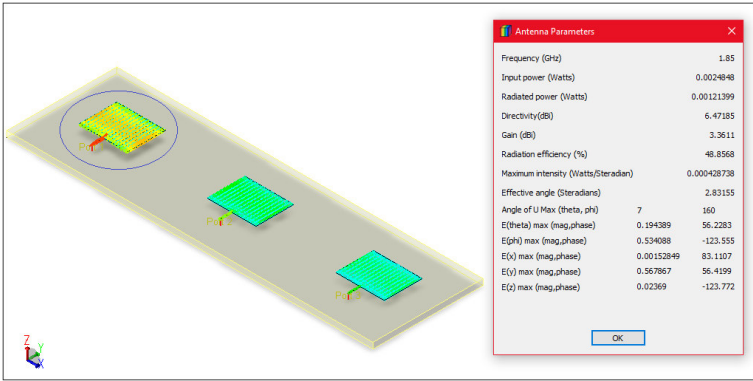
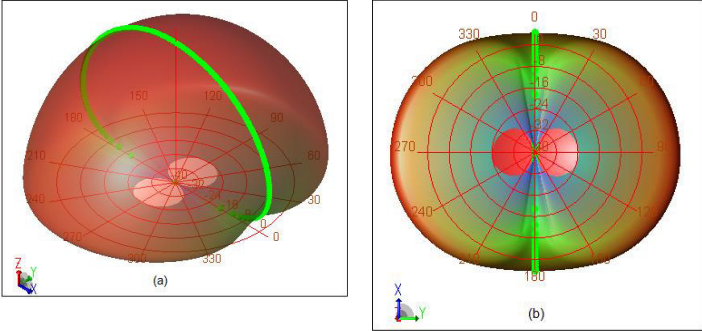
Arreglo 1x3		Impedancia Z (Ω)	S11 (dB)	Fase ($^\circ$)	Ancho de banda (a - 10dB)
		50.58 + j0.73	-40.66 dB	103	25 MHz (1.35 %)
Arreglo 1x3	Patch (1,1)	57.21-j3.30	-22.63 dB	-22.82	25 MHz (1.35 %)
	Patch (1,2)	57.20-j3.28	-22.64 dB	-22.73	25 MHz (1.35 %)
	Patch (1,3)	59.16-j4.99	-20.40 dB	-26.00	26 MHz (1.41 %)

Los valores que se presentan en la Tabla 3.8 muestran que con la línea de alimentación se logró una buena adaptación de la antena a la línea, en este caso los valores de ancho

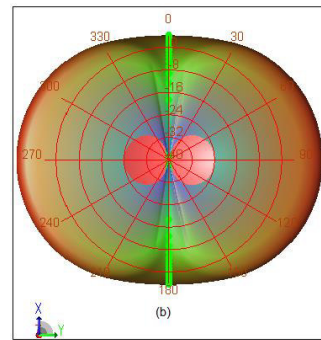
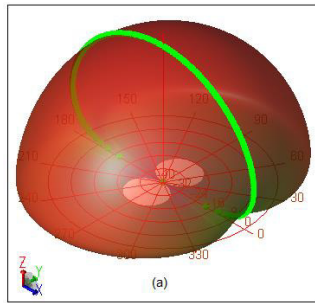
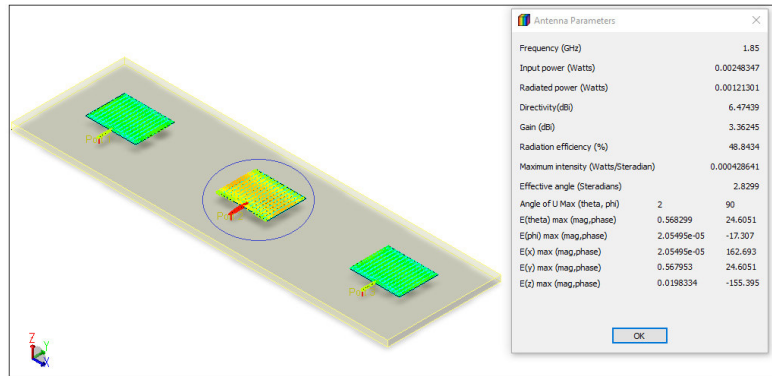
de banda de tomarán para valores menores a -10 dB, debido a que se observa adaptación de impedancias.

A continuación, se presenta la Tabla 3.9 donde se presenta los parámetros simulados de cada uno de los elementos con línea de alimentación del arreglo 1x3, adicional se presentan los lóbulos de radiación con vista frontal y posterior, posteriormente se presenta la Tabla 3.10 con los valores más importantes de cada elemento del arreglo.

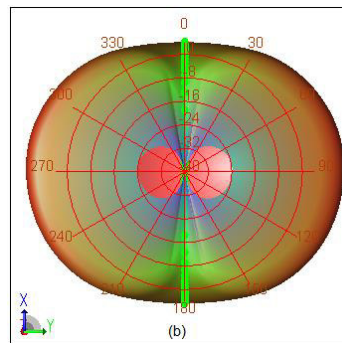
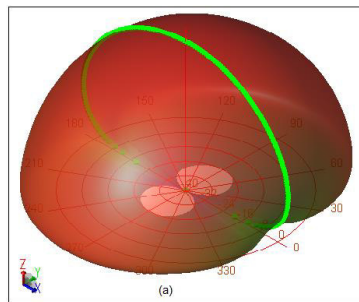
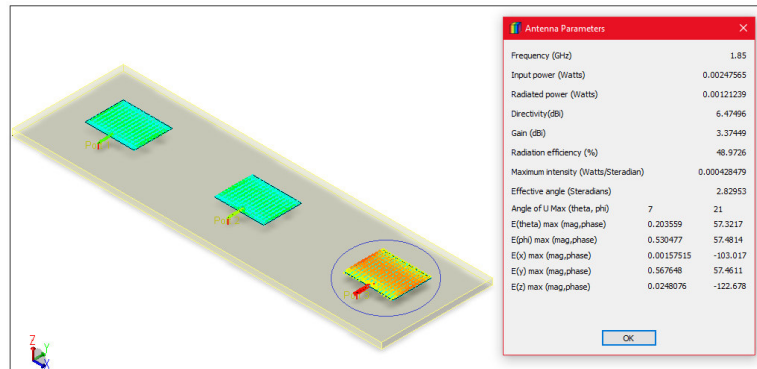
Tabla 3.9 Parámetros simulados y lóbulos de radiación del arreglo 1x3 de parches rectangulares con línea de alimentación.

Elemento	Parámetros y lóbulos de radiación																												
Patch (1,1)	 <table border="1" data-bbox="954 853 1214 1189"> <caption>Antenna Parameters</caption> <tr><td>Frequency (GHz)</td><td>1.85</td></tr> <tr><td>Input power (Watts)</td><td>0.0024848</td></tr> <tr><td>Radiated power (Watts)</td><td>0.00121399</td></tr> <tr><td>Directivity(dB)</td><td>6.47185</td></tr> <tr><td>Gain (dB)</td><td>3.3611</td></tr> <tr><td>Radiation efficiency (%)</td><td>48.8568</td></tr> <tr><td>Maximum intensity (Watts/Steradian)</td><td>0.00428738</td></tr> <tr><td>Effective angle (Steradians)</td><td>2.83155</td></tr> <tr><td>Angle of U Max (theta, phi)</td><td>7 160</td></tr> <tr><td>E(theta) max (mag,phase)</td><td>0.194389 56.2283</td></tr> <tr><td>E(phi) max (mag,phase)</td><td>0.534088 -123.555</td></tr> <tr><td>E(x) max (mag,phase)</td><td>0.00152849 83.1107</td></tr> <tr><td>E(y) max (mag,phase)</td><td>0.567867 56.4199</td></tr> <tr><td>E(z) max (mag,phase)</td><td>0.02369 -123.772</td></tr> </table>	Frequency (GHz)	1.85	Input power (Watts)	0.0024848	Radiated power (Watts)	0.00121399	Directivity(dB)	6.47185	Gain (dB)	3.3611	Radiation efficiency (%)	48.8568	Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.00428738	Effective angle (Steradians)	2.83155	Angle of U Max (theta, phi)	7 160	E(theta) max (mag,phase)	0.194389 56.2283	E(phi) max (mag,phase)	0.534088 -123.555	E(x) max (mag,phase)	0.00152849 83.1107	E(y) max (mag,phase)	0.567867 56.4199	E(z) max (mag,phase)	0.02369 -123.772
Frequency (GHz)	1.85																												
Input power (Watts)	0.0024848																												
Radiated power (Watts)	0.00121399																												
Directivity(dB)	6.47185																												
Gain (dB)	3.3611																												
Radiation efficiency (%)	48.8568																												
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.00428738																												
Effective angle (Steradians)	2.83155																												
Angle of U Max (theta, phi)	7 160																												
E(theta) max (mag,phase)	0.194389 56.2283																												
E(phi) max (mag,phase)	0.534088 -123.555																												
E(x) max (mag,phase)	0.00152849 83.1107																												
E(y) max (mag,phase)	0.567867 56.4199																												
E(z) max (mag,phase)	0.02369 -123.772																												
	 <p>(a)</p> <p>(b)</p>																												

Patch (1,2)



Patch (1,3)



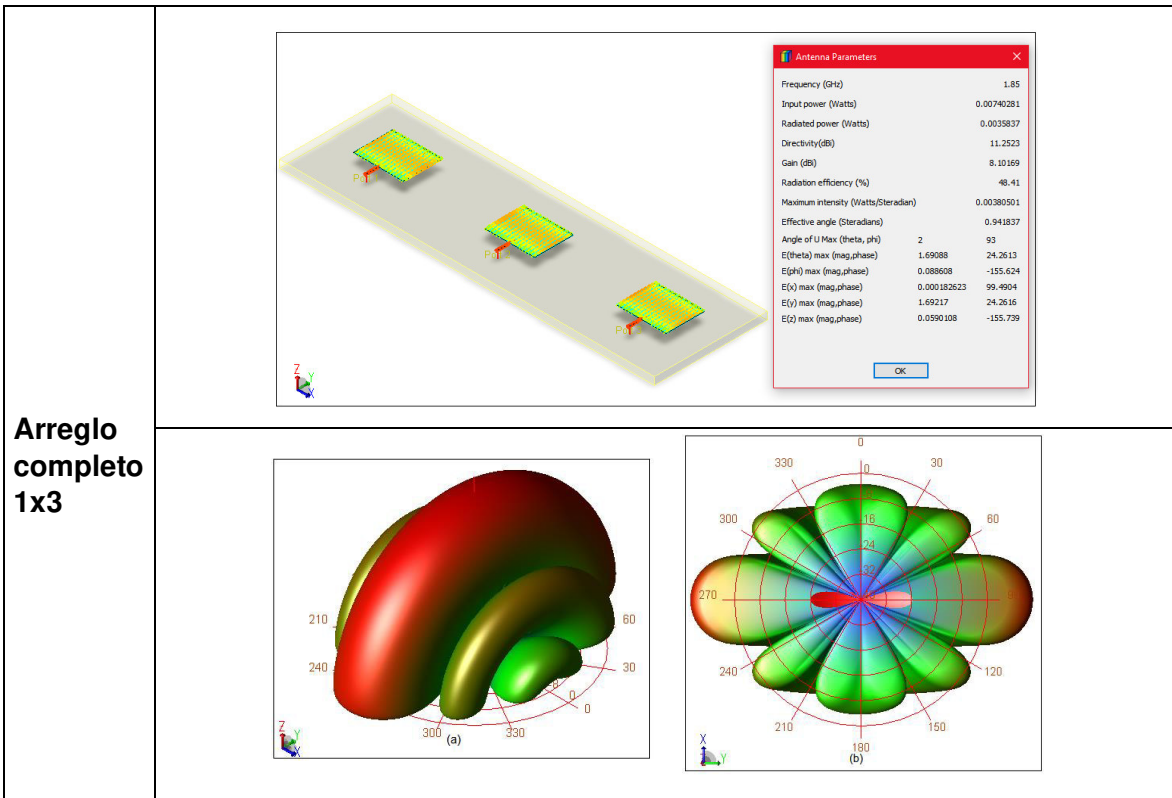


Tabla 3.10 Parámetros de los elementos con línea de alimentación del arreglo 1x3.

Arreglo 1x3		Directividad	Ganancia	Eficiencia
		6.37 dBi	3.25 dBi	48.79%
Arreglo 1x3	Patch (1,1)	6.47 dBi	3.36 dBi	48.86 %
	Patch (1,2)	6.47 dBi	3.36 dBi	48.84 %
	Patch (1,3)	6.47 dBi	3.37 dBi	48.97 %
	Arreglo completo	11.25 dBi	8.10 dBi	48.41 %

Como se puede constatar en la Tabla 3.10, los valores de directividad y ganancia son similares cuando los elementos se analizan uno a uno, en cambio al obtener los valores como un arreglo completo se observa aumento de directividad, ganancia y en este caso un valor similar de eficiencia, estos valores serán analizados al final del capítulo en conjunto con las demás simulaciones.

3.2.1.2 Arreglo lineal 3x1 de elementos rectangulares con línea de alimentación

Como se mencionó en la sección anterior, en los arreglos se utilizó la separación entre parches de una distancia de 81.081 mm, equivalente a $\lambda/2$. En la Figura 3.19 se presenta el arreglo lineal 3x1 con parches rectangulares con línea de alimentación como elemento base.

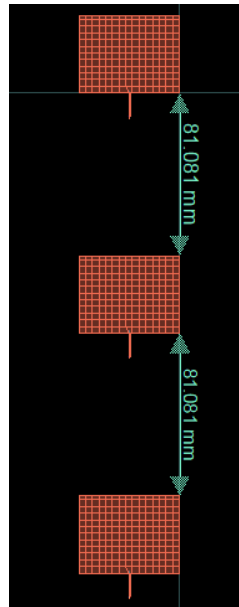


Figura 3.19. Arreglo lineal 3x1 de elementos rectangulares con líneas de alimentación.

En la Figura 3.20 se presenta la simulación de cada uno de los elementos con línea de alimentación del arreglo 3x1, donde se observa los parámetros S11, impedancia y ancho de banda, en la Tabla 3.11 contiene los valores de los parámetros mencionados.

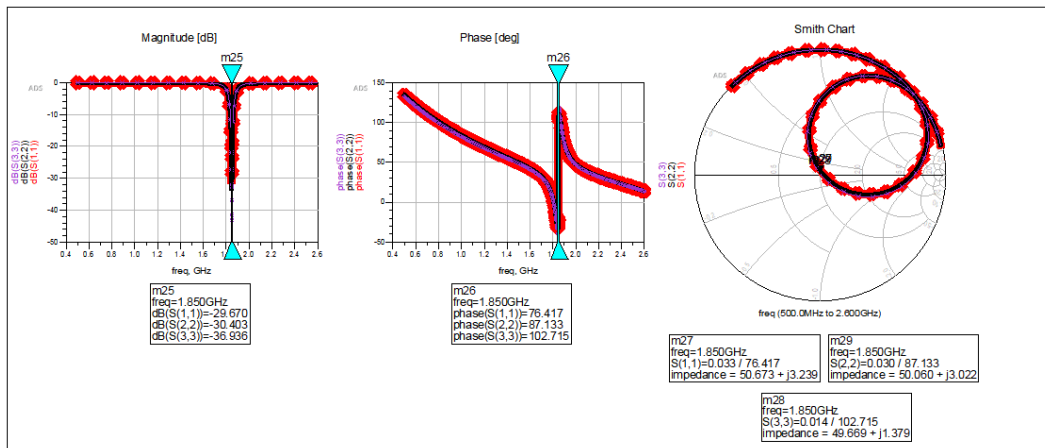


Figura 3.20. Parámetros S11 e impedancia de los elementos con línea de alimentación del arreglo lineal 3x1.

Tabla 3.11. Parámetros S11 e impedancia de entrada de cada uno de los elementos del arreglo 3x1.

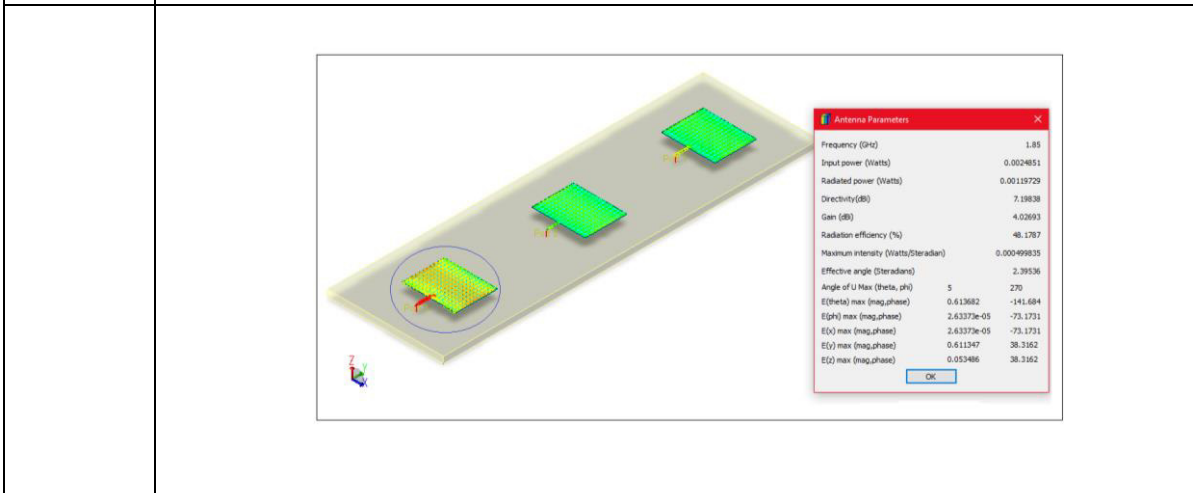
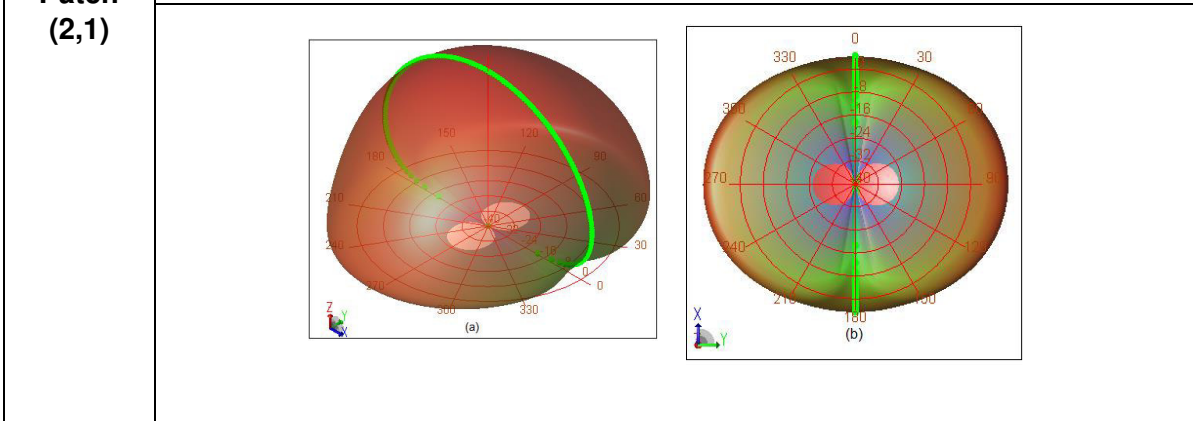
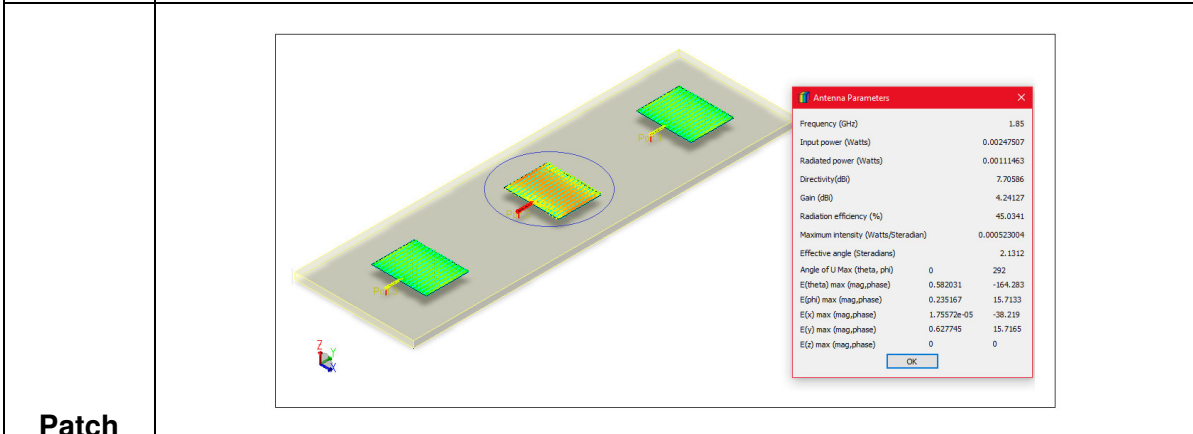
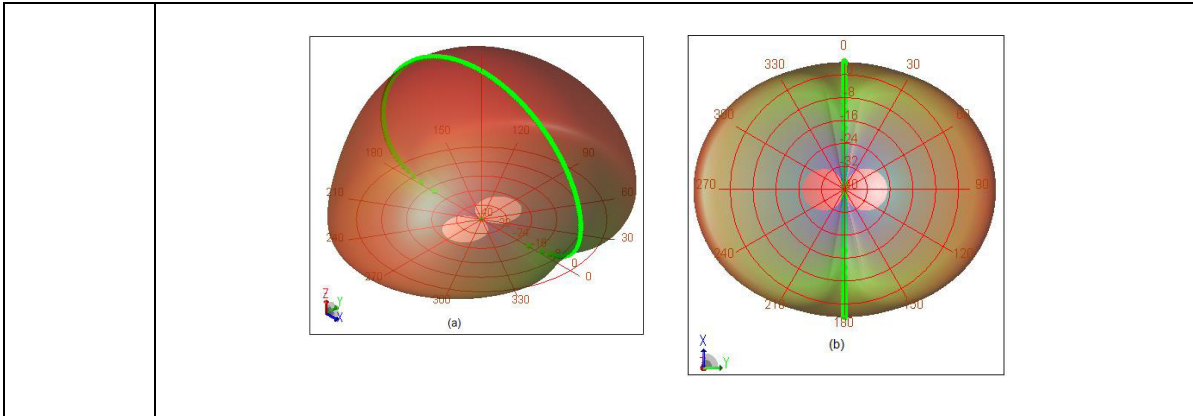
Arreglo 3x1		Impedancia Z (Ω)	S11 (dB)	Fase ($^\circ$)	Ancho de banda (a -10 dB)
Arreglo 3x1	Patch (1,1)	50.67 + j3.24	-29.67 dB	76.42	24 MHz (1.41 %)
	Patch (2,1)	50.06 + j3.02	-30.40 dB	87.13	25 MHz (1.35 %)
	Patch (3,1)	49.67 + j1.38 Ω	-36.34 dB	102.72	25 MHz (1.35 %)

Los valores que se presentan en la Tabla 3.11 muestran que con la línea de alimentación se logró una buena adaptación de la antena a la línea, en este caso los valores de ancho de banda se tomarán para valores menores a -10 dB, debido a que se observa adaptación de impedancias.

A continuación, se presenta la Tabla 3.12 donde se incluyen los parámetros obtenidos de la simulación de cada uno de los elementos con línea de alimentación del arreglo 3x1, adicional se presentan los lóbulos de radiación con vista frontal y posterior, posteriormente se presenta la Tabla 3.13 con los valores más importantes de cada elemento del arreglo.

Tabla 3.12 Parámetros simulados y lóbulos de radiación del arreglo 3x1 de parches rectangulares con línea de alimentación.

Elemento	Parámetros y lóbulos de radiación
Patch (1,1)	



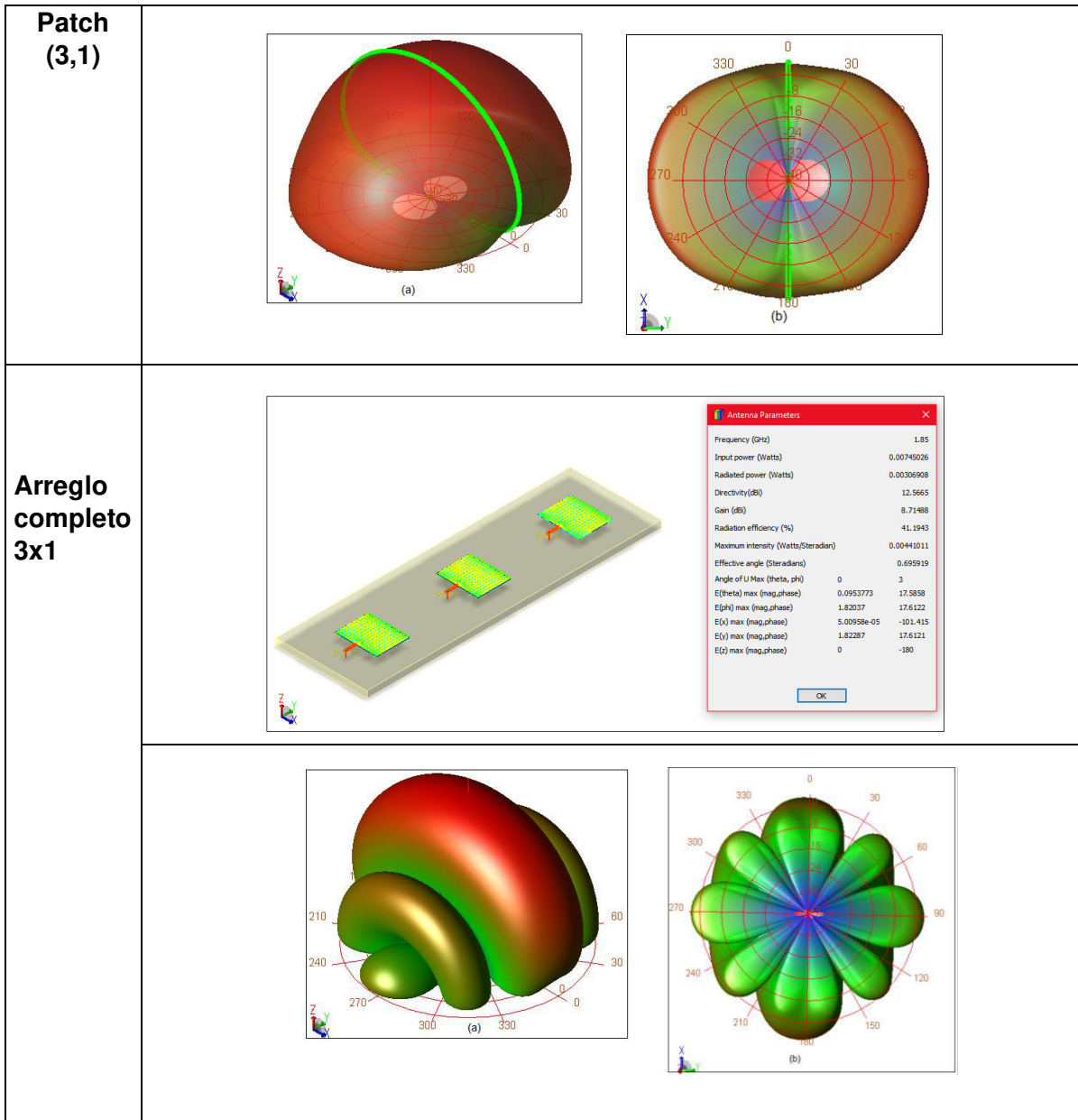


Tabla 3.13 Parámetros de los elementos rectangulares con línea de alimentación del arreglo 3x1.

Arreglo 3x1		Directividad	Ganancia	Eficiencia
Arreglo 3x1	Patch (1,1)	7.17 dBi	3.77 dBi	45.69 %
	Patch (2,1)	7.71 dBi	4.24 dBi	45.03 %
	Patch (3,1)	7.20 dBi	4.02 dBi	48.18 %
	Arreglo completo	12.57 dBi	8.71 dBi	41.19 %

Como se aprecia en la Tabla 3.13, los valores de directividad y ganancia son mejores en el elemento 2,1 del arreglo, además se observa un valor mayor de eficiencia en el elemento

3,1 del arreglo, en cuanto a los parámetros del arreglo completo se aprecian notorios cambios tanto en directividad como en ganancia, sin embargo, en eficiencia el valor disminuye, los resultados serán analizados al final del capítulo.

3.3 SIMULACIÓN DEL ELEMENTO E BASE DEL ARREGLO

Con los valores de la Tabla 2.3 se simula el elemento base del arreglo utilizando el software ADS. El elemento base se simula en el mismo ambiente (aire - sustrato FR-4 – plano a tierra) y con las mismas características que se utilizó en la simulación del parche rectangular.

En la Figura 3.21 se presenta el elemento base en forma de E en el espacio de trabajo del software, el punto de alimentación que se eligió fue en $W/2$ en el lado sin inserciones ya que en las simulaciones de prueba para buscar el mejor punto de alimentación este punto obtuvo mejores parámetros como impedancia, S11, directividad, ganancia y eficiencia.

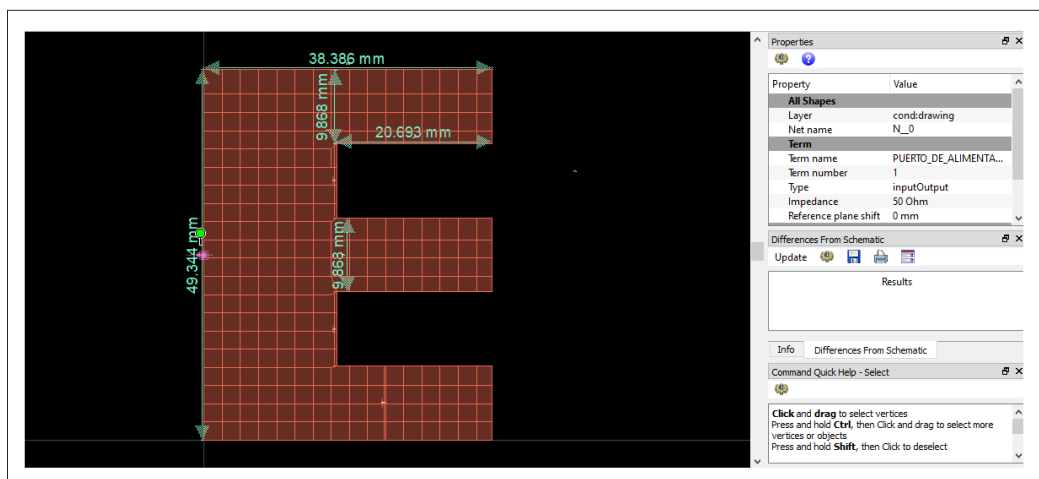


Figura 3.21. Simulación del Parche en forma de E a la frecuencia de 1.85 GHz.

Una vez graficado en el espacio de trabajo la antena tipo parche en forma de E se procedió a simular para obtener los parámetros característicos de la antena, en la Figura 3.22 se muestra el parámetro S11 con un valor de -4.53 dB en magnitud y -1.35 grados en fase a una frecuencia de 1.85 GHz, además, tiene una impedancia de entrada de $195.53 - j8.44 \Omega$ y para valores menores a -3 dB, el ancho de banda es de 69 MHz que en valor porcentual es 3.73 %.

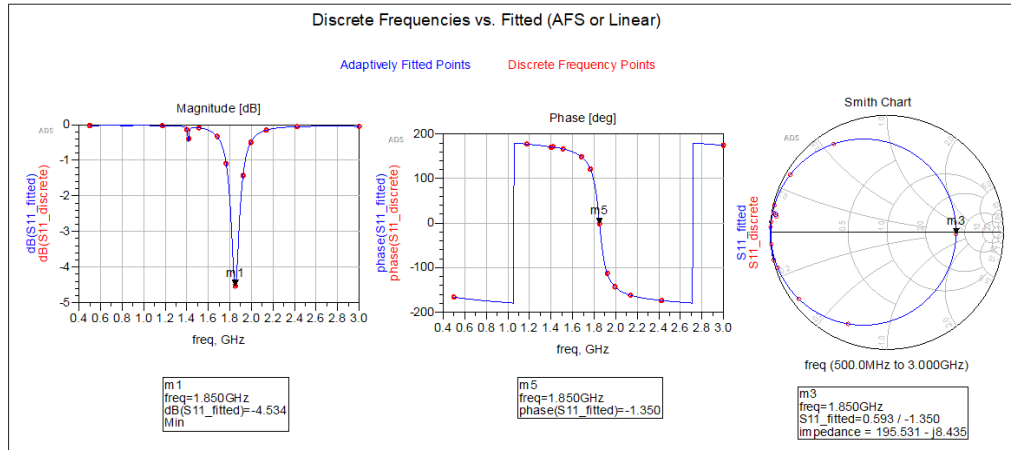


Figura 3.22. S11 e impedancia del parche en forma de E a la frecuencia de 1.85 GHz.

La directividad del parche tipo E es de 6.40 dBi, tiene una ganancia de 4.29 dBi y una eficiencia de 61.24 %, en la Figura 3.23 se presenta el resultado de los parámetros mencionados, adicionalmente en la Figura 3.24 se muestran los patrones de radiación de la antena en 3D.

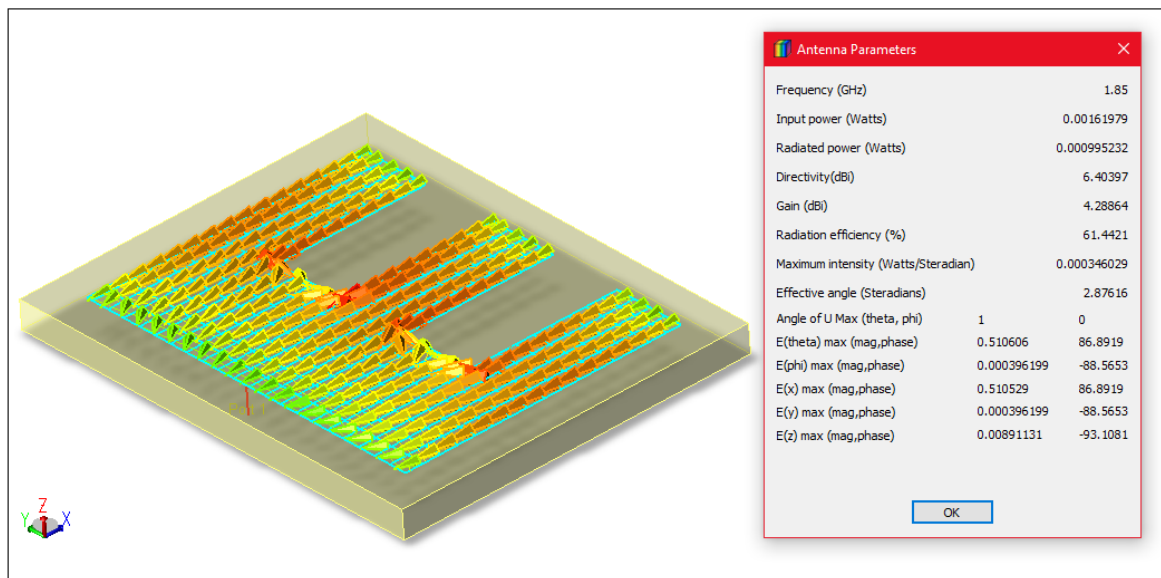


Figura 3.23. Parámetros de la antena tipo E a la frecuencia de 1.85 GHz

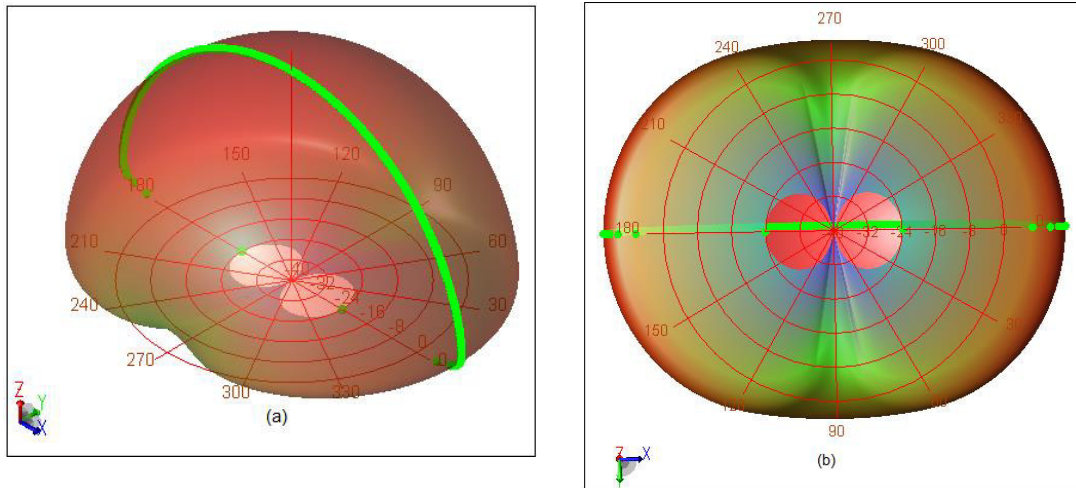


Figura 3.24. Patrón de radiación del parche tipo E en 3D: (a) vista frontal, (b) vista posterior.

3.3.1 SIMULACIÓN DEL ARREGLO LINEAL 1x3 y 3x1 CON EL PARCHÉ TIPO E

Una vez obtenida la simulación y los parámetros del elemento base del arreglo, en esta sección se presenta la simulación de los arreglos lineales 1x3 y 3x1 con el parche tipo E como elemento base del arreglo, además, se presentan los parámetros de cada uno de los elementos que conforman los arreglos, los resultados serán analizados al final del capítulo.

3.3.1.1 Arreglo lineal 1x3 de elementos tipo E

Como ya se indicó la separación entre parches radiadores es de 81.081mm, en la Figura 3.25 se presenta el arreglo lineal 1x3 con parche tipo E.

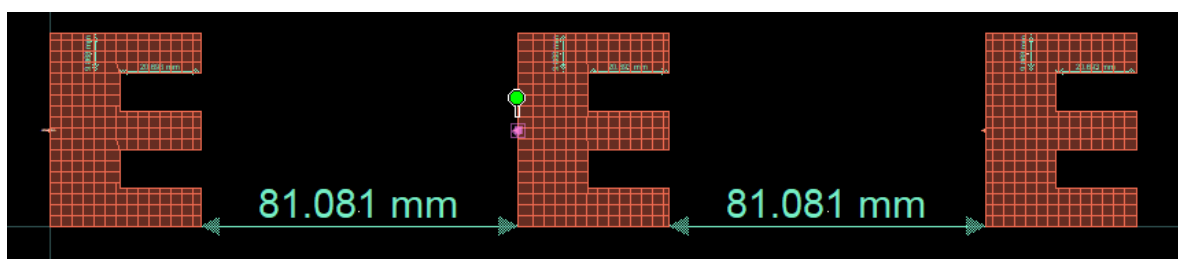


Figura 3.25. Arreglo lineal 1x3 con parche tipo E.

A continuación, se presentan las simulaciones de cada uno de los elementos tipo E del arreglo 1x3, en la Figura 3.26 se observan los parámetros simulados como, impedancia, S11 y ancho de banda, en este caso el valor de ancho de banda se lo realizó para valores de -3 dB debido a que la antena no se encuentra acoplada a 50 Ω . En la Tabla 3.14 se

presentan los valores de impedancia, S11 y ancho de banda obtenidos en la simulación para cada uno de los elementos del arreglo 1x3.

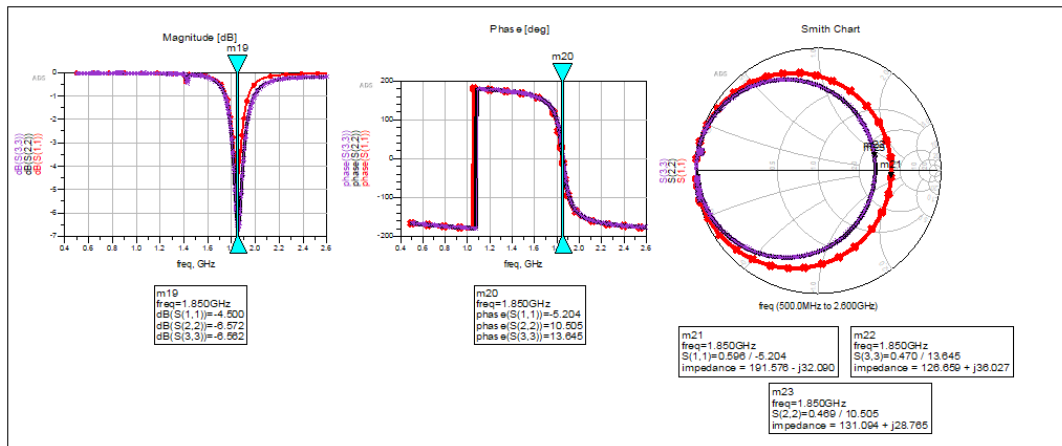
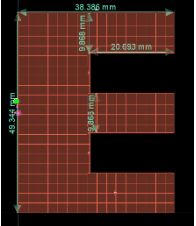


Figura 3.26. Parámetros S11 e impedancia de los elementos tipo E del arreglo lineal 1x3.

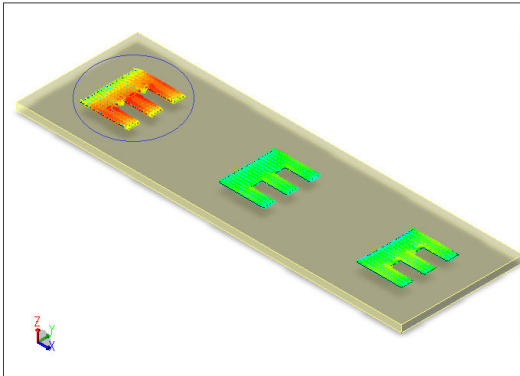
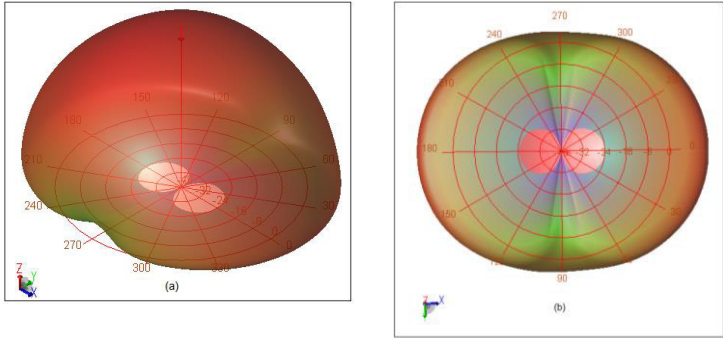
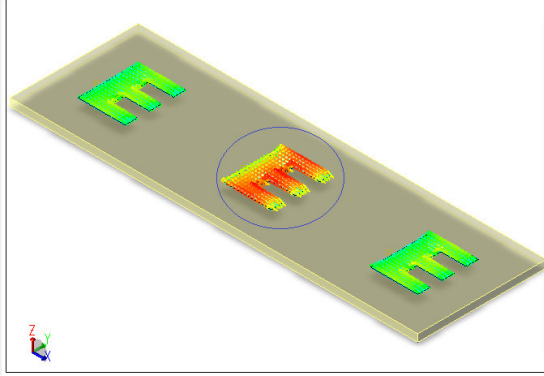
Tabla 3.14. Parámetros S11, impedancia de entrada y ancho de banda de cada uno de los elementos tipo E del arreglo 1x3.

Arreglo 1x3		Impedancia Z (Ω)	S11 (dB)	Fase ($^\circ$)	Ancho de banda (a - 3dB)
Parche sin línea de alimentación 		195.53 - j8.44	-4.53 dB	-1.35	69 MHz (3.73%)
Arreglo 1x3	Patch (1,1)	191.58 - j32.1	-4.5 dB	-5.20	66 MHz (3.57 %)
	Patch (1,2)	131.1 + j28.77	-6.57 dB	10.51	105 MHz (5.68)
	Patch (1,3)	126.66 + j36.03	-6.56 dB	13.65	107 MHz (5.78%)

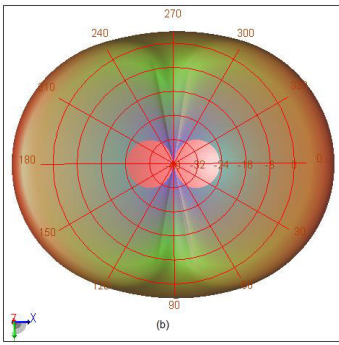
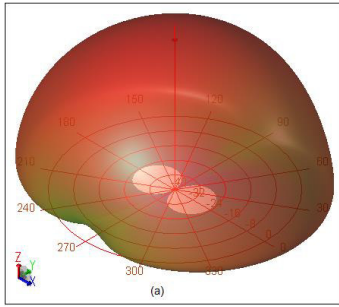
Los valores de la Tabla 3.14 muestran que en los elementos 1,2 y 1,3 presentan un mejor ancho de banda con respecto al elemento 1,1, además se observa que no se tiene una buena adaptación de la antena con el punto de alimentación. Estos valores serán utilizados para su análisis al final del capítulo.

A continuación, se presenta la Tabla 3.15 en la cual se detalla los parámetros de directividad, ganancia y eficiencia de cada uno de los elementos del arreglo 1x3, también se presentan los gráficos de los lóbulos de radiación tanto en su vista frontal como vista posterior, posteriormente se presenta la Tabla 3.16 la cual contiene los valores de los parámetros simulados de cada uno de los elementos.

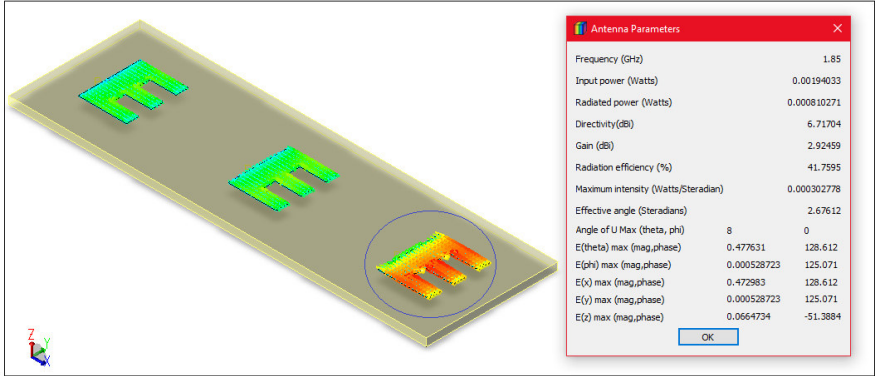
Tabla 3.15. Parámetros simulados y lóbulos de radiación del arreglo 1x3 tipo E.

Elemento	Parámetros y lóbulos de radiación																												
Patch (1,1)	 <table border="1" data-bbox="994 734 1262 1048"> <caption>Antenna Parameters</caption> <tr><td>Frequency (GHz)</td><td>1.85</td></tr> <tr><td>Input power (Watts)</td><td>0.00160107</td></tr> <tr><td>Radiated power (Watts)</td><td>0.000978974</td></tr> <tr><td>Directivity (dB)</td><td>6.92026</td></tr> <tr><td>Gain (dB)</td><td>4.78387</td></tr> <tr><td>Radiation efficiency (%)</td><td>61.1451</td></tr> <tr><td>Maximum intensity (Watts/Steradian)</td><td>0.000383342</td></tr> <tr><td>Effective angle (Steradians)</td><td>2.55378</td></tr> <tr><td>Angle of U Max (theta, phi)</td><td>10 180</td></tr> <tr><td>E(theta) max (mag,phase)</td><td>0.53743 -48.3075</td></tr> <tr><td>E(phi) max (mag,phase)</td><td>0.00155602 129.637</td></tr> <tr><td>E(x) max (mag,phase)</td><td>0.529265 131.692</td></tr> <tr><td>E(y) max (mag,phase)</td><td>0.00155602 -50.3635</td></tr> <tr><td>E(z) max (mag,phase)</td><td>0.0933237 131.692</td></tr> </table>	Frequency (GHz)	1.85	Input power (Watts)	0.00160107	Radiated power (Watts)	0.000978974	Directivity (dB)	6.92026	Gain (dB)	4.78387	Radiation efficiency (%)	61.1451	Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000383342	Effective angle (Steradians)	2.55378	Angle of U Max (theta, phi)	10 180	E(theta) max (mag,phase)	0.53743 -48.3075	E(phi) max (mag,phase)	0.00155602 129.637	E(x) max (mag,phase)	0.529265 131.692	E(y) max (mag,phase)	0.00155602 -50.3635	E(z) max (mag,phase)	0.0933237 131.692
Frequency (GHz)	1.85																												
Input power (Watts)	0.00160107																												
Radiated power (Watts)	0.000978974																												
Directivity (dB)	6.92026																												
Gain (dB)	4.78387																												
Radiation efficiency (%)	61.1451																												
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000383342																												
Effective angle (Steradians)	2.55378																												
Angle of U Max (theta, phi)	10 180																												
E(theta) max (mag,phase)	0.53743 -48.3075																												
E(phi) max (mag,phase)	0.00155602 129.637																												
E(x) max (mag,phase)	0.529265 131.692																												
E(y) max (mag,phase)	0.00155602 -50.3635																												
E(z) max (mag,phase)	0.0933237 131.692																												
																													
	 <table border="1" data-bbox="1018 1619 1302 1933"> <caption>Antenna Parameters</caption> <tr><td>Frequency (GHz)</td><td>1.85</td></tr> <tr><td>Input power (Watts)</td><td>0.00193591</td></tr> <tr><td>Radiated power (Watts)</td><td>0.00079828</td></tr> <tr><td>Directivity (dB)</td><td>7.14243</td></tr> <tr><td>Gain (dB)</td><td>3.29514</td></tr> <tr><td>Radiation efficiency (%)</td><td>41.2354</td></tr> <tr><td>Maximum intensity (Watts/Steradian)</td><td>0.000328994</td></tr> <tr><td>Effective angle (Steradians)</td><td>2.42642</td></tr> <tr><td>Angle of U Max (theta, phi)</td><td>3 0</td></tr> <tr><td>E(theta) max (mag,phase)</td><td>0.49788 91.4174</td></tr> <tr><td>E(phi) max (mag,phase)</td><td>0.000207492 -83.5206</td></tr> <tr><td>E(x) max (mag,phase)</td><td>0.497197 91.4174</td></tr> <tr><td>E(y) max (mag,phase)</td><td>0.000207492 -83.5206</td></tr> <tr><td>E(z) max (mag,phase)</td><td>0.026057 -88.5826</td></tr> </table>	Frequency (GHz)	1.85	Input power (Watts)	0.00193591	Radiated power (Watts)	0.00079828	Directivity (dB)	7.14243	Gain (dB)	3.29514	Radiation efficiency (%)	41.2354	Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000328994	Effective angle (Steradians)	2.42642	Angle of U Max (theta, phi)	3 0	E(theta) max (mag,phase)	0.49788 91.4174	E(phi) max (mag,phase)	0.000207492 -83.5206	E(x) max (mag,phase)	0.497197 91.4174	E(y) max (mag,phase)	0.000207492 -83.5206	E(z) max (mag,phase)	0.026057 -88.5826
Frequency (GHz)	1.85																												
Input power (Watts)	0.00193591																												
Radiated power (Watts)	0.00079828																												
Directivity (dB)	7.14243																												
Gain (dB)	3.29514																												
Radiation efficiency (%)	41.2354																												
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000328994																												
Effective angle (Steradians)	2.42642																												
Angle of U Max (theta, phi)	3 0																												
E(theta) max (mag,phase)	0.49788 91.4174																												
E(phi) max (mag,phase)	0.000207492 -83.5206																												
E(x) max (mag,phase)	0.497197 91.4174																												
E(y) max (mag,phase)	0.000207492 -83.5206																												
E(z) max (mag,phase)	0.026057 -88.5826																												

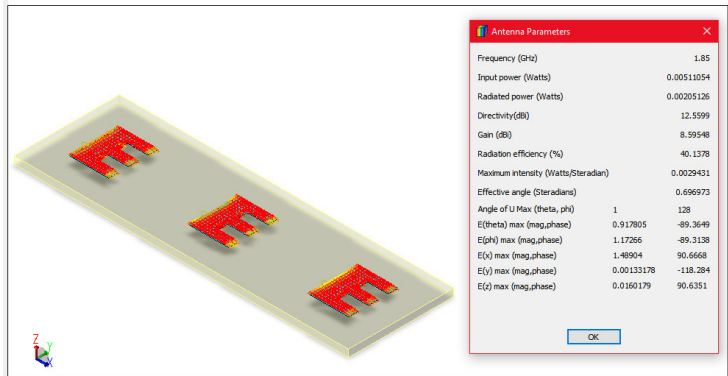
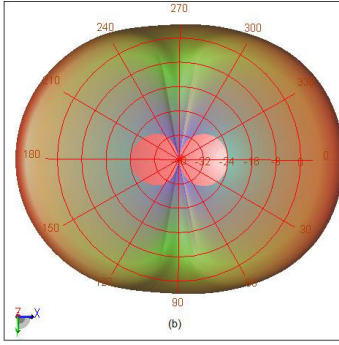
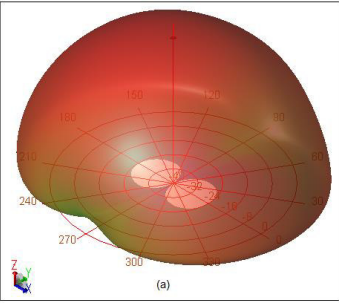
Patch (1,2)



Patch (1,3)



Arreglo completo 1x3



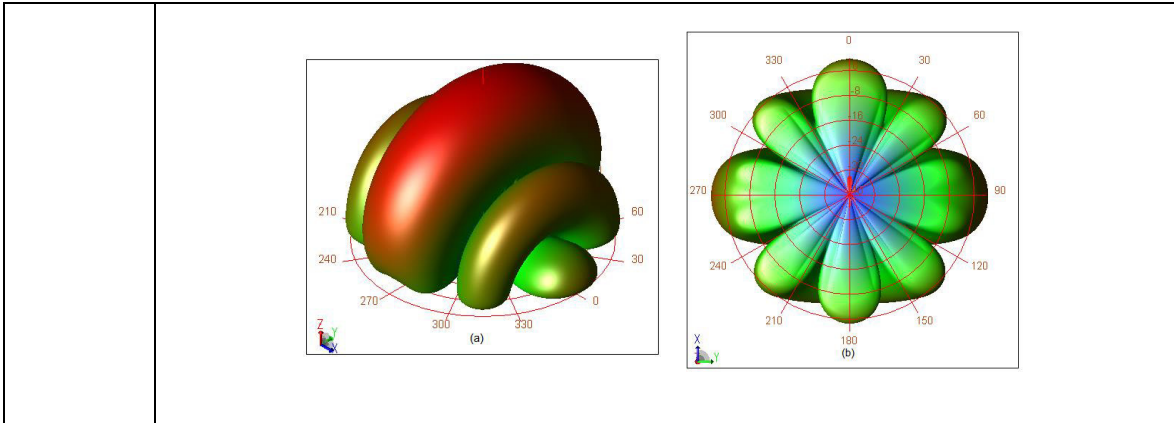
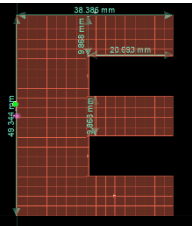


Tabla 3.16 Parámetros de los elementos del arreglo 1x3.

Arreglo 1x3		Directividad	Ganancia	Eficiencia
Parche sin línea de alimentación 		6.40 dBi	4.29 dBi	61.44 %
Arreglo 1x3	Patch (1,1)	6.92 dBi	4.78 dBi	61.15 %
	Patch (1,2)	7.14 dBi	3.30 dBi	41.24 %
	Patch (1,3)	6.71 dBi	2.92 dBi	41.76 %
	Arreglo completo	12.56 dBi	8.56 dBi	40.13 %

En la Tabla 3.16 se muestra que los valores de ganancia y eficiencia son mayores para el elemento 1,1 del arreglo 1x3, en cuanto a directividad el elemento 1,2 tiene un valor un poco mayor a los otros dos elementos, estos valores serán analizados en conjunto con los demás arreglos al final del presente capítulo.

3.3.1.2 Arreglo lineal 3x1 de elementos tipo E

Para este arreglo lineal se realizó el mismo proceso de separación entre parches, es decir de 81.081 mm, en la Figura 3.27 se presenta el arreglo lineal 3x1 con parches tipo E como elemento base del arreglo.

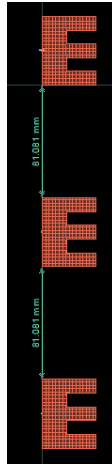


Figura 3.27. Arreglo lineal 3x1 con parche tipo E.

En la Figura 3.28 se muestran las simulaciones de cada elemento del arreglo 3x1, donde se observan los parámetros S11, impedancia y ancho de banda y posteriormente en la Tabla 3.29 se muestran los valores.

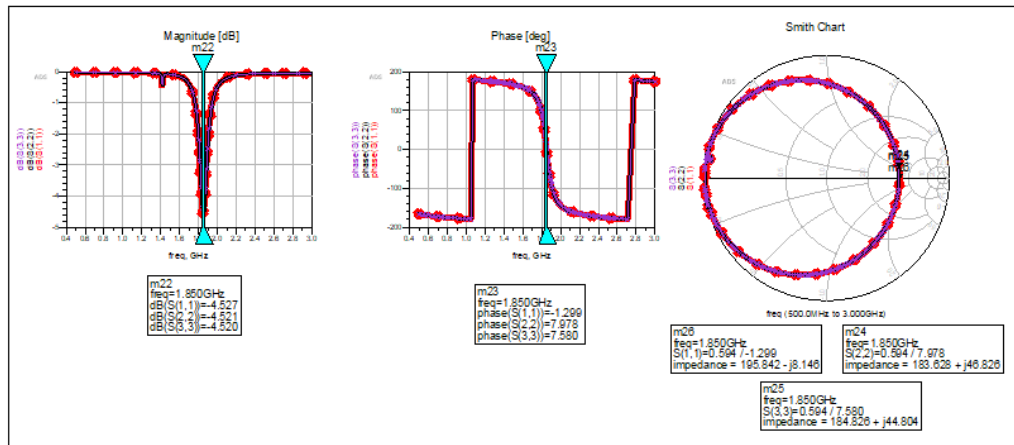


Figura 3.28. Parámetros S11, impedancia y ancho de banda de los elementos E del arreglo lineal 3x1.

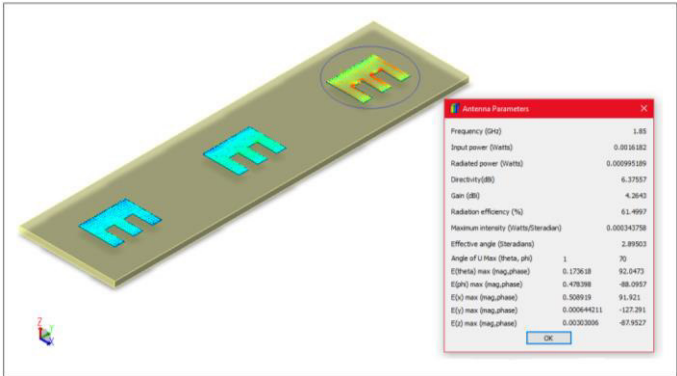
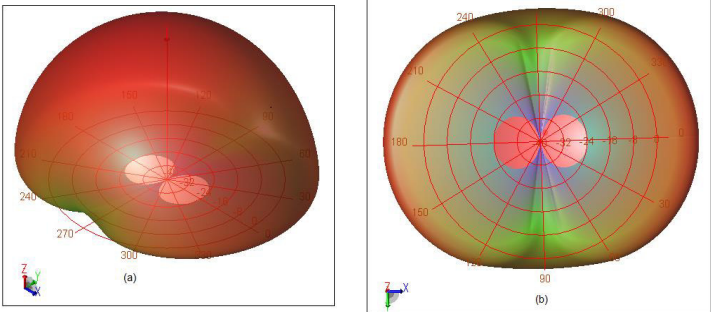
Tabla 3.29. Parámetros S11, impedancia de entrada y ancho de banda de cada uno de los elementos E del arreglo 3x1.

Arreglo 3x1		Impedancia Z (Ω)	S11 (dB)	Fase ($^\circ$)	Ancho de banda (a - 3dB)
Arreglo 3x1	Patch (1,1)	195.84 - j8.15 Ω	-4.53 dB	-1.30	68 MHz (3.68 %)
	Patch (2,1)	183.62 + j46.83	-4.52 dB	7.98	68 MHz (3.68 %)
	Patch (3,1)	184.83 + j44.80	-4.52 dB	7.58	67 MHz (3.62 %)

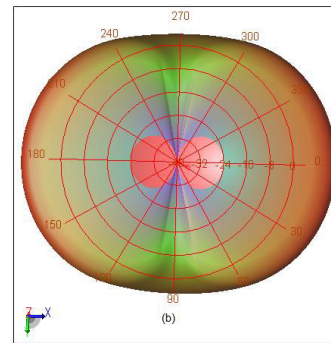
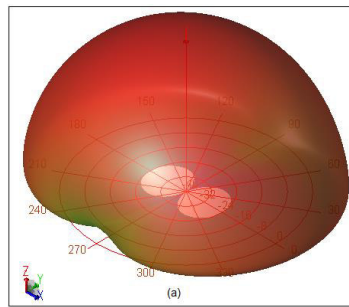
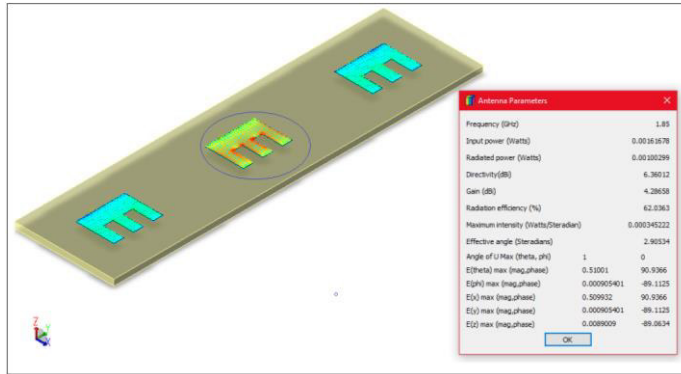
En la Tabla 3.29 se observa que los valores de impedancia, S11 y ancho de banda son aproximadamente iguales, estos valores serán analizados en conjunto con los demás al final del presente capítulo.

A continuación, en la Tabla 3.30 se presenta la simulación de cada elemento del arreglo 3x1 en conjunto con sus lóbulos de radiación tanto en vista frontal como en su vista posterior, posteriormente se presenta la Tabla 3.31 la cual contiene los valores de directividad, ganancia y eficiencia de los elementos que conforman el arreglo.

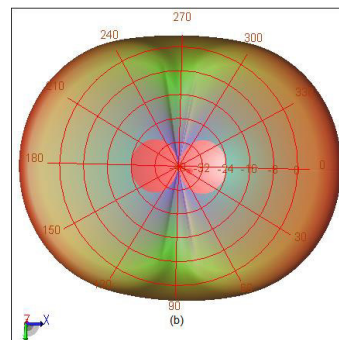
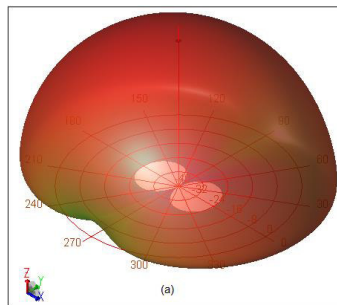
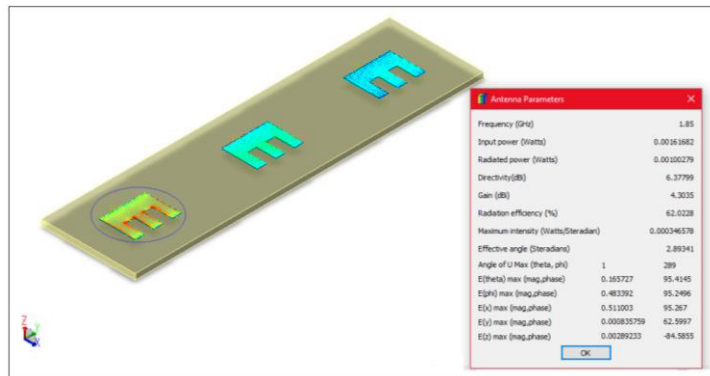
Tabla 3.30 Parámetros simulados y lóbulos de radiación del arreglo 3x1 de parches tipo E.

Elemento	Parámetros y lóbulos de radiación
Patch (1,1)	
	

Patch (2,1)



Patch (3,1)



Arreglo completo 3x1

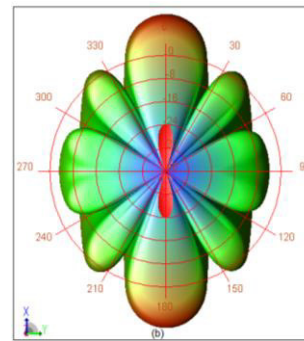
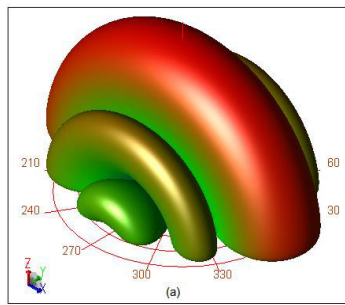
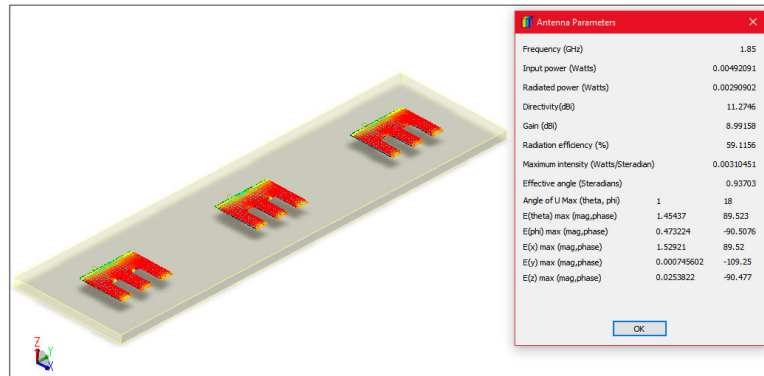


Tabla 3.31 Parámetros de los elementos tipo E del arreglo 3x1.

Arreglo 3x1		Directividad	Ganancia	Eficiencia
Arreglo 3x1	Patch (1,1)	6.38 dBi	4.26 dBi	61.50 %
	Patch (2,1)	6.36 dBi	4.29 dBi	62.04 %
	Patch (3,1)	6.38 dBi	4.30 dBi	62.03 %
	Arreglo completo	11.27 dBi	8.99 dBi	59.11 %

En la Tabla 3.31 se observan los parámetros de directividad, ganancia y eficiencia de cada elemento y del arreglo completo, estos valores son similares en los 3 elementos que conforman el arreglo, y aumentan sus valores al ser analizados en conjunto, esto se analizará al final del capítulo.

3.4 SIMULACIÓN DEL ELEMENTO E BASE DEL ARREGLO CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP

Con las dimensiones obtenidas en el diseño de la línea de alimentación se procedió a realizar la simulación del parche, en la Figura 3.29 se muestran los valores del parámetro S11 que en magnitud muestra un valor de -7.42 dB y fase un valor aproximado de 30 grados, además la impedancia de entrada del parche con la línea de alimentación tiene un valor de $175.65 + j210.57 \Omega$, además, se observa que la línea de alimentación no cumple con su objetivo que es acoplar la antena a una impedancia característica de 50Ω , y la frecuencia de trabajo se ve desplazada a una frecuencia menor (1.82 GHz) por lo que con la ayuda del software se procedió a modificar las dimensiones de la línea para obtener una buena adaptación a la frecuencia que necesitamos.

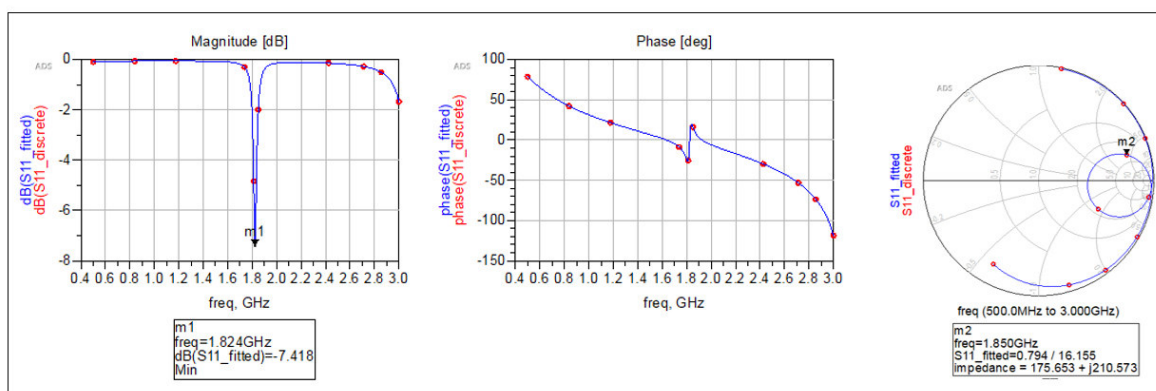


Figura 3.29. S11 e impedancia del parche rectangular a la frecuencia de 1.85 GHz.

En la Tabla 3.32 se presentan los valores del diseño y los valores optimizados obtenidos mediante la simulación de la antena con la línea de alimentación y en la Figura 3.30 se presentan las dimensiones del parche tipo E con la línea de alimentación, esta línea cuenta con sus dimensiones ya optimizadas para obtener mejores resultados.

Tabla 3.32. Dimensiones de la línea de alimentación.

Línea de alimentación	Valor calculado	Valor optimizado
L	23.81 mm	8.10 mm
W	0.379 mm	0.253 mm

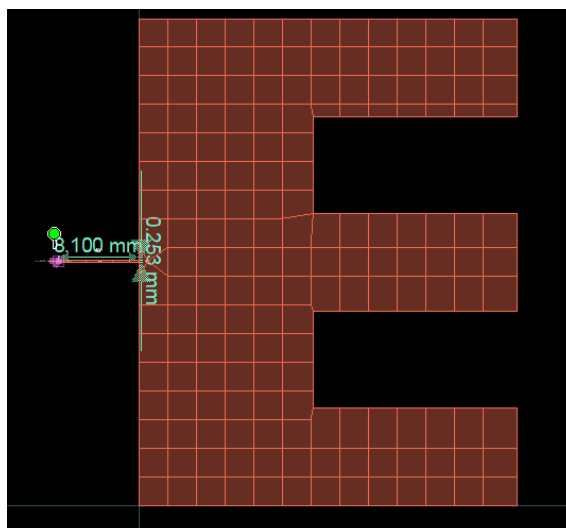


Figura 3.30. Parche tipo E con línea de alimentación mejorada para la frecuencia de 1.85 GHz.

Una vez obtenidas las dimensiones de la línea de alimentación se procedió a simular el parche tipo E junto con la línea de alimentación, en la Figura 3.31 se presenta el parámetro S11 con un valor de -13.55 dB en magnitud y 116.90 grados en fase a la frecuencia de 1.85 GHz, además, la impedancia de entrada es de $47.11 + j7.93 \Omega$ y para valores menores a -10 dB se tiene un ancho de banda de 22MHz que en valor porcentual es 1.19 %.

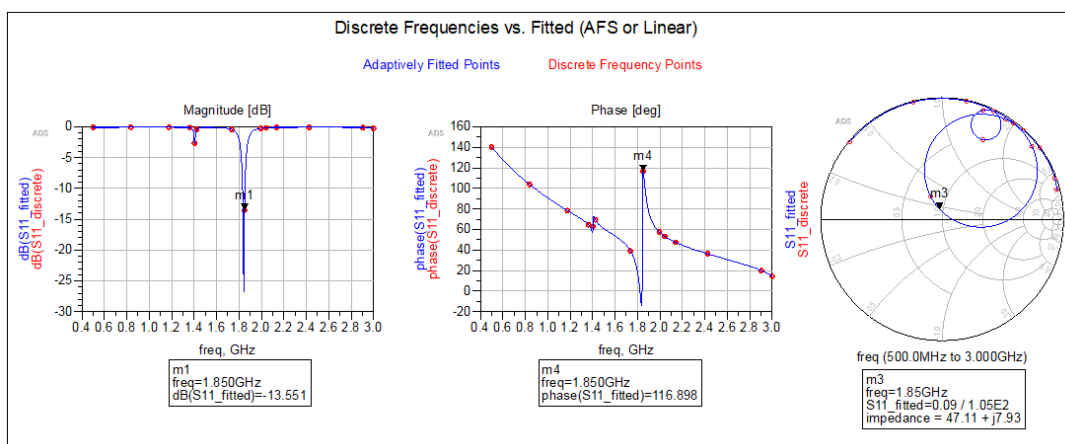


Figura 3.31. S11 e impedancia del parche tipo E a la frecuencia de 1.85 GHz.

En parámetros como la directividad se muestra un valor de 6.40 dBi, una ganancia de 2.68 dBi y una eficiencia de 42.49 %, en la Figura 3.32 se presenta el resultado de los parámetros mencionados, adicionalmente en la Figura 3.33 se muestran los patrones de radiación de la antenna en 3D.

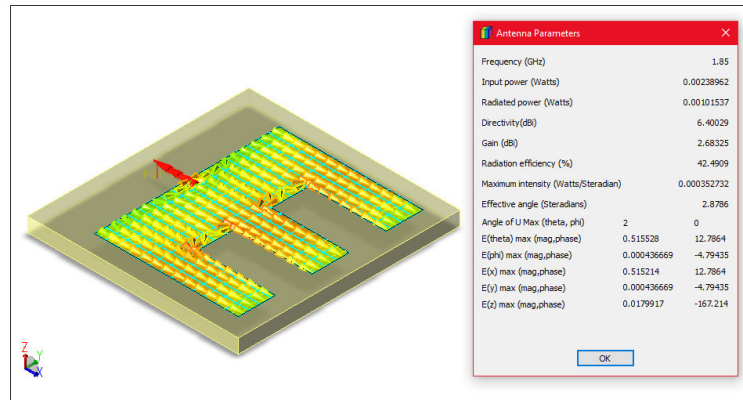


Figura 3.32. Parámetros de la antena parche tipo E con línea de alimentación a la frecuencia de 1.85 GHz.

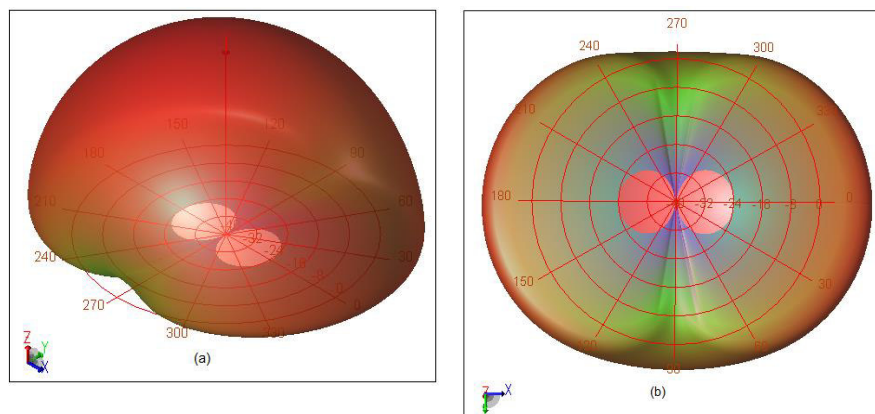


Figura 3.33. Patrón de radiación 3D del parche tipo E con línea de alimentación: (a) vista frontal, (b) vista posterior.

3.4.1 SIMULACIÓN DEL ARREGLO LINEAL TIPO E 1x3 y 3x1 CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP

Una vez obtenido el elemento base con línea de alimentación, el siguiente paso es realizar la simulación de los arreglos lineales 1x3 y 3x1 para obtener los parámetros de cada uno de los elementos que conforman el arreglo lineal, los resultados se analizarán al final del capítulo.

3.4.1.1 Arreglo lineal 1x3

Como en los anteriores arreglos la separación fue de 81.081 mm, tanto para el plano E como para el plano H, en la Figura 3.34 se presenta el arreglo lineal 1x3 con parches tipo E con línea de alimentación.

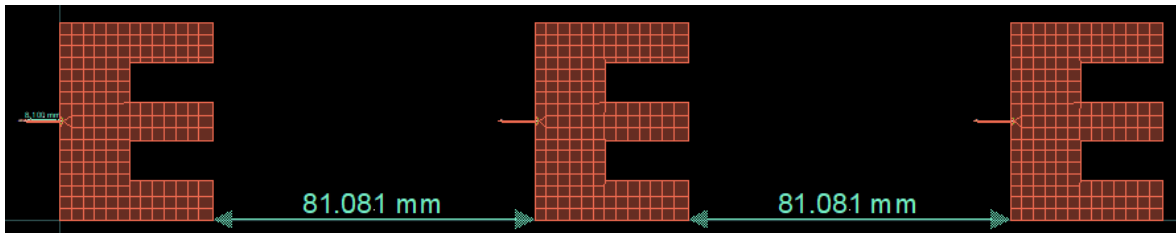


Figura 3.34. Arreglo lineal 1x3 con parche tipo E con línea de alimentación.

En la Figura 3.35 se presentan las simulaciones de los elementos del arreglo 1x3 con línea de alimentación, después se presenta la Tabla 3.33 la cual contiene los valores de impedancia, S11 y ancho de banda de los elementos del arreglo.

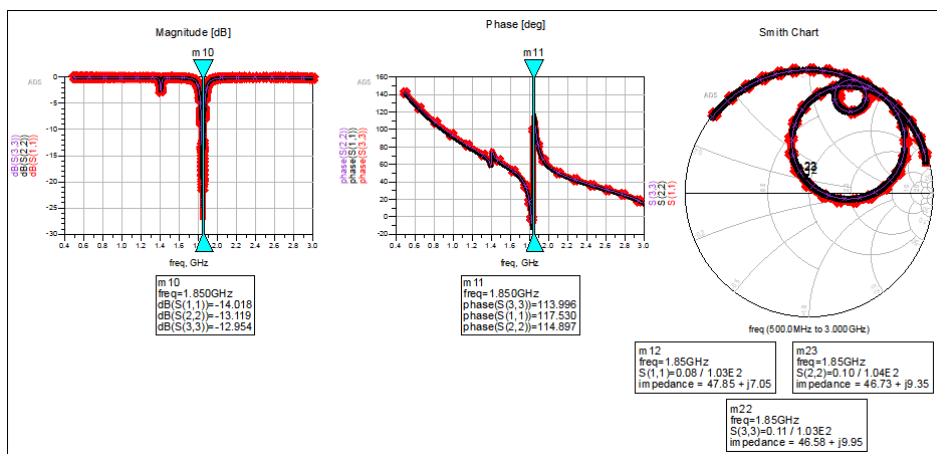
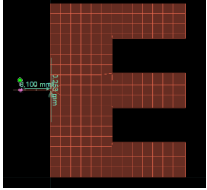


Figura 3.35. Parámetros S11, impedancia y ancho de banda de los elementos del arreglo lineal tipo E 1x3 con líneas de alimentación.

Tabla 3.33. Parámetros S11, impedancia de entrada y ancho de banda de cada uno de los elementos del arreglo tipo E 1x3 con líneas de alimentación.

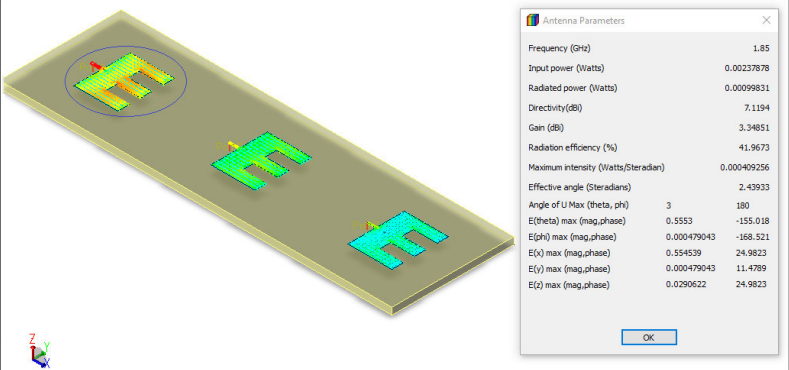
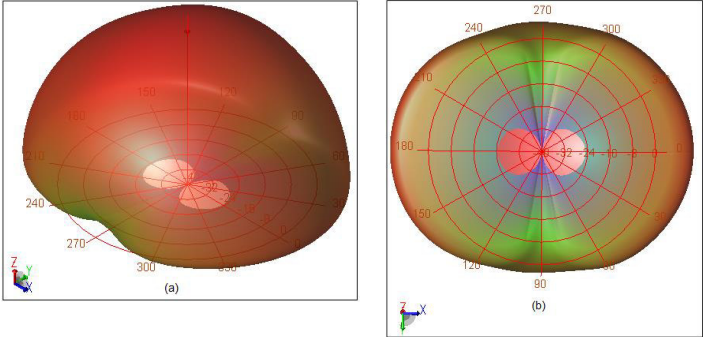
Arreglo 1x3		Impedancia Z (Ω)	S11 (dB)	Fase ($^\circ$)	Ancho de banda (a - 10dB)
Parche con línea de alimentación 		$47.11 + j7.93\Omega$	13.55dB	116.90	22 MHz (1.19%)
Arreglo 1x3	Patch (1,1)	$47.85 + j7.05$	-14.02 dB	117.53	22 MHz (1.19%)

	Patch (1,2)	$46.73 + j9.35$	-13.11 dB	114.90	21 MHz (1.14%)
	Patch (1,3)	$46.58 + j9.45$	-12.96 dB	113.99	22 MHz (1.19%)

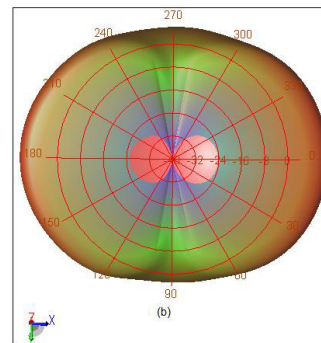
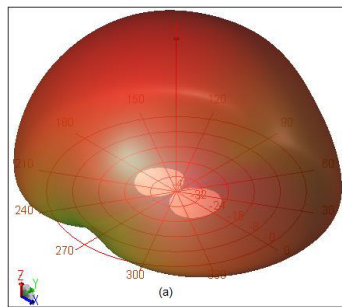
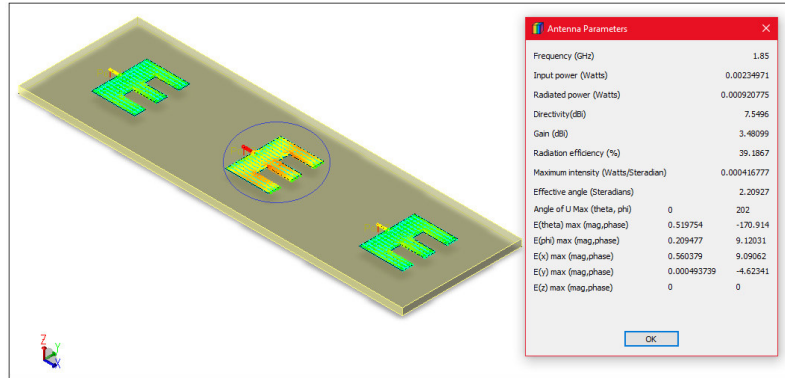
Los valores que se presentan en la Tabla 3.33 muestra que con la línea de alimentación se logró una buena adaptación de la antena a la línea, principalmente en el elemento 1,3, en este caso los valores de ancho de banda de tomarán para valores menores a -10 dB, debido a que se observa adaptación de impedancias.

A continuación, se presenta la Tabla 3.34 con las simulaciones de los elementos de los arreglos mostrando parámetros como directividad, ganancia, eficiencia y sus lóbulos de radiación, posteriormente en la Tabla 3.35 se presenta dichos valores.

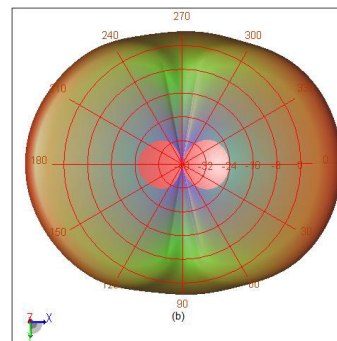
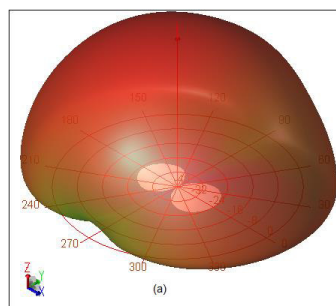
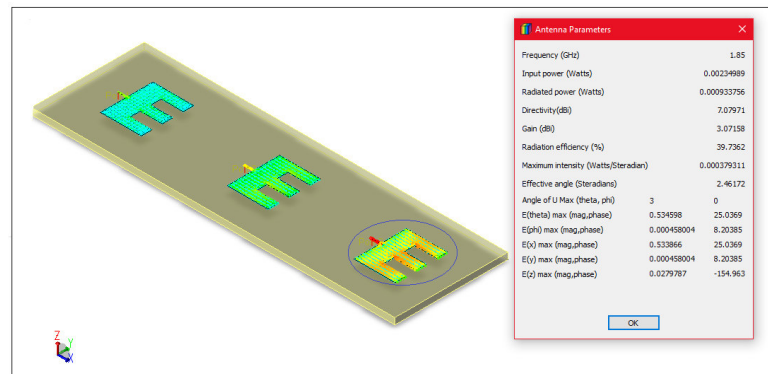
Tabla 3.34 Parámetros simulados y lóbulos de radiación del arreglo 1x3 de parches tipo E con línea de alimentación.

Elemento	Parámetros y lóbulos de radiación																												
Patch (1,1)	 <p>The image shows a 3D model of a patch antenna on a substrate. To the right is a screenshot of the 'Antenna Parameters' window with the following data:</p> <table border="1"> <tr><td>Frequency (GHz)</td><td>1.85</td></tr> <tr><td>Input power (Watts)</td><td>0.00237878</td></tr> <tr><td>Radiated power (Watts)</td><td>0.00099831</td></tr> <tr><td>Directivity(dB)</td><td>7.1194</td></tr> <tr><td>Gain (dB)</td><td>3.34851</td></tr> <tr><td>Radiation efficiency (%)</td><td>41.9673</td></tr> <tr><td>Maximum intensity (Watts/Steradian)</td><td>0.000409256</td></tr> <tr><td>Effective angle (Steradians)</td><td>2.43933</td></tr> <tr><td>Angle of U Max (theta, phi)</td><td>3 180</td></tr> <tr><td>E(theta) max (mag,phase)</td><td>0.5553 -155.018</td></tr> <tr><td>E(phi) max (mag,phase)</td><td>0.000479043 -168.521</td></tr> <tr><td>E(x) max (mag,phase)</td><td>0.554539 24.9823</td></tr> <tr><td>E(y) max (mag,phase)</td><td>0.000479043 11.4789</td></tr> <tr><td>E(z) max (mag,phase)</td><td>0.0290622 24.9823</td></tr> </table>	Frequency (GHz)	1.85	Input power (Watts)	0.00237878	Radiated power (Watts)	0.00099831	Directivity(dB)	7.1194	Gain (dB)	3.34851	Radiation efficiency (%)	41.9673	Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000409256	Effective angle (Steradians)	2.43933	Angle of U Max (theta, phi)	3 180	E(theta) max (mag,phase)	0.5553 -155.018	E(phi) max (mag,phase)	0.000479043 -168.521	E(x) max (mag,phase)	0.554539 24.9823	E(y) max (mag,phase)	0.000479043 11.4789	E(z) max (mag,phase)	0.0290622 24.9823
Frequency (GHz)	1.85																												
Input power (Watts)	0.00237878																												
Radiated power (Watts)	0.00099831																												
Directivity(dB)	7.1194																												
Gain (dB)	3.34851																												
Radiation efficiency (%)	41.9673																												
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000409256																												
Effective angle (Steradians)	2.43933																												
Angle of U Max (theta, phi)	3 180																												
E(theta) max (mag,phase)	0.5553 -155.018																												
E(phi) max (mag,phase)	0.000479043 -168.521																												
E(x) max (mag,phase)	0.554539 24.9823																												
E(y) max (mag,phase)	0.000479043 11.4789																												
E(z) max (mag,phase)	0.0290622 24.9823																												
	 <p>The image contains two radiation pattern plots. Plot (a) is a 3D radiation pattern showing the main lobe and side lobes. Plot (b) is a 2D radiation pattern showing the main lobe and side lobes in a polar coordinate system.</p>																												

Patch (1,2)



Patch (1,3)



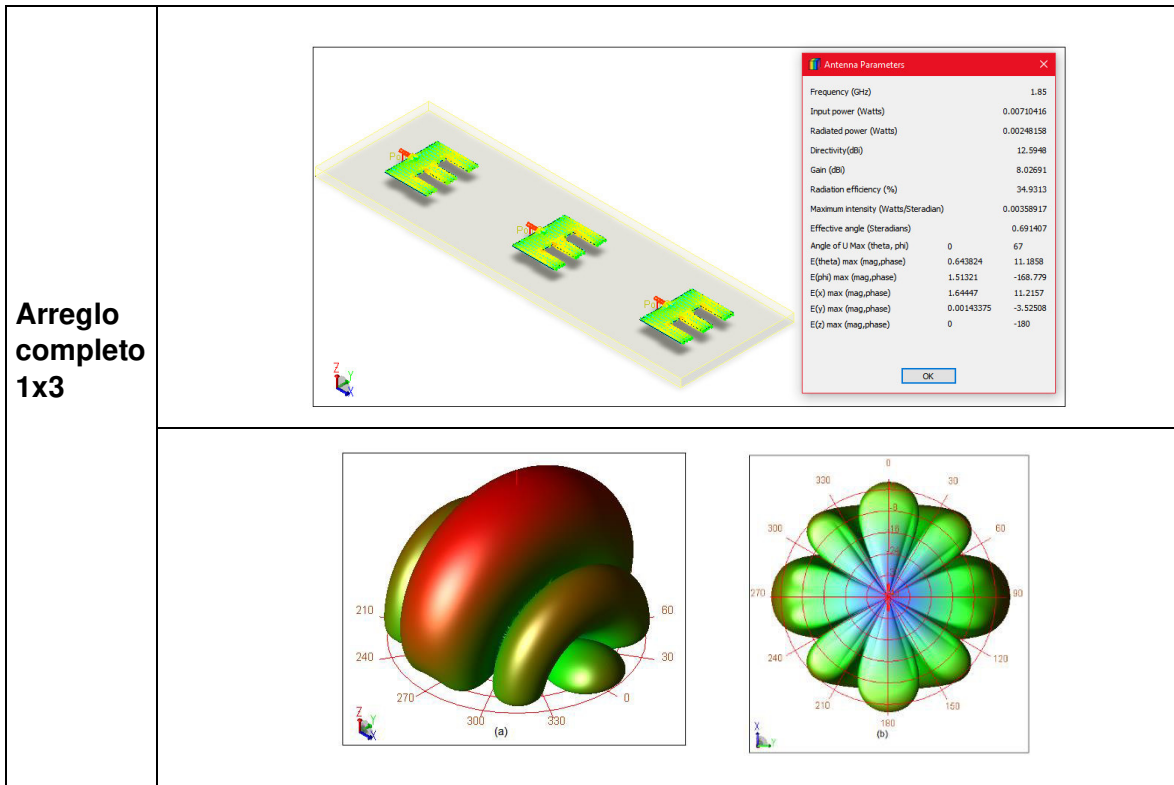


Tabla 3.35 Parámetros de los elementos tipo E con línea de alimentación del arreglo 1x3.

Arreglo 1x3		Directividad	Ganancia	Eficiencia
Parche con línea de alimentación 		6.40 dBi	2.68 dBi	42.49 %
Arreglo 1x3	Patch (1,1)	7.12 dBi	3.35 dBi	41.97 %
	Patch (1,2)	7.55 dBi	3.48 dBi	39.19 %
	Patch (1,3)	7.08 dBi	3.07 dBi	39.74 %
	Arreglo completo	12.59 dBi	8.03 dBi	34.93 %

Como se observa en la Tabla 3.35 los valores de ganancia y eficiencia son bajos, por lo que con la línea de alimentación no se obtiene buenos resultados para el caso de la antena parche tipo E.

3.4.1.2 Arreglo lineal 3x1 de elementos tipo E con línea de alimentación

Al igual que en todos los arreglos la separación entre parches para este arreglo será de 81.081 mm, en la Figura 3.36 se presenta el arreglo lineal 3x1 con parches tipo E con líneas de alimentación.

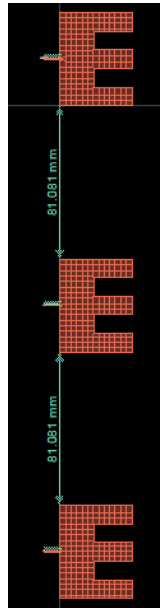


Figura 3.36. Arreglo lineal 3x1 con parche tipo E con líneas de alimentación.

En la Figura 3.37 se presentan las simulaciones de cada uno de los elementos con línea de alimentación del arreglo 3x1, donde se observa los parámetros S11, impedancia y ancho de banda, en la Tabla 3.36 contiene los valores de los parámetros mencionados.

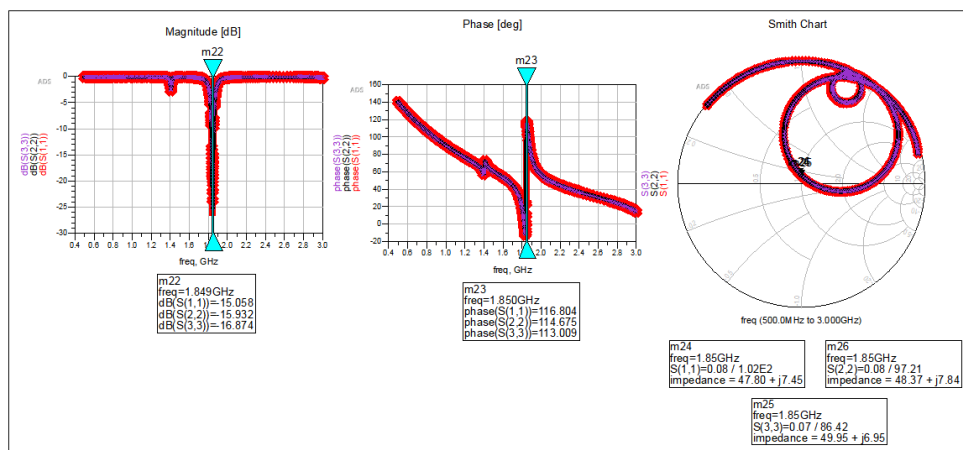


Figura 3.37. Parámetros S11, impedancia y ancho de banda de los elementos con línea de alimentación del arreglo lineal 3x1.

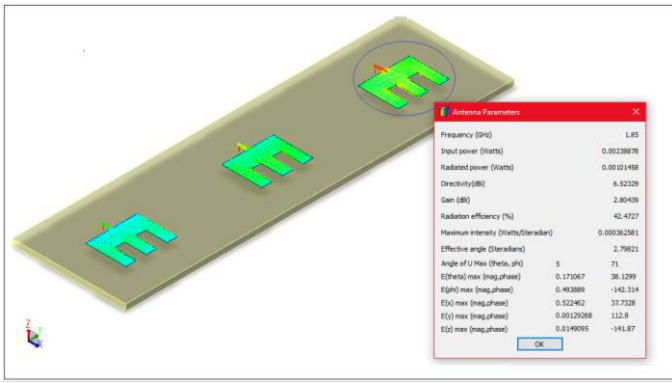
Tabla 3.36. Parámetros S11, impedancia de entrada y ancho de banda de cada uno de los elementos del arreglo 3x1.

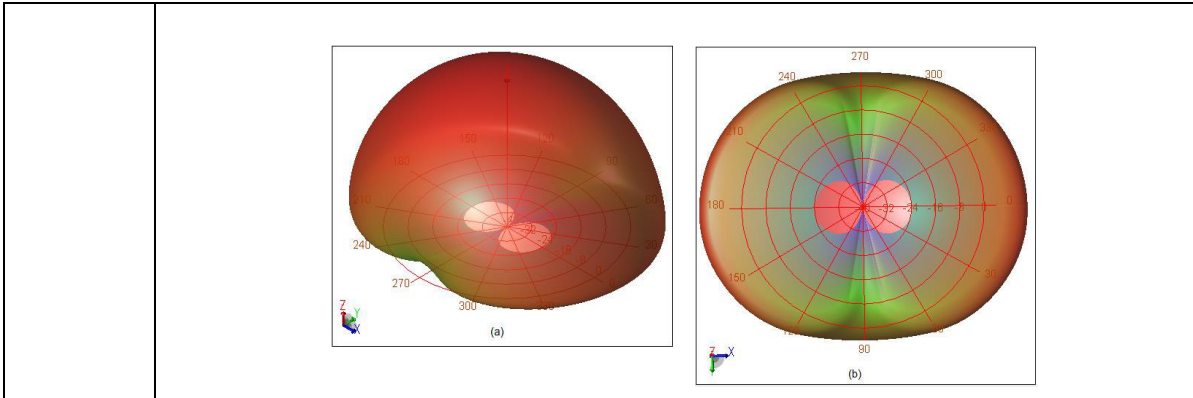
Arreglo 3x1		Impedancia Z (Ω)	S11 (dB)	Fase ($^\circ$)	Ancho de banda (a -10 dB)
Arreglo 3x1	Patch (1,1)	47.80 + j7.45	-15.06 dB	116.80	22 MHz (1.19%)
	Patch (2,1)	48.37 + j7.84	-15.93 dB	114.68	20 MHz (1.08%)
	Patch (3,1)	49.95 + j6.95	-16.87 dB	113.01	22 MHz (1.19%)

Los valores que se presentan en la Tabla 3.36 muestra que con la línea de alimentación se logró una buena adaptación de la antena a la línea, en este caso los valores de ancho de banda se tomarán para valores menores a -10 dB, debido a que se observa adaptación de impedancias.

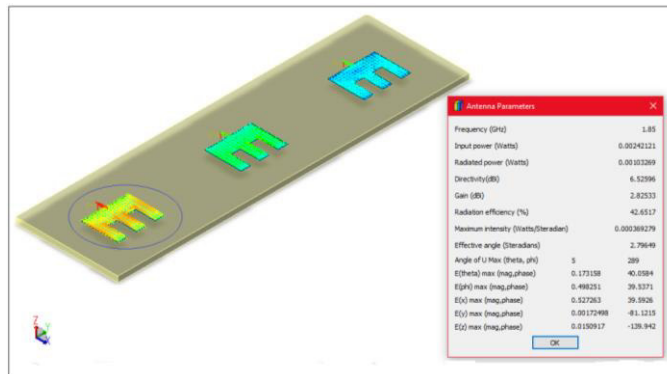
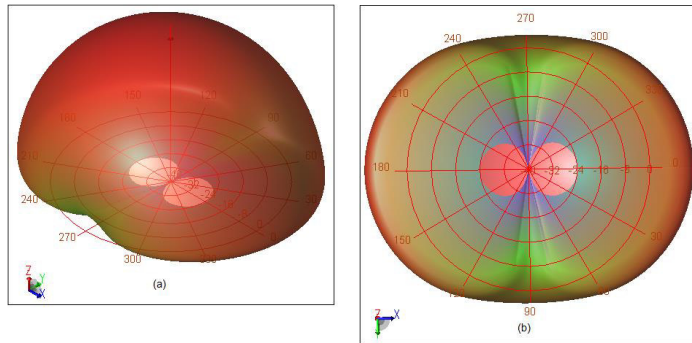
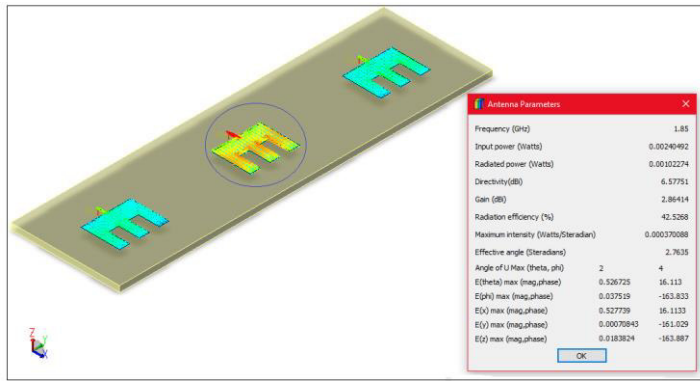
A continuación, se presenta la Tabla 3.37 donde se presenta los parámetros simulados de cada uno de los elementos con línea de alimentación del arreglo tipo E 3x1, adicional se presentan los lóbulos de radiación con vista frontal y posterior, posteriormente se presenta la Tabla 3.38 con los valores más importantes de cada elemento del arreglo.

Tabla 3.37 Parámetros simulados y lóbulos de radiación del arreglo 3x1 de parches tipo E con línea de alimentación.

Elemento	Parámetros y lóbulos de radiación																												
Patch (1,1)	 <p>The image shows a 3D model of an antenna array with three 'E' shaped patches. A 'Antenna Parameters' window is open, showing the following data:</p> <table border="1"> <tr><td>Frequency (GHz)</td><td>1.85</td></tr> <tr><td>Input power (Watts)</td><td>0.00238878</td></tr> <tr><td>Radiated power (Watts)</td><td>0.00101458</td></tr> <tr><td>Directivity(dBi)</td><td>6.52228</td></tr> <tr><td>Gain (dBi)</td><td>2.80438</td></tr> <tr><td>Radiation efficiency (%)</td><td>42.4727</td></tr> <tr><td>Maximum intensity (Watts/Steradian)</td><td>0.000362581</td></tr> <tr><td>Effective angle (Steradians)</td><td>2.79821</td></tr> <tr><td>Angle of U Max (theta, phi)</td><td>5 71</td></tr> <tr><td>E(theta) max (mag,phase)</td><td>0.171067 38.1299</td></tr> <tr><td>E(phi) max (mag,phase)</td><td>0.493889 -142.214</td></tr> <tr><td>E(z) max (mag,phase)</td><td>0.522462 37.7328</td></tr> <tr><td>E(x) max (mag,phase)</td><td>0.09120268 112.8</td></tr> <tr><td>E(y) max (mag,phase)</td><td>0.0149095 -141.87</td></tr> </table>	Frequency (GHz)	1.85	Input power (Watts)	0.00238878	Radiated power (Watts)	0.00101458	Directivity(dBi)	6.52228	Gain (dBi)	2.80438	Radiation efficiency (%)	42.4727	Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000362581	Effective angle (Steradians)	2.79821	Angle of U Max (theta, phi)	5 71	E(theta) max (mag,phase)	0.171067 38.1299	E(phi) max (mag,phase)	0.493889 -142.214	E(z) max (mag,phase)	0.522462 37.7328	E(x) max (mag,phase)	0.09120268 112.8	E(y) max (mag,phase)	0.0149095 -141.87
Frequency (GHz)	1.85																												
Input power (Watts)	0.00238878																												
Radiated power (Watts)	0.00101458																												
Directivity(dBi)	6.52228																												
Gain (dBi)	2.80438																												
Radiation efficiency (%)	42.4727																												
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000362581																												
Effective angle (Steradians)	2.79821																												
Angle of U Max (theta, phi)	5 71																												
E(theta) max (mag,phase)	0.171067 38.1299																												
E(phi) max (mag,phase)	0.493889 -142.214																												
E(z) max (mag,phase)	0.522462 37.7328																												
E(x) max (mag,phase)	0.09120268 112.8																												
E(y) max (mag,phase)	0.0149095 -141.87																												



Patch
(2,1)



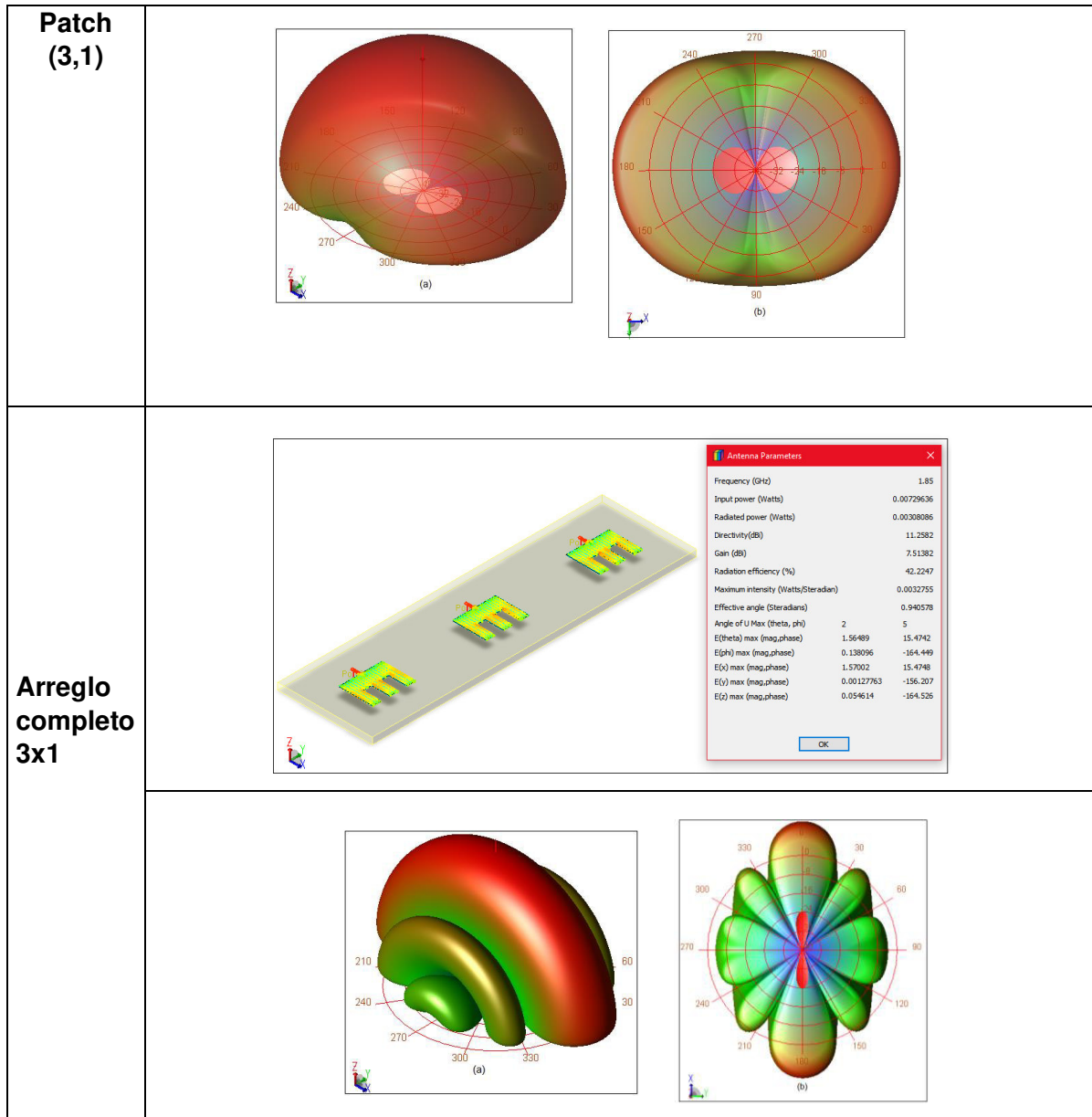


Tabla 3.38. Parámetros de los elementos tipo E con línea de alimentación del arreglo 3x1.

Arreglo 3x1		Directividad	Ganancia	Eficiencia
Arreglo 3x1	Patch (1,1)	6.52 dBi	2.80 dBi	42.47 %
	Patch (2,1)	6.58 dBi	2.86 dBi	42.53 %
	Patch (3,1)	6.53 dBi	2.83 dBi	42.65 %
	Arreglo completo	11.26 dBi	7.51 dBi	42.22 %

Como se aprecia en la Tabla 3.38 los valores de directividad, ganancia y eficiencia no son buenos en ninguno de los elementos del arreglo, los resultados serán analizados al final del capítulo.

3.5 SIMULACIÓN DEL ELEMENTO CIRCULAR BASE DEL ARREGLO

Con los valores de la Tabla 2.5 obtenidos en el capítulo 2 se simula el elemento base del arreglo lineal utilizando el software ADS, la antena se simula al igual que en los anteriores elementos en un ambiente (aire – sustrato FR-4 – plano a tierra) y con las mismas características que se utilizaron en la simulación del parche rectangular y parche tipo E. En la Figura 3.38 se presenta el elemento base tipo parche circular en el espacio de trabajo de ADS, el punto de alimentación de la antena se colocó en el borde.

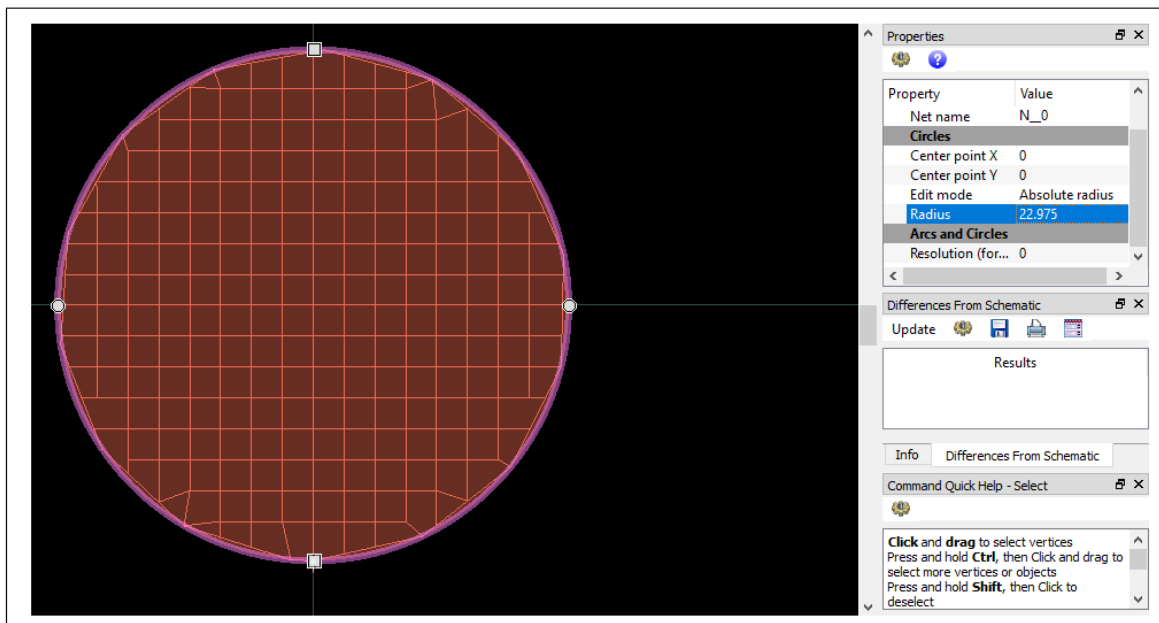


Figura 3.38. Simulación del parche circular a la frecuencia de 1.85 GHz.

Una vez graficada en el espacio de trabajo la antena tipo parche circular se procedió a simular para obtener los parámetros característicos de la antena, en la Figura 3.39 se muestra el parámetro S11 con un valor de -3.46 dB en magnitud y 21.60 grados en fase a una frecuencia de 1.85 GHz, además, tiene una impedancia de entrada de $135.76 - j122.1 \Omega$ y para valores menores a -3 dB, el ancho de banda es de 71 MHz que en valor porcentual es 3.84 %.

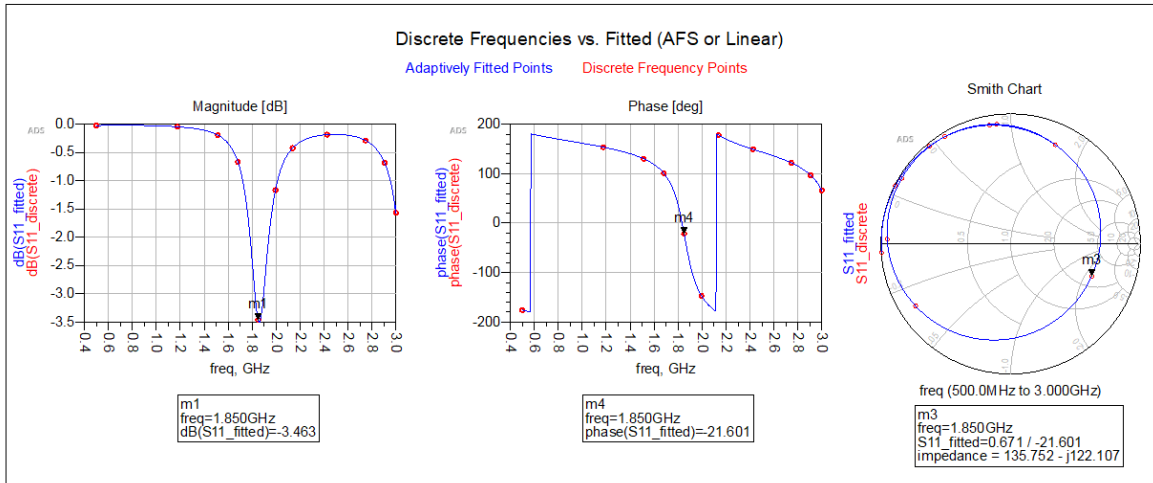


Figura 3.39. S11 e impedancia del parche circular a la frecuencia de 1.85 GHz.

La directividad del parche circular es de 6.40 dBi, tiene una ganancia de 4.29 dBi y una eficiencia de 61.24 %, en la Figura 3.40 se presenta el resultado de los parámetros mencionados, adicionalmente en la Figura 3.41 se muestran los patrones de radiación de la antena en 3D.

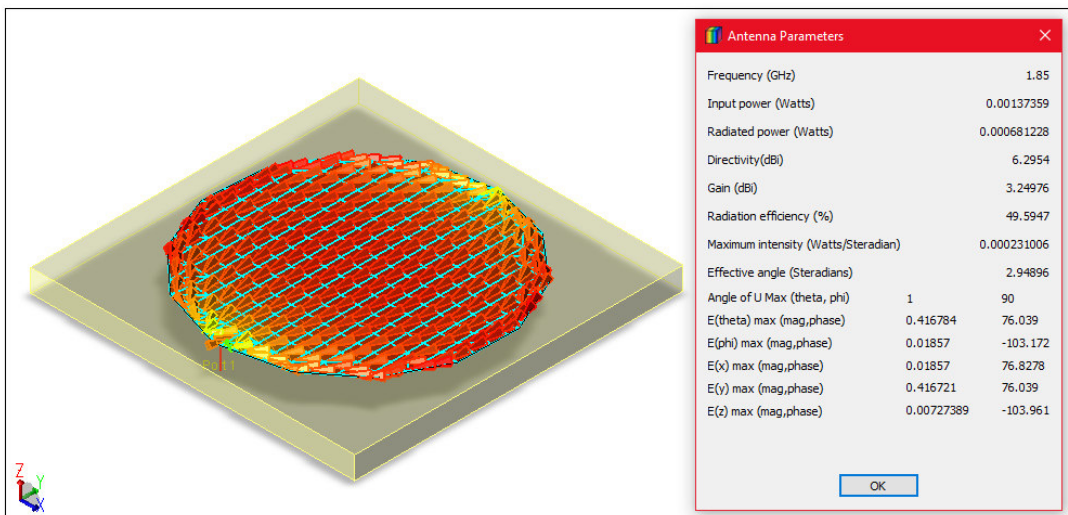


Figura 3.40. Parámetros de la antena tipo parche circular a la frecuencia de 1.85 GHz.

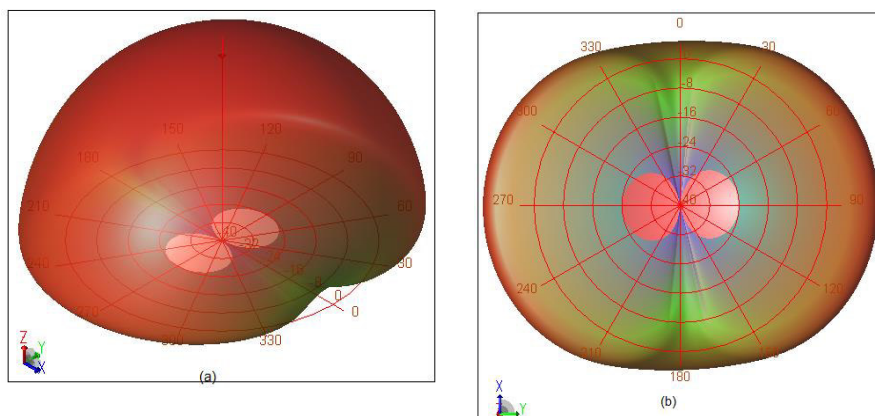


Figura 3.41. Patrón de radiación del parche circular en 3D: (a) vista frontal, (b) vista posterior.

3.5.1 SIMULACIÓN DEL ARREGLO LINEAL 1x3 y 3x1 CON PARCHES CIRCULARES

Con el diseño del elemento base y de la separación entre parches radiadores en esta sección se presentan los arreglos lineales 1x3 y 3x1 con el parche circular como elemento base, además, se presentan los parámetros de cada uno de los elementos que conforman el arreglo lineal, los resultados serán analizados al final del presente capítulo.

3.5.1.1 Arreglo lineal 1x3 de elementos circulares

Como la separación entre parches radiadores es de 81.081 mm se procedió a simular el arreglo lineal 1x3 con parches circulares, en la Figura 3.42 se presenta el arreglo lineal simulado en el software ADS.

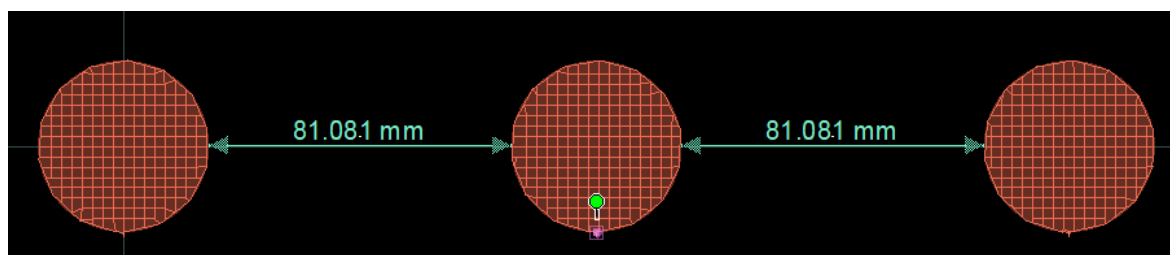


Figura 3.42. Arreglo lineal 1x3 con elementos circulares.

A continuación, se presentan las simulaciones de cada uno de los elementos circulares del arreglo 1x3, en la Figura 3.43 se observan los parámetros simulados como impedancia, S11 y ancho de banda, en este caso al no obtener una adaptación de la impedancia el valor de ancho de banda se lo obtuvo para valores menores a -3 dB. En la Tabla 3.39 se presentan los valores de impedancia, S11 y ancho de banda obtenidos en la simulación para cada uno de los elementos del arreglo.

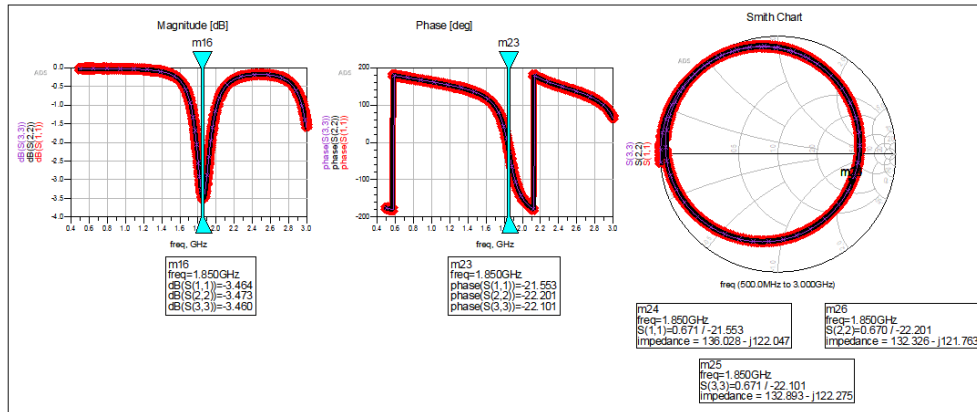



Figura 3.43. Parámetros S11 e impedancia de los elementos circulares del arreglo lineal 1x3.

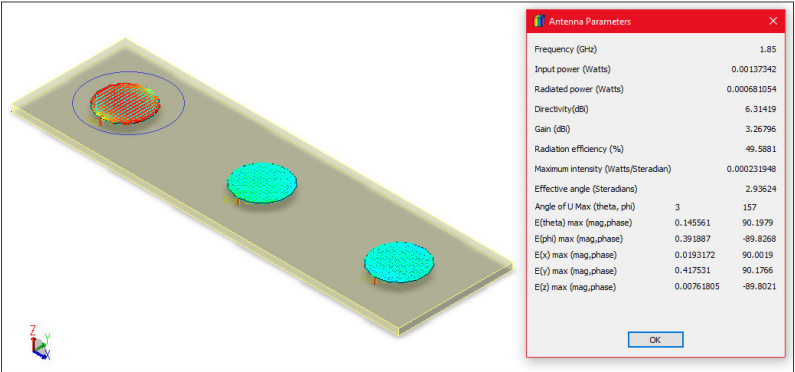
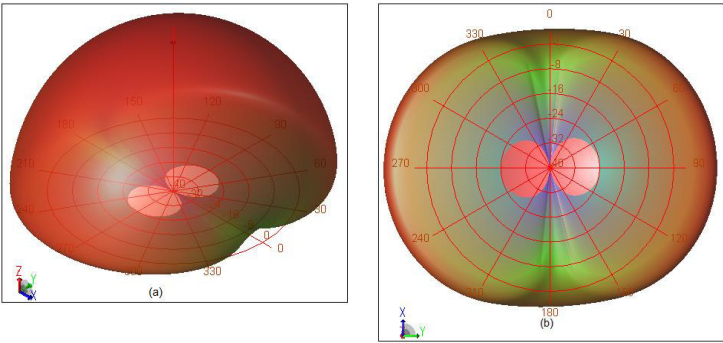
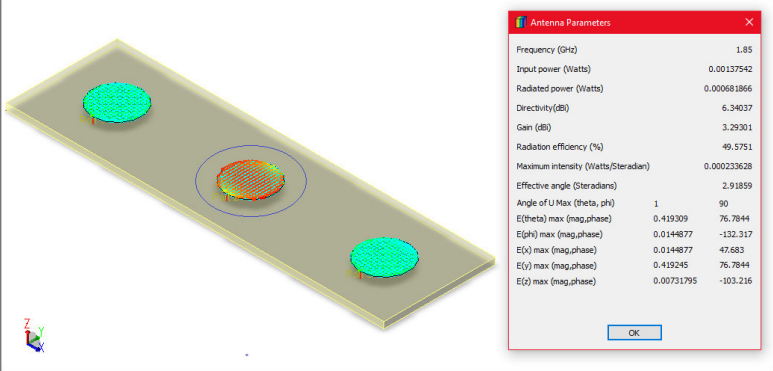
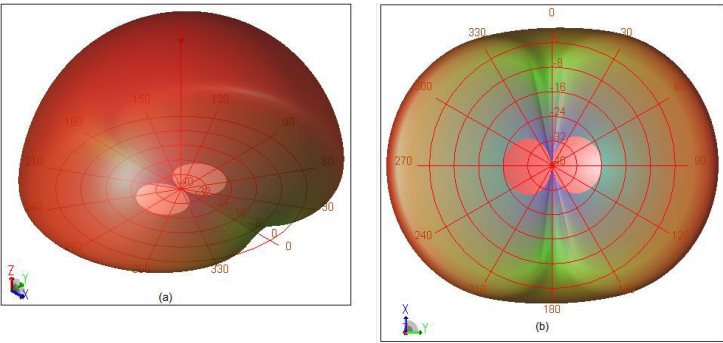
Tabla 3.39. Parámetros S11, impedancia de entrada y ancho de banda de cada uno de los elementos circulares del arreglo 1x3.

Arreglo 1x3		Impedancia Z (Ω)	S11 (dB)	Fase ($^\circ$)	Ancho de banda (a - 3dB)
Parche sin línea de alimentación $r = 22.975$ 		135.76 – j122.1	-3.46dB	21.60	71 MHz (3.84 %)
Arreglo 1x3	Patch (1,1)	136.03 - j122.05	-3.46dB	-21.55	72 MHz (3.89 %)
	Patch (1,2)	132.33 + j121.76	-3.47dB	-22.20	72 MHz (3.89%)
	Patch (1,3)	132.89 - j122.28	-3.46dB	-22.10	72 MHz (3.89 %)

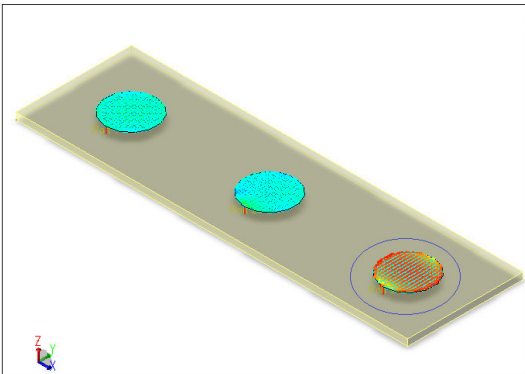
Los valores de la Tabla 3.39 muestran que no existe algún cambio significativo al realizar el arreglo, se mantiene al ancho de banda en los elementos 1,2 y 1,3, además los valores de impedancia y S11 son similares, esto se analizará en conjunto al final del capítulo.

A continuación, se presenta la Tabla 3.40 la cual muestra la simulación de los elementos del arreglo 1x3, además se presenta los lóbulos de radiación de vista frontal y vista posterior. Posteriormente se presenta la Tabla 3.41 la cual contiene los valores de directividad, ganancia y eficiencia de cada elemento del arreglo.

Tabla 3.40. Parámetros simulados y lóbulos de radiación del arreglo circular 1x3.

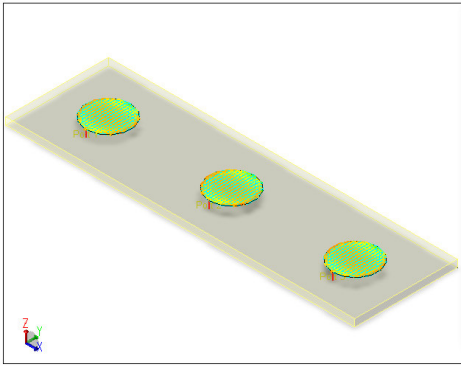
Elemento	Parámetros y lóbulos de radiación																												
Patch (1,1)	 <table border="1" data-bbox="1043 376 1311 730"> <caption>Antenna Parameters</caption> <tr><td>Frequency (GHz)</td><td>1.85</td></tr> <tr><td>Input power (Watts)</td><td>0.00137342</td></tr> <tr><td>Radiated power (Watts)</td><td>0.000681054</td></tr> <tr><td>Directivity (dB)</td><td>6.31419</td></tr> <tr><td>Gain (dB)</td><td>3.26796</td></tr> <tr><td>Radiation efficiency (%)</td><td>49.5881</td></tr> <tr><td>Maximum intensity (Watts/Steradian)</td><td>0.000231948</td></tr> <tr><td>Effective angle (Steradians)</td><td>2.93624</td></tr> <tr><td>Angle of U Max (theta, phi)</td><td>3 157</td></tr> <tr><td>E(theta) max (mag,phase)</td><td>0.145561 90.1979</td></tr> <tr><td>E(phi) max (mag,phase)</td><td>0.391887 -89.8268</td></tr> <tr><td>E(x) max (mag,phase)</td><td>0.0193172 90.0019</td></tr> <tr><td>E(y) max (mag,phase)</td><td>0.417531 90.1766</td></tr> <tr><td>E(z) max (mag,phase)</td><td>0.00761805 -89.8021</td></tr> </table> 	Frequency (GHz)	1.85	Input power (Watts)	0.00137342	Radiated power (Watts)	0.000681054	Directivity (dB)	6.31419	Gain (dB)	3.26796	Radiation efficiency (%)	49.5881	Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000231948	Effective angle (Steradians)	2.93624	Angle of U Max (theta, phi)	3 157	E(theta) max (mag,phase)	0.145561 90.1979	E(phi) max (mag,phase)	0.391887 -89.8268	E(x) max (mag,phase)	0.0193172 90.0019	E(y) max (mag,phase)	0.417531 90.1766	E(z) max (mag,phase)	0.00761805 -89.8021
Frequency (GHz)	1.85																												
Input power (Watts)	0.00137342																												
Radiated power (Watts)	0.000681054																												
Directivity (dB)	6.31419																												
Gain (dB)	3.26796																												
Radiation efficiency (%)	49.5881																												
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000231948																												
Effective angle (Steradians)	2.93624																												
Angle of U Max (theta, phi)	3 157																												
E(theta) max (mag,phase)	0.145561 90.1979																												
E(phi) max (mag,phase)	0.391887 -89.8268																												
E(x) max (mag,phase)	0.0193172 90.0019																												
E(y) max (mag,phase)	0.417531 90.1766																												
E(z) max (mag,phase)	0.00761805 -89.8021																												
Patch (1,2)	 <table border="1" data-bbox="1018 1220 1279 1568"> <caption>Antenna Parameters</caption> <tr><td>Frequency (GHz)</td><td>1.85</td></tr> <tr><td>Input power (Watts)</td><td>0.00137542</td></tr> <tr><td>Radiated power (Watts)</td><td>0.000681866</td></tr> <tr><td>Directivity (dB)</td><td>6.34037</td></tr> <tr><td>Gain (dB)</td><td>3.29301</td></tr> <tr><td>Radiation efficiency (%)</td><td>49.5751</td></tr> <tr><td>Maximum intensity (Watts/Steradian)</td><td>0.000233628</td></tr> <tr><td>Effective angle (Steradians)</td><td>2.91859</td></tr> <tr><td>Angle of U Max (theta, phi)</td><td>1 90</td></tr> <tr><td>E(theta) max (mag,phase)</td><td>0.419309 76.7844</td></tr> <tr><td>E(phi) max (mag,phase)</td><td>0.0144877 -132.317</td></tr> <tr><td>E(x) max (mag,phase)</td><td>0.0144877 47.683</td></tr> <tr><td>E(y) max (mag,phase)</td><td>0.419245 76.7844</td></tr> <tr><td>E(z) max (mag,phase)</td><td>0.00731795 -103.216</td></tr> </table> 	Frequency (GHz)	1.85	Input power (Watts)	0.00137542	Radiated power (Watts)	0.000681866	Directivity (dB)	6.34037	Gain (dB)	3.29301	Radiation efficiency (%)	49.5751	Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000233628	Effective angle (Steradians)	2.91859	Angle of U Max (theta, phi)	1 90	E(theta) max (mag,phase)	0.419309 76.7844	E(phi) max (mag,phase)	0.0144877 -132.317	E(x) max (mag,phase)	0.0144877 47.683	E(y) max (mag,phase)	0.419245 76.7844	E(z) max (mag,phase)	0.00731795 -103.216
Frequency (GHz)	1.85																												
Input power (Watts)	0.00137542																												
Radiated power (Watts)	0.000681866																												
Directivity (dB)	6.34037																												
Gain (dB)	3.29301																												
Radiation efficiency (%)	49.5751																												
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000233628																												
Effective angle (Steradians)	2.91859																												
Angle of U Max (theta, phi)	1 90																												
E(theta) max (mag,phase)	0.419309 76.7844																												
E(phi) max (mag,phase)	0.0144877 -132.317																												
E(x) max (mag,phase)	0.0144877 47.683																												
E(y) max (mag,phase)	0.419245 76.7844																												
E(z) max (mag,phase)	0.00731795 -103.216																												

Patch (1,3)

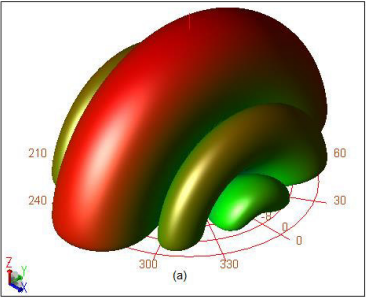


Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	1.85
Input power (Watts)	0.00137228
Radiated power (Watts)	0.000680599
Directivity(dB)	6.3149
Gain (dB)	3.26937
Radiation efficiency (%)	49.5961
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000231831
Effective angle (Steradians)	2.93575
Angle of U Max (theta, phi)	3 26
E(theta) max (mag,phase)	0.198123 88.3924
E(phi) max (mag,phase)	0.367998 90.1584
E(x) max (mag,phase)	0.0173135 71.7058
E(y) max (mag,phase)	0.417454 89.7915
E(z) max (mag,phase)	0.010369 -91.6076

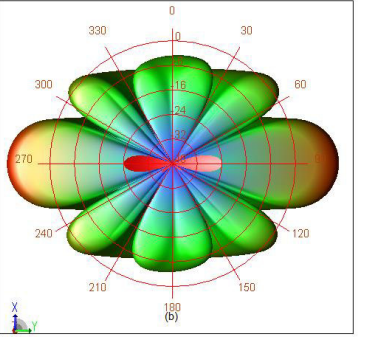
Arreglo completo 1x3



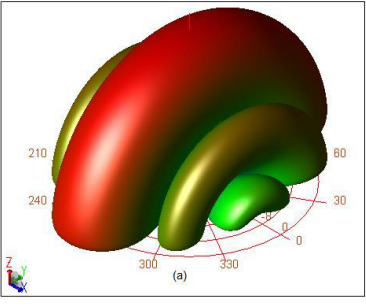
Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	1.85
Input power (Watts)	0.00410332
Radiated power (Watts)	0.0019943
Directivity(dB)	11.1932
Gain (dB)	8.05973
Radiation efficiency (%)	48.6021
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.00208881
Effective angle (Steradians)	0.954755
Angle of U Max (theta, phi)	1 89
E(theta) max (mag,phase)	1.25417 76.6227
E(phi) max (mag,phase)	0.0300058 -127.189
E(x) max (mag,phase)	0.0507975 62.828
E(y) max (mag,phase)	1.25331 76.6324
E(z) max (mag,phase)	0.0218882 -103.377



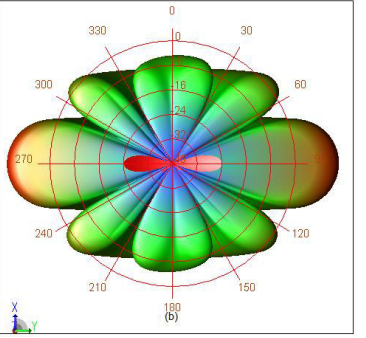
(a)



(b)




(a)



(b)

103

Tabla 3.41 Parámetros de los elementos del arreglo circular 1x3.

Arreglo 1x3		Directividad	Ganancia	Eficiencia
Parche sin línea de alimentación $r = 22.975$ 		6.30 dBi	3.25 dBi	49.59 %
Arreglo 1x3	Patch (1,1)	6.31 dBi	3.27 dBi	49.59 %
	Patch (1,2)	6.34 dBi	3.29 dBi	49.58 %
	Patch (1,3)	6.31 dBi	3.27 dBi	49.60 %
	Arreglo completo	11.19 dBi	8.06 dBi	48.60 %

En la Tabla 3.41 se muestra que los valores de directividad, ganancia y eficiencia no muestran cambios con respecto a los valores de un parche circular, estos valores serán analizados en conjunto con los demás arreglos al final del presente capítulo.

3.5.1.2 Arreglo lineal 3x1 de elementos circulares

Para este arreglo como en los anteriores se utilizó la separación entre parches radiadores de 81.081 mm, en la Figura 3.44 se presenta el arreglo lineal 3x1 con parches circulares.

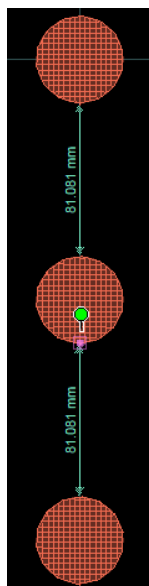


Figura 3.44. Arreglo lineal 3x1 con parche circulares.

En la Figura 3.42 se presentan las simulaciones del arreglo con elementos circulares 3x1, donde se observa los parámetros S11, impedancia y ancho de banda de los elementos, después se presenta la Tabla 3.43 la cual contiene los valores mencionados de los parches que conforman el arreglo.

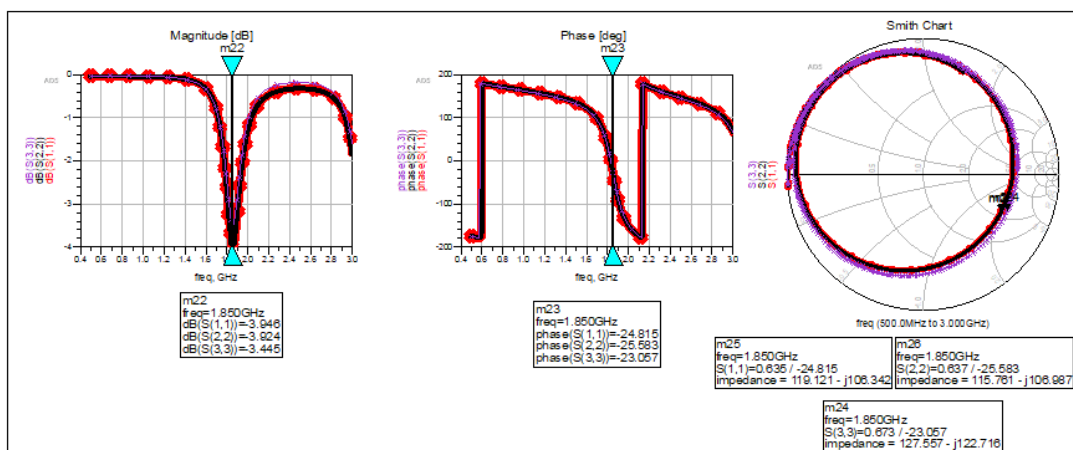


Figura 3.42. Parámetros S11, impedancia y ancho de banda de los elementos circulares del arreglo lineal 3x1.

Tabla 3.43. Parámetros S11, impedancia de entrada y ancho de banda de cada uno de los elementos circulares del arreglo 3x1.

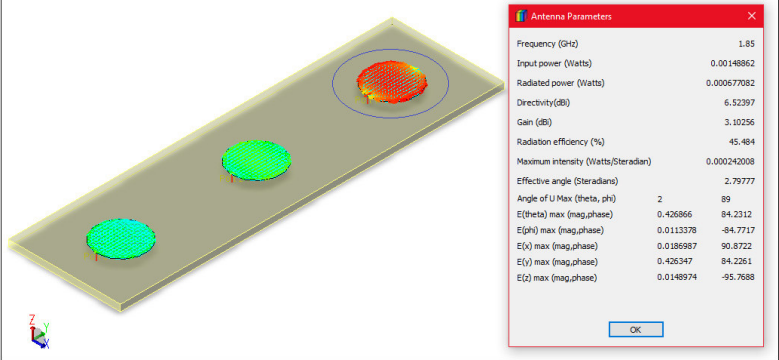
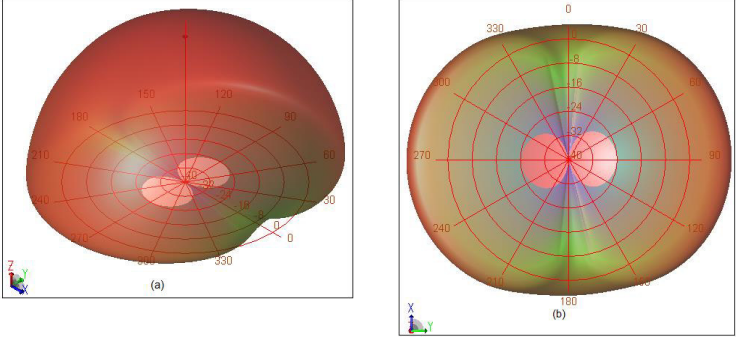
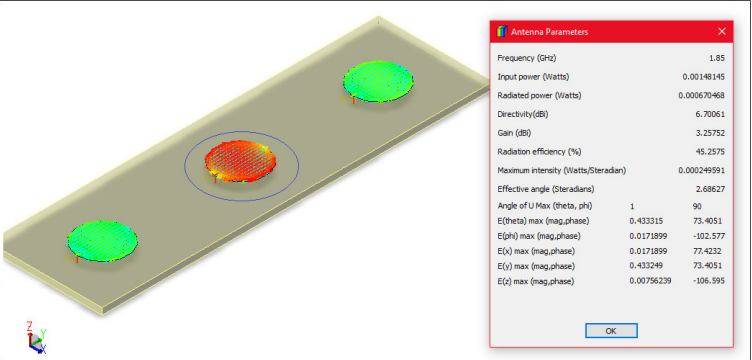
Arreglo 3x1		Impedancia Z (Ω)	S11 (dB)	Fase ($^{\circ}$)	Ancho de banda (a - 3dB)
Arreglo 3x1	Patch (1,1)	119.12 - j106.34 Ω	-3.95dB	-24.82	97 MHz (5.24 %)
	Patch (2,1)	115.76 - j106.99 Ω	-3.92dB	-25.58	95 MHz (5.14 %)
	Patch (3,1)	127.56 - j122.72	-3.45dB	-23.06	70 MHz (3.78 %)

En la Tabla 3.43 se observa que los valores de impedancia, S11 y ancho de banda son aproximadamente iguales, el ancho de banda se lo obtuvo a un valor menor a -3 dB debido a que la impedancia de la antena no se encuentra adaptada, estos valores serán analizados en conjunto con los demás al final del presente capítulo.

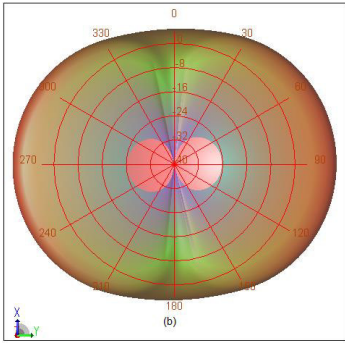
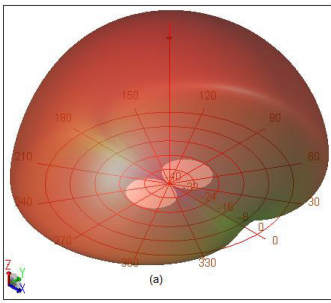
A continuación, en la Tabla 3.44 se presenta la simulación de cada elemento del arreglo 3x1 en conjunto con sus lóbulos de radiación tanto en vista frontal como en su vista posterior, posteriormente se presenta la Tabla 3.31 la cual contiene los valores de

directividad, ganancia y eficiencia de los elementos que conforman el arreglo y del arreglo completo.

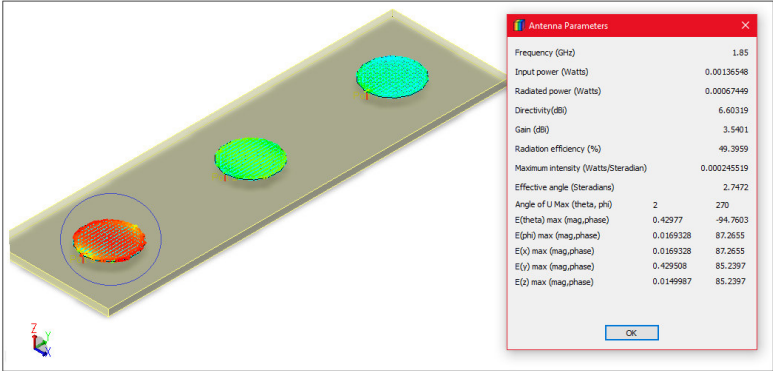
Tabla 3.44 Parámetros simulados y lóbulos de radiación del arreglo circular 3x1.

Elemento	Parámetros y lóbulos de radiación																														
Patch (1,1)	 <table border="1" data-bbox="1023 645 1278 987"> <thead> <tr> <th colspan="2">Antenna Parameters</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Frequency (GHz)</td><td>1.85</td></tr> <tr><td>Input power (Watts)</td><td>0.00148862</td></tr> <tr><td>Radiated power (Watts)</td><td>0.000677082</td></tr> <tr><td>Directivity(dB)</td><td>6.52397</td></tr> <tr><td>Gain (dB)</td><td>3.10256</td></tr> <tr><td>Radiation efficiency (%)</td><td>45.484</td></tr> <tr><td>Maximum intensity (Watts/Steradian)</td><td>0.000242008</td></tr> <tr><td>Effective angle (Steradians)</td><td>2.79777</td></tr> <tr><td>Angle of U Max (theta, phi)</td><td>2 89</td></tr> <tr><td>E(theta) max (mag,phase)</td><td>0.426866 84.2312</td></tr> <tr><td>E(phi) max (mag,phase)</td><td>0.0113378 -84.7717</td></tr> <tr><td>E(x) max (mag,phase)</td><td>0.0186987 90.8722</td></tr> <tr><td>E(y) max (mag,phase)</td><td>0.426347 84.2261</td></tr> <tr><td>E(z) max (mag,phase)</td><td>0.0148974 -95.7688</td></tr> </tbody> </table>	Antenna Parameters		Frequency (GHz)	1.85	Input power (Watts)	0.00148862	Radiated power (Watts)	0.000677082	Directivity(dB)	6.52397	Gain (dB)	3.10256	Radiation efficiency (%)	45.484	Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000242008	Effective angle (Steradians)	2.79777	Angle of U Max (theta, phi)	2 89	E(theta) max (mag,phase)	0.426866 84.2312	E(phi) max (mag,phase)	0.0113378 -84.7717	E(x) max (mag,phase)	0.0186987 90.8722	E(y) max (mag,phase)	0.426347 84.2261	E(z) max (mag,phase)	0.0148974 -95.7688
	Antenna Parameters																														
Frequency (GHz)	1.85																														
Input power (Watts)	0.00148862																														
Radiated power (Watts)	0.000677082																														
Directivity(dB)	6.52397																														
Gain (dB)	3.10256																														
Radiation efficiency (%)	45.484																														
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000242008																														
Effective angle (Steradians)	2.79777																														
Angle of U Max (theta, phi)	2 89																														
E(theta) max (mag,phase)	0.426866 84.2312																														
E(phi) max (mag,phase)	0.0113378 -84.7717																														
E(x) max (mag,phase)	0.0186987 90.8722																														
E(y) max (mag,phase)	0.426347 84.2261																														
E(z) max (mag,phase)	0.0148974 -95.7688																														
																															
	 <table border="1" data-bbox="1027 1496 1283 1823"> <thead> <tr> <th colspan="2">Antenna Parameters</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Frequency (GHz)</td><td>1.85</td></tr> <tr><td>Input power (Watts)</td><td>0.00148145</td></tr> <tr><td>Radiated power (Watts)</td><td>0.000670468</td></tr> <tr><td>Directivity(dB)</td><td>6.70061</td></tr> <tr><td>Gain (dB)</td><td>3.25752</td></tr> <tr><td>Radiation efficiency (%)</td><td>45.2575</td></tr> <tr><td>Maximum intensity (Watts/Steradian)</td><td>0.000249591</td></tr> <tr><td>Effective angle (Steradians)</td><td>2.68627</td></tr> <tr><td>Angle of U Max (theta, phi)</td><td>1 90</td></tr> <tr><td>E(theta) max (mag,phase)</td><td>0.433315 73.4051</td></tr> <tr><td>E(phi) max (mag,phase)</td><td>0.0171899 -102.577</td></tr> <tr><td>E(x) max (mag,phase)</td><td>0.0171899 77.4232</td></tr> <tr><td>E(y) max (mag,phase)</td><td>0.433249 73.4051</td></tr> <tr><td>E(z) max (mag,phase)</td><td>0.00756239 -106.595</td></tr> </tbody> </table>	Antenna Parameters		Frequency (GHz)	1.85	Input power (Watts)	0.00148145	Radiated power (Watts)	0.000670468	Directivity(dB)	6.70061	Gain (dB)	3.25752	Radiation efficiency (%)	45.2575	Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000249591	Effective angle (Steradians)	2.68627	Angle of U Max (theta, phi)	1 90	E(theta) max (mag,phase)	0.433315 73.4051	E(phi) max (mag,phase)	0.0171899 -102.577	E(x) max (mag,phase)	0.0171899 77.4232	E(y) max (mag,phase)	0.433249 73.4051	E(z) max (mag,phase)	0.00756239 -106.595
Antenna Parameters																															
Frequency (GHz)	1.85																														
Input power (Watts)	0.00148145																														
Radiated power (Watts)	0.000670468																														
Directivity(dB)	6.70061																														
Gain (dB)	3.25752																														
Radiation efficiency (%)	45.2575																														
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000249591																														
Effective angle (Steradians)	2.68627																														
Angle of U Max (theta, phi)	1 90																														
E(theta) max (mag,phase)	0.433315 73.4051																														
E(phi) max (mag,phase)	0.0171899 -102.577																														
E(x) max (mag,phase)	0.0171899 77.4232																														
E(y) max (mag,phase)	0.433249 73.4051																														
E(z) max (mag,phase)	0.00756239 -106.595																														

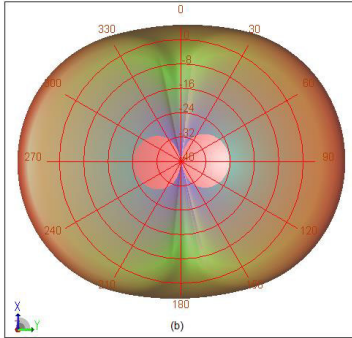
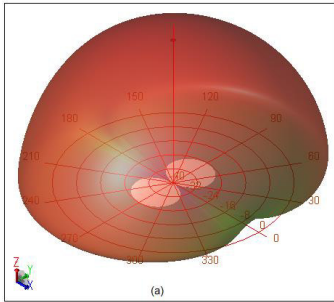
Patch (2,1)



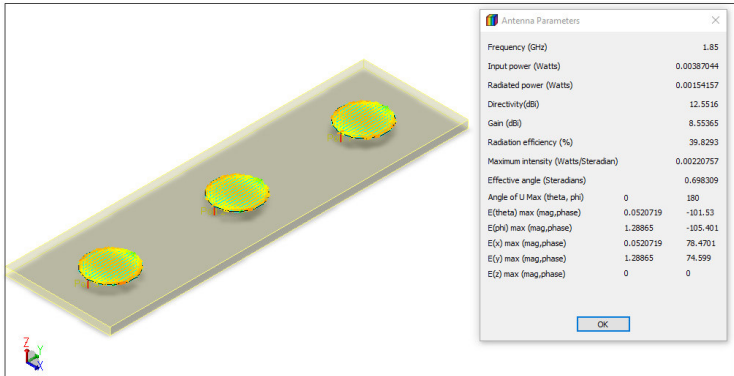
Patch (3,1)



Patch (3,1)



Arreglo completo 3x1



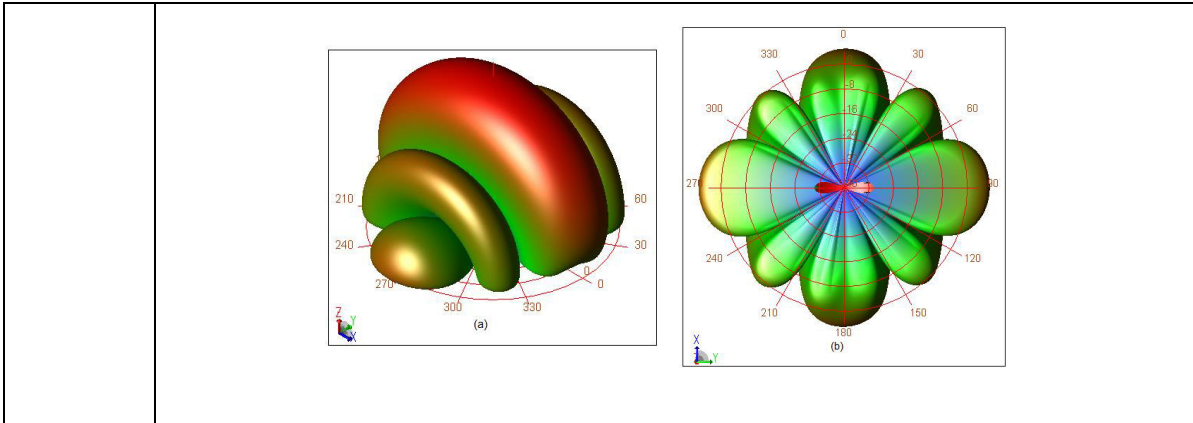


Tabla 3.45 Parámetros de los elementos circulares del arreglo 3x1.

Arreglo 3x1		Directividad	Ganancia	Eficiencia
Arreglo 3x1	Patch (1,1)	6.52 dBi	3.10 dBi	45.48 %
	Patch (2,1)	6.70 dBi	3.26 dBi	45.26 %
	Patch (3,1)	6.60 dBi	3.54 dBi	49.40 %
	Arreglo completo	12.55 dBi	8.55 dBi	39.83 %

Los valores de la Tabla 3.45 muestran valores similares en los tres elementos del arreglo 3x1, de manera similar al arreglo 1x3 no se obtuvo algún cambio significativo en los valores de directividad, ganancia y eficiencia, estos valores serán utilizados al final del capítulo.

3.6 SIMULACION DEL ELEMENTO CIRCULAR BASE DEL ARREGLO CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP

Con las dimensiones de la línea de alimentación se procedió a realizar la simulación del parche, en la Figura 3.43 se muestran los valores del parámetro S11 que en magnitud muestra un valor de -19.14 dB y fase un valor aproximado de 145.172 grados, además la impedancia de entrada del parche con la línea de alimentación tiene un valor de $52.62 + j78.153 \Omega$, además, se observa que la línea de alimentación no cumple completamente con su objetivo que consiste en acoplar la antena a una impedancia característica de 50Ω aproximadamente, y la frecuencia de resonancia se ve desplazada a una frecuencia menor (1.821 GHz), por lo que con la ayuda del software se procedió a modificar las dimensiones de la línea para obtener una buena adaptación a la frecuencia establecida.

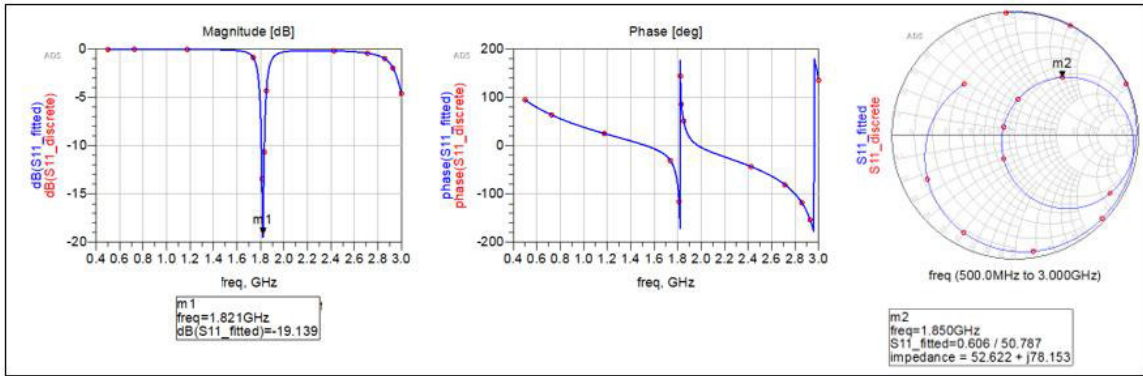


Figura 3.43. S11 e impedancia del parche circular a la frecuencia de 1.85 GHz.

En la Tabla 3.46 se presenta los valores del diseño y los valores optimizados con la simulación de la línea de alimentación y en la Figura 3.44 se presenta las dimensiones del parche circular con la línea de alimentación, esta línea cuenta con sus dimensiones ya optimizadas para obtener mejores resultados.

Tabla 3.46. Dimensiones de la línea de alimentación.

Línea de alimentación	Valor calculado	Valor optimizado
L	23.31 mm	6.5 mm
W	0.678 mm	1.1 mm

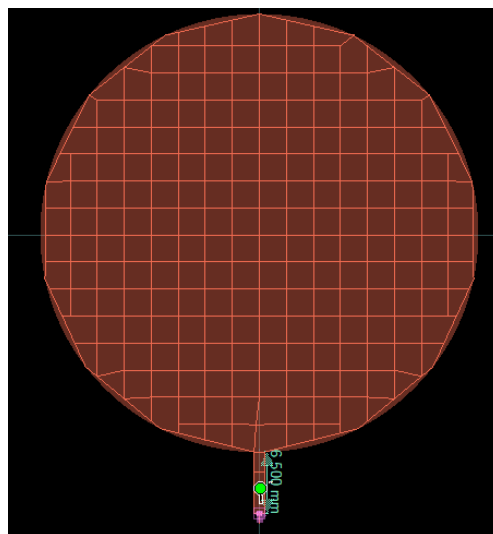


Figura 3.44. Parche circular con línea de alimentación mejorada para la frecuencia de 1.85 GHz.

Con las dimensiones de la línea de alimentación se procedió a simular el parche circular junto con la línea de alimentación, en la Figura 3.45 se presenta el parámetro S11 con un valor de -5.01 dB en magnitud y 57.53 grados en fase a la frecuencia de 1.85 GHz, además, la impedancia de entrada es de $50.03 - j68.87 \Omega$ y para valores menores a -3 dB se tiene un ancho de banda de 104 MHz que en valore porcentual es 5.62 %.

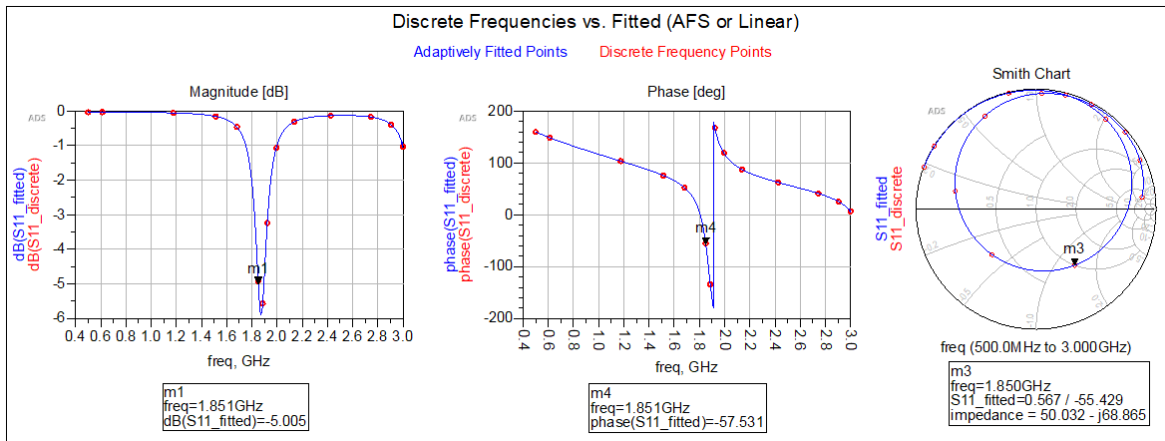


Figura 3.45. S11 e impedancia del parche circular a la frecuencia de 1.85 GHz.

En parámetros como la directividad se muestra un valor de 6.40 dBi, una ganancia de 2.68 dBi y una eficiencia de 42.49 %, en la Figura 3.46 se presenta el resultado de los parámetros mencionados, adicionalmente en la Figura 3.47 se muestran los patrones de radiación de la antena en 3D.

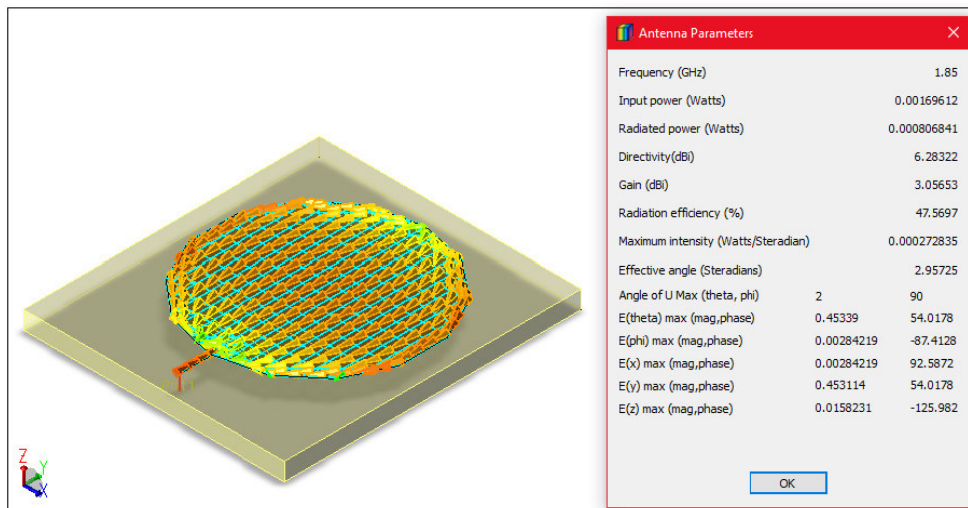


Figura 3.46. Parámetros del parche circular con línea de alimentación a la frecuencia de 1.85 GHz.

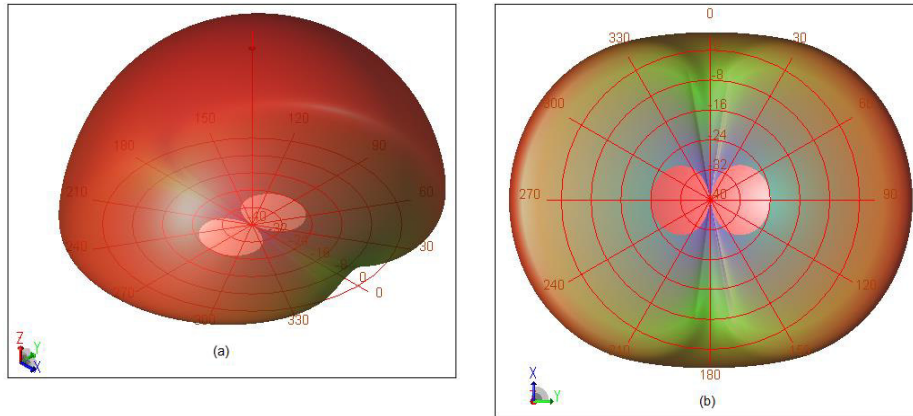


Figura 3.47. Patrón de radiación 3D del parche circular con línea de alimentación: (a) vista frontal, (b) vista posterior.

3.6.1 SIMULACIÓN DEL ARREGLO LINEAL CIRCULAR 1x3 y 3x1 CON LÍNEA DE ALIMENTACIÓN MICROSTRIP

Una vez obtenido el elemento base con línea de alimentación, el siguiente paso es realizar la simulación de los arreglos lineales 1x3 y 3x1, aquí se muestran los parámetros de cada uno de los elementos que conforman el arreglo lineal y de todo el arreglo, los resultados se analizarán al final del capítulo.

3.6.1.1 Arreglo lineal 1x3 de elementos circulares con línea de alimentación

Como en los anteriores arreglos la separación fue de 81.081 mm, tanto para el plano E como para el plano H, en la Figura 3.48 se presenta el arreglo lineal 1x3 con parches circulares con líneas de alimentación.

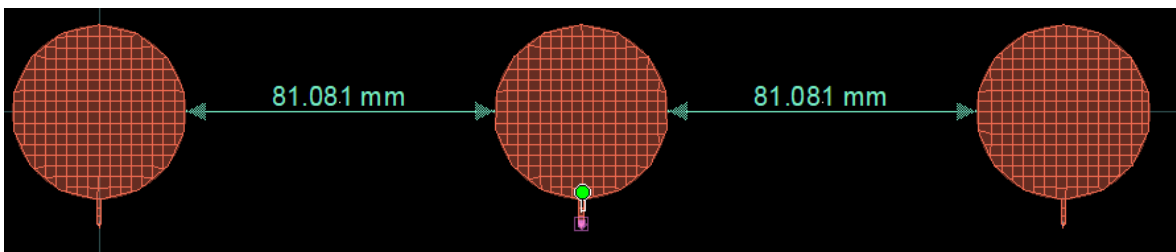


Figura 3.48. Arreglo lineal 1x3 de parches circulares con línea de alimentación.

En la Figura 3.49 se presentan las simulaciones de los elementos circulares del arreglo 1x3 con línea de alimentación, posteriormente se presenta la Tabla 3.33 donde se muestran los valores de impedancia, S11 y ancho de banda de cada elemento.

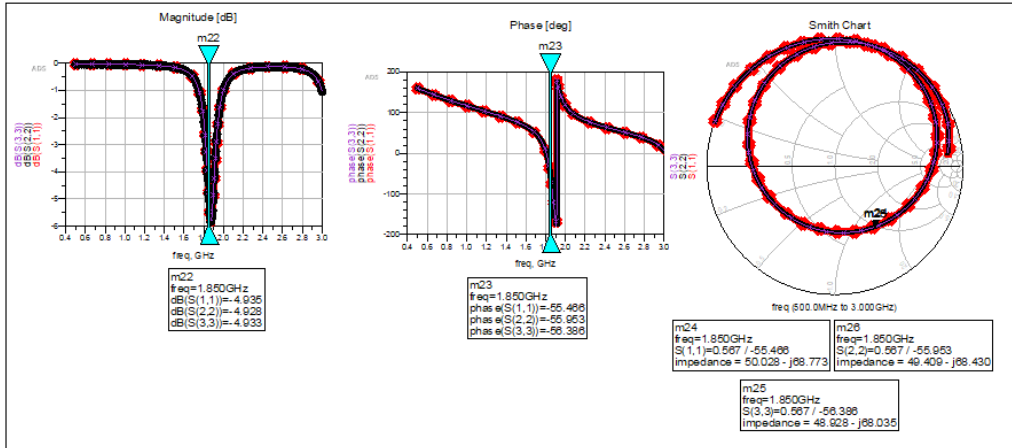


Figura 3.49. Parámetros S11, impedancia y ancho de banda de los elementos del arreglo lineal circular 1x3 con líneas de alimentación.

Tabla 3.47. Parámetros S11, impedancia de entrada y ancho de banda de cada uno de los elementos del arreglo circular 1x3 con líneas de alimentación.

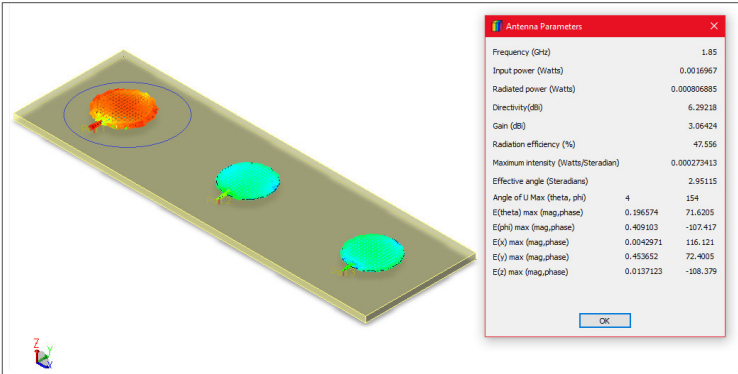
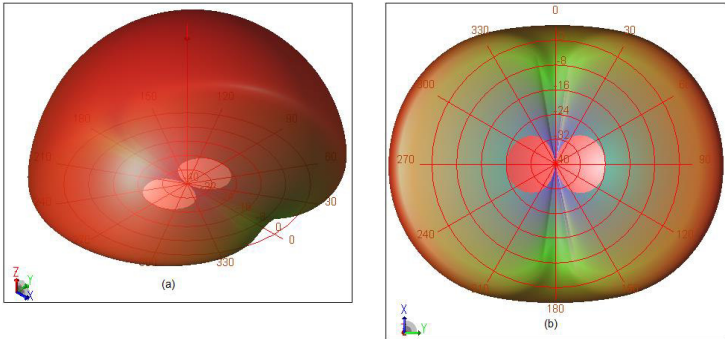
Arreglo 1x3		Impedancia Z (Ω)	S11 (dB)	Fase (°)	Ancho de banda (a -3dB)
		50.03 – j68.87	-5.01 dB	- 57.53	104 MHz (5.62 %)
Arreglo 1x3	Patch (1,1)	50.03 - j68.77	-4.94 dB	-55.47	105 MHz (5.68 %)
	Patch (1,2)	49.41 - j68.43	-4.93 dB	-55.95	104 MHz (5.62 %)
	Patch (1,3)	48.93 – j68.04	-4.98 dB	-56.39	104 MHz (5.62%)

Los valores que se presentan en la Tabla 3.47 muestra que con la línea de alimentación se logró una buena adaptación en la parte real de la impedancia, en cuanto a la parte imaginaria se muestra un valor alto, en este caso los valores de ancho de banda de tomarán para valores menores a -3 dB, debido a que se observa que el parámetro S11 no supera los -5 dB.

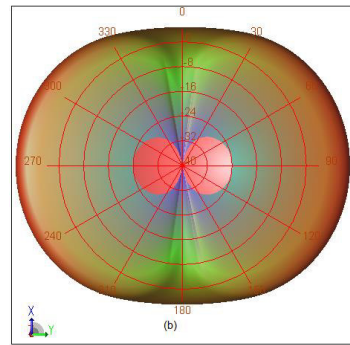
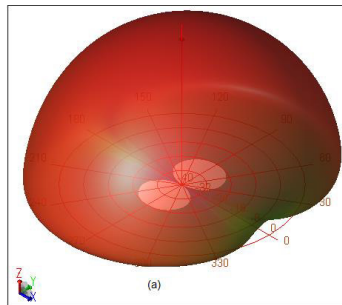
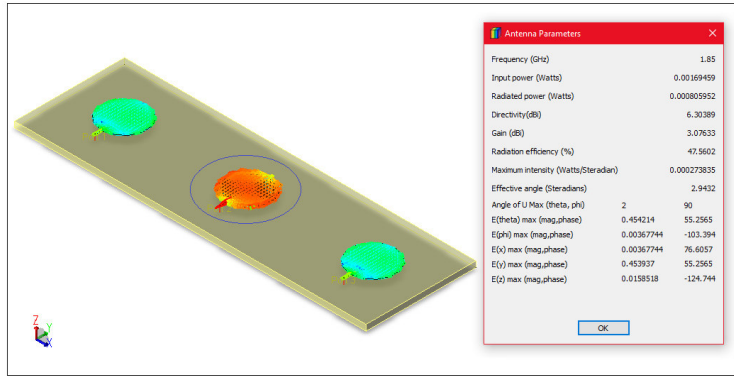
A continuación, se presenta la Tabla 3.48 con las simulaciones de los elementos de los arreglos donde se obtendrá la directividad, ganancia y eficiencia de los elementos del

arreglo, además se muestran los lóbulos de radiación tanto en la vista frontal como posterior, posteriormente se presenta la Tabla 3.49 con los valores de los parámetros mencionados.

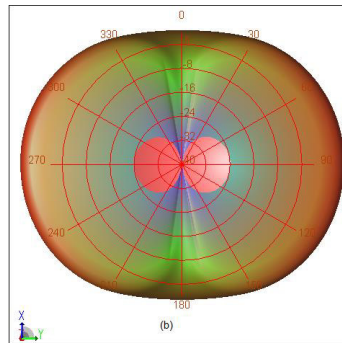
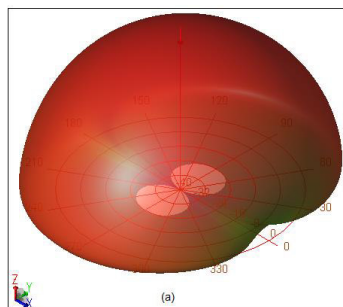
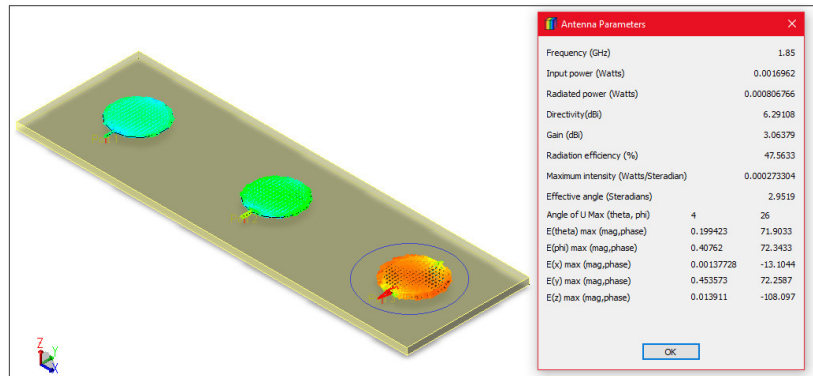
Tabla 3.48 Parámetros simulados y lóbulos de radiación del arreglo circular 1x3 con líneas de alimentación.

Elemento	Parámetros y lóbulos de radiación																														
Patch (1,1)	 <p>The image shows a 3D perspective view of a rectangular substrate with three circular patches arranged in a row. To the right, a dialog box titled 'Antenna Parameters' displays the following data:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Parameter</th> <th>Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Frequency (GHz)</td><td>1.85</td></tr> <tr><td>Input power (Watts)</td><td>0.0016967</td></tr> <tr><td>Radiated power (Watts)</td><td>0.00086885</td></tr> <tr><td>Directivity(dBi)</td><td>6.29218</td></tr> <tr><td>Gain (dBi)</td><td>3.06424</td></tr> <tr><td>Radiation efficiency (%)</td><td>47.556</td></tr> <tr><td>Maximum intensity (Watts/Steradian)</td><td>0.000273413</td></tr> <tr><td>Effective angle (Steradians)</td><td>2.95115</td></tr> <tr><td>Angle of U Max (theta, phi)</td><td>154</td></tr> <tr><td>E(theta) max (mag,phase)</td><td>0.196574 71.6205</td></tr> <tr><td>E(phi) max (mag,phase)</td><td>0.409103 -107.417</td></tr> <tr><td>E(x) max (mag,phase)</td><td>0.0042971 116.121</td></tr> <tr><td>E(y) max (mag,phase)</td><td>0.453652 72.4005</td></tr> <tr><td>E(z) max (mag,phase)</td><td>0.0137123 -108.379</td></tr> </tbody> </table>	Parameter	Value	Frequency (GHz)	1.85	Input power (Watts)	0.0016967	Radiated power (Watts)	0.00086885	Directivity(dBi)	6.29218	Gain (dBi)	3.06424	Radiation efficiency (%)	47.556	Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000273413	Effective angle (Steradians)	2.95115	Angle of U Max (theta, phi)	154	E(theta) max (mag,phase)	0.196574 71.6205	E(phi) max (mag,phase)	0.409103 -107.417	E(x) max (mag,phase)	0.0042971 116.121	E(y) max (mag,phase)	0.453652 72.4005	E(z) max (mag,phase)	0.0137123 -108.379
Parameter	Value																														
Frequency (GHz)	1.85																														
Input power (Watts)	0.0016967																														
Radiated power (Watts)	0.00086885																														
Directivity(dBi)	6.29218																														
Gain (dBi)	3.06424																														
Radiation efficiency (%)	47.556																														
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000273413																														
Effective angle (Steradians)	2.95115																														
Angle of U Max (theta, phi)	154																														
E(theta) max (mag,phase)	0.196574 71.6205																														
E(phi) max (mag,phase)	0.409103 -107.417																														
E(x) max (mag,phase)	0.0042971 116.121																														
E(y) max (mag,phase)	0.453652 72.4005																														
E(z) max (mag,phase)	0.0137123 -108.379																														
	 <p>The image contains two radiation pattern plots. Plot (a) is a 3D surface plot showing the radiation pattern with a main lobe and side lobes. Plot (b) is a 2D polar plot showing the radiation pattern in the X-Z plane, with concentric circles representing constant gain levels and radial lines representing constant angles.</p>																														

Patch (1,2)



Patch (1,3)



Arreglo completo 1x3

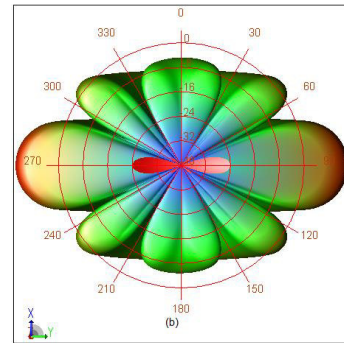
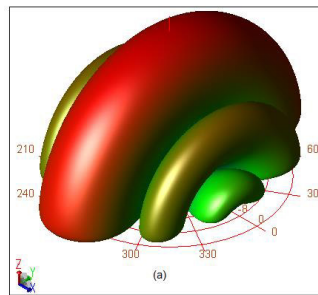
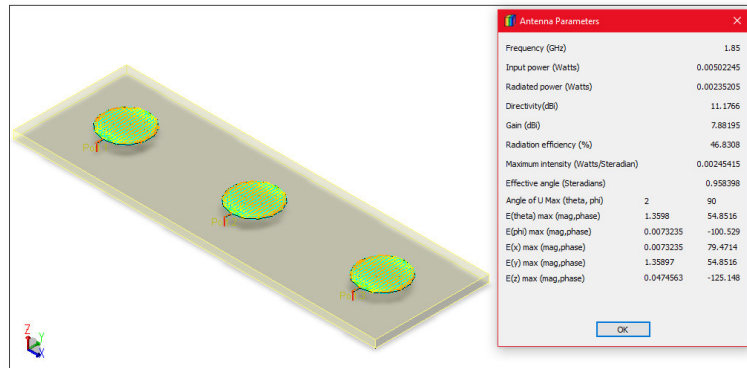


Tabla 3.49 Parámetros de los elementos circulares con línea de alimentación del arreglo 1x3.

Arreglo 1x3		Directividad	Ganancia	Eficiencia
Parche con línea de alimentación 		6.40 dBi	2.68 dBi	42.49 %
Arreglo 1x3	Patch (1,1)	6.29 dBi	3.06 dBi	47.56 %
	Patch (1,2)	6.30 dBi	3.08 dBi	47.56 %
	Patch (1,3)	6.29 dBi	3.06 dBi	47.56 %
	Arreglo completo	11.18 dBi	7.88 dBi	46.83 %

Como se observa en la Tabla 3.49 los valores de directividad, ganancia y eficiencia de los elementos del arreglo no presentan un cambio notorio con respecto al parche circular, estos valores serán utilizados al final del capítulo.

3.6.1.2 Arreglo lineal 3x1 de elementos circulares con línea de alimentación

Al igual que en todos los arreglos la separación entre parches para este arreglo será de 81.081 mm, en la Figura 3.50 se presenta el arreglo lineal 3x1 de parches circulares con líneas de alimentación.

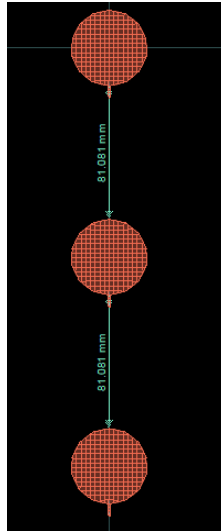


Figura 3.50. Arreglo lineal 3x1 de parches circulares con líneas de alimentación.

En la Figura 3.51 se presentan las simulaciones de los elementos del arreglo 3x1, donde se observan los parámetros S11, impedancia y ancho de banda, posteriormente en la Tabla 3.50 se presentan los valores de los parámetros mencionados.

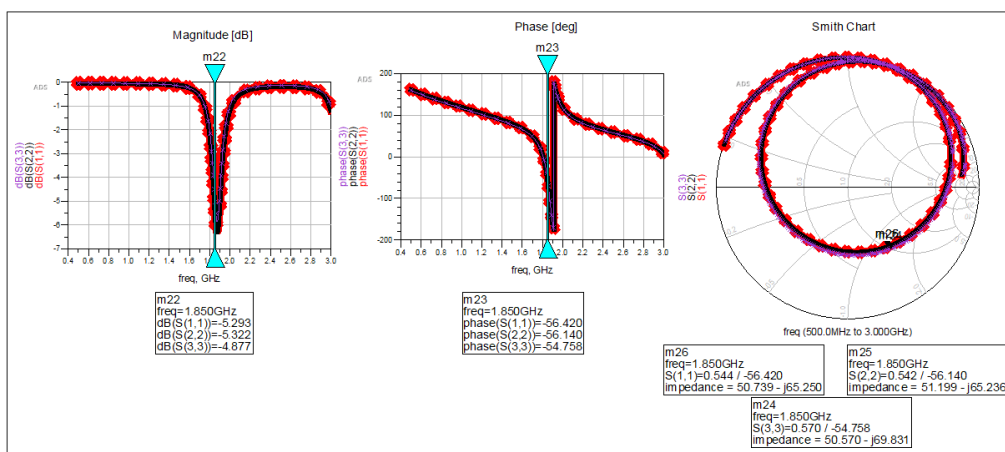


Figura 3.51. Parámetros S11, impedancia y ancho de banda de los elementos circulares con línea de alimentación del arreglo lineal 3x1.

Tabla 3.50 Parámetros S11, impedancia de entrada y ancho de banda de cada uno de los elementos circulares del arreglo 3x1.

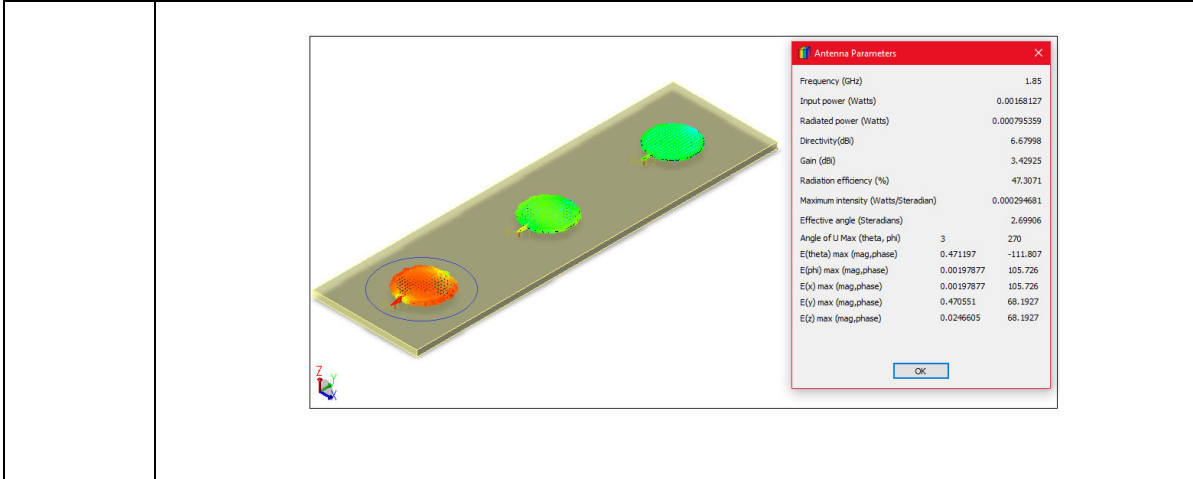
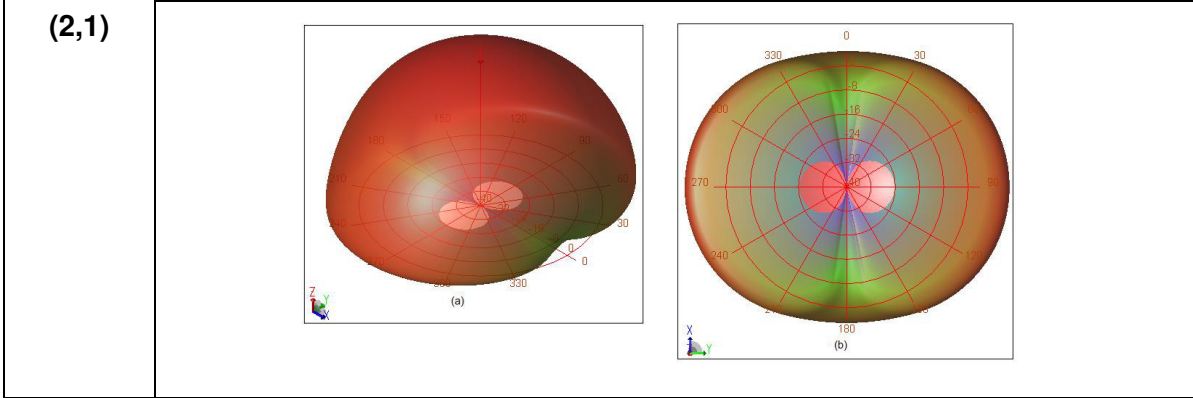
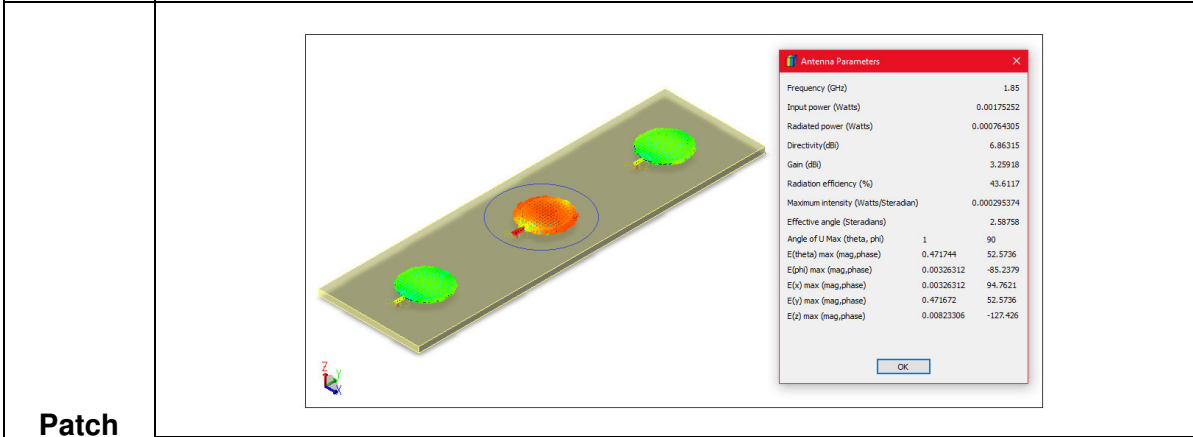
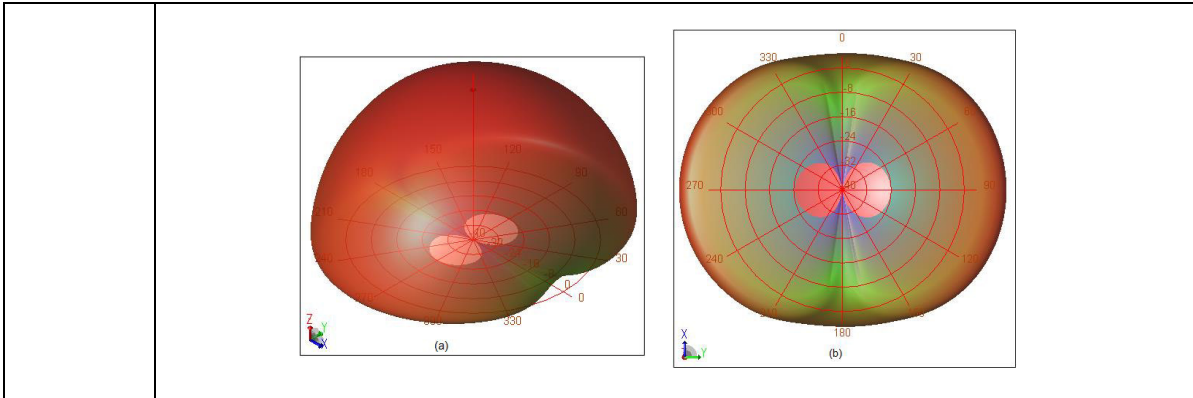
Arreglo 3x1		Impedancia Z (Ω)	S11 (dB)	Fase ($^{\circ}$)	Ancho de banda (a -10 dB)
Arreglo 3x1	Patch (1,1)	50.74 - j65.25	-5.40 dB	-56.42	115 MHz (6.22%)
	Patch (2,1)	51.20 - j65.24	-5.38 dB	-56.14	115 MHz (6.22%)
	Patch (3,1)	50.57 - j69.83	-4.93 dB	-54.76	106 MHz (5.73%)

Los valores que se presentan en la Tabla 3.50 muestra que con la línea de alimentación se logró una buena adaptación de la antena a la línea, pero en la parte real de la impedancia, en cuanto a la parte imaginaria o la reactancia se presentan valores altos los cuales afectarán de alguna manera a nuestra antena, en este caso los valores de ancho de banda se tomarán para valores menores a -3 dB, debido a que no se observa adaptación de impedancias.

A continuación, se presenta la Tabla 3.51 donde se presenta los parámetros simulados de cada uno de los elementos circulares con línea de alimentación del arreglo 3x1 y de todo el arreglo, adicional se presentan los lóbulos de radiación con vista frontal y posterior, posteriormente se presenta la Tabla 3.52 con los valores más importantes de cada elemento del arreglo.

Tabla 3.51 Parámetros simulados y lóbulos de radiación del arreglo 3x1 de elementos circulares con línea de alimentación.

Elemento	Parámetros y lóbulos de radiación
Patch (1,1)	



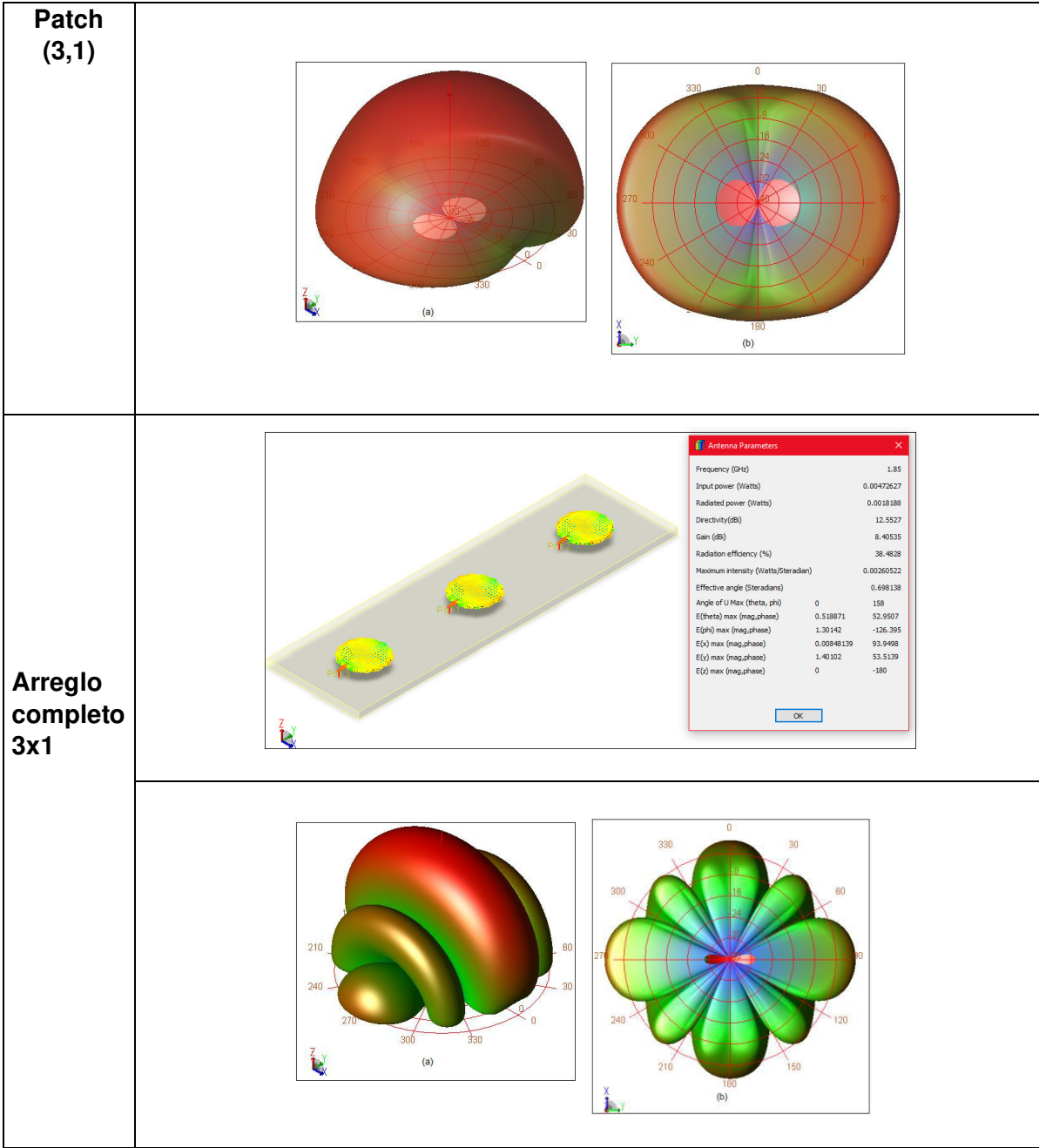


Tabla 3.51 Parámetros de los elementos circulares con línea de alimentación del arreglo 3x1.

Arreglo 3x1		Directividad	Ganancia	Eficiencia
Arreglo 3x1	Patch (1,1)	6.62 dBi	3.05 dBi	43.90 %
	Patch (2,1)	6.86 dBi	3.26 dBi	43.61 %
	Patch (3,1)	6.68 dBi	3.43 dBi	47.30 %
	Arreglo completo	12.55 dBi	8.40 dBi	38.48 %

Como se aprecia en la Tabla 3.51 los valores de directividad, ganancia y eficiencia son similares en los elementos del arreglo, los resultados serán analizados en la siguiente sección.

3.7 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ARREGLOS

En la presente sección se analizan los resultados obtenidos en las secciones 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, es decir se realiza una revisión exhaustiva de los valores obtenidos en las simulaciones para cada uno de los elementos que conforman los arreglos y los parámetros del arreglo completo, en base a los resultados se realizará una comparación y se determinarán los arreglos que presentan mejores características con respecto a cada uno de sus parámetros.

En la Tabla 3.52 se presentan los valores de los parámetros que serán analizados.

Tabla 3.52 Parámetros de los elementos del arreglo y del arreglo completo con parches rectangulares, tipo E y circular.

Arreglos		Impedancia[Ω]	[S11]	Directividad [dBi]	Ganancia [dBi]	Eficiencia [%]	VSWR	AB [MHz]
Parche rectangular		131.71+j109.54	-3.82 dB	6.38	5.08	74.13	4.61	65 MHz
Arreglo 1x3	Parche (1,1)	109.97+j112.062	-3.73 dB	6.34	5.05	74.26	4.73	67 MHz
	Parche (1,2)	110.02+j112.03	-3.73dB	6.31	5.02	74.28	4.73	67 MHz
	Parche (1,3)	110.25+j111.968	-3.74dB	6.34	5.05	74.27	4.72	67 MHz
	Arreglo total	N/A	N/A	11.27	9.72	69.93	N/A	N/A
Arreglo 3x1	Parche (3,1)	74.29+j74.05	-5.37dB	6.69	3.51	48.06	3.34	125 MHz
	Parche (3,2)	73.69+j74.36	-5.34dB	7.08	3.87	47.67	3.34	125 MHz
	Parche (3,3)	113.20+j112.07	-3.74dB	6.89	5.59	74.03	4.71	65 MHz
	Arreglo total	N/A	N/A	12.52	9.33	47.93	N/A	N/A
Parche rectangular con línea de alimentación		50.58+j0.73	-40.66 dB	6.37	3.25	48.79	1.04	25 MHz
Arreglo 1x3	Parche (1,1)	57.21-j3.30	-22.63 dB	6.47	3.36	48.86	1.16	25 MHz
	Parche (1,2)	57.20-j3.28	-22.64 dB	6.47	3.36	48.84	1.16	25 MHz
	Parche (1,3)	59.16-j4.99	-20.40 dB	6.47	3.37	48.97	1.21	26 MHz
	Arreglo total	N/A	N/A	11.25	8.10	48.41	N/A	N/A
Arreglo 3x1	Parche (3,1)	50.67+j3.24	-29.67 dB	7.17	3.77	45.69	1.07	24 MHz
	Parche (3,2)	50.06+j3.02	-30.40 dB	7.71	4.24	45.03	1.06	25 MHz
	Parche (3,3)	49.67+j1.38	-36.34 dB	7.20	4.02	48.18	1.03	25 MHz
	Arreglo total	N/A	N/A	12.57	8.71	41.19	N/A	N/A
Parche E		195.53-j8.44	-4.53 dB	6.40	4.29	61.44	3.92	69 MHz
Arreglo 1x3	Parche (1,1)	191.58-j32.1	-4.5 dB	6.92	4.78	61.15	3.95	66 MHz
	Parche (1,2)	131.1+j28.77	-6.57 dB	7.14	3.30	41.24	2.77	105 MHz
	Parche (1,3)	126.66-j36.03	-6.56 dB	6.71	2.92	41.76	2.77	107 MHz
	Arreglo total	N/A	N/A	12.56	8.56	40.13	N/A	N/A
Arreglo 3x1	Parche (3,1)	195.84-j8.15	-4.53 dB	6.38	4.36	61.50	3.92	68 MHz
	Parche (3,2)	183.62+j46.83	-4.52 dB	6.36	4.29	61.04	3.93	68 MHz
	Parche (3,3)	184.84+j44.80	-4.52 dB	6.38	4.30	62.03	3.93	67 MHz
	Arreglo total	N/A	N/A	11.27	8.99	59.11	N/A	N/A
Parche E con línea de alimentación		47.11+j7.93	13.55 dB	6.40	2.68	42.49	1.53	22 MHz
Arreglo 1x3	Parche (1,1)	47.855+j7.05	-14.02 dB	7.12	3.35	41.97	1.58	22 MHz
	Parche (1,2)	46.73 + j9.35	-13.11 dB	7.55	3.48	39.19	1.65	21 MHz
	Parche (1,3)	46.58 + j9.45	-12.96 dB	7.08	3.07	39.74	1.67	22 MHz
	Arreglo total	N/A	N/A	12.59	8.03	34.93	N/A	N/A
Arreglo 3x1	Parche (3,1)	47.80 + j7.45	-15.06 dB	6.52	2.80	42.47	1.53	22 MHz

	Parche (3,2)	48.37 + j7.84	-15.93 dB	6.58	2.86	42.53	1.48	20 MHz
	Parche (3,3)	49.95 + j6.95	-16.87 dB	6.53	2.83	42.65	1.43	22 MHz
	Arreglo total	N/A	N/A	11.26	7.51	42.22	N/A	N/A
Parche Circular		135.76 – j122.1	-3.46 dB	6.30	3.25	49.59	5.08	71 MHz
Arreglo 1x3	Parche (1,1)	136.03 - j122.05	-3.46 dB	6.31	3.27	49.59	5.08	72 MHz
	Parche (1,2)	132.33 + j121.76	-3.47 dB	6.34	3.29	49.58	5.07	72 MHz
	Parche (1,3)	132.89 - j122.28	-3.46 dB	6.31	3.27	49.60	5.08	72 MHz
	Arreglo total	N/A	N/A	11.19	8.06	48.60	N/A	N/A
Arreglo 3x1	Parche (3,1)	119.12 - j106.34	-3.95 dB	6.52	3.10	45.48	4.48	97 MHz
	Parche (3,2)	115.76 – j106.99	-3.92 dB	6.70	3.26	45.26	4.50	95 MHz
	Parche (3,3)	127.56 - j122.72	-3.45 dB	6.60	3.54	49.40	5.11	70 MHz
	Arreglo total	N/A	N/A	12.55	8.55	39.83	N/A	N/A
Parche circular con línea de alimentación		50.03 – j68.87	-5.01 dB	6.40	2.68	42.49	3.62	104 MHz
Arreglo 1x3	Parche (1,1)	50.03 - j68.77	-4.94 dB	6.29	3.06	47.56	3.61	105 MHz
	Parche (1,2)	49.41 - j68.43	-4.93 dB	6.30	3.08	47.56	3.62	104 MHz
	Parche (1,3)	48.93 – j68.04	-4.98 dB	6.29	3.06	47.56	3.62	104 MHz
	Arreglo total	N/A	N/A	11.18	7.88	46.83	N/A	N/A
Arreglo 3x1	Parche (3,1)	50.74 - j65.25Ω	-5.40 dB	6.62	3.05	43.90	3.38	115 MHz
	Parche (3,2)	51.20 – j65.24Ω	-5.38 dB	6.86	3.26	43.61	3.37	115 MHz
	Parche (3,3)	50.57 – j69.83Ω	-4.93 dB	6.68	3.43	47.30	3.66	106 MHz
	Arreglo total	N/A	N/A	12.55	8.40	38.48	N/A	N/A

Los valores que se presentan en la tabla 3.52, como impedancia, pérdidas de retorno, directividad, ganancia, eficiencia, vswr y ancho de banda, serán analizados uno a uno tomando en cuenta los valores que más sobresalen para que puedan ser analizados más a detalle en el proyecto de investigación PIS-18-06. A continuación se realiza un análisis empezando con la comparación de los parámetros de cada parche con y sin línea de alimentación y posteriormente se analizan los arreglos de elementos con diferente geometría.

- **Frecuencia de operación**

Para el proyecto al cual está relacionado el presente trabajo de titulación se requiere que la frecuencia de resonancia de las antenas se ubique en 1.85 GHz, teniendo esto en cuenta se realizó el diseño de las antenas en base a procedimientos ya establecidos, tanto para el parche rectangular como para el circular, en cuanto al parche tipo E se procedió a realizar el diseño mediante la ayuda del software ADS, la frecuencia de operación para el caso del parche rectangular resultó dentro del ancho de banda como se observa en la figura 3.5, para este caso no fue necesario realizar modificaciones notorias en las dimensiones del parche rectangular, únicamente se aproximaron las medidas obtenidas en el diseño trabajando con 2 decimales. Para el caso del parche rectangular con línea de alimentación la frecuencia de operación cambió al introducir la línea, esto se analizará en la sección de análisis de impedancia de entrada, sin embargo, se puede mencionar que se logró que el parche rectangular con línea de alimentación trabaje a la frecuencia requerida.

En cuanto al parche tipo E la frecuencia de resonancia varía acorde las dimensiones de los slots insertados para formar la figura E, en este caso se insertaron dos slots cuyas dimensiones de observan en la figura 3.21, estos slots presentan las dimensiones finales para obtener la frecuencia de resonancia deseada de 1.85 GHz. De los experimentos realizados se puede mencionar que al cambiar el ancho de las inserciones W_1 aparece una nueva frecuencia de resonancia aproximadamente a 1.1 GHz, 2.2 GHz o hasta 3 GHz y adicionalmente se perdía la frecuencia requerida de 1.85 GHz, es por eso que solo se ve cambio en el lado "ls" del parche. Las dimensiones finales se muestran en la tabla 2.3 para el parche tipo E. En cuanto al parche tipo E con línea de alimentación, la frecuencia de resonancia cambió al introducir dicha línea, esto se analizará más adelante, sin embargo, se logró que la antena trabaje a la frecuencia deseada.

Para el parche circular la frecuencia de resonancia que se obtuvo con el diseño teórico inicial fue de 1.927 GHz, con ayuda del software se procedió a cambiar el radio del parche circular para obtener la frecuencia deseada, como se esperaba, al aumentar el valor del

radio se observó que la frecuencia bajaba su valor acercándose así a 1.85 GHz, este valor que se aumentó fue muy pequeño cambiando el radio de $r=22.136$ mm a $r=22.975$ mm. En cuanto al parche circular con línea de alimentación, la frecuencia de resonancia se vio afectada al introducir dicha línea, esto se analizará más adelante, sin embargo, se logró que la antena trabaje a la frecuencia deseada modificando las dimensiones de la línea de alimentación.

Se observó que al colocar los elementos individuales como un arreglo 1x3 y 3x1 con cada uno de las geometrías estudiadas no se presentaron cambios en la frecuencia de resonancia, es por esto que en la tabla 3.52 se presentan los parámetros cuya frecuencia queda entendida que es la de 1.85 GHz.

- **Pérdidas por retorno**

Otro parámetro que se analizará son las pérdidas por retorno, como se estudió en el capítulo 1, los parámetros S_{ij} , donde $i = j$, describen la cantidad de señal que se refleja en el puerto cuando se genera una onda incidente en dicho puerto, en este caso este valor también nos indica el desacoplamiento entre la impedancia de la carga y la impedancia de la línea [24].

En base a esto, al analizar la figura 3.5 se tiene un valor de pérdidas por retorno de -3.821 dB a una frecuencia de 1.85 GHz, esto indica que al alimentar el parche rectangular directamente en los bordes de la antena no se tiene una buena adaptación de impedancia, es decir se pierde potencia, y por tanto se presentan valores altos de v_{swr} . Para el caso del parche rectangular con línea de alimentación se observa, en la figura 3.14, que se tiene el valor de -40.66 dB a una frecuencia de 1.85 GHz, esto indica que existe una buena adaptación de impedancia la cual también hace cambiar el valor de v_{swr} a un nivel más bajo en relación con el parche sin línea de alimentación. Los valores también se los puede observar en la tabla 3.52.

En la figura 3.22 se observa que el valor de pérdidas por retorno para el parche tipo E es -4.53 dB a la frecuencia de 1.85 GHz, este valor muestra que no existe una buena adaptación entre el puerto de entrada y la impedancia de la antena, por lo tanto existirá pérdidas de potencia, para el parche tipo E con línea de alimentación se observa en la figura 3.31, el valor de pérdidas por retorno de -13.55 dB, esto indica que con la línea de alimentación existe un mejor acoplamiento y menores pérdidas de potencia, esto se ve reflejado consecuentemente en los parámetros como impedancia y v_{swr} .

Para el análisis de la antena circular en este aspecto se presenta la figura 3.39 que muestra un valor de -3.46 dB a una frecuencia de 1.85 GHz, este valor es muy alto e indica que no existe un acoplamiento adecuado entre el puerto de alimentación y la impedancia de la antena, por lo que existirán pérdidas de potencia. En cuanto al parche circular con línea de alimentación, la figura 3.45 muestra un valor de pérdidas por retorno de -5.01 dB, este valor disminuye debido a la línea de alimentación; sin embargo, el cambio no es muy notorio, únicamente disminuyó su valor en aproximadamente 2 dBs, lo cual se evidencia en el valor de impedancia obtenido.

Se debe mencionar que un factor importante que influye en las pérdidas por retorno es la ubicación del punto de alimentación de las antenas, en el caso del parche rectangular el punto de alimentación se lo ubicó en el lado W obteniendo los valores ya mencionados de pérdidas por retorno. En cuanto al parche rectangular con línea de alimentación el punto se ubicó al borde de la línea de alimentación, en donde las pérdidas por retorno cambiaron. Para el parche tipo E con y sin línea de alimentación el punto de alimentación se lo ubicó en uno de los bordes hasta lograr tener los valores de pérdidas por retorno que ya se indicaron. En cuanto al parche circular el punto de alimentación se colocó en la periferia del mismo, de igual manera que en los anteriores parches las pérdidas por retorno varían dependiendo de la ubicación en el punto de alimentación; se decidió no ubicar el punto de alimentación dentro del parche circular debido a que se dificultaría realizar la construcción de la antena.

En la tabla 3.52 se presentan los valores de las pérdidas por retorno de los elementos que conforman los distintos arreglos. Como primer punto se analizan los valores del arreglo 1×3 y 3×1 con elementos rectangulares. Se observa un punto importante: los valores de las pérdidas por retorno en los elementos del arreglo 1×3 no presentan un cambio notorio. En el arreglo 3×1 se observa que existe una disminución de pérdidas por retorno en las antenas 1 y 2, llegando a tener valores de -5.37 dB y -5.34 dB, lo cual se da por efecto de acoplamiento entre elementos este fenómeno será discutido posteriormente; en cambio la antena 3 del arreglo mantiene un valor similar al del parche base del arreglo.

Los valores de pérdidas por retorno obtenidos en los arreglos 1×3 y 3×1 de parches rectangulares se encuentran en el rango de -3 dBs hasta los -5 dBs, estos valores indican que no se tiene buena adaptación entre el punto de alimentación y la impedancia de la antena, por esto se procedió a diseñar una línea de alimentación para mejorar los valores de pérdidas por retorno. Lo mencionado se realizó con las 3 geometrías estudiadas en este proyecto.

Al analizar el funcionamiento de los arreglos 1x3 y 3x1 de elementos rectangulares con línea de alimentación se observa que los valores de pérdidas por retorno presentan un mejor valor con respecto al parche sin línea de alimentación, obteniendo así valores menores a -20 dBs en ambos arreglos.

En la tabla 3.52 también se presentan las pérdidas por retorno de cada elemento en forma de E cuando forman parte del arreglo, para el arreglo 1x3 se evidencia que en los elementos 2 y 3 se tiene un valor de -6.56 dBs y -6.57 dBs, valores que se dan debido al acoplamiento de los elementos del arreglo, por su parte para el arreglo 3x1 se evidencia que no existe un cambio notorio con respecto al elemento único en forma de E.

En cambio, para los elementos tipo E del arreglo 1x3 y 3x1 con línea de alimentación se constata que existe una variación de las pérdidas por retorno de -4 dBs con respecto al elemento único tipo E con línea de alimentación, valores que van aproximadamente desde -13 dBs hasta los -17 dBs en los elementos de los arreglos, estos valores se pueden constatar en la tabla 3.52.

Finalmente, los valores de pérdidas por retorno de los elementos circulares que forman parte del arreglo 1x3 y 3x1 evidentemente son similares, estos se encuentran entre los valores de -3.46 dBs hasta los -3.95 dBs. Para los elementos circulares con líneas de alimentación que forman los arreglos 1x3 y 3x1 se constata que las pérdidas por retorno se encuentran en el rango de -4.93 dBs hasta los -5.40 dBs, con esto se observa que la línea de alimentación diseñada en este caso, no ayuda a lograr una buena adaptación como en los casos del parche rectangular y parche tipo E.

Considerando los resultados de la tabla 3.52 en lo que respecta a pérdidas por retorno se constata que los arreglos con elementos rectangulares y tipo E con línea de alimentación presentan mejores valores de pérdidas por retorno debido a que no muestran variaciones significativas entre el único elemento y cada elemento dentro del arreglo, además presentan valores S11 aceptables. Para el arreglo circular los valores de pérdidas por retorno son deficientes con y sin línea de alimentación.

- **Impedancia de entrada**

Otro parámetro de gran importancia para analizar es la impedancia de las antenas, uno de los requerimientos de las antenas es obtener una buena adaptación de impedancia entre la impedancia de la antena y la impedancia de la línea de alimentación. En la figura 3.5 se muestra una carta de Smith, donde se observa el valor de impedancia del parche rectangular, este es de $131.71 + j109.54 \Omega$ valor que no se acerca a la impedancia

característica de 50Ω que sería lo ideal, razón por la cual se procedió a diseñar una línea de alimentación la cual permitirá tener un acoplamiento adecuado de impedancias, en la figura 3.12 se muestra el valor de $156 + j86.51 \Omega$ de impedancia del parche con línea de alimentación, este valor no muestra un cambio notorio; por lo que con la modificación de las dimensiones de la línea con ayuda del software ADS se llegó a obtener un valor de impedancia de $50.58 + j0.73 \Omega$, este valor se lo puede constatar en la figura 3.14. Las modificaciones en la línea de alimentación provocaron una reducción de 23.99 mm a 11.5 mm del largo y un aumento del ancho de 0.154 mm a 0.6 mm, esto se puede observar en la figura 3.13, llegando a tener de esta manera un buen acoplamiento de impedancia del parche rectangular con línea de alimentación.

Para el caso del elemento E en la figura 3.22 se muestra una carta de Smith, la cual muestra el valor de $195.53 - j8.44 \Omega$, valor nada cercano a los 50Ω requeridos, por esta razón se procedió a diseñar una línea de alimentación para poder adaptar las impedancias, en la figura 3.29 se observa el valor de $175.65 + j210.57 \Omega$ impedancia obtenida de la antena tipo E con línea de alimentación, al no obtener una mejoría en el valor de la impedancia se procedió a cambiar las dimensiones de la línea del valor de $L=23.81$ mm a un valor de 8.10 mm, y el valor de $W=0.379$ mm a un valor de 0.253 mm, estos valores se los puede observar en la tabla 3.32. Los resultados al realizar estos cambios de las dimensiones de la línea se pueden constatar en la figura 3.31, donde se muestra un valor de impedancia de $47.11 + j7.93 \Omega$, valor muy cercano a la impedancia de 50Ω , lo cual indica que se logró adaptar de mejor manera las impedancias en comparación con la antena sin línea de alimentación.

En la figura 3.39 se muestra el valor de impedancia del parche circular en una carta de Smith con un valor de $135.76 - j122.1 \Omega$, valor lejano a la impedancia de 50Ω requerido, como en los casos anteriores se procedió a realizar el diseño de una línea de alimentación para adaptar impedancias, la figura 3.43 muestra el valor de $52.62 + j78.153 \Omega$, este valor se obtiene con el diseño de la línea de alimentación, se debe mencionar que al analizar además la frecuencia de operación, se observa un cambio a un valor de 1.821 GHz, por lo que se procedió a realizar variaciones en las dimensiones de la línea, el cambio se lo puede constatar en la tabla 3.46, en donde se puede observar que se cambió el valor de $L=23.31$ mm diseñado a un valor de $L=6.5$ mm, y el valor de $W=0.678$ mm a un valor de $W= 1.1$ mm, con estos cambios en la figura 3.45 se obtiene un valor de impedancia de $50.03 - j68.87 \Omega$, el valor obtenido muestra un valor alto en la parte imaginaria, en cuanto a la parte real no se observa problemas, debido a esto se observa que no existe la adaptación

esperada y se lo puede constatar al observar el valor de las pérdidas por retorno en la figura 3.45 con un valor de -5.01 dBs.

Los valores obtenidos de impedancia para los elementos de las diferentes geometrías cuando forman parte de los arreglos presentan algunas variaciones en sus valores, algunas significativas y otras con variaciones muy bajas. En la tabla 3.52 se observa que para los elementos del arreglo 1x3 con parche rectangular existe una variación de hasta 22 Ω con respecto al elemento único, en cuanto al arreglo 3x1 con parche rectangular se observa una disminución de aproximadamente 58 Ω en los elementos 1 y 2 del arreglo, el elemento 3 presenta una disminución de hasta 18 Ω , esto se debe al acoplamiento entre las antenas en el arreglo; se puede indicar que el valor de la impedancia depende de la posición de las antenas; este aspecto se lo analizará con más detalle en el análisis de acoplamiento.

Los valores de impedancia de los elementos que conforman los arreglos 1x3 y 3x1 con parches rectangulares y línea de alimentación (tabla 3.52) se encuentran en un rango de 49 Ω a 59 Ω . En el arreglo 1x3 se presenta los valores más altos de impedancia que van de 57 Ω a 59 Ω y en cambio en el arreglo 3x1 se observa los valores más cercanos al valor del elemento único, cuyos valores van de 49 Ω a 50 Ω . El aumento de impedancia en el arreglo 1x3 creemos que se debe al acoplamiento mutuo entre elementos del arreglo, lo cual se analizará más adelante.

En cuanto a los valores de impedancia de los elementos del tipo E que conforman los arreglos 1x3 y 3x1 se presentan valores que van desde 126 Ω a 195 Ω , en el arreglo 1x3 se observa en la tabla 3.52 que los valores disminuyen hasta 69 Ω con respecto al elemento único, en donde el elemento 3 del arreglo presenta el menor valor de impedancia. Para el arreglo 3x1 se observa una disminución de hasta 11 Ω y cuyo segundo elemento del arreglo presenta el menor valor con respecto al elemento único.

Al colocar el parche tipo E con una línea de alimentación se observa que los elementos que conforman los arreglos 1x3 y 3x1 toman valores de impedancia que van desde 46 Ω a 49 Ω . En la tabla 3.52 se observa que para los elementos del arreglo 1x3 existe una variación de impedancia insignificante con respecto al elemento único, estos valores disminuyen únicamente hasta 2 Ω . Para los elementos del arreglo 3x1 los valores por el contrario aumentan en 2 Ω .

En la tabla 3.52 se observa que los valores de impedancia de los elementos circulares que conforman el arreglo 1x3 y 3x1 se encuentran en el rango de 115 Ω a 136 Ω . En el caso del arreglo 1x3 se observa que los valores varían hasta 3 Ω , para el arreglo 3x1 se observa

que los valores disminuyen hasta 20Ω , teniendo el valor más bajo en el elemento 2 del arreglo, esto con respecto al elemento único.

Al colocar la línea de alimentación en los elementos circulares que conforman el arreglo 1x3 y 3x1 se observa, en la tabla 3.52, que los valores no presentan un cambio notorio con respecto al elemento único, en el arreglo 1x3 los valores disminuyen hasta 2Ω , y en el arreglo 3x1 los valores de impedancia aumentan únicamente en 1Ω . Se evidencia que la parte imaginaria permanece en un valor alto, afectando así los valores de pérdidas por retorno y VSWR de los elementos de los arreglos.

Comparando los arreglos con las 3 diferentes geometrías, se evidencia en la tabla 3.52 que el arreglo de elementos rectangulares con línea de alimentación presenta mejores valores de impedancia, el arreglo con elementos tipo E con línea de alimentación se ubica en segundo lugar debido a que presenta valores cercanos a 50Ω , y en tercer lugar se ubica el arreglo con elementos circulares con línea de alimentación debido a que no se tiene una adaptación completa en la reactancia, lo cual afecta otros parámetros como las pérdidas por retorno.

- **VSWR**

En la tabla 3.52 se presenta el parámetro de VSWR estudiado en el capítulo 1 para todos los elementos que conforman los arreglos con las diferentes geometrías, cuyo valor se relaciona con el coeficiente de reflexión, pérdidas por retorno y adaptación de impedancias.

El valor óptimo de VSWR no es un valor único, pues depende de las aplicaciones específicas, para casos de sistemas de transmisión es necesario que no supere el valor de 2 y sea igual o mayor a 1, pero habría casos en donde se podría tolerar valores mayores a 2 [13].

Para obtener los valores de VSWR en el software ADS fue necesario definir una ecuación debido a que el software no cuenta con la herramienta de simulación directa para obtener el parámetro, este proceso se muestra en el Anexo C.

En la tabla 3.52 para el elemento único rectangular se observa el valor de VSWR de 4.61, valor que concuerda con las altas pérdidas por retorno y alta impedancia, es decir que existen altas pérdidas de potencia por reflexión.

Para los elementos rectangulares que conforman los arreglos 1x3 y 3x1 se observan que los valores de VSWR toman el rango entre 3.34 a 4.73. En el arreglo 1x3 se observa un aumento hasta 0.12, en cuanto al arreglo 3x1 se observa que los elementos 1 y 2 del

arreglo disminuyen el valor de VSWR hasta 1.27 y el elemento 3 del arreglo aumenta 0.13 con respecto al elemento único.

En la tabla 3.52 para el elemento rectangular con línea de alimentación se observa que el valor de VSWR disminuye a 1.04, valor muy aceptable, esto tiene concordancia con los valores obtenidos en las pérdidas por retorno y la impedancia que se encuentra adaptada. En el arreglo 1x3 de elementos rectangulares con línea de alimentación se evidencia que los valores de VSWR aumentan hasta un valor de 1.21 en el elemento 3, que de igual manera son valores aceptables. Para los elementos rectangulares con línea de alimentación del arreglo 3x1 se constata que existe una mínima variación de VSWR en sus elementos, llegando a tener variaciones muy bajas de hasta 0.2 con respecto al elemento único.

En cuanto al elemento único tipo E se tiene un valor de VSWR de 3.92, valor que muestra alta potencia reflejada en el elemento. Para los elementos del arreglo 1x3 se evidencia que los valores de los elementos 2 y 3 decaen a 2.77 para ambos casos y el elemento 1 permanece a un nivel cercano al elemento único. Para el arreglo 3x1 se evidencia que los valores no cambian en relación al elemento único.

Al aumentar una línea de alimentación al parche tipo E se constata que el valor de VSWR disminuye a 1.53, debido a que la línea de alimentación permitió mejorar el nivel con respecto al elemento único tipo E sin línea de alimentación. Los elementos tipo E con línea de alimentación del arreglo 1x3 presentan valores superiores de hasta 1.67 y en el arreglo 3x1 se tienen valores que disminuyen hasta un valor de 1.43 con respecto al elemento único tipo E con línea de alimentación.

Por otro lado, para el elemento circular se observa un valor de VSWR de 5.08, valor que no es adecuado para sistemas de transmisión, los valores de los elementos del arreglo 1x3 permanecen iguales y en el arreglo 3x1 se constata una disminución en los elementos 1 y 2 llegando al valor de 4.48, mientras que en el elemento 3 aumenta hasta el valor de 5.11.

Evidentemente con ayuda de una línea de alimentación el elemento circular tuvo una mejora en el valor de VSWR, llegando al valor de 3.62, valor que de todas formas no es adecuado en comparación con las otras antenas. En el arreglo 1x3 de elementos circulares con línea de alimentación se evidencia que los valores no cambian en lo absoluto, en cuanto al arreglo 3x1 se observa que los valores decaen hasta un valor de 3.38 en el primer elemento del arreglo.

Se concluye que el arreglo rectangular con línea de alimentación presenta mejores valores de VSWR en la mayoría de sus elementos, ya que sus valores no sobrepasan el valor de 1.21, los elementos tipo E con línea de alimentación presentan un valor más elevado de hasta 1.67 y los elementos circulares con línea de alimentación evidencian valores altos de hasta 3.66, valores que se puede decir son los menos aceptables de las 3 geometrías. Los elementos rectangulares, tipo E y circulares sin línea de alimentación presentaron valores muy altos de VSWR logrando valores de aproximadamente 4 para los elementos rectangulares, 3 para los elementos tipo E y 5 para los elementos circulares.

- **Ancho de banda**

El ancho de banda es un parámetro que pudo ser medido con ayuda de las simulaciones de pérdidas por retorno en cada elemento, como se indica en [20], para medir el ancho de banda se debe cortar los puntos de onda de los parámetros S en un valor de aproximadamente de -10 dBs, para el presente proyecto al tener antenas con impedancias adaptadas y no adaptadas, se tomó la decisión de realizar la medición del ancho de banda a valores de -10 dBs y a -3 dBs, dependiendo de los niveles de los parámetros S obtenidos en la simulación. Lo mencionado va en concordancia con el tipo de antenas, ya que las que tienen línea de alimentación presentan pérdidas por retorno por debajo de los -10 dBs, mientras que para los elementos sin línea de alimentación presentan valores por debajo de los -3 dBs.

En base a este criterio se observa en la Figura 3.52 para el elemento rectangular que las frecuencias en los puntos de corte a -3 dBs son 1.895 GHz y 1.830 GHz, logrando un ancho de banda de 65 MHz.

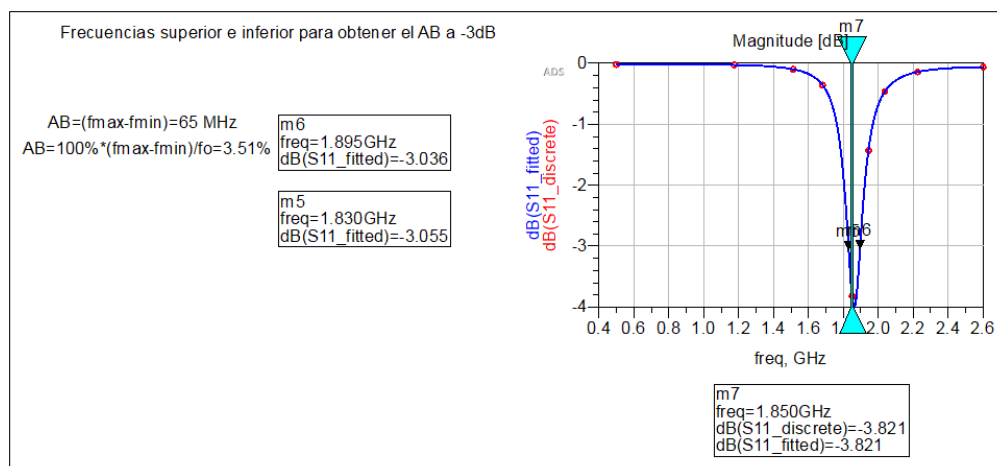


Figura 3.52. Ancho de banda a -3 dBs del parche rectangular.

Para los valores de ancho de banda de los elementos rectangulares que conforman los arreglos 1x3 y 3x1, se observan que varían su valor en solamente 1 MHz, sin embargo, en el arreglo 3x1 se evidencia que en los elementos 1 y 2 existe un aumento de ancho de banda llegando a un valor de 125 MHz, es decir casi el doble, este valor se relaciona con los valores obtenidos en el análisis de impedancia y de pérdidas por retorno que mostraron mejores valores en relación con el elemento único.

En la figura 3.14 para el caso del parche rectangular con línea de alimentación se observa un valor de 25MHz, con valores de frecuencia a -10 dBs de 1.862 GHz y 1.837GHz, para este caso se observa una disminución del ancho de banda a la mitad en comparación con el elemento rectangular sin línea de alimentación, también se observa que, al tener valores más bajos de pérdidas por retorno, la curva se hace más angosta lo cual evidencia el valor obtenido en el ancho de banda. En cuanto a los valores de los elementos que conforman los arreglos 1x3 y 3x1 se evidencia una variación de 1MHz que no es cambio significativo con respecto al elemento único.

Los valores de ancho de banda para todos los elementos rectangulares, tipo E y circulares se los determinó mediante la figura 3.52, este proceso se lo muestra en el Anexo D, ya que son datos muy extensos. Sin embargo, en la tabla 3.52 se tienen los valores de todos los elementos con las diferentes geometrías para su análisis.

El parche tipo E presenta un ancho de banda de 69 MHz que en comparación con el parche rectangular aumentó únicamente en 4 MHz, como se explica en [25], [26], [27], el parche tipo E muestra un aumento de ancho de banda dependiendo de las dimensiones de los slots, en este caso el aumento fue en un valor bajo que no afectará nuestro análisis debido a que se necesita que trabaje a una frecuencia específica de 1.85 GHz.

Al conformar los elementos tipo E en el arreglo 1x3, en la tabla 3.52 se observa que existe un aumento en el ancho de banda de los elementos 2 y 3 que llegan a valores de 105 MHz y 107 MHz, se debe mencionar que estos valores fueron obtenidos en los puntos de -3 dBs, debido al desacoplamiento. Para el arreglo 3x1 se observa que los anchos de banda de los elementos que conforman al arreglo no cambian en más de 2 MHz con respecto al único elemento.

Al colocar una línea de alimentación en el elemento tipo E se observa en la figura 3.31 que los puntos a -10 dBs se encuentran a las frecuencias de 1.854 GHz y 1.832 GHz logrando un ancho de banda de 22 MHz, se constata que con inserción de la línea de alimentación en el parche E, el ancho de banda disminuyó en más de la mitad en relación con el parche E sin línea. Los elementos de los arreglos 1x3 y 3x1 permanecen con el mismo valor de

ancho de banda, y se observa que, en los elementos ubicados en la mitad, es decir en la posición 2 del arreglo, disminuyen su valor de ancho de banda en únicamente 1 MHz.

Para el elemento circular se observa un valor de ancho de banda de 71 MHz tomando en cuenta el valor de -3 dBs como referencia para obtener el ancho de banda, teniendo en tal valor las frecuencias de 1.895 GHz y 1.824 GHz. Se observa además que en el arreglo 1x3 el valor de ancho de banda se mantiene en 72 MHz y en cuanto al arreglo 3x1 se logra un aumento de 26 MHz de ancho de banda en los elementos 1 y 2, mientras que en el elemento 3 del arreglo se mantiene su característica como en el elemento único. Se cree que esto es ocasionado por el acoplamiento entre antenas y por el tipo de arreglo.

En cuanto al parche circular con línea de alimentación se observa en la tabla 3.52 y en el Anexo D que se tiene un ancho de banda de 104 MHz con puntos a -3 dBs desde 1.925 GHz a 1.821 GHz, valor mayor que en comparación con los elementos rectangulares y tipo E.

En los elementos circulares que conforman los arreglos 1x3 se observa que el valor de ancho de banda se mantiene; y en cambio para el arreglo 3x1 se evidencia un pequeño aumento del valor llegando hasta 115 MHz en los elementos 1 y 2 del arreglo, y manteniéndose el elemento 3 en un valor de 106 MHz, similar al elemento circular único

Además, se muestra que con la línea de alimentación el valor de ancho de banda en los elementos circulares aumenta, caso que no ocurrió con los elementos de los arreglos rectangulares y tipo E, es decir que para la geometría rectangular y tipo E al colocar la línea de alimentación los valores de ancho de banda disminuyeron.

Con este análisis se concluye que, en cuanto al ancho de banda, el arreglo con elementos circulares presenta mayores valores que las demás geometrías estudiadas.

- **Ganancia**

En los estudios como en [16] se afirma que un elemento tipo parche puede lograr ganancias de entre 3 a 7 dBi con un único elemento; valor que se confirma al observar la figura 3.6 para el elemento rectangular con un valor de ganancia de 5.08 dBi.

Al colocar los elementos rectangulares en el arreglo 1x3 se evidencia que los valores de ganancia varían únicamente por décimas. Se debe recalcar que es posible obtener el valor de ganancia, directividad y eficiencia de todo el arreglo.

Por lo mencionado en el párrafo anterior, en la tabla 3.2 se presenta la ganancia de todo el arreglo rectangular 1x3 con un valor de 9.72 dBi, valor que se lo obtiene con ayuda del

software ADS, en donde se debe realizar la configuración de puertos de los elementos que conforman el arreglo, este proceso se lo realizó para todas las geometrías y el proceso se lo describe en el Anexo D.

Para los elementos rectangulares que conforman el arreglo 3x1 se observa que la ganancia disminuye en aproximadamente 1.5 dBi en los elementos 1 y 2 y existe un pequeño aumento en el elemento de borde del arreglo llegando a un valor de 5.59 dBi, además, el valor de ganancia de todo el arreglo presenta un valor de 9.33 dBi, que en comparación con el arreglo 1x3 disminuye en aproximadamente 0.4 dBi. Esta disminución de ganancia en el arreglo puede ser explicada por la influencia positiva o negativa de las antenas vecinas y por el tipo de arreglo.

Al colocar una línea de alimentación al elemento rectangular se observa en la figura 3.15 que el valor de ganancia disminuye a un valor de 3.25 dBi, además al colocar los elementos en el arreglo 1x3, en tabla 3.8, se observa que los valores de ganancia se encuentran entre 3.36 dBi y 3.37 dBi y que el valor de ganancia para todo el arreglo es de 8.10 dBi, de lo anterior se puede evidenciar que el valor de ganancia aumenta al colocar los elementos en un arreglo. En la tabla 3.12 se constata que los elementos rectangulares con línea de alimentación que conforman el arreglo 3x1 presentan un aumento de ganancia con respecto al elemento único que van de 3.77 dBi hasta 4.24 dBi, el aumento de ganancia se da en los elementos de la posición 2 y 3.

En la figura 3.23 se presenta el valor de ganancia del elemento tipo E de 4.29 dBi, sin embargo, se observa que el valor de ganancia disminuye en comparación con el elemento rectangular. Al observar la tabla 3.34 se evidencia que los elementos que conforman el arreglo 1x3 presentan valores de ganancia bajos y altos, por ejemplo, en el elemento 3 del arreglo se tiene un valor bajo de ganancia que llega a 2.92 dBi, mientras que en el elemento 1 del arreglo se tiene el valor de 4.78 dBi que es mayor en comparación con el elemento único, el elemento ubicado en la mitad de las antenas presenta un valor de 3.30 dBi. Al analizar el valor de ganancia de todo el arreglo se observa un gran aumento, logrando un valor de ganancia de 8.56 dBi.

Los elementos del arreglo 3x1 presentan valores de ganancia similares al elemento único, cuyo rango va de 4.29 dBi a 4.36 dBi con un valor de ganancia de todo el arreglo de 8.99 dBi, que en comparación con el arreglo 1x3 presenta un mayor valor.

Como se observa en la figura 3.32, al aumentar la línea de alimentación al elemento tipo E se constata que el valor de ganancia se reduce a 2.68 dBi, como ocurrió con el elemento rectangular, además para los elementos del arreglo 1x3 se observa en la tabla 3.34 que

los valores aumentan en relación al elemento único, llegando a valores en un rango de 3.07 dBi a 3.48 dBi, también se observa que el valor de ganancia de todo el arreglo es de 8.03 dBi.

En cuanto a los elementos tipo E con línea de alimentación que conforman el arreglo 3x1 se observa en la tabla 3.37 que los valores de ganancia se encuentran en el rango de 2.80 dBi a 2.86 dBi, lo cual muestra que este tipo de arreglo con la geometría tipo E degrada la ganancia de cada elemento que lo conforma, por lo que es evidente que el valor de ganancia del arreglo completo no tendrá un gran aumento, siendo este valor de 7.51 dBi, que en comparación con los demás arreglos es el valor más bajo de ganancia obtenido.

De la figura 3.40 se observa que el elemento circular presenta un valor de ganancia de 3.25 dBi, cuyo valor se ubica en tercer lugar después del parche rectangular y el tipo E. En la tabla 3.40 se muestran las ganancias de los elementos circulares que conforman el arreglo 1x3 y en la tabla 3.44 se evidencian los valores de ganancias del arreglo 3x1. Al analizar estos valores se observa que en ambos arreglos los valores no presentan un cambio notorio, estos valores de ganancias se encuentran en el rango de 3.10 dBi a 3.54 dBi, teniendo en el elemento 3 del arreglo 3x1 la mayor ganancia (3.54 dBi). Además, el valor de ganancia de todo el arreglo 1x3 es de 8.06 dBi y el valor de todo el arreglo 3x1 es de 8.55 dBi. Estos valores se los puede revisar en la tabla 3.40 y la tabla 3.44.

Como en los anteriores casos se procedió a colocar una línea de alimentación al parche circular, en la figura 3.46 se observa un valor de ganancia de 2.68 dBi, como sucedió con el parche rectangular y tipo E, el valor de ganancia disminuyó, en este caso a un valor semejante al elemento tipo E.

En la tabla 3.48 se muestran los valores de ganancia de los elementos circulares con línea de alimentación que conforman el arreglo 1x3, estos valores presentan un pequeño aumento de ganancia que van en un rango de 3.06 dBi a 3.08 dBi, pero al observar el valor de ganancia del arreglo completo se tiene un valor de 7.88 dBi, que constituye el segundo valor más bajo de ganancia para los arreglos con y sin línea de alimentación seguido del arreglo 3x1 tipo E con línea de alimentación. En cuanto al arreglo 3x1 se evidencia en la figura 3.51 que los valores se encuentran en el rango de 3.05 dBi hasta 3.43 dBi, logrando de esta manera un valor de ganancia de 8.40 dBi de todo el arreglo 3x1.

Los valores mencionados en los párrafos anteriores se los muestran en la tabla 3.52, en donde se concluye que el parche rectangular presenta los mayores valores de ganancia en comparación con el elemento tipo E y el elemento circular, el elemento tipo E se ubica en segundo lugar para dejar al elemento circular con el valor más bajo de ganancia de las 3

geometrías. Se evidenció que, al colocar la línea de alimentación a los elementos rectangular, tipo E y circular los valores de ganancia disminuyen. Siendo el valor más bajo de ganancia el del arreglo tipo E con línea de alimentación.

- **Directividad y eficiencia**

Como se definió en el capítulo 1, la directividad se diferencia de la ganancia, debido a que se establece en relación a la potencia radiada de la antena o en relación a la potencia que se entrega a la antena, por lo que esta diferencia de potencias es la potencia que se pierde mediante calor. Tanto la directividad como la ganancia se relacionan mediante la eficiencia, esto se lo puede observar en la ecuación 1.14, donde se concluye que la eficiencia relaciona la potencia radiada y la potencia entregada a la antena.

En la tabla 3.52 se observan los valores de directividad y eficiencia de los elementos rectangulares, se tiene un valor de directividad de 6.38 dBi en el elemento rectangular único con una eficiencia de 74.13 %, esto se traduce que del total de potencia recibida en la antena emite solo el 74.13 %, el resto de potencia se pierden en pérdidas por calor. Para los elementos que conforman el arreglo 1x3 se observa que los valores de directividad se encuentran en un rango de entre 6.31 dBi hasta 7.08 dBi, además al obtener el valor de directividad del arreglo completo se observa que para el arreglo 1x3 se tiene un valor de 11.27 dBi, mientras que para el arreglo 3x1 presenta un valor de 12.52 dBi.

Al aumentar una línea de alimentación al parche rectangular se muestra un valor de directividad de 6.37 dBi con una eficiencia de 48.79 %, en este caso se muestra que más de la mitad de la potencia que recibe la antena se pierde, en cuanto a los elementos que conforman los arreglos 1x3 y 3x1 se observa que los valores de directividad se encuentran en el rango de 6.47 dBi hasta 7.71 dBi, se observa que en el arreglo 3x1 los valores de directividad aumentaron en los 3 elementos a un valor de hasta 7.71 dBi, al analizar la directividad total de cada arreglo se tienen valores de 11.25 dBi para el arreglo 1x3 y el valor de 12.57 dBi para el arreglo 3x1. Se evidencia en este caso que el menor valor de eficiencia se da en el arreglo 3x1. Los valores de eficiencia de los elementos se los puede observar en la tabla 3.52, los cuales no sobrepasan el 50 % de eficiencia.

Al analizar los resultados obtenidos del elemento tipo E en la tabla 3.52 se observa un valor de directividad de 6.40 dBi y con una eficiencia de 61.44 %, estos valores en comparación al elemento rectangular muestran un aumento de 0.2 dBi en directividad y una disminución de aproximadamente 12.7 % de eficiencia. Un detalle que es importante observar es el valor de directividad y de eficiencia total del arreglo, para el caso del arreglo 1x3 se observa que el valor de directividad presenta un valor de 12.56 dBi con una eficiencia de 40.13 %,

como se analizó en el párrafo anterior se nota que, al aumentar el valor de directividad total del arreglo, la eficiencia del arreglo disminuye considerablemente en este caso en un 21.33 % con respecto al elemento tipo E único. El mismo caso ocurre en el arreglo 3x1 donde se tiene un valor de directividad total de 11.27 dBi y una eficiencia de 59.11 %.

Al colocar una línea de alimentación al elemento tipo E se tiene un valor de directividad de 6.40 dBi con una eficiencia de 42.49 %, se nota que el valor de directividad se mantiene en un valor similar al elemento rectangular y al elemento tipo E, pero en este caso el valor de la eficiencia disminuye a menos del 50 %. Como sucedió en los casos anteriores, al aumentar la directividad se tiene como resultado una disminución de eficiencia, para el arreglo 1x3 se evidencia que el valor de directividad del todo el arreglo es de 12.59 dBi con una eficiencia de 34.93 %. Al juntar los elementos en un arreglo 3x1 se observa que el valor de directividad total presenta un valor de 11.26 dBi con una eficiencia de 42.22 %; en este caso se evidencia que no ocurre el mismo efecto que con los demás arreglos en donde al aumentar la directividad la eficiencia disminuía notoriamente, para este arreglo la eficiencia se mantiene casi igual a la obtenida por el elemento único.

El elemento circular presenta un valor de 6.30 dBi con una eficiencia de 49.59 %, al colocar los elementos en un arreglo 1x3 se observa que los valores de eficiencia permanecen en un rango de 48.60% y 49.59 % incluido el valor de eficiencia total del arreglo, en el caso de la directividad se observan valores similares al elemento único y evidentemente un aumento de la directividad total de todo el arreglo 1x3 llegando a un valor de 11.19 dBi, nuevamente se evidencia que el valor de eficiencia no disminuye como ocurrió en los casos anteriores al aumentar la directividad. En el arreglo 3x1 se tiene un valor de directividad total de 12.55 dBi con una eficiencia de 39.83 %, en este caso, al aumentar la directividad resultó en una disminución de la eficiencia.

Como en los casos anteriores al aumentar una línea de alimentación al elemento circular se tiene un valor de directividad de 6.40 dBi con una eficiencia de 42.49 %, al colocar los elementos en un arreglo 1x3 se observa un pequeño aumento de eficiencia en cada uno de los elementos del arreglo llegando a un valor de 47.56 %, además se evidencia que el valor de directividad de todo el arreglo es de 11.18 dBi y la eficiencia en este caso llega a un valor de 46.83 %; es decir, aumentó en un 4.3 % aproximadamente con respecto al elemento único.

Al colocar los elementos en un arreglo 3x1 se observa un comportamiento similar a algunos de los casos anteriores, es decir, al aumentar la directividad total del arreglo se presenta

una disminución de la eficiencia, por lo que se tienen valores de 12.55 dBi en directividad y un valor de 38.48 % de eficiencia total del arreglo 3x1.

Considerando todo lo expuesto, se concluye que el parámetro de directividad permanece en un rango de 6.30 dBi a 6.40 dBi en los elementos con las diferentes geometrías, lo que no constituye una variación significativa, sin olvidar que al conformar los arreglos evidentemente este valor aumentará, por lo que el parámetro de la eficiencia tendrá un valor importante para decidir el mejor elemento en cuestión de directividad y eficiencia.

El valor de eficiencia más alto se lo obtiene con el parche rectangular, seguido del parche tipo E. En cambio, cuando se coloca una línea de alimentación, los valores decaen considerablemente en ambas geometrías, situación que con el elemento circular no es tan notorio. Por lo que en términos de directividad y eficiencia se coloca en primer lugar al parche rectangular, seguido del parche tipo E y finalmente el parche circular con línea de alimentación.

- **Lóbulos de radiación**

En las figuras 3.7, 3.16, 3.24, 3.33, 3.41 y 3.47 se presentan los lóbulos de radiación del elemento rectangular, del elemento rectangular con línea de alimentación, del elemento tipo E, del elemento tipo E con línea de alimentación, del elemento circular y del elemento circular con línea de alimentación. De los gráficos se observa que el patrón de radiación en todos los casos es un patrón omnidireccional con dirección de radiación en una cara del sustrato, esto debido al ambiente que se utilizó en el proyecto, el cual fue de (aire-FR4-plano de tierra), caso que hubiera sido diferente, por ejemplo, si se utilizaba un ambiente sin plano de tierra es decir (aire-FR4-aire), es ese caso se tendrían lóbulos de radiación en ambas caras del sustrato.

Al tener lóbulos de radiación similares en todos los casos no sería lógico elegir un elemento en base a este análisis; sin embargo, se observará que ocurre cuando se colocan los elementos en un arreglo.

En la tabla 3.2 se observan los lóbulos del arreglo 1x3 con elementos rectangulares, además en la parte final de la misma tabla se muestra la forma del lóbulo formado al unir los elementos y realizar la simulación como un arreglo completo, en este caso se observa que aparecen 1 lóbulo primario y 4 lóbulos secundarios, 2 ubicados a cada lado del lóbulo principal.

Para el caso de las demás geometrías se tienen las tablas 3.5, 3.9, 3.12, 3.15, 3.30, 3.34, 3.37, 3.40, 3.44, 3.48 y 3.51, donde se presentan los lóbulos de radiación, tanto en vista

frontal como en vista posterior de cada uno de los elementos que conforman los arreglos y los lóbulos del arreglo completo,

Como se mencionó en párrafos anteriores, en este caso es difícil evidenciar que elemento presenta mejores resultados en base a sus parámetros de radiación, lo cual coincide con el análisis de directividad, donde se observó que estos valores no presentaban grandes variaciones en ninguna de las 3 geometrías analizadas.

- **Análisis de polarización**

En el capítulo 1 se estudió el concepto de polarización de la antena, mostrando 3 casos, tales como: polarización lineal, polarización circular y polarización elíptica. Para poder realizar un análisis de polarización se tomó como referencia lo realizado en [24], en donde se utilizó el concepto de relación axial AR para poder determinar que polarización tienen los elementos.

La relación axial (AR) puede definirse como la relación que existe entre los ejes mayor y menor en una elipse de polarización formada por el vector de campo eléctrico, además se conoce que los valores de AR se ubican en un rango de $1 \leq AR \leq \infty$ [30].

Para la polarización lineal el vector de campo eléctrico presenta un movimiento de una línea recta, por lo que la relación axial tendría un valor de ∞ , en cambio para la polarización circular el campo tendría un movimiento circular en donde la relación axial debería tener un valor de 1, ya que los ejes serían iguales [30].

En [31] se evidencia que por factores de acoplamiento resulta difícil obtener valores de relación axial con el valor de 1 (0 dB) para obtener una polarización circular perfecta, por lo que se toma como referencia un valor de 3 dB de AR para considerar tal polarización.

Tomando en cuenta los criterios mencionados en los párrafos anteriores y basándonos en estudios como en [30] y [31] se tomó como valores para medir la relación axial los ángulos de $\phi = 0^\circ$ y un barrido en el ángulo θ de -90° a 90° , para este estudio se utilizó el ángulo $\theta = 0^\circ$ para el análisis de la polarización.

En la figura 3.53 se presenta el valor de relación axial de 50 dBs para el elemento rectangular, porque se puede considerar que este elemento presenta una polarización elíptica.

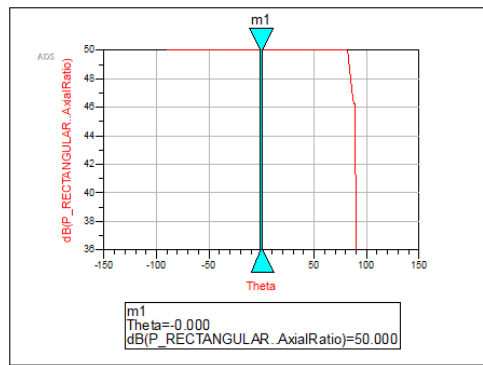


Figura 3.53. Relación axial del elemento único rectangular.

Para poder analizar los valores de relación axial de todos los elementos con diferentes geometrías que conforman los arreglos se puede observar la tabla 3.53 que se detalla a continuación.

Tabla 3.53 Relación axial y polarización de los elementos rectangulares, tipo E y circulares.

Arreglos		Relación axial (dB)	Polarización
Parche rectangular		50 dB	Elíptica
Arreglo 1x3	Parche (1,1)	50 dB	
	Parche (1,2)	50 dB	
	Parche (1,3)	50 dB	
	Arreglo total	50 dB	
Arreglo 3x1	Parche (3,1)	50 dB	
	Parche (3,2)	50 dB	
	Parche (3,3)	50 dB	
	Arreglo total	50 dB	
Parche rectangular con línea de alimentación		50 dB	
Arreglo 1x3	Parche (1,1)	50 dB	
	Parche (1,2)	50 dB	
	Parche (1,3)	50 dB	
	Arreglo total	50 dB	
Arreglo 3x1	Parche (3,1)	50 dB	
	Parche (3,2)	50 dB	
	Parche (3,3)	50 dB	
	Arreglo total	50 dB	
Parche E		50 dB	Elíptica
Arreglo 1x3	Parche (1,1)	50 dB	
	Parche (1,2)	50 dB	
	Parche (1,3)	50 dB	
	Arreglo total	50 dB	
Arreglo 3x1	Parche (3,1)	50 dB	
	Parche (3,2)	50 dB	
	Parche (3,3)	50 dB	
	Arreglo total	50 dB	
Parche E con línea de alimentación		50 dB	
Arreglo 1x3	Parche (1,1)	50 dB	
	Parche (1,2)	50 dB	
	Parche (1,3)	50 dB	
	Arreglo total	50 dB	

Arreglo 3x1	Parche (3,1)	50 dB	Elíptica
	Parche (3,2)	50 dB	
	Parche (3,3)	50 dB	
	Arreglo total	50 dB	
Parche Circular		50 dB	
Arreglo 1x3	Parche (1,1)	50 dB	
	Parche (1,2)	35.49 dB	
	Parche (1,3)	38.30 dB	
	Arreglo total	40.30 dB	
Arreglo 3x1	Parche (3,1)	46.77 dB	
	Parche (3,2)	50 dB	
	Parche (3,3)	50 dB	
	Arreglo total	50 dB	
Parche circular con línea de alimentación		50 dB	
Arreglo 1x3	Parche (1,1)	43.95 dB	
	Parche (1,2)	50 dB	
	Parche (1,3)	50 dB	
	Arreglo total	50dB	
Arreglo 3x1	Parche (3,1)	46.65 dB	
	Parche (3,2)	46.73 dB	
	Parche (3,3)	50 dB	
	Arreglo total	48.12 dB	

Se debe mencionar que todos los valores obtenidos en la tabla 3.53 se encuentran en el ANEXO C que corresponden a las simulaciones realizadas.

- **Acoplamiento mutuo**

Para el análisis de acoplamiento mutuo se pueden observar las tablas D.1, D.2, D.3, D.4, D.5, D.6, D.7, D.8, D.9, D.10, D.11 y D.12 ubicadas en el ANEXO D, en donde se muestran los valores en dBs (parámetros $S_{i,j}$)¹², donde $i \neq j$ para cada uno de los elementos que conforman los arreglos con respecto a sus elementos vecinos.

En el capítulo 2 se realizó el diseño de los arreglos de antenas con las diferentes geometrías, en donde se mencionó que para garantizar un correcto funcionamiento de un arreglo cada elemento que lo conforma debería estar separado una distancia que sea múltiplo de la longitud de onda calculada, de no cumplirse con este requisito podrían presentarse fenómenos de solapamiento entre las ondas, afectando el desempeño del arreglo [30]. En nuestro proyecto se realizaron simulaciones con diferentes distancias entre los bordes de cada elemento, de donde se llegó a escoger en base a la simulación y a

¹² Parámetros $S_{i,j}$: Como se explicó en el capítulo 1, los parámetros S se encargan de describir el comportamiento de cualquier dispositivo microondas, basándose en los niveles de potencia existentes en los puertos, según las ondas incidentes y reflejadas [9]. Los términos i, j se refieren a los parámetros de un puerto o antena con respecto a otra, en este caso para obtener los niveles de acoplamiento entre antenas se lo puede realizar analizando los parámetros S con el puerto de la antena i con respecto al puerto de la antena j, obteniendo así el valor de acoplamiento entre las antenas vecinas.

estudios realizados como en [24] una distancia de $\frac{\lambda_0}{2} = 81.081\text{mm}$, tanto en el plano E como en el plano H como se muestra en la figura 2.2.

La separación entre elementos, número de elementos y manera de ubicación de las antenas son factores que influyen en el acoplamiento mutuo [32]. Tener un acoplamiento mutuo alto quiere decir que existen pérdidas en alcance de radiación, ya que la energía puede ser transmitida a los elementos vecinos del arreglo, por tal razón debería ser deseable obtener valores muy bajos de acoplamiento entre antenas de un arreglo [32].

Para obtener el valor de acoplamiento mutuo se deben analizar los parámetros $S_{i,j}$, donde $i \neq j$, y se toma como valor referencial a -20 dB, considerando que si el acoplamiento es mayor a -20 dB los elementos presentan un alto acoplamiento mutuo [24].

Al analizar la tabla D.1 ubicada en el ANEXO D se observa que los valores de acoplamiento entre los 3 elementos del arreglo 1x3 con elementos rectangulares son menores a -39.57 dB, lo cual muestra que no existe acoplamiento que afecte a los elementos vecinos.

En la tabla D.2 se muestran los valores de acoplamiento en el arreglo 3x1 de elementos rectangulares, donde se observa que los valores aumentan acercándose al valor referencial de -20 dBs, se observan valores más altos de -24.31 dBs en $S_{3,2}$ y un valor de $S_{3,1}$ de -28.76 dB, por lo que se puede evidenciar que el acoplamiento aumenta en los elementos que están cercanos y disminuye al aumentar la separación entre estos.

Al aumentar una línea de alimentación se observan en las tablas D.3 y D.4 que sucede el mismo efecto, logrando valores menores a -32.33 dB en el arreglo 1x3 y un valor de -23.85 dB en el arreglo 3x1. De lo anterior se evidencia que al colocar los elementos en un arreglo 3x1 con y sin línea de alimentación existe una mayor tendencia a que aumente el acoplamiento mutuo.

En las tablas D.5, D.6, D.7 y D.8 se muestran los valores de acoplamiento de los elementos tipo E de los arreglos 1x3 y 3x1, se evidencia que en los arreglos 1x3 con y sin línea de alimentación se presentan valores más cercanos al valor de referencia de -20 dB, llegando a valores de -27.14 dB y -25.13 dB, y en los arreglos 3x1 los valores son más bajos encontrándose por debajo de -41.27 dB y -33.85 dB.

En cuanto al acoplamiento de los elementos circulares se observa el mismo efecto que ocurrió con los elementos rectangulares, es decir que los arreglos 3x1 presentan valores altos, pero, sin embargo, no superan la condición de -20 dB, por lo que se puede decir que el acoplamiento no afecta el desempeño del arreglo.

En base a lo expuesto se concluye que el acoplamiento mutuo aumenta con elementos cercanos y disminuye al aumentar la separación entre elementos, adicional se debe tomar en cuenta que este efecto no solo depende de la distancia, sino también del número de elementos que conforman el arreglo, en este caso al tener un arreglo con 3 elementos este efecto no es muy notorio, aunque se pudo observar cambios en los valores de acoplamiento al cambiar la posición de los arreglos de 1x3 a 3x1. Además, se observó que el acoplamiento entre elementos tiene incidencia en los parámetros como impedancia, pérdidas por retorno y ganancia, que fueron analizados anteriormente, estos valores se los puede evidenciar en la tabla 3.52.

En cuanto a la comparación de todos los parámetros simulados entre los arreglos realizados en el presente proyecto de titulación no es necesarios ni útiles para el proyecto de investigación PIS 18-06 al cual está relacionado, los resultados obtenidos serán utilizados de la manera que se crea adecuada en el proyecto. Para obtener mayor información de los parámetros simulados de describe brevemente la información que contienen los anexos:

- Anexo A: Se detalla el procesó para obtener los valores de VSWR en el software ADS.
- Anexo B: Se detalla el procesó para obtener el ancho de banda en el software ADS.
- Anexo C: Se añade las simulaciones de todos los arreglos realizados en el trabajo de titulación.
- Anexo D: Se presentan las tablas con los valores de acoplamiento mutuos entre antenas de cada arreglo.
- Anexo E: Se detalla el procedimiento para obtener los parámetros del arreglo completo en el software ADS.
- Anexo F: Datasheet de la placa de cobre FR4 para la construcción de las antenas.
- Anexo G: Datasheet de los conectores utilizados para la construcción de las antenas.

Finalmente, en base a los párrafos anteriores que procederá con la construcción de:

- 3 elementos rectangulares sin línea de alimentación.
- 3 elementos tipo E sin línea de alimentación.
- 3 elementos circulares con línea de alimentación.

Estos elementos podrán ser utilizados como se lo requiera en el proyecto de investigación PIS18-06.

3.8 CONSTRUCCIÓN DE LAS ANTENAS TIPO PARCHE

Una vez realizadas las simulaciones de las antenas, en este capítulo se muestra el proceso de construcción con tecnología impresa (Microstrip) de las antenas con geometría rectangular, tipo E y circular. Los materiales que se utilizaron para la construcción de las antenas son materiales disponibles en el mercado del país. La construcción se realizó en sustratos independientes para que en el proyecto de investigación PIS18-06 se puedan usar las antenas con la separación que se requieran en las pruebas de laboratorio.

Como las dimensiones de las antenas se encuentran en el orden de los milímetros y para aprovechar de mejor manera el material, se utilizó el software AutoCAD, en el cual se dibujaron en un formato de tamaño A4 varias antenas, debido a que la geometría de las antenas es muy básica no hubo ningún problema en realizar este proceso, en la Figura 3.54 se muestra el resultado de las antenas dibujadas en el software.

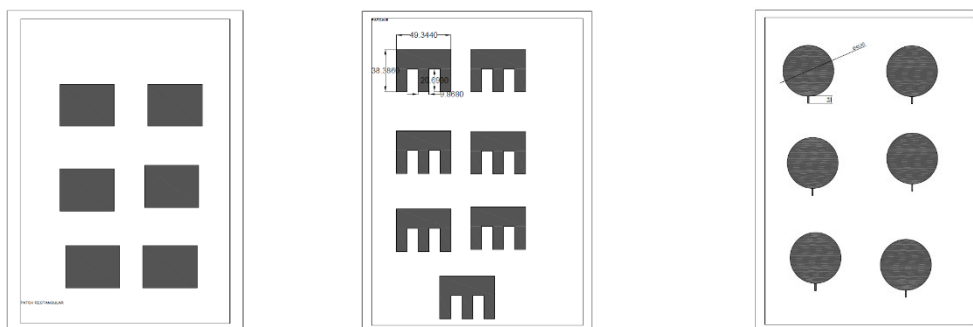


Figura 3.54. Formatos en tamaño A4 del esquema de las antenas a construir.

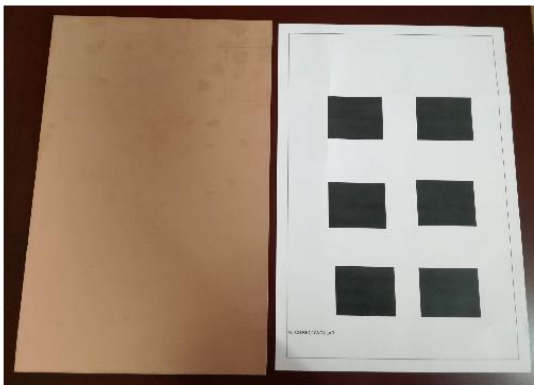
El método utilizado para la construcción de las antenas fue el método del planchado, este método consiste en realizar la transferencia del circuito, en este caso el diseño de la antena, a la placa de cobre o sustrato se realiza mediante calor, para después procesar la placa con ayuda de ácido férrico, la ventaja de este método es su bajo costo de implementación.

Ya con los archivos de AutoCAD listos se procedió a transferirlos del formato del programa que es DWG a formato PDF para poder realizar la impresión a laser sin problemas en papel termotransferible.

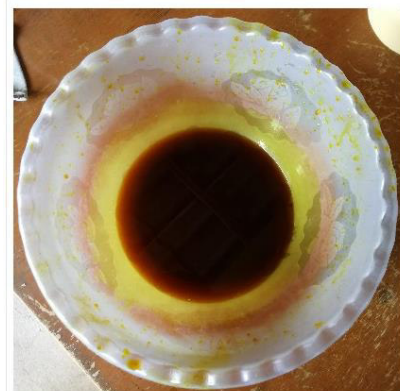
3.8.1 MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS ANTENAS

En esta sección se enlistan los materiales utilizados para la construcción de las antenas, en la Figura 3.55 se presentan algunos materiales del listado.

- Circuitos en archivo PDF,
- Papel termotransferible,
- Placa de fibra de vidrio FR-4 tamaño A4(210mm x 297mm), ver ANEXO A,
- Impresora a láser,
- Cinta aislante,
- Sierra,
- Calibrador pie de rey,
- Depósito de plástico,
- Plancha,
- Ácido férrico,
- Lija #500,
- Lustre o esponja de platos
- Thinner,
- Cautín,
- Estaño,
- Conectores SMA, ver ANEXO B.



a)



b)



c)



d)

Figura 3.55. Materiales: (a) placa de fibra de vidrio FR4 (b) ácido férrico (c) conectores SMA (d) estaño y caudín.

3.8.2 PASOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS ANTENAS

Una vez diseñadas y simuladas las antenas el siguiente paso es realizar la construcción, al inicio se realizaron las impresiones de los diseños en papel termotransferible con ayuda de una impresora a láser, el resultado se presenta en la Figura 3.56.

Con la ayuda del calibrador pie de rey, que es un instrumento que nos ayuda a realizar mediciones mucho más exactas que una regla convencional, se realizaron las mediciones de los diseños de las antenas impresas, ya que pueden existir variaciones milimétricas en las dimensiones debido al movimiento que existe al realizar la impresión.

Una vez que se comprueba que las dimensiones de las antenas son correctas el siguiente paso es realizar el corte de la placa o baquelita de fibra de vidrio FR4 a la medida aproximada de las antenas con ayuda de una sierra o estilete.

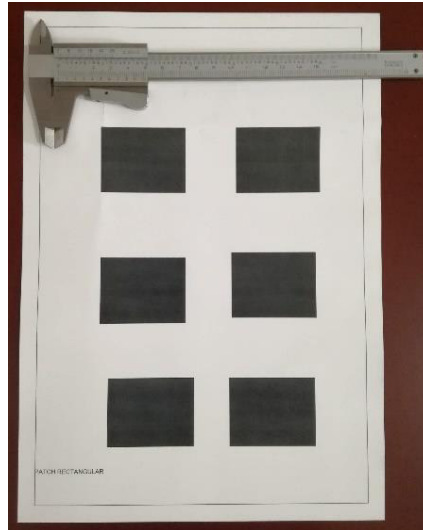


Figura 3.56. Diseño del parche rectangular impreso en papel termotransferible con impresora láser.

Para el corte de la placa el tamaño mínimo del plano de tierra está relacionado con el espesor del sustrato, en [33] se muestra que los valores del plano de tierra están dados por la Ecuación 3.1 y la Ecuación 3.2, así tenemos:

$$Lg = 6h + L \quad (3.1)$$

$$Wg = 6h + W \quad (3.2)$$

Por lo tanto, las dimensiones del plano de masa para cada antena son:

$$Lg = 6 * 1.5mm + 38.386mm = 47.386mm.$$

$$Wg = 6 * 1.5mm + 49.344mm = 58.344mm.$$

Ahora con las dimensiones de la placa, el siguiente paso fue realizar los cortes con ayuda de una sierra, después se procede a desprender las impurezas de los bordes con ayuda de la lija, dejando el contorno de la placa liso. Antes de realizar el pegado del papel termotransferible a la placa es de vital importancia frotar la placa con un lustre para obtener brillo en la placa así la superficie queda totalmente lisa y sin impurezas, después es necesario lavar la placa con ayuda de una esponja y jabón para eliminar grasas o polvo que la placa tenga, una vez realizado este paso se procede a secar al aire libre en un ambiente donde no exista polvo ni ningún material que ensucie nuestra placa.

Con ayuda de cinta aislante se pega el papel termotransferible con el diseño de la antena en la superficie de cobre de la placa, hay que ubicar el papel de modo que, al pasar la plancha por encima, el papel no se mueva ya que de ser así el planchado dejará partes del

diseño sin transferirse. Se procede a planchar uniformemente y con fuerza toda la placa aproximadamente de 5 a 8 minutos, para esto es necesario utilizar una plancha que no sea automática, esto ya que es necesario que el calor sea permanente por varios minutos, al realizar este proceso con planchas automáticas el calor no permanecerá constante todo el tiempo por lo que no se obtendrá un traspaso del diseño correctamente. Para este proceso se utilizó una plancha antigua, la cual ayudó mucho para realizar este proceso, manteniendo una temperatura alta durante varios minutos. Finalizado el planchado se deja reposar la placa en agua helada de 5 a 8 minutos, luego se retira del recipiente y se quita el papel con mucho cuidado hasta que se vea la tinta trasferida a la placa, en la Figura 3.57 se presenta el resultado al sumergir la placa planchada en un depósito con agua fría y la placa sin el papel con la tinta trasferida a ella.



Figura 3.57. Antena tipo parche rectangular con tinta transferida.

Finalmente se verifica que la tinta se haya transferido totalmente en la placa y se procede a preparar el ácido férrico. Para preparar el ácido primero se debe colocar en un recipiente agua a temperatura alta, después con mucho cuidado se coloca el ácido que se encuentra en polvo en el recipiente con agua y se procede a mezclar, se debe tener cuidado con que la mezcla no tenga contacto con nuestra piel, además se recomienda usar guantes para realizar este paso. Ya con la mezcla en el recipiente se introduce la placa en el ácido, tomando en cuenta que el ácido debe cubrir por completo la antena.

Se debe mantener en un movimiento constante el recipiente con la placa y al ácido para que este pueda desprender correctamente el cobre de la placa, este proceso de movimiento debe realizarse aproximadamente de 5 a 7 minutos, esto depende de la cantidad de ácido que se coloca en el recipiente. Una vez que se desprende el cobre de la parte que necesitamos se procedió a retirar la placa y con ayuda de agua se limpia la placa del ácido, en la Figura 3.58 se presenta la antena sumergida en el ácido y la antena después de retirarla del recipiente.

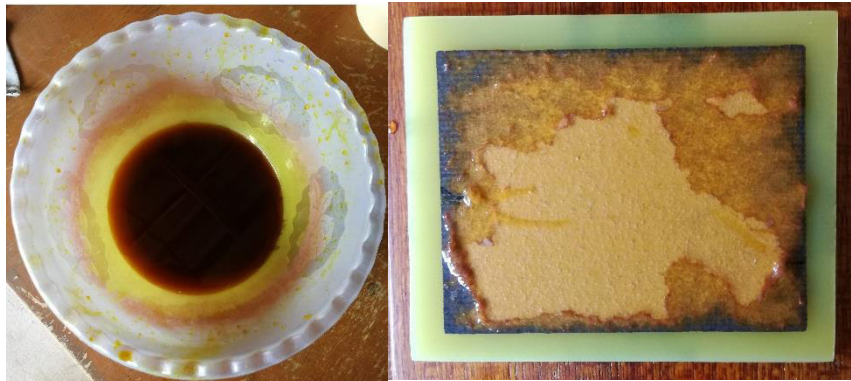


Figura 3.58. Antena tipo parche rectangular después de retirar del recipiente con ácido férrico.

Con ayuda del thinner se procede a limpiar la placa para retirar la tinta que quedó como diseño de la antena sobre la baquelita, para finalmente obtener el diseño de la antena en el cobre, este procedimiento se debe realizar para todas las antenas, en la Figura 3.59 se presenta el resultado final realizado con todas las antenas para este proyecto.



Figura 3.59. Antenas tipo parche rectangular, tipo E y tipo circular construidas.

3.8.3 PUERTOS DE ALIMENTACIÓN

Para el puerto de alimentación se conectaron directamente los conectores a la antena o a la línea de alimentación en el caso de la antena circular, con ayuda de estaño y cautín se suelda el conector tipo SMA a la antena, finalmente se procede a limpiar las antenas con un lustre para obtener brillo en el cobre, el resultado se presenta en la Figura 3.60.

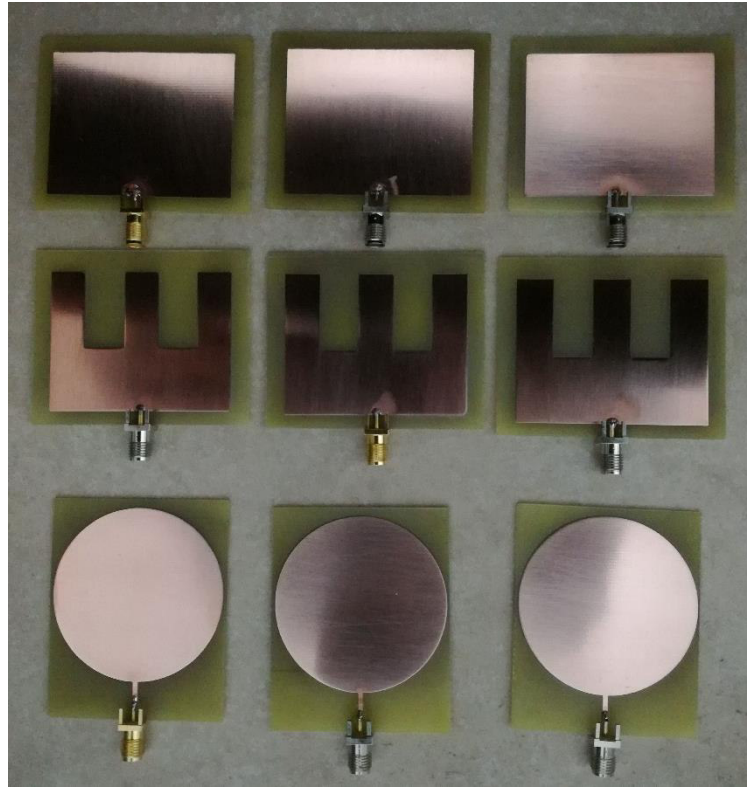


Figura 3.60. Antenas tipo parche rectangular, tipo E y tipo circular construidas con conectores SMA.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Del trabajo de titulación realizado se pueden mencionar las siguientes conclusiones:

- El medio donde se desarrolla la simulación fue aire – FR4 – plano de tierra, por lo cual se evidenció que los lóbulos de radiación se forman en la parte superior de cada parche anulando así la radiación en la parte inferior.
- Se constató que al colocar una línea de alimentación en los elementos radiadores para el acoplamiento, la frecuencia de operación cambia, por lo que una de las alternativas y que se aplicó en este proyecto fue realizar modificaciones a las dimensiones de la línea o de los elementos radiantes con la finalidad de mantener la frecuencia de resonancia en 1.85 GHz.
- Se observó de la simulación que los elementos rectangulares, tipo E y circular sin línea de alimentación presentan una mala adaptación de impedancia, teniendo valores de $131.71+j109.54 \Omega$, $195.53-j8.44 \Omega$ y $135.76 - j122.1 \Omega$ respectivamente, al colocar una línea de alimentación en los elementos se observó que los valores de impedancia disminuyeron, acercándose así al valor buscado de 50Ω , en el caso de los elementos únicos se logró obtener valores de impedancia de $50.58+j0.73 \Omega$, $47.11+j7.93 \Omega$ y $50.03 - j68.87 \Omega$ respectivamente. Esto se evidencia de igual manera al formar los arreglos con cada geometría, en donde las impedancias tomaron valores cercanos a los valores obtenidos en su elemento único tanto con línea y sin línea de alimentación.
- El elemento rectangular sin línea de alimentación presentó mayor valor de ganancia, directividad, eficiencia y ancho de banda en comparación con el elemento único rectangular con línea de alimentación, en este caso la línea de alimentación únicamente ayudó a lograr un mejor valor de VSWR cambiándolo de 4.61 a un valor de 1.04, además disminuyó el valor de las pérdidas por retorno de -3.82 dB a un valor de -40.66 dB, lo cual coincide con el valor de impedancia obtenido cercano a 50Ω .
- El elemento tipo E sin línea de alimentación presenta mayor valor de ganancia, eficiencia y ancho de banda en comparación con el elemento único tipo E con línea de alimentación. Además, se evidenció que el valor de directividad permanece en el mismo valor de 6.40 dBi con y sin línea de alimentación. Por otro lado, se tiene que el valor de pérdida por retorno en el elemento sin línea de alimentación presentó un valor de -4.53 dB con VSWR de 3.92, al colocar la línea este valor disminuye a un valor de

-13.55 dB con VSWR de 1.53, lo cual concuerda con el valor obtenido en la impedancia cuyo valor es cercano a 50Ω .

- Al analizar el funcionamiento del elemento circular con línea de alimentación se observa que presenta mayor valor de ancho de banda y mejores características de acoplamiento de impedancia, pérdidas por retorno, directividad y VSWR, en cambio el elemento circular sin línea de alimentación presentó mayores valores de ganancia y eficiencia.
- De acuerdo al análisis de la sección 3.7 se comprobó que, al colocar los elementos con las diferentes geometrías en un arreglo, el parámetro de ganancia presenta un aumento significativo en comparación con el elemento único. En el caso del elemento rectangular la ganancia pasó de 5.08 dBi a 9.72 dBi para el arreglo 1x3 y a 9.33 dBi para el arreglo 3x1. Para el elemento rectangular con línea de alimentación el valor de ganancia de 3.52 dBi del elemento único pasó a 8.10 dBi para el arreglo 1x3 y a 8.71 dBi para el arreglo 3x1.
- Al introducir dos ranuras en un parche rectangular se forma el elemento tipo E, en el cual cambia su frecuencia de operación de acuerdo a las dimensiones de las ranuras. Se observa que en el tipo de antena E se presenta un pequeño aumento de ancho de banda cuando no se tiene línea de alimentación y una disminución del ancho de banda al colocar la línea de alimentación, estas variaciones en comparación con el parche rectangular de donde se partió para el diseño.
- Se evidenció que al colocar los elementos en arreglos aparecen nuevos lóbulos de radiación en comparación al diagrama obtenido con el único elemento.
- Las 3 geometrías utilizadas en el presente trabajo de titulación emiten las ondas electromagnéticas con polarización elíptica, como se evidenció en la sección 3.7 en el análisis de polarización.
- Por medio de las simulaciones se comprobó que al colocar los elementos en un arreglo a una distancia de $\frac{\lambda_0}{2} = 81.081$ mm se presentaron mejores valores de los parámetros eléctricos y de radiación de las antenas, a valores mayores a λ_0 los parámetros mostraron valores deficientes.
- En los arreglos propuestos en este estudio se observa que los valores de acoplamiento mutuo entre los elementos no superan el valor de -20 dBs, lo cual es ventajoso para su aplicación en la estimación del DoA porque se espera que no existirá una distorsión entre las señales recibidas en cada uno de los elementos de los arreglos.

- Las antenas construidas en el presente trabajo de titulación podrán ser utilizadas como parte del sistema de detección del DoA, ya que gracias a este estudio se conocen sus parámetros eléctricos y de radiación que servirán de referencia para establecer las características de las señales recibidas en cada uno de los elementos del arreglo de antenas y que podrán ser procesadas posteriormente.
- Se concluye que los arreglos de antenas 1x3 y 3x1 con parches rectangulares sin línea de alimentación, los arreglos de antenas tipo E sin línea de alimentación y los arreglos circulares con línea de alimentación se recomendarían para ser utilizados en la aplicación específica requerida, ya que en la revisión bibliográfica de los métodos para la detección del DoA, se indica que se deberían utilizar antenas especiales o arreglos de antenas, por lo que dichos arreglos presentan características eléctricas y de radiación adecuadas pueden ser utilizados en los métodos como: interferencia correlativa y estimación de la diferencia entre tiempos de arribo. En estos métodos es necesario emplear antenas omnidireccionales con buena ganancia y directividad.

4.2. RECOMENDACIONES

- Se sugiere para trabajos futuros realizar el estudio de otros métodos de alimentación como los estudiados en el capítulo 1, así como también realizar estudios con otro tipo de sustratos con mejores características que el FR-4.
- También se podría estudiar en un trabajo futuro la aplicación de otro tipo de métodos de adaptación de impedancias como las redes tipo T o redes tipo L, ya que el utilizado en el presente proyecto no permite un acoplamiento preciso.
- Se recomienda utilizar otros métodos de construcción de antenas impresas no únicamente el método de planchado como el que se utilizó en el presente proyecto.
- Finalmente, se sugieren estudiar otros tipos de antenas microstrip, como las antenas fractales, para verificar su desempeño y probar su aplicación en los sistemas para la estimación del DoA.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. A. Balanis, "Microstrip and Mobile Communications Antennas," in *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016, ch.1, ch.14, pp. 75-79, 783-861.
- [2] Hind S. Hussain, "Inverted E-shape Microstrip Antenna for Bandwidth and Gain Enhancement," *Journal of Wireless Networking and Communications*, vol. 6, no. 2, pp. 47-55, jun 2016, DOI: 10.5923/j.jwnc.20160602.03.
- [3] Consejo de Educación Superior, "Normativa transitoria", RCP-SE-03-No.046-2020. [Online]. Available: https://www.epn.edu.ec/wpcontent/uploads/2020/04/normativa_transitoria__rpc-se-03-no.046-2020.pdf
- [4] A. Mehta, "Microstrip Antenna," *International Journal of Scientific & Techonology Research*, vol. 4, no. 3, pp. 54-56, mar 2015, [Online] Available: <https://www.ijstr.org/final-print/mar2015/Microstrip-Antenna.pdf>
- [5] P. León, "Diseño de una antena de bajo perfil para un sistema anticolidión embarcado," Trabajo de Fin Grado, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2014. [Online]. Available: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/26219/TFG_Patricia_Leon_Villarejo_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [6] A.S.Moreno," Evaluación mediante simulación de dos arreglos de antenas tipo parche en banda S para aplicaciones de un sistema radar," Trabajo de fin de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2017. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19272>
- [7] A. Cardama, J.Roca, J.M.Rius, J.Romeu, S.Blanch, M.F.Bataller, "Consideraciones generales sobre antenas," in *Antenas*, 2nd. ed. Cataluña: UPC, 2002, ch. 1, pp. 17-25.
- [8] P. Sánchez Dancausa, "Diseño de antenas de parches conformadas para sistemas de comunicaciones de banda ancha," Trabajo de Fin Grado, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España, 2014. [Online]. Available: https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/662911/Sanchez_Dancausa_Paula_tfg.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [9] A. Gonzáles, "Diseño de redes de alimentación para arrays de antenas con diagrama de campo conformado," Proyecto Fin de Carrera, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España, 2015. [Online]. Available:

- https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/668307/Gonzalez_Gonzalez_Al_ejandro_pfc.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [10] M. El Bouchti, "Diseño y medición de una antena Wearable," Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2016. [Online]. Available: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/106668/mohamed.el.bouchti_119201.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [11] R.Hernández Aquino, "Diseño, simulación y construcción de antenas tipo parche para bluetooth y WI-FI, bandas 2.4ghz y 5.8ghz," Tesis Profesional, Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Puebla, México, 2008. [Online]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/
- [12] D.Orban, G. Moernaut, "The Basics of Patch Antennas", Orban Microwave Products, Orlando, United States of America, 2009, [Online]. Available: <http://orbanmicrowave.com/wp-content/uploads/2014/12/Orban-Patch-Antennas-2009-rev.pdf>
- [13] D. Jaramillo, L. Quishpe, "Estudio, diseño y construcción de un prototipo de arreglo de antenas microstrip para recepción en la banda X comparable a la ganancia de una antena parabólica," Trabajo de fin de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2013. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7119/1/CD-5306.pdf>
- [14] C. A. Balanis, "Wave Propagation and Polarization," in Advanced Engineering Electromagnetics, 2nd. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012, ch.4, pp. 146-160.
- [15] A. Roldan, " Diseño y simulación de antena plana," Trabajo de fin de grado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Pamplona, España, 2011. [Online]. Available: <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/3546/577434.pdf;jsessionid=6BCA07130514C45F923A4185DD53249C?sequence=1z>
- [16] G. Pazmiño, "Análisis comparativo de antenas tipo patch con tecnología microstrip en la banda X," Trabajo de fin de grado, Sangolquí, Ecuador, 2018. [Online]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/14099/T-ESPE-057655.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [17] D. Ortega, "Extracción de señales de un ordenador mediante antenas planares," Trabajo final de grado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España,

2017. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/110128/memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [18] A. Fatthi Alsager, "Desing and analysis of microstrip patch antennas arrays," Tesis de Maestría en Comunicación y Procesamiento de Señal, Departamento de Ingeniería Eléctrica, University College of Boras, Suecia, 2011. [Online]. Available: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1312395/FULLTEXT01.pdf>
- [19] A. Kumar, J. Kaur, R. Singh, "Performance analysis of different feeding techniques," IJETAE International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol.3, no.3, pp. 884-890, mar 2013. [Online]. Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.448.4793&rep=rep1&type=pdf>
- [20] Y. Huang, K. Boyle, "Popular Antennas," in Antennas: From Theory to Practice, 1rd. ed. New Delhi, India: John Wiley & Sons Ltd, 2008, ch. 5, sec. 5.2.5, pp. 188-190, 191.
- [21] J. Nieto, "Diseño de un array de antenas parche con alimentación en serie a 60GHz," Trabajo final de grado, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, 2018. [Online]. Available: https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/30617/TFG_JMNieto.pdf;jsessionid=E3B1931E6914A48BB4D4FEE0CF25F123?sequence=1
- [22] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, A. Ittipiboon, "Microstrip Radiators," in Microstrip Antenna Design Handbook, Boston, London, Artech House Inc. Norwood, 2001, ch. 1, sec. 1.1, 1.6, pp. 1-2, 54-68.
- [23] P. Denisowski, "An introduction to direction finding methodologies," White paper, seminario online, Rohde & Schwarz, mar 2020, [Online]. Available: <https://on24static.akamaized.net/event/22/63/52/7/rt/1/documents/resourceList1587423492045/introtodirectionfindingmethodologies1587423454142.pdf>
- [24] J. Hidalgo, "Comparación de dos arreglos de antenas tipo mimo masivo usando Advanced Design System (ADS)," Trabajo final de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2020. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/21260/1/CD%2010776.pdf>
- [25] J. Armas, "Estufa de microondas con campo radiante," Trabajo final de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2000, [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9182/3/T1632.pdf>

- [26] S. Kumar, A. Islam, U. Habiba, M. Masudur, "E-shape microstrip patch antenna design for wireless applications," *International Journal of Science Engineering and Technology Research (IJSETR)*, vol. 2, no. 3, mar 2013.
- [27] A. Kasinathna, V. Jayaraj, M. Pachiyaannan, "E-shape microstrip patch antenna design for wireless applications," *International Journal of Innovative Science & Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 484-490, may 2014. [Online]. Available: http://www.ijiset.com/v1s3/IJSET_V1_I3_84.pdf
- [28] S. Kumar, V. Kumar, "E-Shape slotted microstrip antenna with enhanced gain for wireless communication," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, pp. 60-62, jul-ago 2011.
- [29] a R. Alvarez, A. Nobrega, "Desarrollo de un arreglo de antenas patch en la banda 300-650 MHz," Trabajo Especial de Grado, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Colombia, 2013. [Online]. Available: <http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/AAS7533.pdf>
- [30] E. Betancor A., "Diseño y estudio de una antena de polarización circular para la banda Ka," Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnico Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, Escuela Politécnica de Madrid, 2017. [Online] Available: http://oa.upm.es/49914/1/PFC_ELIAS_BETANCOR_ARROYO.pdf
- [31] E. Gómez, I. Rodriguez, F. Marante, L. Rizo, "Estudio de la variación de diferentes parámetros en antenas de microcinta AAPC," *Revista de Ingeniería Electrónica Automática y Comunicaciones*, vol. 34, pp. 27-39, ene-abr 2013. [Online] Available: <http://scielo.sld.cu/pdf/eac/v34n1/eac03113.pdf>
- [32] J. A. Buitrago, "Metodología de desacople para antenas de parche con aplicaciones en sistemas de imagenología," Trabajo de Maestría, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, Mexico, 2012. [Online] Available: <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/741/1/BuitragoMJA.pdf>
- [33] S.Kumar, H. Gupta, "Design and Study of Compact and Wideband Microstrip U-Slot Patch Antenna for Wi-Max Application," *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, vol. 5, no. 2, pp. 45-48, mar - apr 2013. [Online]. Available: <http://www.iosrjournals.org/iosr-jece/papers/Vol5-Issue2/H0524548.pdf?id=4332>

ANEXOS

En esta sección se presentan los anexos:

ANEXO A. Proceso para obtener VSWR en ADS software.

ANEXO B. Cálculo del ancho de banda en ADS software.

ANEXO C. Simulaciones de todos los arreglos (Anexo Digital)

ANEXOS D. Tablas de acoplamiento mutuo.

ANEXO E. Procedimiento para obtener los parámetros del arreglo completo

ANEXO F. Datasheet placa de cobre, FR4

ANEXO G. Datasheet conectores tipo SMA.

ANEXO A

Se adjunta el proceso para obtener los valores de VSWR en ADS software.

En el software ADS no existe la herramienta para poder obtener directamente el parámetro de VSWR, en este caso se procedió a utilizar la herramienta de ecuación como se observa en la Figura A.1.

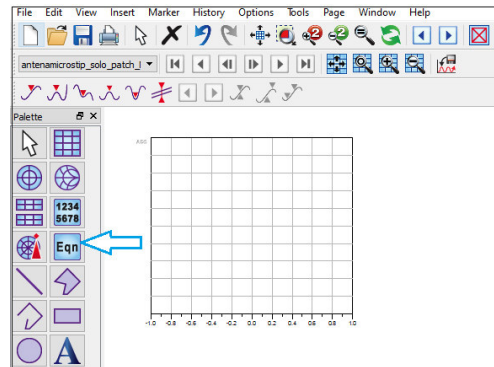


Figura A.1. Herramienta Eqn utilizada para obtener el VSWR.

Al elegir esta herramienta se abre el cuadro presentado en la Figura A.2 donde se debe ingresar la ecuación “nombre=vswr(parámetro S11 de la antena que se requiere el valor)”, en este caso se muestra la ecuación del elemento único rectangular sin línea de alimentación.

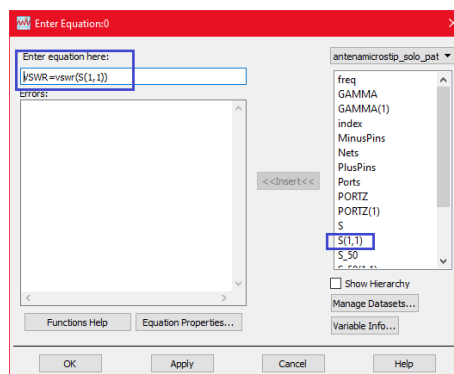


Figura A.2. Ecuación utilizada para obtener el VSWR.

Una vez colocado la ecuación se procede a mostrar el resultado, se debe ir a la paleta de herramientas y elegir la opción “Plot Traces & Attributes” como se muestra en la Figura A.3, en donde se despliega el cuadro donde se puede elegir la opción de “Equations” en donde aparecerá la ecuación realizada, en este caso con el nombre de VSWR, al aplicar OK, se obtiene el resultado mostrado en la Figura A.4.

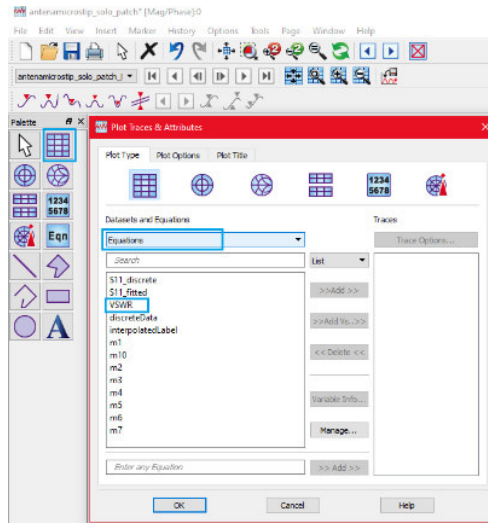


Figura A.3. Método para obtener el VSWR.

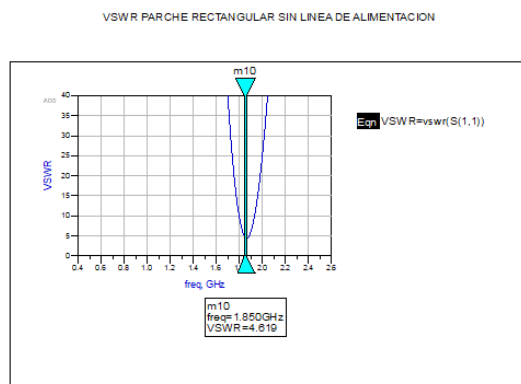


Figura A.4. Resultado del VSWR del elemento único rectangular con línea de alimentación.

Este procedimiento se lo realizó con todas las antenas y arreglos con y sin línea de alimentación y con las 3 geometrías utilizadas, los resultados se muestran en conjunto con las simulaciones obtenidas en el Anexo C (Anexo digital).

ANEXO B

Se adjunta el proceso utilizado para el cálculo del ancho de banda en ADS software.

Para obtener el valor de ancho de banda en el software ADS se colocó marcadores a un valor de -3 dBs en la parte superior e inferior de la frecuencia de resonancia, para así poder obtener los valores de las frecuencias a ese valor. Se debe tomar en cuenta que este valor de -3dBs es utilizado únicamente para los elementos que no se encuentran con la impedancia de entrada adaptada, en el caso de que se tenga una impedancia a 50 ohm el ancho de banda se calcula a un valor de -10 dBs. Con estos valores se utilizó la ecuación 1.16 del capítulo 1 obteniendo de esta manera el valor de ancho de banda de cada elemento, cabe recalcar que este parámetro es único de cada elemento ya que en el presente proyecto no se utilizó una línea de alimentación para todo el arreglo sino se utilizó alimentación por separado para cada elemento, en la Figura B.1 se presenta un ejemplo del método utilizado para obtener el ancho de banda, los resultados de ancho de banda de todos los elementos se muestran en conjunto con las simulaciones obtenidas en el Anexo C (Anexo digital).

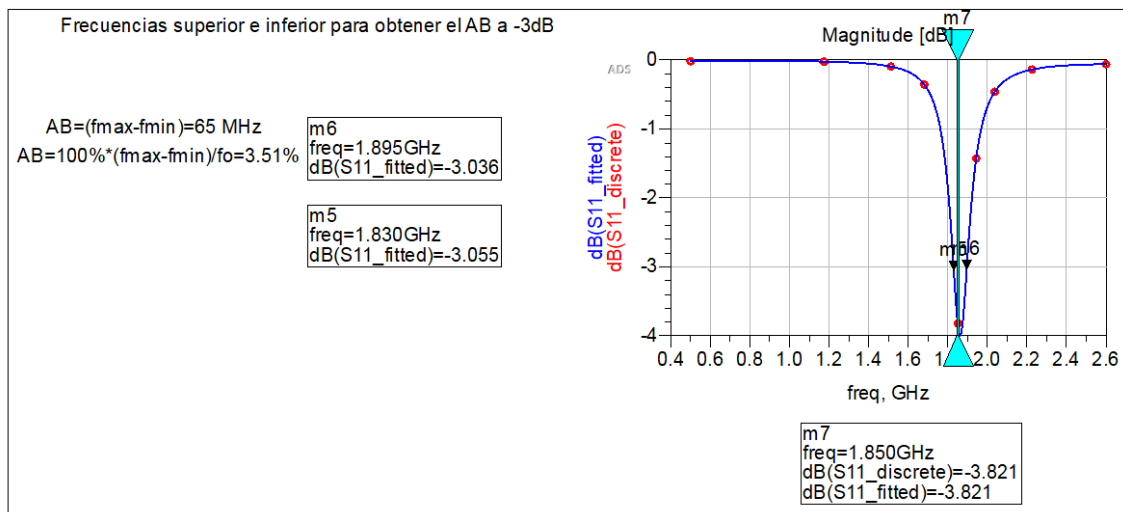


Figura B.1. Cálculo del ancho de banda el elemento único rectangular sin línea de alimentación.

ANEXO C (Anexo digital)

Conjunto de simulaciones de los elementos únicos rectangular, tipo E y circular.
Simulaciones de los arreglos 1x3 y 3x1 con las diferentes geometrías.

ANEXO D

Tablas con valores de acoplamiento mutuo entre los elementos que conforman los arreglos con las diferentes geometrías.

Tabla D.1. Acoplamiento mutuo de los elementos rectangulares del arreglo 1x3.

Elemento	1	2	3
1	-	-39.57	-58.82
2	-39.57	-	39.55
3	-58.82	-39.55	-

Tabla D.2. Acoplamiento mutuo de los elementos rectangulares del arreglo 3x1.

Elemento	1	2	3
1	-	-27.20	-28.76
2	-27.20	-	-24.31
3	-28.76	-24.31	-

Tabla D.3. Acoplamiento mutuo de los elementos rectangulares con LT del arreglo 1x3

Elemento	1	2	3
1	-	-32.33	-44.03
2	-32.33	-	-32.33
3	-44.03	-32.33	-

Tabla D.4. Acoplamiento mutuo de los elementos rectangulares con LT del arreglo 3x1.

Elemento	1	2	3
1	-	-23.53	-28.85
2	-23.53	-	-23.85
3	-28.85	-23.85	-

Tabla D.5. Acoplamiento mutuo de los elementos tipo E del arreglo 1x3.

Elemento	1	2	3
1	-	-24.55	-29.12
2	-24.55	-	-27.14
3	-29.12	-27.14	-

Tabla D.6. Acoplamiento mutuo de los elementos tipo E del arreglo 3x1.

Elemento	1	2	3
1	-	-41.32	-61.42
2	-41.32	-	-41.27
3	-61.42	-41.27	-

Tabla D.7. Acoplamiento mutuo de los elementos tipo E con LT del arreglo 1x3.

Elemento	1	2	3
1	-	-25.54	-30.71
2	-25.54	-	-25.13
3	-30.71	-25.13	-

Tabla D.8. Acoplamiento mutuo de los elementos tipo E con LT del arreglo 3X1.

Elemento	1	2	3
1	-	-33.92	-45.70
2	-33.92	-	-33.85
3	-45.70	-33.85	-

Tabla D.9. Acoplamiento mutuo de los elementos circulares del arreglo 1x3.

Elemento	1	2	3
1	-	-37.05	-49.71
2	-37.05	-	-37.06
3	-49.71	-37.06	-

Tabla D.10. Acoplamiento mutuo de los elementos circulares del arreglo 3x1.

Elemento	1	2	3
1	-	-29.41	-34.69
2	-29.41	-	-29.63
3	-34.69	-29.63	-

Tabla D.11. Acoplamiento mutuo de los elementos circulares con LT del arreglo 1x3.

Elemento	1	2	3
1	-	-35.03	-47.39
2	-35.03	-	-35.04
3	-47.39	-35.04	-

Tabla D.12. Acoplamiento mutuo de los elementos circulares con LT del arreglo 3x1.

Elemento	1	2	3
1	-	-27.55	-27.82
2	-27.55	-	-32.90
3	-27.82	-32.90	-

ANEXO E

Se adjunta el manual con el proceso para obtener los parámetros del arreglo completo en el software ADS.

Para obtener los parámetros del arreglo completo se realiza el siguiente procedimiento:

Primero se elige el ícono de color azul de la barra de herramientas mostrado en la Figura E.1.

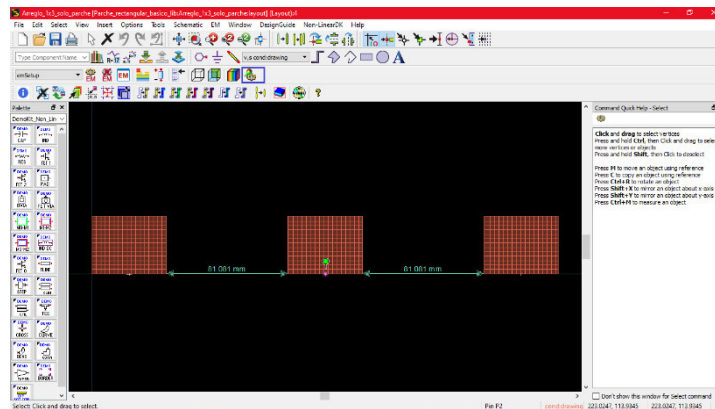


Figura E.1. Método para obtener los parámetros del arreglo completo.

Después se abre espacio de trabajo mostrado en la Figura E.2 en donde se debe elegir la frecuencia de trabajo, además del puerto del elemento que se quiere analizar.

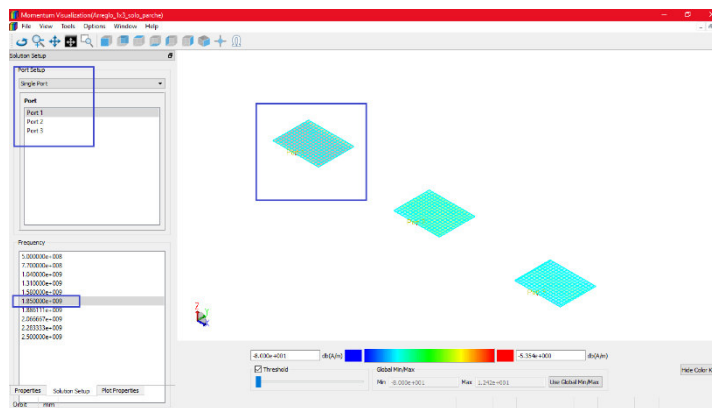


Figura E.2. Espacio de trabajo del software ADS para obtener los parámetros eléctricos y de radiación.

Se puede observar en la Figura E.3 que al hacer click en Port Setup se despliega dos opciones: Single Port y User Defined. Al elegir la opción de User Defined se despliega las opciones que se presentan en la Figura E.4. En donde únicamente se debe cambiar el

valor de la magnitud de los elementos que conforman el arreglo, es este caso se configuró los elementos del arreglo 1x3 sin línea de alimentación colocando a un valor de 1 en amplitud

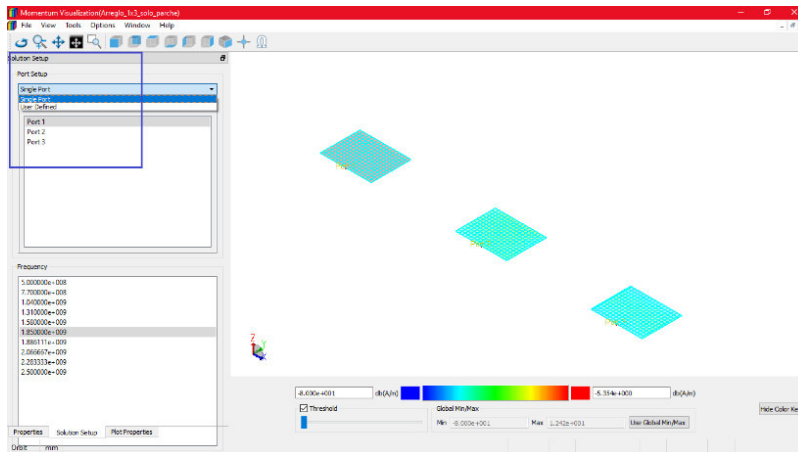


Figura E.3. Configuración de puertos para obtener los parámetros del arreglo completo.

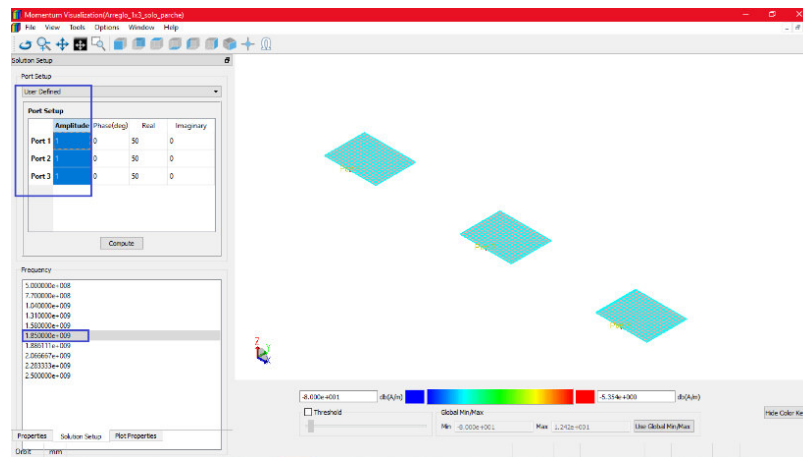


Figura E.4. Configuración de puertos.

Al realizar este procedimiento se obtiene los parámetros de todo el arreglo, en la Figura E.5 se presenta los parámetros del elemento 2 del arreglo 1x3 con elementos rectangulares sin línea de alimentación y los parámetros del arreglo completo para que se pueda visualizar la comparación con mayor detalle.

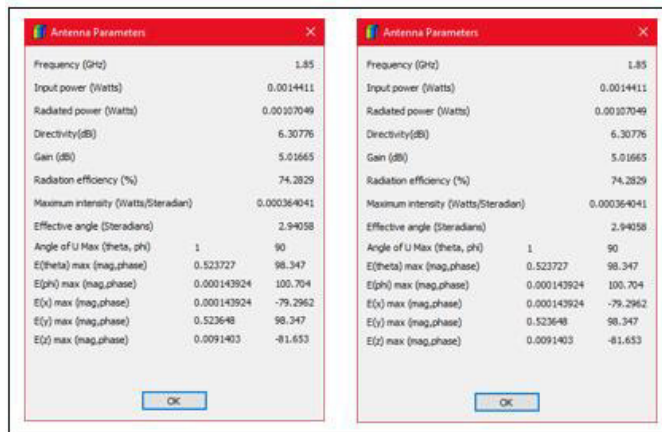


Figura E.5. Parámetros de un elemento (2) del arreglo 1x3 y del arreglo completo con elementos rectangulares sin línea de alimentación.

Este procedimiento para obtener los parámetros totales del arreglo fue realizado con todas las geometrías estudiadas en el proyecto de titulación.

ANEXO F

Se adjunta el datasheet de la placa de cobre FR4.



FR4 Data Sheet :-

<u>Test/Specification</u>	<u>FR4 Laminate Typical Values</u>
Thermal Stress, Solder bath 288 deg. C	>60
Dimensional Stability, E-2/150	<0.04% Warp/fill <1.00% Bow/Twist
Flammability, Classification UL94	V0
Water Absorption E-1/105	0.10%
Peel Strength After Thermal Stress	11 lb./in After 10s/288 Deg. C
Flexural Strength	100,000 lbf/in ² Lengthwise 75,000 lbf/in ² Crosswise
Resistivity After Damp Heat Volume	10 ^{^8} M ohms cm
Resistivity After Damp Heat Surface	10 ^{^8} M ohms
Dielectric Breakdown. Parallel to laminate	>60KV
Dielectric Constant @ 1MHz	4.7
Dissipation Factor @ 1MHz	0.014
Q-Resonance @ 1 MHz	>75
Q-Resonance @ 50 MHz	>95
Arc Resistance	125 s
Glass Transition Temperature	135 Deg. C
Temperature Index	130 Deg. C
<u>A Few Other Relevant Facts from other Sources</u>	
Specific Gravity	1.8-1.9
Rockwell Hardness (M scale)	110
Coefficient of Thermal Expansion	11 microns/m/Deg.C Lengthwise 15 microns/m/Deg.C Crosswise
Thermal Conductivity	2.2-2.5 cal/h. cm Deg C

ANEXO G

Se adjunta el datasheet de los conectores tipo SMA.



SMA and Reverse Polarity SMA Specifications

Materials		
Connector Part	Material	Finish
Bodles	Brass	Nickel or Gold
	Stainless Steel	Passivated or Gold
Center contact	Male: Brass	Gold
	Female: Beryllium Copper	
Insulator	PTFE	N/A
Crimp ferrule	Annealed Copper	Nickel or Gold

Electrical			
Electrical Data	Detail		
Impedance	50 ohm		
Frequency range	Flexible cable: 0~12.4GHz		
	Semi-rigid cable: 0~18GHz		
Working voltage	RG402 (.141") » 500 volts rms max.		
	RG405 (.085") » 335 volts rms max.		
	RG58, 141, 142, 223/U » 500 volts rms max.		
	RG174, 188, 316/U » 335 volts rms max.		
	RG178, 196/U » 250 volts rms max.		
Insulation resistance	5,000 megaohms min.		
Dielectric withstanding voltage	RG402 (.141") » 1,000 volts rms max.		
	RG405 (.085") » 750 volts rms max.		
	RG58, 141, 142, 223/U » 1,000 volts rms max.		
	RG174, 188, 316/U » 750 volts rms max.		
	RG178, 196/U » 500 volts rms max.		
Contact resistance	Center contact: 3.0 milliohms max.		
	Outer contact: 2.0 milliohms max.		
VSWR: f(GHz)		Straight	Right angle
	RG178/U	1.20+0.025f	1.20+0.03f
	RG174, 316/U	1.15+0.02f	1.15+0.03f
	RG58, 141, 142, 223/U	1.10+0.01f	1.15+0.02f
	RG402 (.141")	1.05+0.005f	1.15+0.15f
RG405 (.085")	1.05+0.005f	1.18+0.15f	
Insertion loss	0.04dB max. x \sqrt{f} GHz (straight)		
	0.06dB max. x \sqrt{f} GHz (right angle)		

Mechanical

Mechanical Data	Detail
Engagement force	60lbs min.
Disengagement force	15 inch-pound
Connector durability	500 cycles min.
Cable retention force	RG58, 141, 142, 223/U » 40lbs min.
	RG174, 188, 316/U » 20lbs min.

Environmental

Environmental Data	Detail
Corrosion (salt spray)	MIL-STD-202 METHOD 101 TEST CONDITION B
Thermal shock	MIL-STD-202 METHOD 107 TEST CONDITION B
Vibration	MIL-STD-202 METHOD 204 TEST CONDITION D
Mechanical shock	MIL-STD-202 METHOD 213 TEST CONDITION I
Temperature Range	-65°C to 165°C

ORDEN DE EMPASTADO