

**CONSTRUCCION DE UNA ANTENA MICROSTRIP CON INCISIONES
MULTIBANDA**

**SANTIAGO ANDRÉS LÓPEZ AYALA
ANDERSON BASILIO PORRAS GARCÍA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA
BUCARAMANGA
AÑO 2014**

**CONSTRUCCION DE UNA ANTENA MICROSTRIP CON INCISIONES
MULTIBANDA**

**SANTIAGO ANDRÉS LÓPEZ AYALA
ANDERSON BASILIO PORRAS GARCÍA**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título
de
Ingeniería Electrónica**

DIRECTOR:

**FABIO ALONSO GUZMÁN SERNA
Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA
BUCARAMANGA
AÑO 2014**

Nota de aprobación.

Firma de jurado

Firma de jurado

Bucaramanga, julio de 2014

A mis padres y a mi hermano porque siempre me han brindado su apoyo incondicional en todos los trayectos de mi vida.

Santiago Andrés López Ayala

Creo que los grandes artífices para estar donde estoy hoy, son Dios, mis padres y mi hermano. Además a mi compañero de tesis Santiago Andrés López Ayala a quien admiro por ser una persona dedica en las labores que realiza.
Por ultimo mis amigos quienes estuvieron apoyándome en todo momento.

Anderson Basilio Porras García

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Nunca los logros que conseguimos son netamente nuestros. Siempre han habido, o existen personas que se esmeran por nosotros. Lo importante siempre es reconocer que sin gente que crea en nosotros, nada de lo que haríamos sería posible.

A Dios por darnos la inteligencia y sabiduría necesaria para afrontar los problemas que se presentaron durante este objetivo.

A la universidad Pontificia Bolivariana por formarnos como profesionales y personas con valores para afrontar los retos de la vida.

Al ingeniero Fabio Alonso Guzmán Serna quien fue nuestro tutor y guía durante el desarrollo de este proyecto.

A todas las personas y familiares quienes sin darse cuenta fueron de gran apoyo para el desarrollo de este objetivo. Gracias

GLOSARIO

Antena: Una antena es un dispositivo cuya misión es difundir y/o recoger ondas radioeléctricas. Las antenas convierten las señales eléctricas en ondas electromagnéticas y viceversa. Para transmitir, transforma voltajes en ondas y para recibir, realiza la acción contraria.

Directiva: La razón de la intensidad radiada en una dirección a la intensidad de radiación promedio en todas las direcciones.

Eficiencia: Es la medida de la pérdida de potencia en una antena.

Frecuencia de operación: Es la frecuencia a la cual la antena irradia la potencia que incide sobre ella excepto de pérdidas.

Ganancia: Representa la relación entre la intensidad de campo que produce una antena en un punto determinado, y la intensidad de campo que produce una antena omnidireccional (llamada isotrópica), en el mismo punto y en las mismas condiciones. Cuanto mayor es la ganancia, mejor es la antena.

Intensidad de radiación: Es la potencia radiada por una antena en dirección dada por unidad de ángulo sólido.

Impedancia: Es la adaptación que supone la máxima transferencia de energía de un elemento a otro circuito eléctrico.

Lóbulos de radiación: Es el área del patrón de radiación rodeada por regiones de baja intensidad de radiación.

Microstrip: Tipo de línea de transmisión eléctrica que pueden ser fabricados utilizando placa de circuito impreso y se utiliza para transmitir señales de microondas.

Patrón de radiación: Es un gráfico o diagrama polar sobre el que se representa la fuerza de los campos electromagnéticos emitidos por una antena.

Permeabilidad: Es la capacidad de un material, de permitirle a un flujo que atraviese sin que se afecte su estructura interna.

Permitividad: Es la constante física que demuestra como el campo eléctrico afecta y se ve afectado el medio.

Tabla de contenido

OBJETIVOS.....	16
OBJETIVO GENERAL	16
1 MARCO TEORICO	17
1.1 Antena	17
1.1.1 Reseña histórica.....	17
1.2 Parámetros de la antena.....	18
1.2.1 Patrón de radiación	18
1.2.2 Lóbulos patrón de radiación	19
1.2.3 Densidad de potencia radiada.....	19
1.2.4 Directividad de la antena.....	20
1.2.5 Ganancia.....	20
1.2.6 Eficiencia.....	21
1.2.7 VSRW	21
1.2.8 Parámetros de dispersión o parámetros S	22
1.2.9 Carta de Smith	24
2 DISEÑO DE UNA ANTENA TIPO PARCHE CON INCISIÓN EN U	25
2.1 Características de la antena microstrip.....	25
2.1.1 Ventajas y desventajas de las antenas microstrip.....	25
2.2 La antena microstrip con incisión en U	26
2.2.1 Antena microstrip con incisión en U para aplicaciones de doble y triple banda.....	26
2.3 Selección del substrato.....	27
2.3.1 RT/Duroid 5880.....	28
2.4 Método de Alimentación	29
2.5 Métodos de análisis	29
2.5.1 Modelo de línea de transmisión	30
2.5.2 Método de los momentos	32
2.6 EM Sonnet.....	33
2.6.1 Parámetros para simular la antena usando el software EM SONNET	33
2.6.2 Visor de campo lejano.....	33

2.7	Acople de impedancias.....	34
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	DESARROLLO DEL PROYECTO	36
3.2	Antena rectangular	36
3.2.1	Etapa de dimensiones iniciales	36
3.2.2	Etapa de optimización	37
3.3	Antena rectangular con incisión en U	38
3.3.1	Etapa de dimensiones iniciales	38
3.3.2	Etapa de optimización	39
3.3.3	Parametrización	39
3.4	Construcción de las antenas.....	44
3.4.1	Análisis de resultados	49
3.4.2	Antena número 1:.....	50
3.4.3	Antena número 2:.....	55
3.4.4	Antena número 3:.....	66
	CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES.....	77

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Patrón de radiación en tres dimensiones.....	18
Figura 2. Lóbulos del patrón de radiación de una antena.....	19
Figura 3. Cuadripolo parámetros S.....	23
Figura 4. Dimensiones antena tipo parche con incisión en U.....	27
Figura 5. Líneas de campo eléctrico de la antena microstrip.....	30
Figura 6. Análisis de antenas por medio del método de los momentos.....	32
Figura 7. Acople de impedancias.....	34
Figura 8. Carta de Smith antena tipo parche rectangular.....	37
Figura 9. Carta de Smith antena rectangular tipo parche con incisión.....	38
Figura 10. Diagrama de flujo diseño antena tipo parche con incisión en U.....	40
Figura 11. Graficas S11 variando el ancho del parche.....	41
Figura 12. Graficas S11 variando el largo del parche.....	41
Figura 13. Graficas S11 variando el largo de la incisión.....	42
Figura 14. Graficas S11 variando el grosor de la incisión.....	42
Figura 15. Graficas S11 variando el ancho del acople de impedancia.....	43
Figura 16. Graficas S11 variando la ubicación de la alimentación.....	43
Figura 17. Antena parche rectangular 6.8GHz.....	45
Figura 18. Antena parche rectangular con incisión en U 7.2-10GHz.....	47
Figura 19. Antena parche rectangular con incisión en U 10-13,4GHz.....	49
Figura 20. Grafica S11 antena 6.8GHz.....	50
Figura 21. VSRW antena 6.8GHz.....	51

Figura 22. Densidad eléctrica antena 6.8GHz.....	51
Figura 23. Patrón de radiación simulado antena 6.8GHz.....	52
Figura 24. Patrón de radiación medido en LAB-VOLT.....	53
Figura 25. Patrón de radiación cartesiano LAB-VOLT antena 6.8GHz.....	54
Figura 26. Patrón de radiación cartesiano simulado antena 6.8GHz.....	54
Figura 27. Grafica S11 antena 7.2-10GHz.....	55
Figura 28. VSRW antena 7.2-10GHz.....	55
Figura 29. Densidad eléctrica antena 7.2-10GHz.....	56
Figura 30. Patrón de radiación medido en LAB-VOLT antena 7.2-10GHz.....	57
Figura 31. Patrón de radiación simulado antena 7.2-10GHz.....	57
Figura 32. Patrón de radiación cartesiano LAB-VOLT antena 7.2-10GHz.....	58
Figura 33. Patrón de radiación cartesiano simulado antena 7.2-10GHz.....	58
Figura 34. %Error antena 7.2-10GHz.....	64
Figura 35. Potencia mitad antena 7.2-10GHz.....	65
Figura 36. Grafica S11 antena 10-13,4GHz.....	66
Figura 37. Grafica VSRW 10-13,4GHz.....	66
Figura 38. Densidad eléctrica antena 10-13,4GHz.....	67
Figura 39. Patrón de radiación cartesiano LAB-VOLT antena 10-13,4GHz.....	68
Figura 40. Patrón de radiación cartesiano simulado antena 10-13,4GHz.....	68
Figura 41. Patrón de radiación medido con LAB-VOLT antena 10-13,4GHz.....	69
Figura 42. Patrón de radiación simulado antena 10-13,4GHz.....	69
Figura 43. % Error antena 10-13,4GHz.....	75
Figura 44. Potencia mitad antena 10-13,4GHz.....	76

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Hechos relevantes de las antenas tipo parche.....	17
Tabla 2. VSRW vs Coeficiente de reflexión vs porcentaje potencia reflejada.....	22
Tabla 3. Características de sustratos.....	28
Tabla 4. Dimensiones de la antena de parametrización.....	39
Tabla 5. Dimensiones antena tipo parche rectangular 6.8GHz.....	44
Tabla 6. Dimensiones antena parche rectangular con incisión en U 7.2-10GHz..	46
Tabla 7. Antena tipo parche rectangular parche con incisión en U 10-13,4GHz..	48
Tabla 8. Datos Antena de 7.2-10GHz.....	59
Tabla 9. Cálculos de datos tabla 8.....	64
Tabla 10. Potencia mitad antena 7.2-10GHz.....	65
Tabla 11. Datos antena 10GHz-13,4GHz.....	70
Tabla 12. Cálculos de datos tabla 10.....	75
Tabla 13. Potencia mitad antena 10-13,4GHz.....	76

RESUMEN GENERAL

TITULO: CONSTRUCCION DE UNA ANTENA MICROSTRIP
CON INCISIONES MULTIBANDA

AUTOR(ES): ANDERSON BASILIO PORRAS GARCIA
SANTIAGO ANDRES LOPEZ AYALA

FACULTAD: Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): Esp. FABIO ALONSO GUZMAN SERNA

RESUMEN

Este proyecto consiste en la construcción de una antena microstrip con incisión en forma de U, partiendo de los cálculos del método de línea de transmisión y luego se realizan los ajustes necesarios para optimizar el rendimiento de la antena mediante el software de Sonnet que realiza su análisis mediante el método de los momentos. Se comparan los resultados del patrón de radiación de la antena diseñada obtenido por el software LVADM_ANT en conjunto con el kit de Lab-Volt y el software EM-SONNET.

PALABRAS CLAVES: Lab-Volt, Sonnet, Patrón de radiación, Método de los momentos.

GENERAL ABSTRACT

TITLE: CONSTRUCTION OF AN ANTENNA WITH INCISIONS
MICROSTRIP MULTIBAND

AUTHOR(S): ANDERSON BASILIO PORRAS GARCIA
SANTIAGO ANDRES LOPEZ AYALA

FACULTY: Electronic Engineering

DIRECTOR: Esp. FABIO ALONSO GUZMAN SERNA

ABSTRACT

This project involves the construction of a microstrip antenna with U-shaped incision, based on the calculations of transmission line method and then adjustments are made to optimize the performance of the antenna using Sonnet software that performs analysis by the method of moments. The results of the radiation pattern of the antenna designed LVADM_ANT obtained by the software in conjunction with the Lab-Volt kit and software are compared EM-SONNET.

KEYWORDS: Lab-Volt, Sonnet, radiation pattern, method of moments.

INTRODUCCION

En este proyecto se darán algunos conceptos generales que ayudaran al lector a comprender la base teórica detrás del análisis de cada uno de los resultados obtenidos, los cuales se puede comprender en el primer capítulo.

En el segundo capítulo se dan las características básicas y las ventajas y desventajas de la antena microstrip con incisión en U la cual tiene el potencial para satisfacer las diferentes necesidades de diseño de la antena de parche, se demostrara que la ranura en U puede mejorar el ancho de banda de impedancia y suprimir las polarizaciones cruzadas. Las antenas de ranura en U también se pueden diseñar para operación de doble y triple banda. También se hace una recopilación de toda la base teórica necesaria para llevar a cabo el desarrollo del proyecto.

Se llevará a cabo el diseño y construcción de una antena rectangular con frecuencia de resonancia de 7 GHz y de dos antenas rectangulares con incisión en U Multibanda que operan en las frecuencias de 7-10GHz y de 10-13GHz las cuales se analizaran en tercer capítulo, basadas en la base teórica recopilada en los capítulos anteriores. Posteriormente se realiza el análisis del acople de impedancias y la comparación del patrón de radiación teórico y simulado de cada una de las antenas con incisión en U. Los resultados obtenidos se comprobaron mediante el software de diseño y análisis de antenas EM-SONNET y el software LVADM_ANT en conjunto con el kit de Lab-Volt, comparando los resultados del patrón de radiación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir una antena microstrip con incisiones Multibanda y analizar su patrón de radiación.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Escoger el método o modelo matemático que permita obtener los datos necesarios para llevar a cabo el diseño de la antena.
- Realizar la construcción física de la antena a partir del diseño realizado con los datos matemáticos obtenidos.
- Realizar la medición experimental de los parámetros de la antena previamente construida.
- Comparar los datos experimentalmente obtenidos con los resultados obtenidos en la etapa de diseño.

1 MARCO TEORICO

1.1 Antena

Es aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas [1] Este dispositivo se encargara de transmitir la energía electromagnética hacia el espacio libre. Las antenas transmisoras transforman voltajes en ondas electromagnéticas, mientras que las antenas receptoras realizan la función inversa [2].

Un tipo de antena importante es la microstrip, conforme la tecnología avanza hacia la comunicación radioeléctrica se avanza también en la miniaturización de los componentes empleados en los dispositivos utilizados [3].

1.1.1 Reseña histórica

Las antenas al pasar de los años han tenido una evolución considerable y muy importante para las telecomunicaciones mundiales. Algunos de estos grandes cambios se presentan a continuación.

Tabla 1. Hechos relevantes de las antenas tipo parche

AÑO	SUCESO
1953	El francés Deschamps da el primer concepto de una antena microstrip [4].
1955	Gutton y Baissinot dan la patente de la antena microstrip [4].
1970	Se desarrolló la primera antena microstrip por Howell y Munson [4].
1995	Biffi Gentili, Piazzesi y Salvador. Analizaron la operación de una antena de parche de doble frecuencia colocando dos ranuras cerca del parche radiante [5].
1998	Kin-Lu Wong adiciona ranuras en los bordes del parche radiante para generar de esta forma una antena compacta de doble frecuencia [6].
2001	Jia-Yi Sze y Kin-Lu Wong desarrollan la antenna tipo parche y le realizan una incisión en forma de U y obtiene un ancho de banda VSWR 1:1.5 [7].
2004	Shafai y Jacob realizan la simulación e investigación experimental de una antena impresa microstrip con ranuras [8].

1.2 Parámetros de la antena

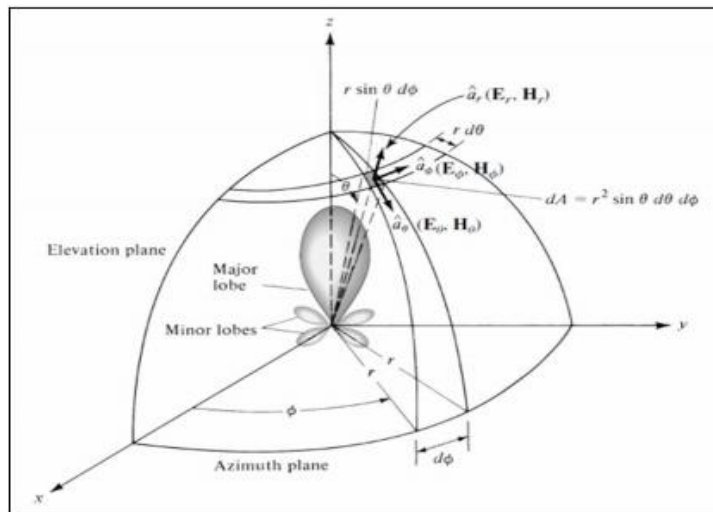
Cada antena posee propiedades las cuales caracterizan a la misma. Estas se encuentran relacionadas con la radiación emitida por la antena. [9]

1.2.1 Patrón de radiación

Es la representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena en función de las coordenadas. [10] El patrón de radiación es determinado con el campo lejano y es representado en función de coordenadas direccionales. La radiación contiene potencia de densidad de flujo, intensidad de radiación, intensidad de campo y directividad de fase. Un rastro de la potencia recibida en un radio constante se llama patrón de potencia y un gráfico de la variación espacial del campo eléctrico a lo largo de un radio constante se denomina amplitud del patrón de campo.

El diagrama se puede representar en un plano cartesiano y en plano polar de dos dimensiones o tres, en el plano polar la antena se grafica en dos planos: plano de elevación y plano azimutal que es un plano horizontal, los cuales se encuentran en función del ángulo Θ $g(\Theta)$ y en función del ángulo ϕ $f(\phi)$ respectivamente. A menudo los principales patrones se describen como E y H. el plano E contiene el campo eléctrico y el plano H contiene el campo magnético [10].

Figura 1. Patrón de radiación en tres dimensiones.

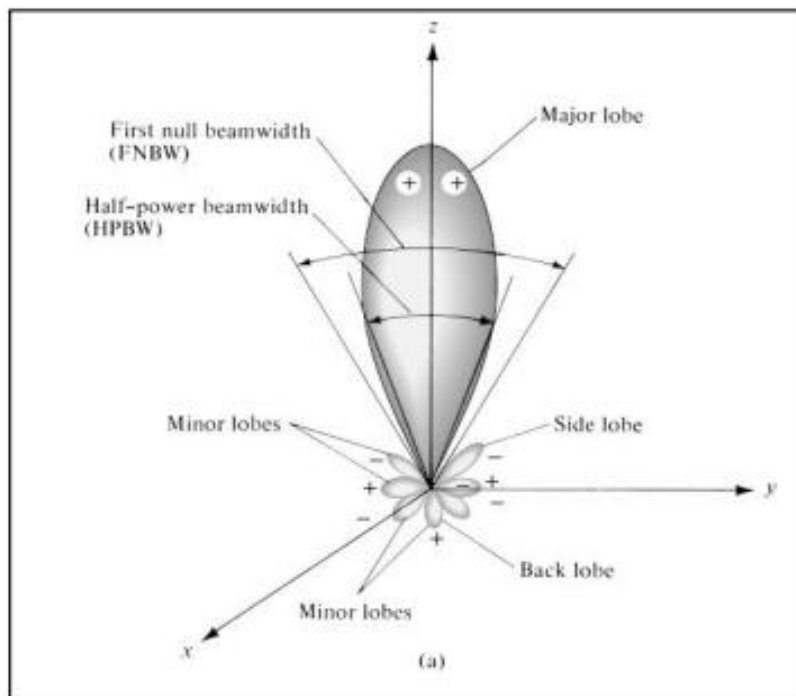


Fuente: Constantine A Balanis., Antenna Theory, Analysis and Design., Tercera Edición, John Wiley y Sons., 2005.

1.2.2 Lóbulos patrón de radiación

Se clasifican en los lóbulos principales, laterales, traseros y de menor importancia. Un lóbulo de radiación es una porción del diagrama de radiación limitada por regiones de una intensidad de radiación relativamente débil. Cuando se presenta un lóbulo principal la antena es directiva y su ancho se conoce como el ancho de haz. Los lóbulos menores representan las radiaciones no deseadas las cuales se deben minimizar [10].

Figura 2. Lóbulos del patrón de radiación de una antena.



Fuente: Constantine A Balanis., Antenna Theory, Analysis and Design. Tercera Edición, John Wiley y Sons., 2005.

1.2.3 Densidad de potencia radiada

Para calcular la potencia de una onda electromagnética se puede recurrir al vector de Poynting, donde la potencia radiada es igual a la integral cerrada de superficie del producto punto entre el vector de Poynting y el diferencial del área [10].

$$P = \oint_S \mathbf{W} \cdot d\mathbf{s} = \oint_S \mathbf{W} \cdot \mathbf{n} da \quad \text{Ecuación (1.1)}$$

P = Potencia total instantánea

\mathbf{n} = Vector unitario de superficie

\mathbf{W} = Vector de Poynting.

da = Área infinitesimal de la superficie cerrada en m^2

1.2.4 Directividad de la antena

[9]Se considera como la razón de la intensidad radiada en una dirección a la intensidad de radiación de una antena. Entre mayor sea la directividad, el haz de radiación será más incisivo. La directividad está dado por:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{Prad} \quad \text{Ecuación (1.2)}$$

U = Intensidad de radiación (W/unidad ángulo solido)

U_0 = Intensidad de radiación de una fuente isotrópica (W/unidad ángulo solido)

$Prad$ = Potencia total radiada (W)

1.2.5 Ganancia

La ganancia de la antena es un parámetro similar a la directividad, su diferencia reside en que la directividad solamente toma en cuenta propiedades direccionales de la antena y por lo tanto esta depende únicamente del patrón de radiación y la ganancia tiene en cuenta las propiedades direccionales de esta como la eficiencia.

Se dice que la ganancia es la razón entre la intensidad de radiación y la intensidad uniforme de radiación que sería obtenida si la potencia aceptada por la antena fuera radiada de manera isotrópica [9]. Está dada por:

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \Phi)}{P_{in}} \quad \text{Ecuación (1.3)}$$

1.2.6 Eficiencia

[9] Este parámetro se utiliza para determinar las pérdidas en la entrada y dentro de la estructura de la antena. La eficiencia en general puede ser escrita de la siguiente manera:

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad \text{Ecuación (1.4)}$$

e_0 = Eficiencia total

e_r = Eficiencia de reflexión: reflexión causada por el desacople entre la línea de transmisión y la antena ($1 - |\Gamma|^2$).

e_c = Eficiencia de conducción: pérdidas I^2R .

e_d = Eficiencia del dieléctrico: pérdidas I^2R .

Γ = Coeficiente de reflexión en los terminales de entrada de la antena.

Generalmente e_c y e_d son muy difíciles de calcular, pero pueden ser halladas experimentalmente.

1.2.7 VSRW

Voltaje standing wave ratio o relación de onda estacionaria es una medida que describe numéricamente qué tan bueno es el acople entre la antena y la línea de transmisión a la que está conectada [11].

El VSRW es una función del coeficiente de reflexión, que describe cuánta potencia es reflejada por la antena. Si el coeficiente de reflexión está dado por Γ , entonces el VSRW está definido por la siguiente fórmula [11].

$$VSRW = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad \text{Ecuación (1.5)}$$

El VSRW es siempre un número real y positivo para las antenas, entre más pequeño sea el VSRW mejor acoplada estará la antena con la línea de transmisión y habrá mucha más potencia entregada a la antena. El valor mínimo de VSRW es 1.

La tabla 2 muestra la relación entre el VSRW, el coeficiente de reflexión y el porcentaje de potencia reflejada.

Tabla 2. VSWR vs Coeficiente de reflexión vs porcentaje potencia reflejada

VSWR	Γ (s_{11})	Potencia reflejada (%)	Potencia reflejada(dB)
1,0	0,000	0,00	-Infinito
1,5	0,200	4,0	-14,0
2,0	0,333	11,1	-9,55
2,5	0,429	18,4	-7,36
3,0	0,500	25,0	-6,00
3,5	0,556	30,9	-5,10
4,0	0,600	36,0	-4,44
5.0	0.667	44.0	-3.52
6.0	0.714	51.0	-2.92
7.0	0.750	56.3	-2.50
8.0	0.778	60.5	-2.18
9.0	0.800	64.0	-1.94
10.0	0.818	66.9	-1.74
15.0	0.875	76.6	-1.16
20.0	0.905	81.9	-0.87
50.0	0.961	92.3	-0.35

Fuente: Antenna-theory. VSWR. [en línea]. 2009. [citado el 5 de julio de 2014].
 Disponible en internet: <http://www.antenna-theory.com/definitions/vswr.php>.

1.2.8 Parámetros de dispersión o parámetros S

Los parámetros de dispersión son los coeficientes de reflexión y transmisión entre la onda incidente y la reflejada. Estos parámetros describen completamente el comportamiento de un dispositivo bajo condiciones lineales en determinado rango de frecuencia. Cada parámetro es caracterizado por magnitud, ganancias o pérdidas en decibeles y fase. A pesar de ser aplicables a cualquier frecuencia, los parámetros S son usados principalmente para redes que operan en radiofrecuencia (RF) y frecuencias de microondas. En general, para redes prácticas, los parámetros S cambian con la frecuencia a la que se miden, razón por la cual se debe especificar la frecuencia para cualquier medición de parámetros S, junto con la impedancia característica o la impedancia del sistema [12].

En el contexto de los parámetros S, dispersión se refiere a la forma en que las corrientes y tensiones que se desplazan en una línea de transmisión son afectadas cuando se encuentran con una discontinuidad debido a la introducción

de una red en una línea de transmisión. Esto equivale a la onda encontrándose con una impedancia diferente de la impedancia característica de la línea [12].

La descripción de los parámetros es la siguiente:

S11: Coeficiente de reflexión a la entrada o coeficiente de reflexión directa.

S21: Coeficiente de transmisión directa o ganancia con la tensión directa.

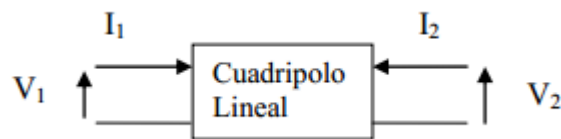
S22: Coeficiente de reflexión a la salida o coeficiente de reflexión inversa.

S12: Coeficiente de transmisión o ganancia con la tensión inversa.

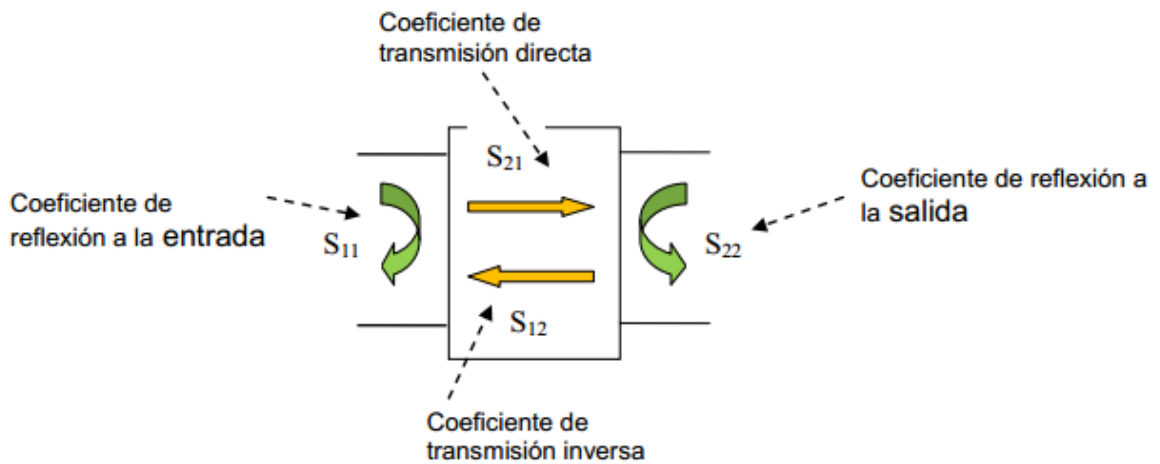
Para que esto sea válido las impedancias en el puerto de entrada y salida deben ser las mismas.

En la figura 3a se muestra el esquema típico del cuadripolo y en la figura 3b el cuadripolo con los parámetros S

Figura 3. Cuadripolo parámetros S



(a)



(b)

Fuente: J. C. Colombo. Medición De Parámetros De Dispersión S. medidas electrónicas II. 2012.

1.2.9 Carta de Smith

La carta de Smith es una buena herramienta para visualizar la impedancia de un sistema de línea de transmisión y antena como función de la frecuencia. La carta de Smith puede ser usada para incrementar el entendimiento de las líneas de transmisión su comportamiento desde un punto de vista de impedancias. Las cartas de Smith también son importantes para calcular la impedancia de acople [13].

La carta de Smith muestra el coeficiente de reflexión complejo en forma polar, por una impedancia arbitraria. El coeficiente de reflexión está completamente determinado por la impedancia Z_L y la impedancia de "referencia" Z_0 . La impedancia Z_0 se puede ver como la impedancia del transmisor, o lo que está tratando de entregar energía a la antena. Por lo tanto, la carta de Smith es un método gráfico de visualización de la impedancia de una antena, que puede ser un solo punto o una serie de puntos para mostrar la impedancia como una función de la frecuencia [13]. El coeficiente de reflexión y la impedancia de carga se pueden hallar a partir de la carta de Smith con las siguientes formulas:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad \text{Ecuación (1.6)}$$

$$Z_L = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} Z_0 \quad \text{Ecuación (1.7)}$$

Donde:

Γ : coeficiente de reflexión.

Z_L : impedancia de carga.

Z_0 : impedancia característica de la línea de transmisión.

2 DISEÑO DE UNA ANTENA TIPO PARCHE CON INCISIÓN EN U

2.1 Características de la antena microstrip

Una antena microstrip es por lo general un diseño de una sola capa que consiste en un parche metálico radiante o un arreglo de parches situado en un lado de un panel de sustrato delgado y no conductor con un plano de tierra metálico situado en el otro lado del panel. El parche metálico se hace normalmente de una hoja delgada de cobre o está chapado de cobre con un metal resistente a la corrosión, como el oro, estaño o níquel. Cada parche puede ser diseñado con una variedad de formas, siendo las formas más populares rectangular o circular. El panel de sustrato tiene generalmente un espesor entre 0,01-0,05 longitudes de onda en espacio libre (λ_0). Se utiliza principalmente para proporcionar el espacio apropiado y soporte mecánico entre el parche y el plano de tierra. También se utiliza a menudo con material de alta constante dieléctrica para cargar el parche y reducir su tamaño. [10]

2.1.1 Ventajas y desventajas de las antenas microstrip

Como se describe en [14] las antenas microstrip poseen varias ventajas comparadas con las antenas de microondas convencionales tales como:

- Son delgadas, de bajo volumen y configuración de perfil delgado.
- Bajo costo de fabricación, se presta fácilmente a la producción en masa.
- Polarización circular y lineal se puede conseguir con una alimentación simple.
- Antenas de doble frecuencia y doble polarización se pueden construir fácilmente.
- Puede ser integrada fácilmente con circuitos integrados de microondas.
- Líneas de alimentación y redes de adaptación pueden ser fabricadas simultáneamente con la estructura de la antena.

Las antenas microstrip también poseen limitaciones con respecto a las antenas de microondas convencionales. Algunas de estas son:

- Banda angosta y problemas de tolerancia asociados.
- Baja ganancia de alrededor de 6db.
- Gran pérdida óhmica en las estructuras de alimentación de los arreglos.

- Estructuras de alimentación complejas son requeridas para aplicación de alto rendimiento.
- Dificultad para obtener pureza en la polarización.
- Baja capacidad para manejar potencia (aproximadamente 100w).
- Excitación de ondas superficiales.

Algunas de estas limitaciones pueden ser atenuadas siguiendo algunas pautas específicas al momento de diseñar una antena.

2.2 La antena microstrip con incisión en U

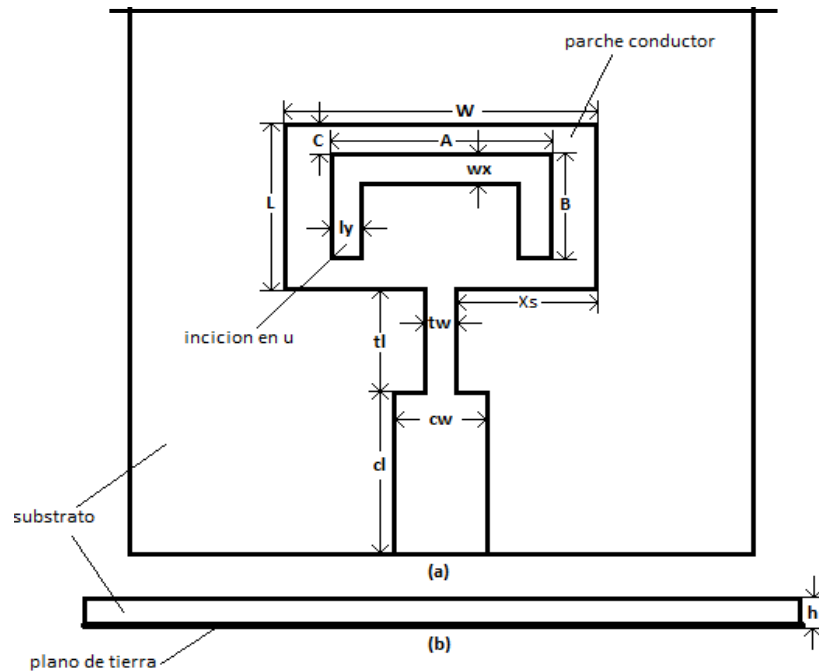
La antena tipo parche rectangular con incisión en U fue introducida en 1995 por Huynh y Lee, como una antena de una sola capa y polarización lineal de banda ancha.

Recientemente se ha vuelto a despertar el interés en la investigación de este tipo de antenas ya que estudios recientes han demostrado que las antenas con incisión en U pueden ser diseñadas no solo para aplicaciones de banda ancha sino que también para aplicaciones de doble y triple banda y además se puede operar con polarización circular [15][24][25].

2.2.1 Antena microstrip con incisión en U para aplicaciones de doble y triple banda

La mayoría de los estudios realizados a la antena microstrip con incisión en U se concentraron en su capacidad de banda ancha. Sin embargo como la incisión en U introduce otra resonancia, se puede obtener una antena de doble banda eligiendo de forma apropiada sus parámetros. Para lograr una operación en triple banda se deben poner dos incisiones en U en el parche [15].

Figura 4. Dimensiones antena tipo parche con incisión en U



2.3 Selección del substrato

El substrato está compuesto de material dieléctrico que afecta el rendimiento eléctrico de la antena y de la línea de transmisión. Como resultado la permitividad del substrato y el grosor del mismo son parámetros críticos en el diseño de las antenas microstrip. Se puede asumir que una buena elección de estos dos parámetros puede dar como resultado un mejor rendimiento en la antena [16].

La dificultad en la selección del substrato yace en la necesidad de satisfacer de forma simultánea los requerimientos eléctricos y mecánicos de la antena. Por esto hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Variaciones de la constante dieléctrica y la pérdida tangencial con respecto a la temperatura.
- Rango de temperatura de homogeneidad e isotropía.
- Variaciones de la estabilidad dimensional con la temperatura, la humedad y el tiempo.
- Resistencia a los impactos.
- Resistencia a los químicos.
- Resistencia estructural.

- Flexibilidad.

En la tabla 3 se enlistan las categorías de sustratos existentes y algunos ejemplos de cada uno de ellos.

2.3.1 RT/Duroid 5880

El sustrato RT/Duroid 5880 de microfibras de vidrio con compuestos de PTFE es diseñado para diseños exigentes de líneas microstrip y circuitos microstrip [17].

Las microfibras de vidrio de refuerzo están orientadas de forma aleatoria para maximizar los beneficios de refuerzo de fibras en las direcciones más valiosas para productores de circuitos y la aplicación final de los mismos [17].

La constante dieléctrica de este sustrato es constante en todo el rango de frecuencias.

Tabla 3. Características de sustratos

Substrate	Dielectric Constant	Loss Tangent	Dimensional Stability	Chemical Resistance	Temperature Range [degrees]	Relative Cost
<i>Ceramic Substrates</i>						
Alumina	9.8	0.0004	Excellent	Excellent	to +1600	Medium to high
Sapphire	9.4, 1.6	0.0001	Excellent	Excellent	-24 to +370	Very high
<i>Semiconductor Substrates</i>						
GaAs	13.0	0.0006	Excellent	Excellent	-55 to +260	Very High
Silicon	11.9	0.0004	Excellent	Excellent	-55 to +260	High
<i>Ferrimagnetic Substrates</i>						
Ferrite	9.0 to 16.0	0.001	Excellent	Excellent	-24 to +370	Medium
<i>Synthetic Substrates</i>						
PTFE (Teflon)	2.1	0.0004	Poor	Excellent	-27 to +260	Medium
Polypropylene	2.18	0.0003	Poor	Good	-27 to +200	Medium
<i>Composite Material Substrates</i>						
PTFE-glass, woven web	2.17 to 2.55	0.0009 – 0.0022	Excellent	Excellent	-27 to +260	Medium
PTFE-glass, random fiber	2.17 to 2.35	0.0009 – 0.0015	Fair	Excellent	-27 to +260	Medium to high

Fuente: TONG, Hong. System study and design of broad-band u-slot microstrip patch antennas for aperstructures and opportunistic arrays. Trabajo de grado (opta título de master). Monterrey, California. Naval Posgraduate School. 2005. 88p.

2.4 Método de Alimentación

Línea microstrip: Se trata de una línea conductora de ancho generalmente mucho menor que el del parche. Como ventajas podemos destacar su facilidad para fabricarla y modelarla. Al aumentar el espesor del sustrato se incrementan las ondas de superficie y las radiaciones espurias acotando el ancho de banda entre un 2% y un 5%. El acople entre el parche y la línea produce niveles altos de radiación en polarización cruzada y campos inducidos. La falta de simetría de la antena hace que se generen modos de orden mayor y que aumente el nivel de radiación en polarización cruzada [18].

2.5 Métodos de análisis

Los métodos de análisis son importantes porque ayudan al diseñador a predecir las características de radiación de la antena tales como patrón de radiación, ganancia y polarización, igualmente las características de campo cercano como la impedancia de entrada, la impedancia de banda ancha, acople mutuo y la eficiencia de la antena.

En la referencia [14] se incluyen algunos beneficios de usar los métodos de análisis, y son los siguientes.

- Reduce el costo de diseño de las antenas.
- Se pueden comprobar las ventajas y limitaciones de la antena al estudiar sus parámetros.
- El análisis puede proveer el entendimiento de los principios de operación que pueden ser útiles para nuevos diseños, para modificar diseños existentes, y para el desarrollo de nuevas configuraciones de antenas.

Existen muchas técnicas diferentes de análisis que han sido desarrolladas para analizar las antenas microstrip, pero las técnicas más populares se dividen en cinco grupos que son [10]:

- Modelo de línea de transmisión.
- Modelos de cavidades.
- Método de los momentos.
- Método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo.
- Método de las diferencias finitas.

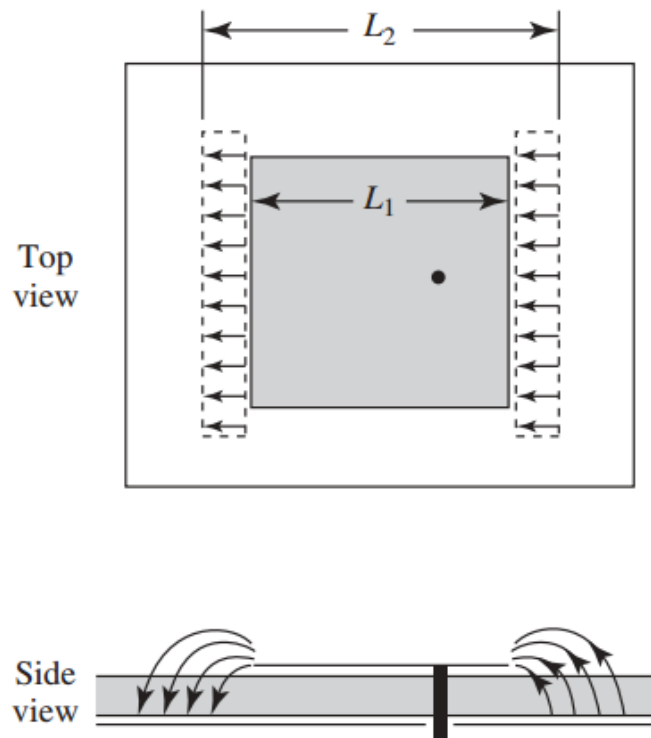
Para el desarrollo de este proyecto se utilizará el método de línea de transmisión y el método de los momentos, por esta razón se hará especial énfasis en estos dos métodos.

2.5.1 Modelo de línea de transmisión

El modelo de línea de transmisión es el de menor precisión en los resultados. Básicamente el modelo de línea de transmisión representa la antena como dos ranuras separadas por una línea de transmisión de baja impedancia [19].

En una antena microstrip la distribución de los campos presenta un efecto conocido como fringing effect los cuales generan líneas de radiación como se puede observar en la figura 5.

Figura 5. Líneas de campo eléctrico de la antena microstrip.



Fuente: A. BALANIS, Constantine. MODERN ANTENNA HANDBOOK. John Wiley and Sons. 2008. 1704p.

El fringing effect es función de las dimensiones del parche y del grosor del sustrato. Este efecto genera una longitud efectiva un poco mayor que la longitud física. Como se puede observar en la figura 5 el fringing effect hace que la radiación de la antena se presente en dos medios dieléctricos diferentes: el aire y el sustrato escogido. Lo que genera que se tengan dos permitividades eléctricas distintas y la distribución de campo sea diferente de un medio a otro [19].

El modelo de línea de transmisión combina los dos medios (substrato y aire) para formar una permitividad eléctrica efectiva y de esta manera asumir que el parche se encuentra inmerso dentro de un solo medio homogéneo con permitividad eléctrica constante en toda la superficie [19].

La permitividad eléctrica efectiva está dada por:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{12h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

Donde:

ϵ_{eff} : constante dieléctrica efectiva.
 ϵ_r : constante dieléctrica del sustrato.
 W : ancho del parche.
 h : grosor del sustrato.

Como se dijo anteriormente el fringing effect hace que la longitud física de la antena aumente un poco y a esta nueva longitud se le llama longitud efectiva. La longitud efectiva de la antena está dada por:

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

Dónde:

L_{eff} : longitud efectiva.
 L : longitud del parche.
 $2\Delta L$: extensión de la longitud del parche.

$$2\Delta B = 0.824T \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.262 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.813 \right)} \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

El ancho de la antena está dado por:

$$A = \frac{c}{2f_{cen} \sqrt{\epsilon_r + 1}} \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

La longitud de la antena está dada por:

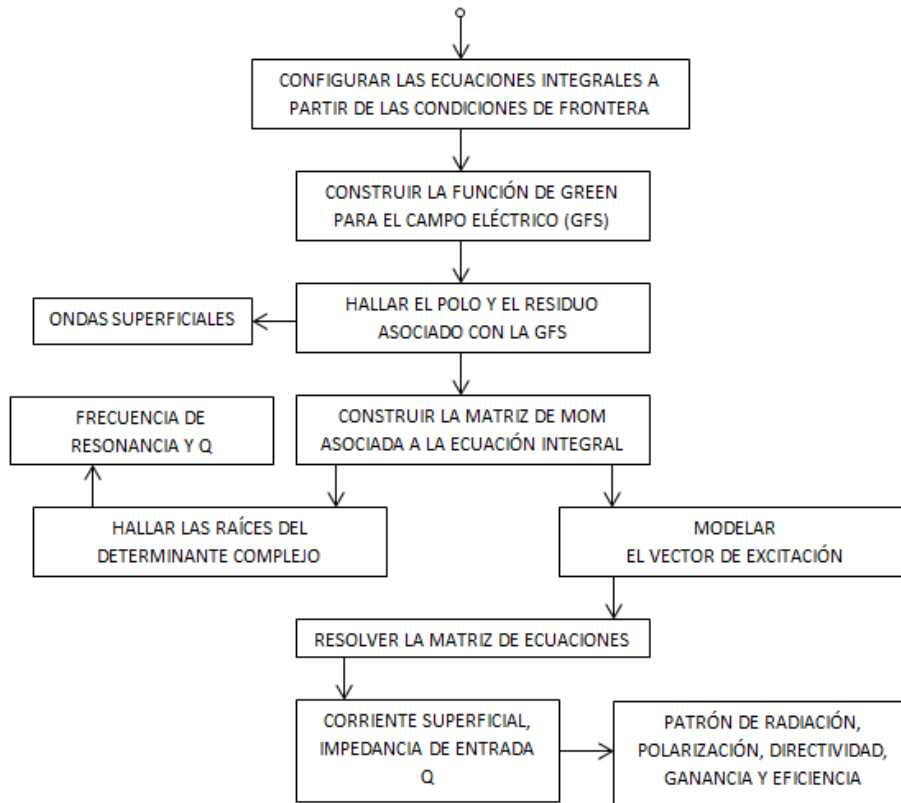
$$B = \frac{c}{2f_{cen} \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta B \quad \text{Ecuación (2.5)}$$

2.5.2 Método de los momentos

Se usa la función exacta de Green para la naturaleza dieléctrica mezclada de la antena microstrip. La función de Green se emplea en la ecuación integral del campo eléctrico para satisfacer las condiciones de frontera en la metalización del parche. La ecuación integral resultante es discretizada en un grupo de ecuaciones lineales a través del método de los momentos para de esta manera generar una ecuación matricial. La solución de la ecuación matricial proporciona la distribución de corriente en la metalización del parche. Las características de campo lejano y campo cercano de la antena se obtienen a través de la distribución de corriente y de la función de Green [10].

En la figura 6 se describen los pasos llevados a cabo para realizar el análisis por el método de los momentos.

Figura 6. Análisis de antenas por medio del método de los momentos



Fuente: RAMESH Gar. [Et al]. Microstrip Antenna Design Handbook. Artech House. 2001. 845p.

2.6 EM Sonnet

EM es un analizador electromagnético completo; todos los efectos electromagnéticos como la dispersión y las pérdidas están incluidos. Solo hay dos aproximaciones usadas por EM. La primera es la precisión numérica inherente a los computadores y la segunda es que EM subdivide la metalización en pequeñas subsecciones [20].

EM realiza el análisis electromagnético de un microstrip, stripline, coplanar waveguide o cualquier otro circuito plano por medio de la solución de la distribución de corriente en la metalización del circuito a través del método de los momentos [20].

EM evalúa el campo eléctrico en todos los lados debido a la corriente en una sola subsección. EM repite el cálculo para todas las subsecciones en el circuito, una a la vez. Al hacer esto EM calcula de forma efectiva el acople entre cada una de las subsecciones posibles en el circuito [20].

2.6.1 Parámetros para simular la antena usando el software EM SONNET

Si el circuito que se desea construir no se encuentra dentro de una caja, el circuito se debe poner alejado de la caja. La regla general para determinar la distancia a la que debe estar el circuito de la caja en estos casos es por lo menos 3 o 5 veces el grosor del sustrato (mínimo 3 longitudes de onda de ser posible).

Para la simulación de antenas en Sonnet la capa de aire debe de ser de media longitud de onda.

La medida de las celdas de análisis de Sonnet lite debe estar entre el 1 y 5 % de la longitud de onda para no sobrepasar el límite de memoria del programa.

Tener precaución para que las medidas de la antena coincidan con la cuadrícula de análisis del programa ya que esto puede alterar un poco las dimensiones de la antena.

Se debe cambiar la tapa de arriba y la de debajo de la caja por “espacio libre” y cobre respectivamente.

2.6.2 Visor de campo lejano

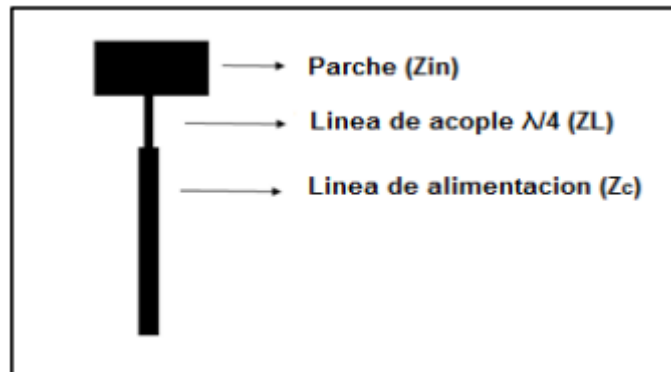
El analizador de campo lejano de EM Sonnet realiza el análisis del patrón de radiación a partir de la densidad eléctrica presente en la superficie metálica del

parche en las frecuencias deseadas. La información del patrón de radiación se presenta en tres formas diferentes: cartesiana, polar y diagrama superficial [11].

2.7 Acople de impedancias

Para adaptar la impedancia de la línea microstrip (Z_c), y la impedancia del parche (Z_{in}) se hace necesario emplear una segunda línea de longitud $\lambda/4$ tipo shebyshev. El empleo de esta línea es una técnica para lograr acoplar una impedancia de entrada (fuente) puramente resistiva a una impedancia real de salida (carga) [18]. En la figura 7 se puede observar el acople.

Figura 7. Acople de impedancias



Fuente: SOPHOCLES, Orfanidis. Electromagnetic Waves and Antennas, Rutgers University. 1st ed. 2004. 819p.

La impedancia característica de la línea de acople se conoce como Z_l y está dada por [18]:

$$Z_l = \sqrt{Z_c Z_{in}} \quad \text{Ecuación (2.6)}$$

El modelo usado para calcular el ancho y el largo de la línea microstrip es el modelo de wheeler [22].

$$Wl = \frac{4h}{\frac{e^A}{2} - e^{-A}} \quad ; \quad \frac{W}{h} \leq 2 \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

$$Wl = h \left[\frac{\varepsilon_r - 1}{\pi * \varepsilon_r} \left(\log(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r} \right) + \frac{2}{\pi} (B - 1 - \log(2B - 1)) \right]; \quad \frac{W}{h} \geq 2$$

Ecuación (2.8)

$$A = \sqrt{(2\varepsilon_r) + 1} * \frac{\pi Zm}{\eta} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} * \frac{0.23 + 0.11}{\varepsilon_r} \quad \text{Ecuación (2.9)}$$

$$B = \frac{\pi * \eta}{2 * Zm * \sqrt{\varepsilon_r}} \quad \text{Ecuación (2.10)}$$

3 METODOLOGIA

3.1 DESARROLLO DEL PROYECTO

Para el diseño y construcción de la antena tipo parche rectangular con incisión en U, se manejó el substrato dieléctrico RT/Duroid 5880. El diseño de la antena se dividió en dos etapas importantes las cuales son:

- Etapa de dimensiones iniciales: en esta etapa se hallan las dimensiones iniciales de la antena haciendo uso del modelo de línea de transmisión y para hallar las dimensiones de la línea de alimentación microstrip y del acople de sus respectivas impedancias se usa el modelo de wheeler.
- Etapa de optimización: En la etapa de optimización se introdujeron los datos obtenidos en la etapa de dimensiones iniciales al software de simulación EM Sonnet para realizar un proceso de optimización que permita llegar a las condiciones de operación deseadas y a su vez obtener el patrón de radiación.

3.2 Antena rectangular

3.2.1 Etapa de dimensiones iniciales

Dimensiones: como se mencionó en la introducción del desarrollo del proyecto, se implementó el método de línea de transmisión para hallar las dimensiones iniciales de la antena.

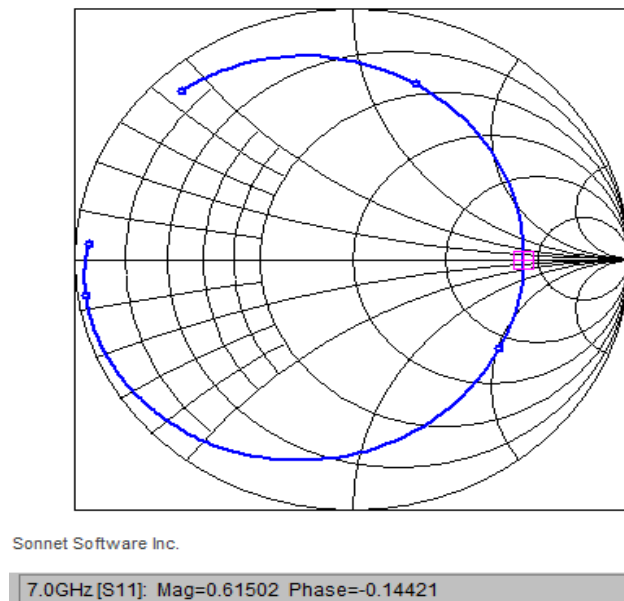
Impedancia de entrada: la impedancia de entrada aproximada de la antena se obtiene por medio del software de simulación EM Sonnet al colocar el puerto de alimentación de 50 ohm en el borde del parche rectangular diseñado en el punto anterior y luego con el análisis de la carta de Smith generada se obtiene el coeficiente de reflexión como se observa en la figura 8. Reemplazando el coeficiente de reflexión en la ecuación 1.7 se obtiene la resistencia de entrada.

Línea de alimentación: la línea de alimentación posee una impedancia Z_c de 50 ohmios ya que el conector para coaxial requiere de este valor de impedancia. El largo de la línea es un valor escogido por el diseñador ya que este no va a influir

en el patrón de radiación de la antena, se utilizó la ecuación 2.7 o 2.8 dependiendo de la condición (W/h).

Línea de acople: utilizando la ecuación 2.6 se calcula la impedancia de acople. Una vez se ha obtenido la impedancia de acople se utiliza la ecuación 2.7 o 2.8, dependiendo de la condición, para hallar su ancho. La longitud de la línea de acople es de $\lambda/4$, siendo λ la longitud de onda en el sustrato.

Figura 8. Carta de Smith antena tipo parche rectangular.



3.2.2 Etapa de optimización

La optimización de la antena rectangular generalmente se resume a dos pasos que son:

- Mejoramiento del acople de impedancias entre la línea de alimentación y la antena variando el ancho de la línea de acople.
- Corregir la desviación presente en la frecuencia de resonancia modificando la longitud del parche como se muestra en la referencia [23].

$$L_{new} = \frac{F_{simulada}}{F_{deseada}} * L$$

Donde:

L_{new} : longitud optimizada

L : longitud inicial

$F_{simulada}$: frecuencia de resonancia obtenida en la simulación

$F_{deseada}$: frecuencia deseada de operación

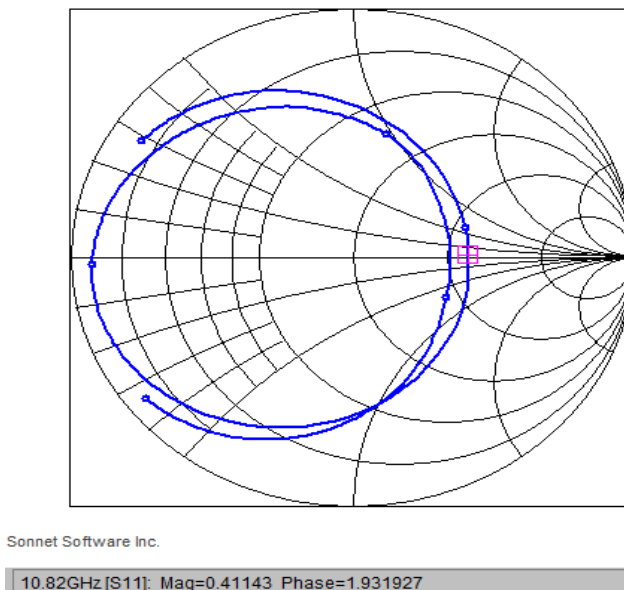
3.3 Antena rectangular con incisión en U

3.3.1 Etapa de dimensiones iniciales

Dimensiones: Al igual que la antena rectangular se usa el método de línea de transmisión para hallar las dimensiones iniciales del parche rectangular. Las dimensiones de la incisión en U se hallan teniendo en cuenta que estas no deben ser mayores a las dimensiones del parche rectangular y en base a la experiencia adquirida en diseños previamente construidos con el simulador EM SONNET, ya que este tipo de geometría no dispone de fórmulas analíticas.

Impedancia de entrada: La impedancia de entrada se halla de la misma manera que se halló en la antena rectangular, pero en este caso en la carta de Smith aparecen dos lazos ya que esta antena es de doble banda como se observa en la figura 9 en este caso se toma el coeficiente de reflexión de cualquiera de los dos lazos ya que lo que se requiere es obtener valores aproximados.

Figura 9. Carta de Smith antena rectangular tipo parche con incisión



Línea de alimentación: Para hallar las dimensiones de la línea de alimentación se sigue el mismo procedimiento que en la antena rectangular.

Línea de acople: Se utiliza el mismo proceso que en la antena de parche rectangular normal.

3.3.2 Etapa de optimización

Con los datos obtenidos en la etapa de diseño, se genera un modelo inicial de la antena microstrip con incisión en U, el cual se introduce en el software de simulación para de esta manera alterar las dimensiones de la antena hasta obtener los parámetros de operación deseados.

3.3.3 Parametrización

Se realizaron una serie de modificaciones controladas a la geometría de una antena microstrip con incisión en U para de esta forma obtener una serie de parámetros empíricos que nos permitan posteriormente reducir las iteraciones de sintonización necesarias para que la antena opere conforme a las especificaciones de diseño.

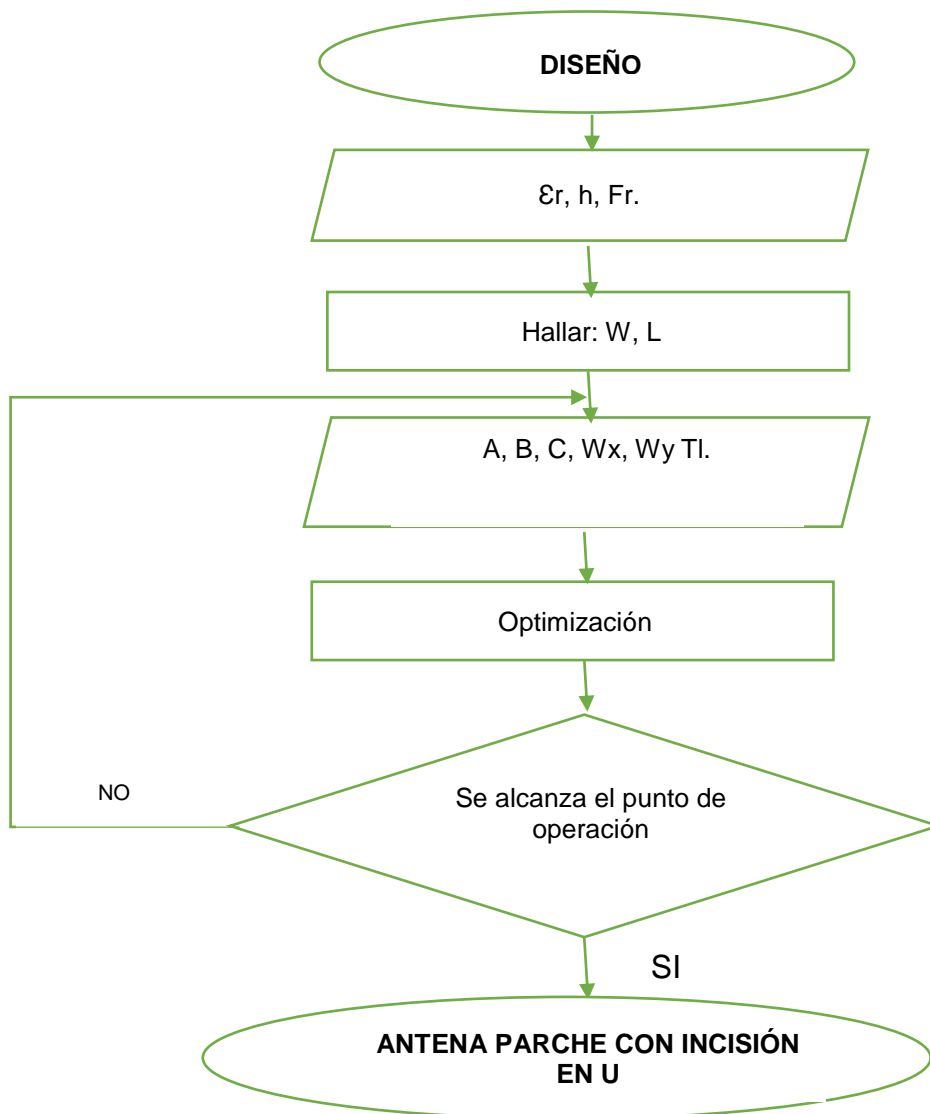
Las dimensiones iniciales de la antena usada para hallar estos parámetros son:

Tabla 4. Dimensiones de la antena de parametrización

Dimensiones de la antena microstrip con incisión en U	[mm]
Permitividad eléctrica del sustrato [ϵ_r]	2.2
Grosor del sustrato [h]	0.79
Ancho del parche [W]	17
Longitud del parche [L]	14
Ancho de la incisión en U [A]	11
Longitud de la incisión en U [B]	8

Separación de la incisión y el borde superior del parche [C]	3
Grosor de la incisión [wx = ly]	1
Ancho del transformador de lambda/4 [tw]	1
Longitud del transformador lambda/4 [tl]	11
Posición de la alimentación con respecto a la esquina del parche [Xs]	8

Figura 10. Diagrama de flujo diseño antenna tipo parche con incisión en U.



La repuesta de las variaciones en las dimensiones da la antena se van a observar en la gráfica s11 de la figura 11 a la figura 16.

Efecto de variar el ancho del parche [W]

Figura 11. Gráficas S11 variando el ancho del parche.

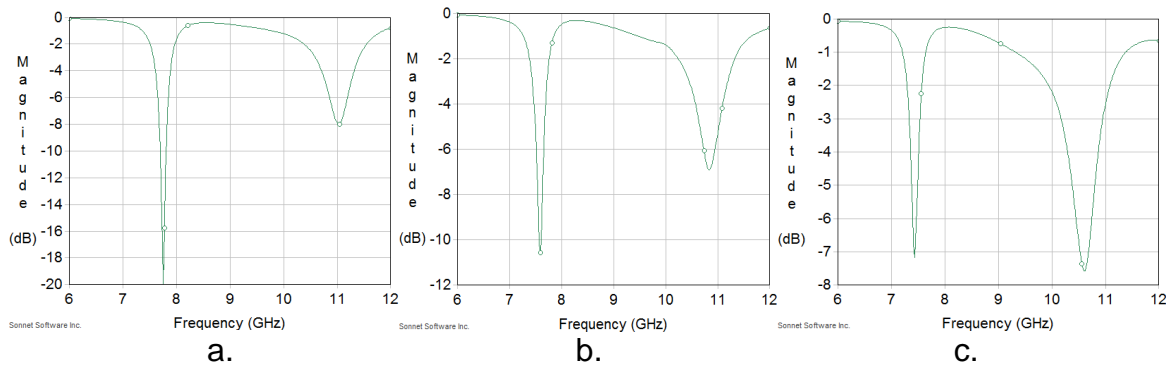


Figura 11. Efecto de variar el largo del parche [L]
(a)W=16mm (b)W=17mm (c)W=18mm

Efecto de variar el largo del parche [L]

Figura 12. Gráficas S11 variando el largo del parche.

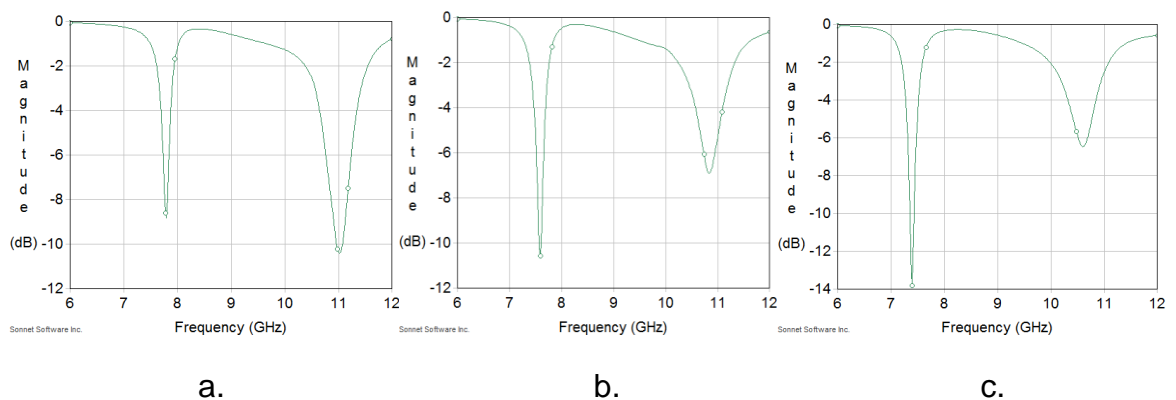


Figura 12. Efecto de variar el largo del parche [L]
(a)L=13mm (b)L=14mm (c)L=15mm

Efecto de variar el largo de la incisión [B]

Figura 13. Gráficas S11 variando el largo de la incisión.

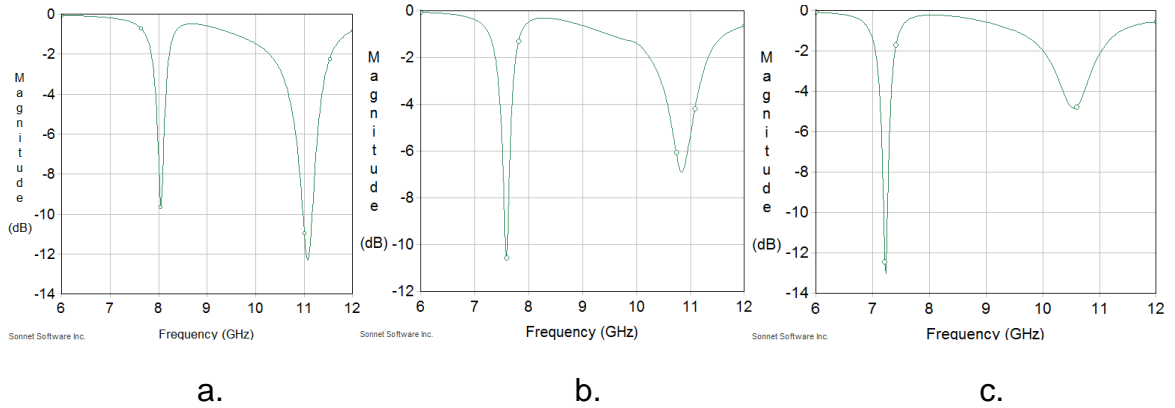


Figura 13. Efecto de variar el largo de la incisión [c]
(a)B=7mm (b)B=8mm (c)B=9mm

Efecto de variar el grosor de la incisión [wx=ly]

Figura 14. Gráficas S11 variando el grosor de la incisión.

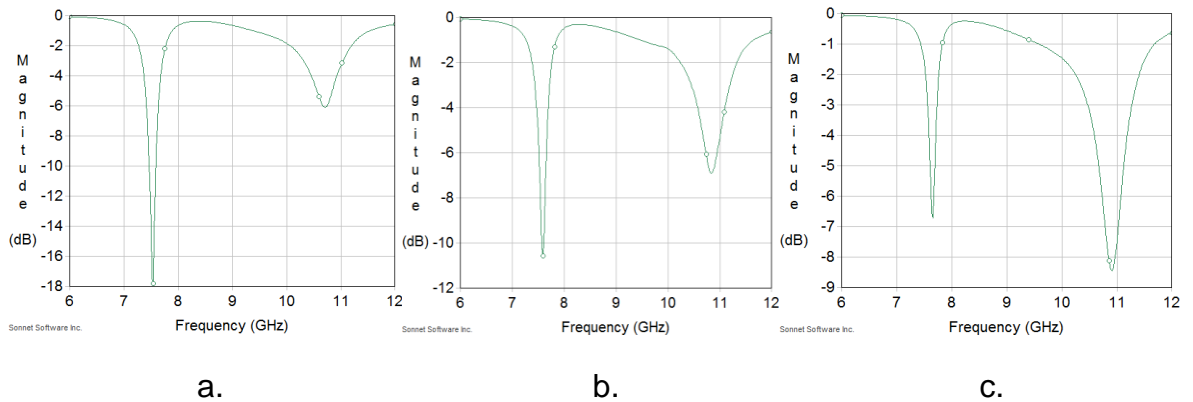


Figura 14. Efecto de variar el grosor de la incisión [wx=ly]
(a)wx=ly=0.5mm (b)wx=ly=1mm (c)wx=ly=1.5mm

Efecto de variar el grosor del transformador de $\lambda/4$

Figura 15. Gráficas S11 variando el ancho del acople de impedancia.

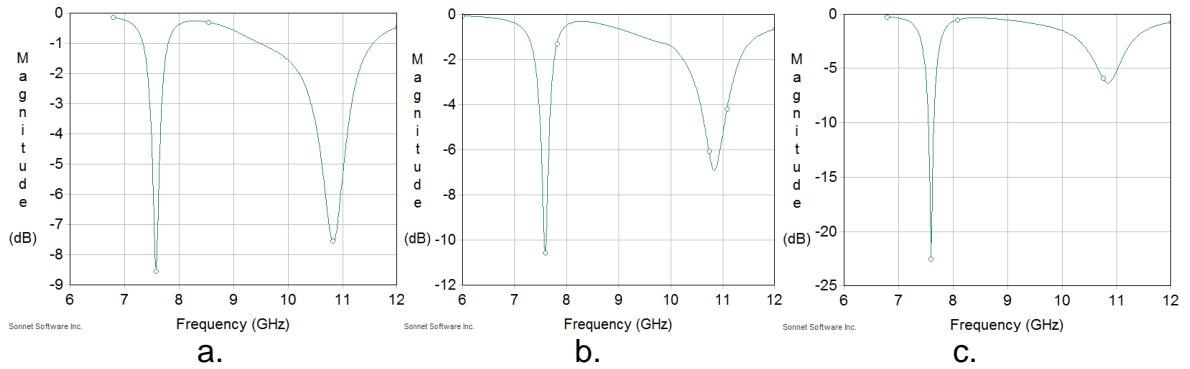


Figura 15. Efecto de variar el grosor del transformador de $\lambda/4$ [tw]
(a)tw=0.6mm (b)tw=1mm(c) tw=1.4mm

Efecto de variar la ubicación de la línea de alimentación [Xs]

Figura 16. Gráficas S11 variando la ubicación de la alimentación.

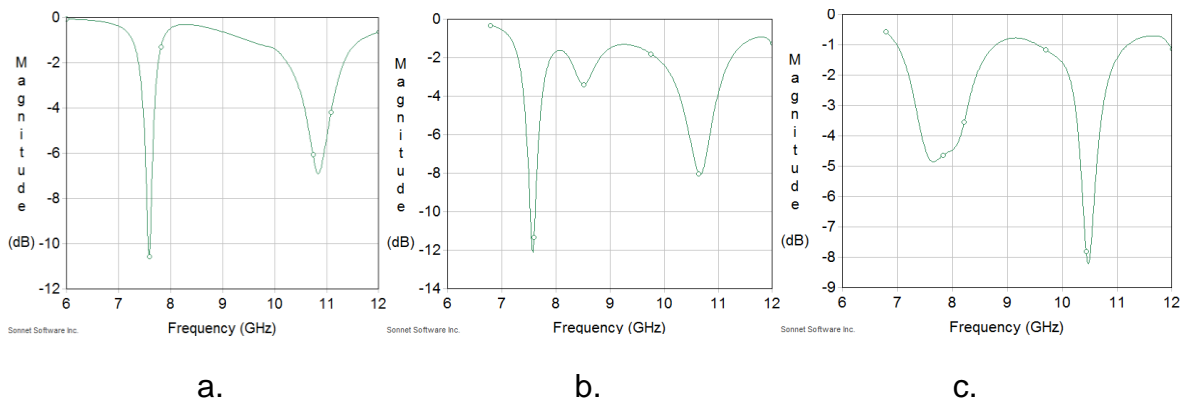


Figura 16. Efecto de variar la ubicación de la línea de alimentación [Xs]
(a)Xs=8mm (b)Xs=4mm (c)Xs=0mm

3.3.3.1 Análisis parametrización.

Se puede observar en las simulaciones que los efectos generados al variar el ancho y el largo tanto del parche como de la incisión en U son similares en cuanto a desplazamiento de las frecuencias de resonancia se refiere, pero se pueden observar marcadas variaciones en los coeficientes de reflexión de las frecuencias de resonancia entre un caso y otro.

Se obtuvo que la antena microstrip con incisión en U y alimentada con línea microstrip solo permite un pequeño margen de optimización de la separación existente entre las dos frecuencias de resonancia, y este efecto solo se obtiene al cambiar la ubicación de la línea de alimentación.

Al modificar el grosor del transformador de $\lambda/4$ se muestra una mejoría en una de las frecuencias de resonancia de la antena pero esto a su vez deteriora la otra frecuencia de resonancia, por esto al modificar el grosor del transformador se debe buscar el equilibrio entre las dos bandas.

3.4 Construcción de las antenas

Basado en la parametrización, se calculan todas las características de las antenas a probar y así proceder a construirlas.

Antena número 1: la antena número 1 es una antena rectangular y sus características de construcción se observan en la tabla 5.

Tabla 5. Dimensiones antena tipo parche rectangular 6.8GHz.

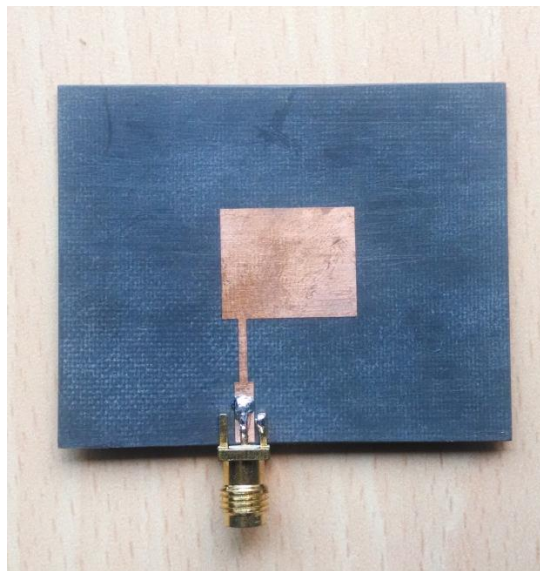
Características	Valor
Frecuencia de trabajo [fr]	6.8Ghz
Permitividad eléctrica del substrato [ϵ_r]	2.2
Impedancia de alimentación [Z_c]	50 Ω
Impedancia de entrada [Z_{in}]	217.7 Ω
Impedancia de acople [Z_I]	104.33 Ω

Grosor del sustrato [h]	0.79mm
Ancho del parche [W]	17mm
Longitud del parche [L]	14mm
Ancho del transformador de $\lambda/4$ [tw]	1mm
Longitud del transformador $\lambda/4$ [tl]	8mm
Ancho de la línea de alimentación [cw]	2.4mm
Longitud de la línea de alimentación [cl]	14mm
Posición de la alimentación con respecto a la esquina del parche [Xs]	3mm

El sustrato dieléctrico para la construcción de la antena número 1 es un RT/Duroid 5880.

Con los datos de la tabla 5 se construyó la antena número 1. La cual se observa en la figura 17.

Figura 17. Antena tipo parche rectangular 6.8GHz.



Antena número 2: la antena número 2 es un parche rectangular con incisión en U. Este tipo de antenas es versátil ya que se puede lograr la operación Multibanda o de banda ancha. La antena 2 es de doble banda y sus características de construcción se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Dimensiones antena parche rectangular con incisión en U 7.2-10GHz.

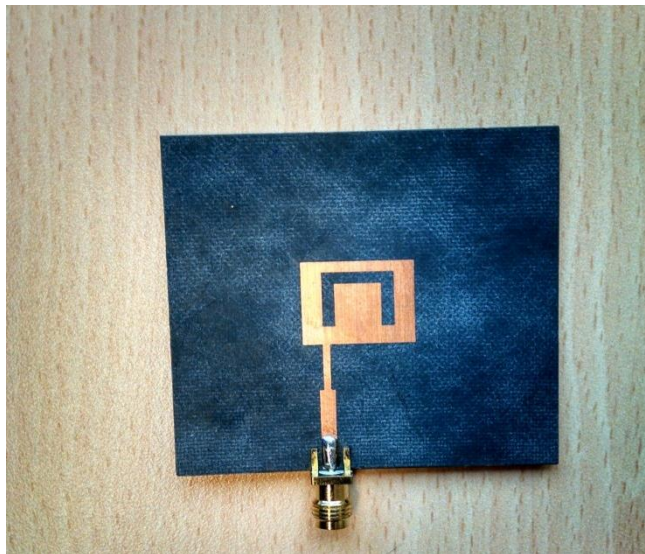
Características	Valor
Frecuencia de trabajo banda 1 [fr1]	7.2Ghz
Frecuencia de trabajo banda 2 [fr2]	10Ghz
Permitividad eléctrica del substrato [ϵ_r]	2.2
Impedancia de alimentación [Z_c]	50 Ω
Impedancia de entrada [Z_{in}]	180 Ω
Impedancia de acople [Z_I]	94.86 Ω
Grosor del substrato [h]	0.79mm
Ancho del parche [W]	17mm
Longitud del parche [L]	14mm
Ancho de la incisión en U [A]	11mm
Longitud de la incisión en U [B]	9.3mm
Separación de la incisión y el borde superior del parche [C]	1.7mm
Grosor de la incisión [$w_x = l_y$]	2mm
Ancho del transformador de $\lambda/4$ [t_w]	1mm
Longitud del transformador $\lambda/4$ [t_l]	8mm
Ancho de la línea de alimentación [c_w]	2.4mm
Longitud de la línea de alimentación [cl]	14mm

Posición de la alimentación con respecto a la esquina del parche [Xs]	3mm
---	-----

El substrato dieléctrico para la construcción de la antena número 2 al igual que en la antena número 1 es un RT/Duroid 5880.

Con los datos de la tabla se construyó la antena número 2. La cual se observa en la figura 18.

Figura 18. Antena parche rectangular con incisión en U 7.2-10GHz.



Antena número 3: la antena número 3 al igual que la antena número 2 es de parche rectangular con incisión en U de doble banda, pero las frecuencias de trabajo son diferentes a la antena anterior.

Las características de construcción de esta antena se muestran en la tabla 7.

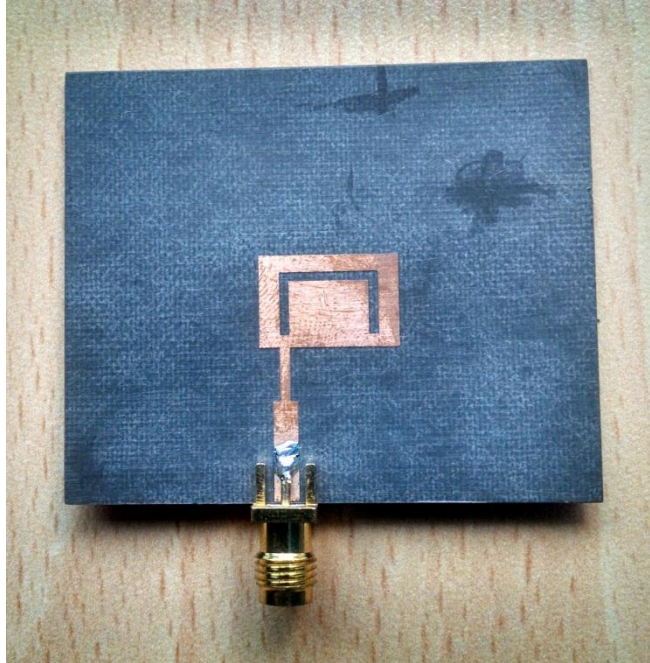
Tabla 7. Antena parche rectangular con incisión en U 10-13,4GHz.

Características	Valor
Frecuencia de trabajo banda 1 [fr1]	10Ghz
Frecuencia de trabajo banda 2 [fr2]	13.5Ghz
Permitividad eléctrica del substrato [ϵ_r]	2.2
Impedancia de alimentación [Z_c]	50 Ω
Impedancia de entrada [Z_{in}]	112 Ω
Impedancia de acople [Z_I]	74.83 Ω
Grosor del substrato [h]	0.79mm
Ancho del parche [W]	14mm
Longitud del parche [L]	9.5mm
Ancho de la incisión en U [A]	10mm
Longitud de la incisión en U [B]	6.6mm
Separación de la incisión y el borde superior del parche [C]	1.7mm
Grosor de la incisión [$w_x = l_y$]	1mm
Ancho del transformador de lambda/4 [t_w]	1mm
Longitud del transformador lambda/4 [t_l]	5.6mm
Ancho de la línea de alimentación [cw]	2.4mm
Longitud de la línea de alimentación [cl]	10mm
Posición de la alimentación con respecto a la esquina del parche [X_s]	2mm

El substrato dieléctrico para la construcción de la antena número 2 al igual que en la antena número 1 es un RT/Duroid 5880.

Con los datos de la tabla 7 se construyó la antena número 2. La cual se observa en la figura 19.

Figura 19. Antena parche rectangular con incisión en U 10-13,4GHz.



3.4.1 Análisis de resultados

Se dividió en dos partes:

Análisis del acople de impedancias y densidad eléctrica de la antena: En esta parte se realiza el análisis de la gráfica VSRW, grafica S11, la carta de Smith y la densidad eléctrica presente en la metalización del parche.

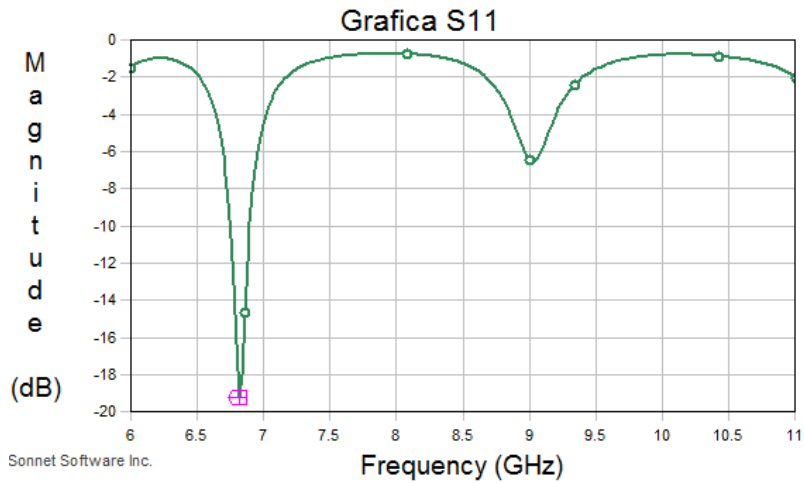
Análisis del patrón de radiación de la antena: En este análisis se hace una comparación numérica punto a punto de los campos eléctricos de las antenas generados por el simulador EM SONNET y por el equipo de medición LAB-VOLT.

Estos análisis se realizan para las antenas 1, 2 y 3 mencionadas anteriormente.

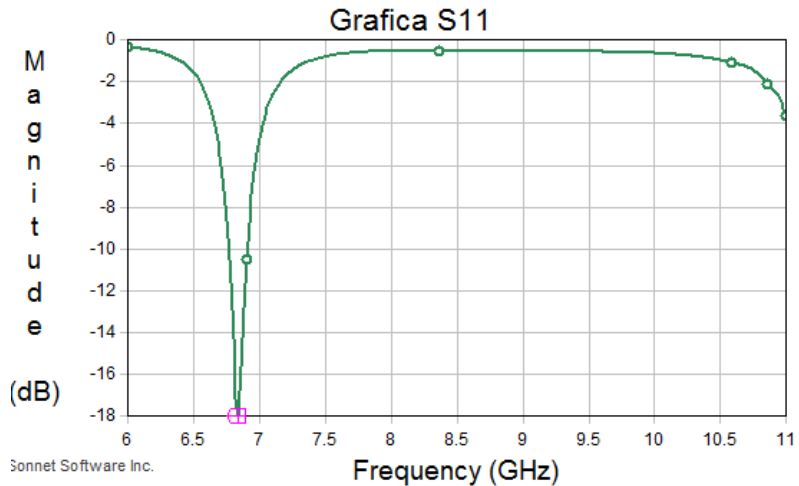
3.4.2 Antena número 1:

Análisis de acople de impedancias y densidad eléctrica de la antena:

Figura 20. Grafica S11 antena 7GHz.



a)

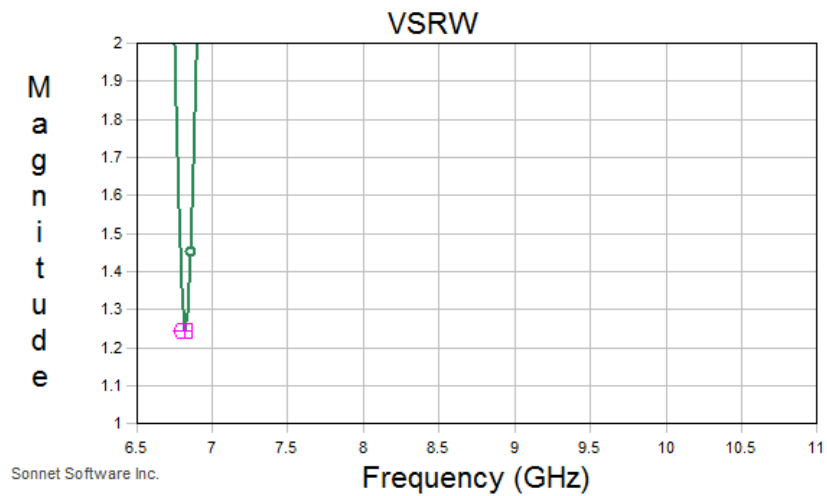


b)

En la figura 20 a) y b) se observa el coeficiente de reflexión representado en la gráfica de reflexión a la entrada (S11). Con estas graficas se puede determinar qué tan bueno es el acople entre la línea de alimentación microstrip y el parche. Para la frecuencia 6.82GHz que tiene un coeficiente de reflexión de -18dB aproximadamente, lo que indica que hay menos del 4% de potencia reflejada.

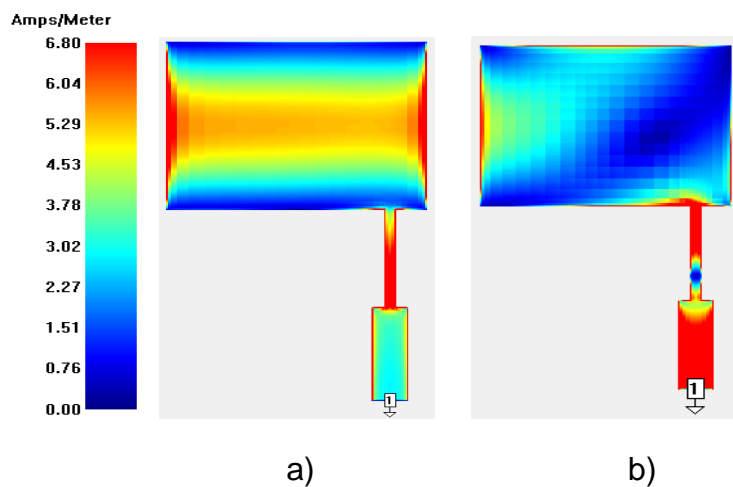
En la figura 20a. la línea de alimentación microstrip se ubica desplazada hacia la esquina inferior izquierda del parche y la figura 20b. La alimentación se encuentra ubicada en el centro del parche.

Figura 21. VSRW antenna 6.8GHz



En la figura 21 se muestra el VSRW (voltaje standing wave ratio), el cual es un parámetro importante que afecta el desempeño de la antena. La antena solo opera en las frecuencias en las que el valor de VSRW sea menor que 2. Se muestra en la figura 21 que para la frecuencia 6.82GHz se cumple con la condición de operación enunciada anteriormente.

Figura 22. Densidad eléctrica antenna 6.8GHz.



La figura 22 muestra la densidad eléctrica presente en la metalización de la antena. En la figura 22a. se muestra como para la frecuencia de 6.82GHz hay una buena transmisión de densidad eléctrica de la línea de alimentación al parche, mientras que en la figura 22b. Se muestra como para la frecuencia de 10GHz toda la densidad eléctrica se queda en la línea de alimentación. Esta figura confirma los resultados obtenidos en la gráfica S11 y el VSRW.

3.4.2.1 Análisis de patrón de radiación de la antena.

Figura 23. Patrón de radiación simulado antena 6.8GHz.

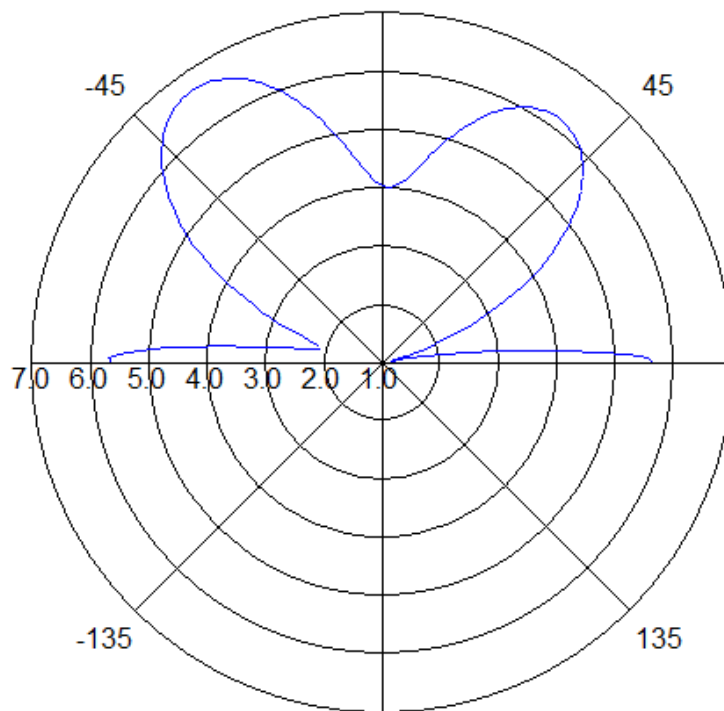
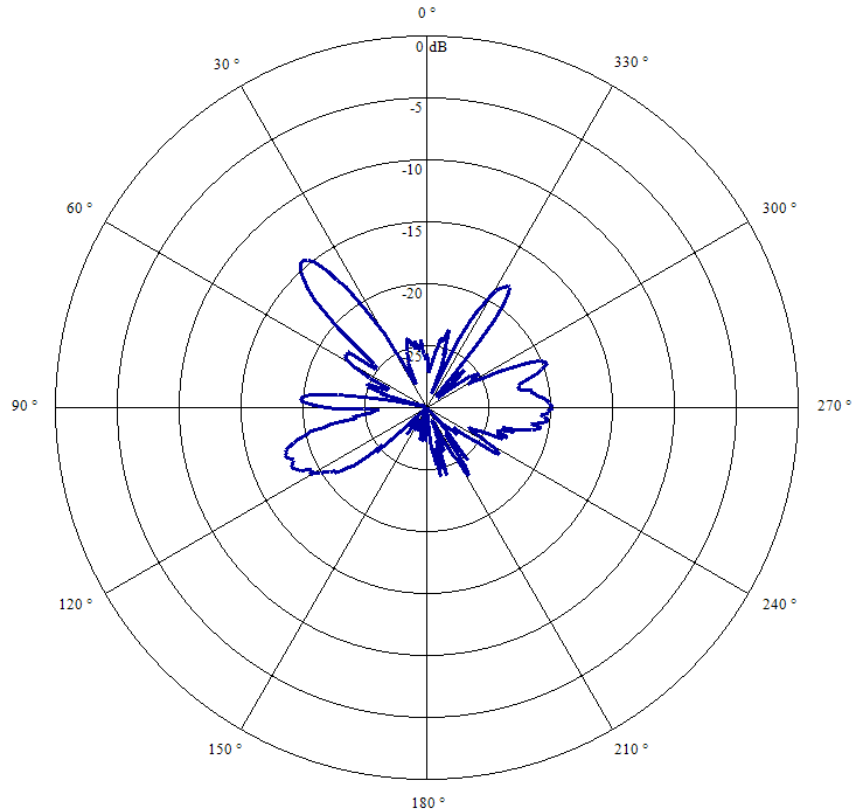


Figura 24. Patrón de radiación medido en LAB-VOLT



Con la antena número 1 se quiere demostrar que una antena tipo parche rectangular diseñada para trabajar a una frecuencia de 6.8GHz no puede trabajar a otra frecuencia. Las figuras 23 y 24 muestran que cuando la antena se encuentra de frente a la antena transmisora (en 0 grados) que radia a una frecuencia de 10GHz la atenuación del patrón de radiación es máxima comprobando de esta manera que las antenas tipo parche rectangulares solo operan en su frecuencia de trabajo. La diferencia observada entre el patrón de radiación simulado y el experimental (figuras 23 y 24 respectivamente) se debe a las diferencias de escalas entre el software de simulación y el equipo de medida y al error inherente de los modelos matemáticos.

Figura 25. Patrón de radiación cartesiano LAB-VOLT antenna 6.8GHz.

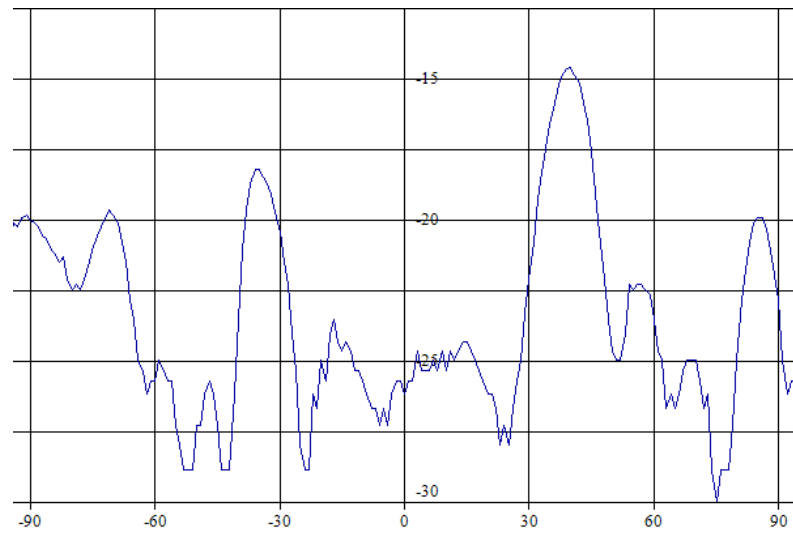
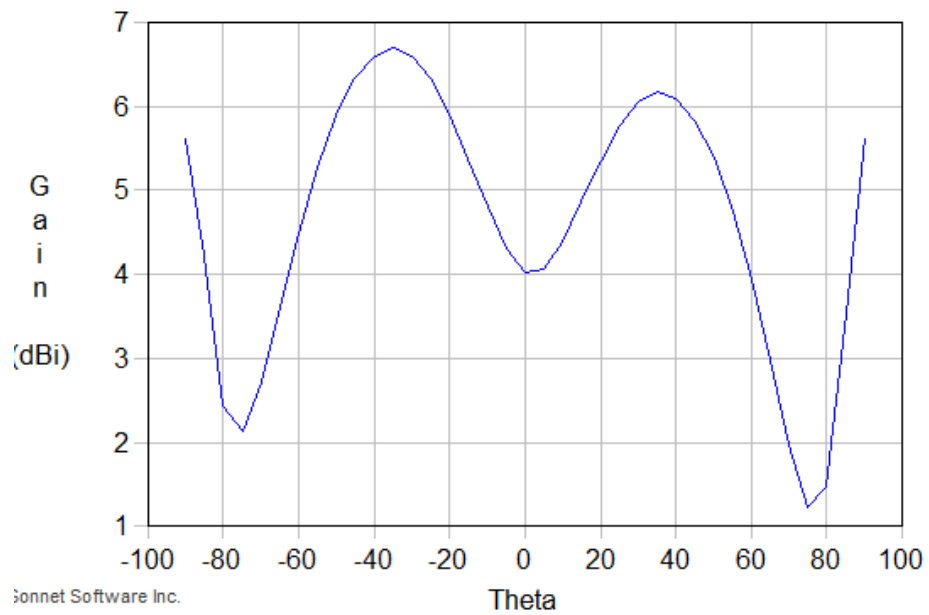


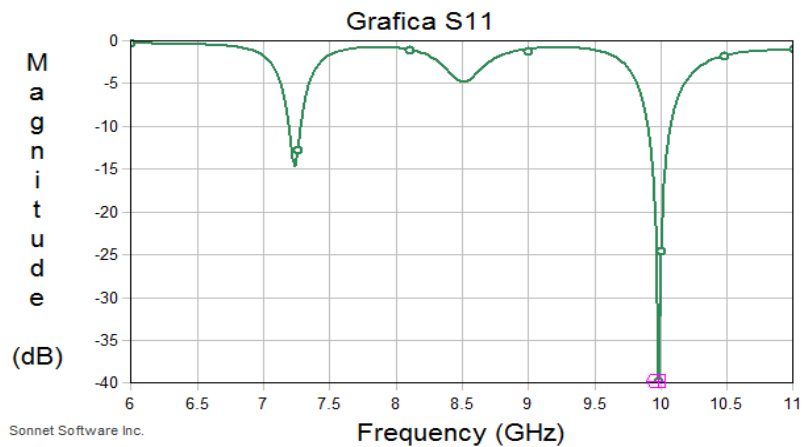
Figura 26. Patrón de radiación cartesiano simulado antenna 6.8GHz.



3.4.3 Antena número 2:

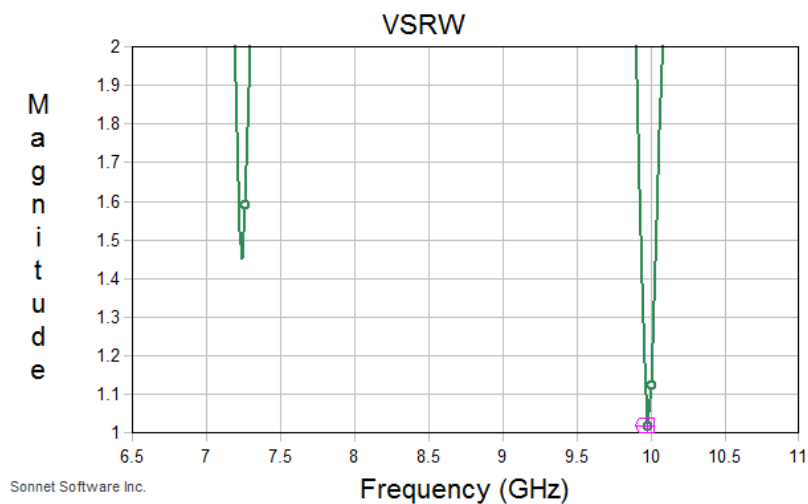
Análisis de acople de impedancia y densidad eléctrica de la antena:

Figura 27. Grafica S11 antena 7.2-10GHz.



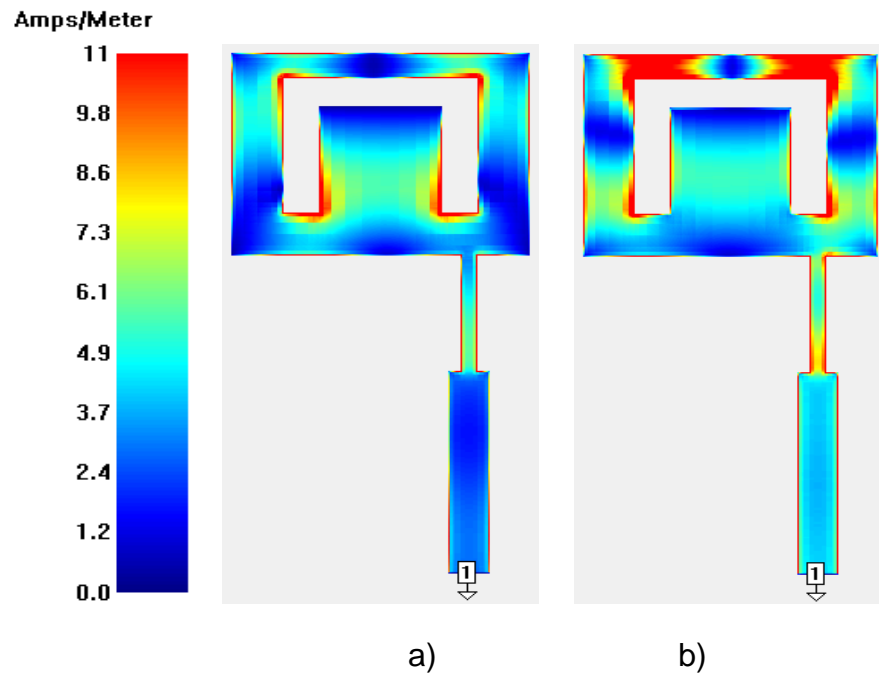
En la figura 27 al igual que en la figura 20 de la antena número 1, se observa que para las frecuencias 10GHz y 7.2GHz la antena presenta un coeficiente de reflexion en dB de -40 y -15 respectivamente, lo que equivale a menos de un 4% de reflexion a la entrada para las dos bandas de la antena.

Figura 28. VSRW antena 7.2-10GHz.



En la figura 28 al igual que en la figura 21 de la antena número 1, la antena opera bien en las frecuencias de 7.2 y 10GHz ya que se cumple la condición de que el VSRW sea menor que 2 como se mostró anteriormente.

Figura 29. Densidad eléctrica antena 7.2-10GHz.



En la figura 29 se muestra la densidad eléctrica en la metalización de la antena número 2 para las frecuencias de 7.2 y 10GHz. En las dos frecuencias anteriores se observó que la densidad eléctrica se transfiere bien de la línea de alimentación al parche.

3.4.3.1 Análisis del patrón de radiación de la antena:

Figura 30. Patrón de radiación medido en LAB-VOLT antena 7.2-10GHz.

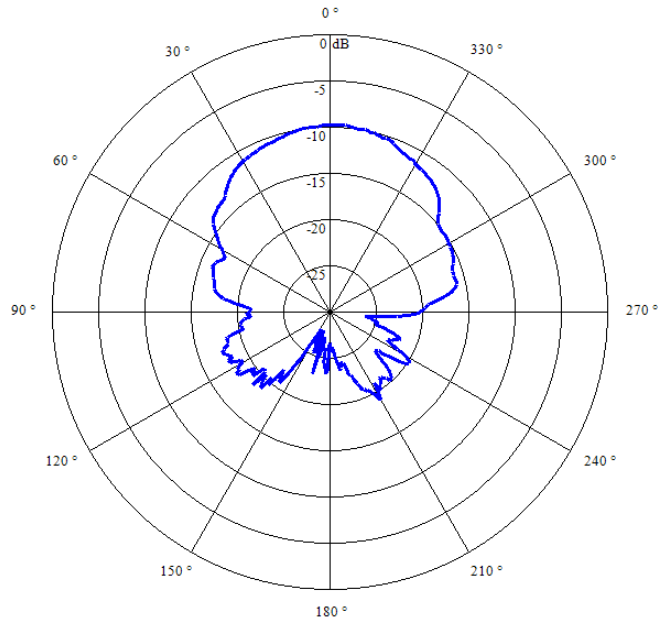


Figura 31. Patrón de radiación simulado antena 7.2-10GHz.

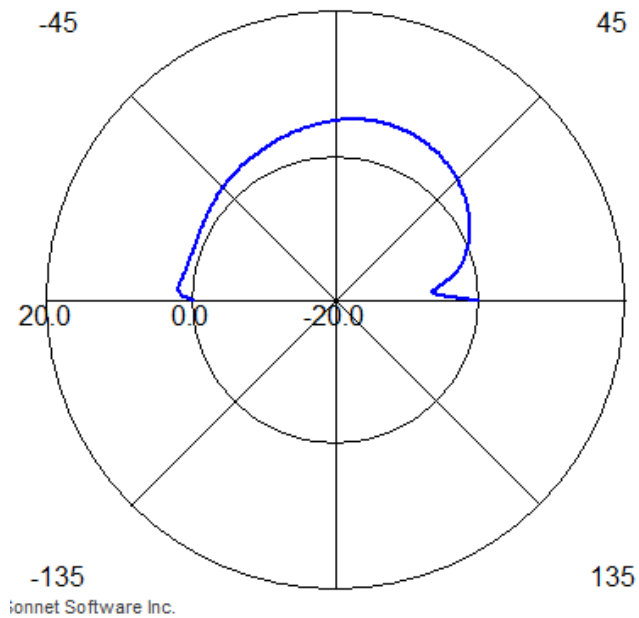


Figura 32. Patrón de radiación cartesiano LAB-VOLT antenna 7.2-10GHz.

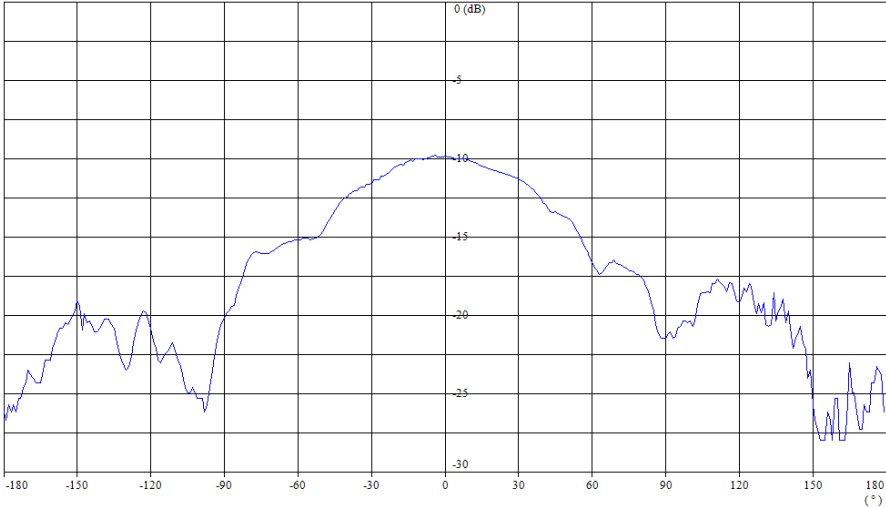
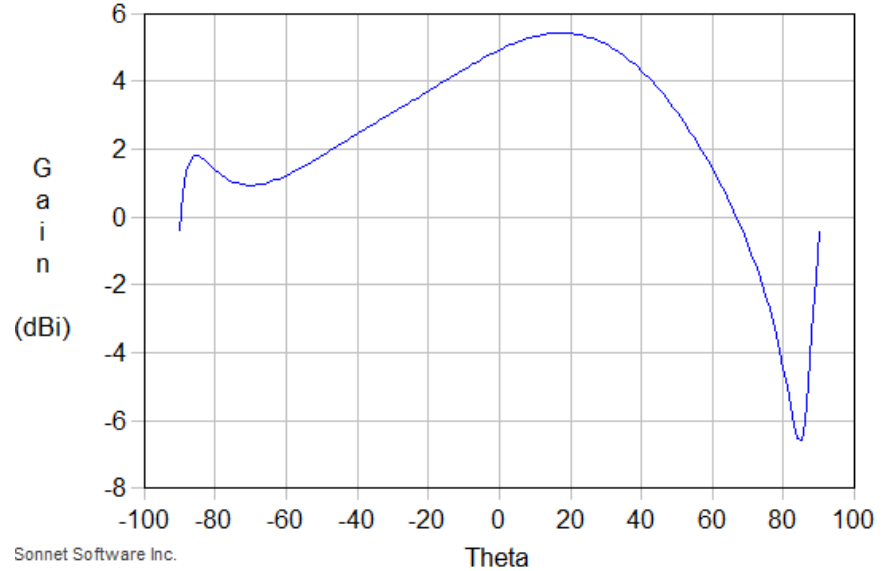


Figura 33. Patrón de radiación cartesiano simulado antenna 7.2-10GHz.



La tabla 8 muestra los datos tomados por el simulador y el equipo de LAB-VOLT a los cuales se realizan la normalización para poder compararlos y obtener el porcentaje de error que existe entre el campo eléctrico simulado y medido.

Tabla 8. Datos Antena de 7.2-10GHz.

Angulo	DATOS		DB-->MAGBITUD		NORMALIZADOS		%ERROR
	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB VOLT	
0	-0,332	-15,949	0,926	0,025	0,263	0,241	8,422
1	-1,638	-15,909	0,686	0,026	0,195	0,243	24,835
2	-3,111	-15,949	0,489	0,025	0,139	0,241	73,639
3	-4,489	-16,729	0,356	0,021	0,101	0,201	99,278
4	-5,479	-17,829	0,283	0,016	0,080	0,156	94,318
5	-5,921	-18,229	0,256	0,015	0,073	0,143	96,191
6	-5,880	-18,389	0,258	0,014	0,073	0,137	87,303
7	-5,543	-17,909	0,279	0,016	0,079	0,153	93,573
8	-5,078	-17,631	0,311	0,017	0,088	0,164	85,387
9	-4,580	-16,980	0,348	0,020	0,099	0,190	92,062
10	-4,094	-16,606	0,390	0,022	0,111	0,207	87,188
11	-3,638	-15,998	0,433	0,025	0,123	0,238	93,867
12	-3,215	-15,657	0,477	0,027	0,135	0,258	90,219
13	-2,824	-15,357	0,522	0,029	0,148	0,276	86,256
14	-2,461	-15,288	0,567	0,030	0,161	0,280	74,040
15	-2,122	-15,255	0,613	0,030	0,174	0,283	62,244
16	-1,804	-15,221	0,660	0,030	0,187	0,285	51,971
17	-1,504	-15,154	0,707	0,031	0,201	0,289	44,025
18	-1,220	-15,154	0,755	0,031	0,214	0,289	34,898
19	-0,949	-15,122	0,804	0,031	0,228	0,291	27,699
20	-0,690	-15,056	0,853	0,031	0,242	0,296	22,107
21	-0,440	-15,056	0,904	0,031	0,257	0,296	15,293
22	-0,200	-15,056	0,955	0,031	0,271	0,296	9,085
23	0,033	-15,122	1,008	0,031	0,286	0,291	1,865
24	0,258	-15,089	1,061	0,031	0,301	0,294	2,550
25	0,476	-15,056	1,116	0,031	0,317	0,296	6,636
26	0,688	-14,961	1,172	0,032	0,333	0,302	9,107
27	0,895	-14,867	1,229	0,033	0,349	0,309	11,438
28	1,096	-14,627	1,287	0,034	0,365	0,327	10,630
29	1,292	-14,399	1,346	0,036	0,382	0,344	9,968
30	1,483	-14,052	1,407	0,039	0,400	0,373	6,676
31	1,669	-13,802	1,469	0,042	0,417	0,395	5,307
32	1,850	-13,521	1,531	0,044	0,435	0,421	3,096
33	2,027	-13,278	1,595	0,047	0,453	0,446	1,602
34	2,199	-13,027	1,659	0,050	0,471	0,472	0,195

Angulo	DATOS		DB-->MAGBITUD		NORMALIZADOS		%ERROR
	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB VOLT	
35	2,367	-12,789	1,725	0,053	0,490	0,499	1,814
36	2,530	-12,657	1,791	0,054	0,509	0,514	1,100
37	2,689	-12,456	1,857	0,057	0,527	0,538	2,083
38	2,844	-12,402	1,925	0,058	0,547	0,545	0,270
39	2,994	-12,229	1,992	0,060	0,566	0,567	0,256
40	3,140	-12,129	2,060	0,061	0,585	0,581	0,780
41	3,281	-11,982	2,129	0,063	0,604	0,601	0,655
42	3,418	-11,982	2,197	0,063	0,624	0,601	3,739
43	3,551	-11,855	2,265	0,065	0,643	0,618	3,872
44	3,679	-11,763	2,333	0,067	0,662	0,632	4,656
45	3,802	-11,763	2,400	0,067	0,682	0,632	7,333
46	3,922	-11,627	2,467	0,069	0,701	0,652	6,989
47	4,036	-11,613	2,533	0,069	0,719	0,654	9,107
48	4,147	-11,554	2,598	0,070	0,738	0,663	10,182
49	4,253	-11,327	2,662	0,074	0,756	0,698	7,638
50	4,354	-11,285	2,725	0,074	0,774	0,705	8,907
51	4,451	-11,313	2,787	0,074	0,791	0,701	11,480
52	4,543	-11,097	2,847	0,078	0,808	0,736	8,937
53	4,631	-11,097	2,905	0,078	0,825	0,736	10,763
54	4,715	-10,981	2,961	0,080	0,841	0,756	10,076
55	4,794	-10,842	3,016	0,082	0,856	0,781	8,832
56	4,868	-10,744	3,068	0,084	0,871	0,799	8,333
57	4,938	-10,542	3,118	0,088	0,885	0,837	5,511
58	5,004	-10,450	3,165	0,090	0,899	0,854	4,937
59	5,065	-10,349	3,210	0,092	0,912	0,875	4,057
60	5,122	-10,327	3,252	0,093	0,923	0,879	4,815
61	5,174	-10,349	3,291	0,092	0,935	0,875	6,432
62	5,222	-10,207	3,328	0,095	0,945	0,904	4,378
63	5,265	-10,164	3,361	0,096	0,955	0,913	4,392
64	5,304	-10,007	3,392	0,100	0,963	0,946	1,761
65	5,339	-10,143	3,419	0,097	0,971	0,917	5,544
66	5,369	-9,966	3,443	0,101	0,978	0,955	2,310
67	5,396	-9,956	3,464	0,101	0,984	0,957	2,671
68	5,418	-9,977	3,482	0,101	0,989	0,953	3,618
69	5,436	-10,018	3,496	0,100	0,993	0,944	4,918
70	5,450	-9,997	3,507	0,100	0,996	0,948	4,771
71	5,459	-9,916	3,515	0,102	0,998	0,966	3,190

Angulo	DATOS		DB-->MAGBITUD		NORMALIZADOS		%ERROR
	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB VOLT	
72	5,465	-9,866	3,520	0,103	1,000	0,978	2,199
73	5,467	-9,767	3,522	0,106	1,000	1,000	0,000
74	5,465	-9,787	3,520	0,105	1,000	0,996	0,407
75	5,460	-9,846	3,516	0,104	0,998	0,982	1,627
76	5,451	-9,836	3,508	0,104	0,996	0,984	1,193
77	5,438	-9,826	3,498	0,104	0,993	0,987	0,676
78	5,422	-9,816	3,485	0,104	0,990	0,989	0,077
79	5,402	-9,836	3,469	0,104	0,985	0,984	0,081
80	5,379	-9,866	3,451	0,103	0,980	0,978	0,241
81	5,353	-9,916	3,430	0,102	0,974	0,966	0,793
82	5,324	-9,966	3,407	0,101	0,968	0,955	1,287
83	5,292	-9,977	3,383	0,101	0,961	0,953	0,794
84	5,258	-9,987	3,356	0,100	0,953	0,951	0,235
85	5,221	-9,977	3,327	0,101	0,945	0,953	0,863
86	5,181	-9,977	3,297	0,101	0,936	0,953	1,790
87	5,139	-10,018	3,265	0,100	0,927	0,944	1,816
88	5,094	-10,069	3,232	0,098	0,918	0,933	1,640
89	5,048	-10,122	3,197	0,097	0,908	0,922	1,499
90	5,000	-10,186	3,162	0,096	0,898	0,908	1,139
91	4,949	-10,250	3,126	0,094	0,888	0,895	0,800
92	4,898	-10,349	3,089	0,092	0,877	0,875	0,287
93	4,844	-10,439	3,051	0,090	0,866	0,857	1,121
94	4,790	-10,508	3,013	0,089	0,856	0,843	1,436
95	4,734	-10,554	2,974	0,088	0,845	0,834	1,219
96	4,677	-10,636	2,936	0,086	0,834	0,819	1,791
97	4,619	-10,672	2,897	0,086	0,823	0,812	1,288
98	4,560	-10,708	2,858	0,085	0,812	0,805	0,770
99	4,501	-10,744	2,819	0,084	0,801	0,799	0,240
100	4,441	-10,817	2,780	0,083	0,790	0,785	0,549
101	4,380	-10,842	2,742	0,082	0,779	0,781	0,273
102	4,320	-10,917	2,704	0,081	0,768	0,767	0,056
103	4,258	-10,955	2,666	0,080	0,757	0,761	0,478
104	4,197	-11,006	2,629	0,079	0,746	0,752	0,712
105	4,136	-11,058	2,592	0,078	0,736	0,743	0,937
106	4,074	-11,137	2,555	0,077	0,726	0,729	0,535
107	4,013	-11,190	2,519	0,076	0,715	0,721	0,725
108	3,951	-11,244	2,484	0,075	0,705	0,712	0,900

Angulo	DATOS		DB-->MAGBITUD		NORMALIZADOS		%ERROR
	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB VOLT	
109	3,889	-11,341	2,449	0,073	0,695	0,696	0,099
110	3,828	-11,439	2,414	0,072	0,686	0,680	0,747
111	3,767	-11,554	2,381	0,070	0,676	0,663	1,967
112	3,705	-11,657	2,347	0,068	0,667	0,647	2,909
113	3,644	-11,840	2,314	0,065	0,657	0,620	5,588
114	3,583	-11,950	2,282	0,064	0,648	0,605	6,649
115	3,522	-12,129	2,250	0,061	0,639	0,581	9,147
116	3,461	-12,298	2,219	0,059	0,630	0,558	11,381
117	3,400	-12,491	2,188	0,056	0,621	0,534	14,050
118	3,340	-12,751	2,158	0,053	0,613	0,503	17,891
119	3,279	-12,906	2,127	0,051	0,604	0,485	19,658
120	3,217	-13,171	2,098	0,048	0,596	0,457	23,342
121	3,156	-13,321	2,068	0,047	0,587	0,441	24,885
122	3,095	-13,386	2,039	0,046	0,579	0,435	24,959
123	3,033	-13,364	2,011	0,046	0,571	0,437	23,502
124	2,972	-13,476	1,982	0,045	0,563	0,426	24,366
125	2,910	-13,544	1,954	0,044	0,555	0,419	24,470
126	2,847	-13,636	1,926	0,043	0,547	0,410	24,991
127	2,785	-13,707	1,899	0,043	0,539	0,404	25,128
128	2,722	-13,778	1,871	0,042	0,531	0,397	25,280
129	2,658	-13,876	1,844	0,041	0,524	0,388	25,867
130	2,595	-14,026	1,818	0,040	0,516	0,375	27,334
131	2,531	-14,316	1,791	0,037	0,509	0,351	31,020
132	2,467	-14,627	1,765	0,034	0,501	0,327	34,823
133	2,402	-14,898	1,739	0,032	0,494	0,307	37,858
134	2,338	-15,221	1,713	0,030	0,486	0,285	41,445
135	2,273	-15,606	1,688	0,028	0,479	0,261	45,610
136	2,208	-15,870	1,663	0,026	0,472	0,245	48,050
137	2,144	-16,235	1,638	0,024	0,465	0,226	51,521
138	2,079	-16,542	1,614	0,022	0,458	0,210	54,152
139	2,014	-16,922	1,590	0,020	0,452	0,193	57,363
140	1,950	-17,125	1,567	0,019	0,445	0,184	58,708
141	1,887	-17,339	1,544	0,018	0,438	0,175	60,108
142	1,824	-17,231	1,522	0,019	0,432	0,179	58,507
143	1,762	-17,023	1,500	0,020	0,426	0,188	55,843
144	1,701	-16,824	1,479	0,021	0,420	0,197	53,123
145	1,641	-16,588	1,459	0,022	0,414	0,208	49,820

Angulo	DATOS		DB-->MAGBITUD		NORMALIZADOS		%ERROR
	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB VOLT	
146	1,583	-16,588	1,440	0,022	0,409	0,208	49,141
147	1,526	-16,408	1,421	0,023	0,404	0,217	46,295
148	1,472	-16,681	1,403	0,021	0,398	0,204	48,926
149	1,419	-16,728	1,386	0,021	0,394	0,201	48,865
150	1,369	-16,776	1,371	0,021	0,389	0,199	48,839
151	1,322	-16,873	1,356	0,021	0,385	0,195	49,425
152	1,278	-16,972	1,342	0,020	0,381	0,190	50,067
153	1,238	-17,125	1,330	0,019	0,378	0,184	51,349
154	1,202	-17,125	1,319	0,019	0,374	0,184	50,938
155	1,169	-17,178	1,309	0,019	0,372	0,182	51,165
156	1,142	-17,339	1,301	0,018	0,369	0,175	52,643
157	1,119	-17,339	1,294	0,018	0,367	0,175	52,397
158	1,102	-17,506	1,289	0,018	0,366	0,168	54,017
159	1,092	-17,680	1,286	0,017	0,365	0,162	55,713
160	1,087	-18,116	1,284	0,015	0,365	0,146	59,904
161	1,090	-18,387	1,285	0,014	0,365	0,137	62,352
162	1,100	-19,152	1,288	0,012	0,366	0,115	68,504
163	1,119	-19,687	1,294	0,011	0,367	0,102	72,278
164	1,146	-20,529	1,302	0,009	0,370	0,084	77,304
165	1,183	-21,157	1,313	0,008	0,373	0,073	80,529
166	1,230	-21,439	1,327	0,007	0,377	0,068	81,945
167	1,287	-21,439	1,345	0,007	0,382	0,068	82,182
168	1,355	-21,439	1,366	0,007	0,388	0,068	82,460
169	1,434	-21,157	1,391	0,008	0,395	0,073	81,624
170	1,523	-21,024	1,420	0,008	0,403	0,075	81,434
171	1,621	-21,439	1,452	0,007	0,412	0,068	83,500
172	1,723	-21,296	1,487	0,007	0,422	0,070	83,346
173	1,824	-20,769	1,522	0,008	0,432	0,079	81,629
174	1,911	-20,647	1,553	0,009	0,441	0,082	81,482
175	1,964	-20,302	1,572	0,009	0,446	0,088	80,192
176	1,947	-20,302	1,566	0,009	0,445	0,088	80,115
177	1,805	-20,414	1,515	0,009	0,430	0,086	79,976
178	1,454	-20,302	1,398	0,009	0,397	0,088	77,724
179	0,786	-20,647	1,198	0,009	0,340	0,082	76,002
180	-0,317	-20,302	0,930	0,009	0,264	0,088	66,511

En la tabla 8 se observó que el error relativo generado al comparar los datos obtenidos por medio del simulador y del equipo de medida LAB-VOLT es significativo a los lados del lóbulo principal y es más bajo en la zona cercana al punto central del mismo. Como se observa en la figura 30 la falta de simetría del patrón de radiación y los pequeños picos que se forman en el mismo son los que incrementan el error entre el patrón teórico y el medido. Las perturbaciones en el patrón de radiación se deben principalmente a ciertos factores existentes en el lugar de la medición tales como: ruido externo ya que las mediciones no se realizaron dentro de una cámara anecoica, reflexiones generadas por los marcos y cables metálicos, ruido generado por el cable de alimentación... etc. Otro factor importante que influye en el error de los datos medidos y simulados es la omisión de algunas pérdidas físicas inherentes a los modelos matemáticos de simulación y en particular a que el método de los momentos considera que el sustrato es infinito.

Analizando los datos de la tabla 8 podemos obtener error máximo, mínimo y error promedio estos datos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 9. Cálculos de datos tabla 8

ERROR MAXIMO (%)	ERROR MINIMO (%)	ERROR PROMEDIO (%)
99,27843368	0.00	28,6159415

El error máximo es muy alto debido a las perturbaciones que se presentan cuando se realiza la toma de datos en el laboratorio.

Figura 34. %Error antena 7.2-10GHz

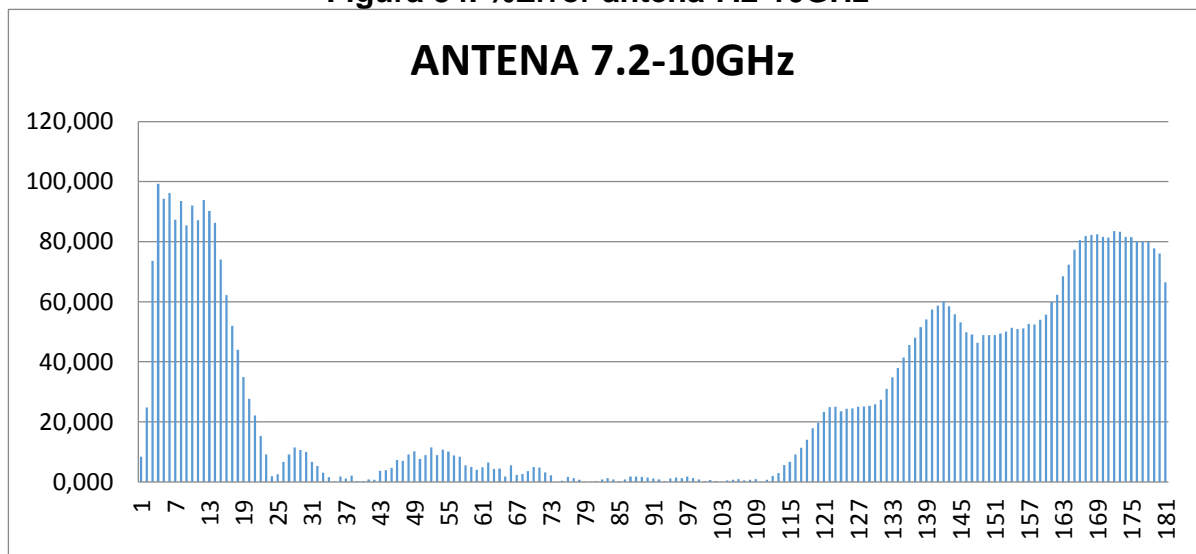
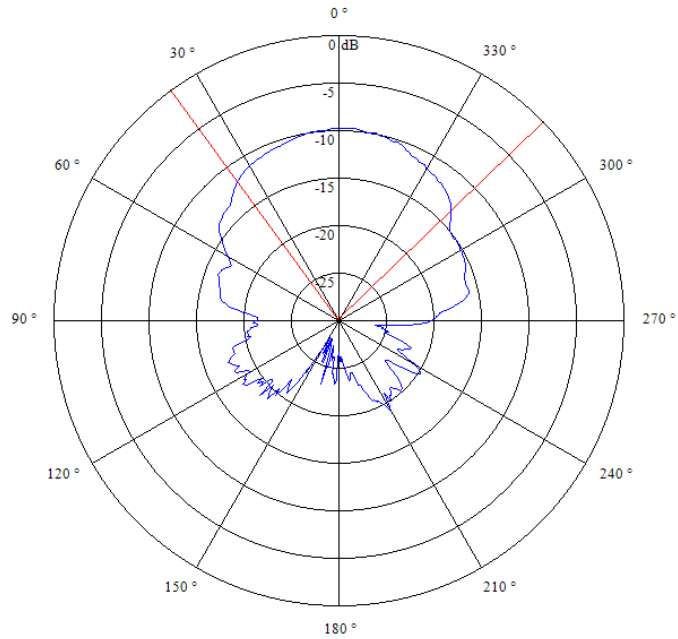


Figura 35. Potencia mitad antenna 7.2-10GHz



Con los datos que se encuentran delimitados en las casillas de color amarillo de la tabla 9 se calcula el rango en grados, en donde se encuentra la potencia mitad:

$$\text{Potencia mitad} = 118^\circ - 36^\circ$$

$$\text{Potencia mitad} = 82^\circ$$

Tabla 10. Potencia mitad antenna 7.2-10GHz

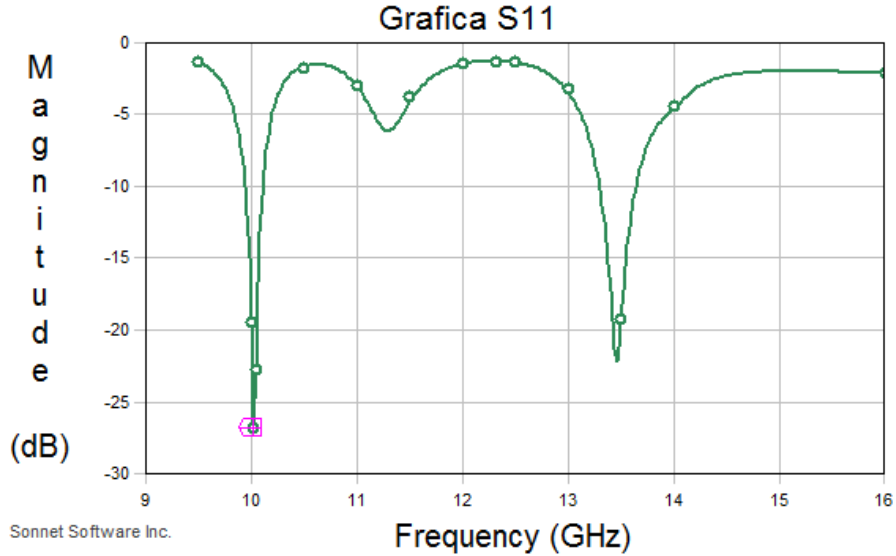
PROMEDIO %ERROR POTENCIA MITAD	DESVIACION ESTANDAR POTENCIA MITAD
3,520386542	3,774659272

En la tabla 10 se observa una mejoría en el promedio del porcentaje de error, esto es muy satisfactorio ya que en la región acotada se encuentra la mayoría de intensidad de potencia radiada.

3.4.4 Antena número 3:

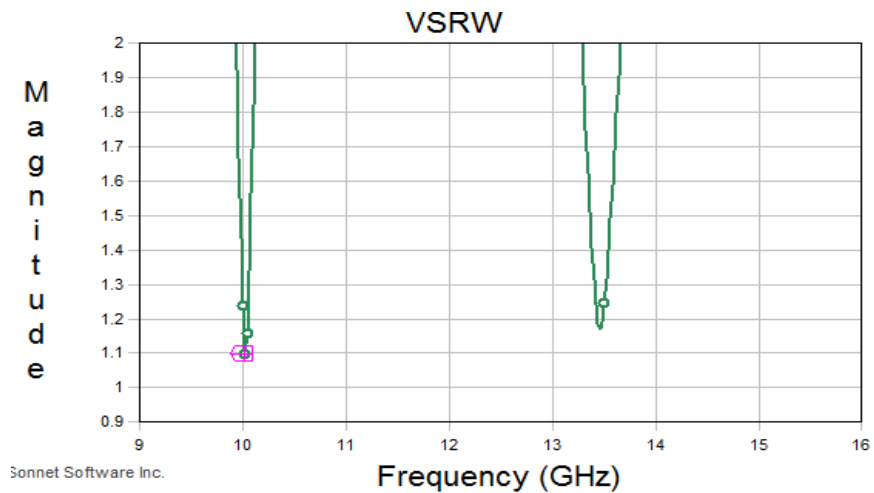
Análisis de acople de impedancias y densidad eléctrica de la antena:

Figura 36. Grafica S11 antena 10-13,4GHz.



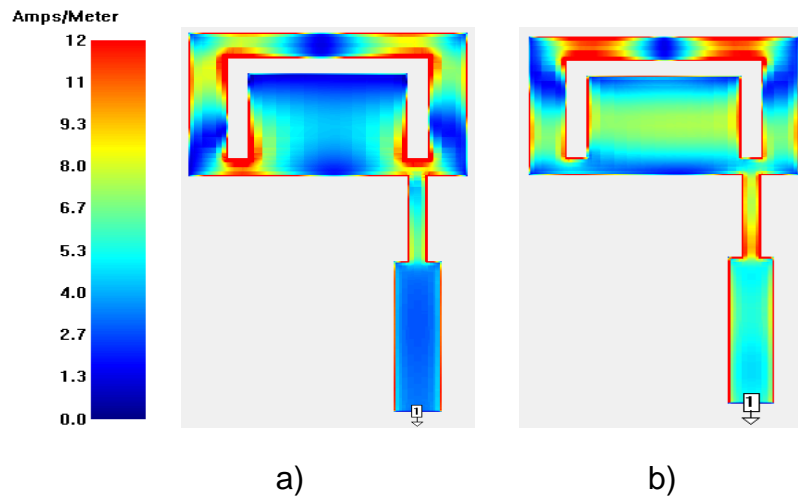
En la figura 36 al igual que en las antenas número 1 y 2 se muestra que para las frecuencias de 10 y 13.4GHz la antena presenta un coeficiente de reflexion en dB de -27 y -22 respectivamente, lo que equivale a menos de un 4% de reflexion a la entrada para las dos bandas de la antena.

Figura 37. Grafica VSRW 10-13,4GHz.



En la figura 37 al igual que en la figuras 21 y 28 de las antenas anteriores la antena debe operar bien en las frecuencias de 10 y 13.4GHz ya que se cumple la condición de que el VSRW sea menor que 2 como se mostró anteriormente.

Figura 38. Densidad eléctrica antena 10-13,4GHz.



En la figura 38 se muestra la densidad eléctrica en la metalización de la antena número 3 para las frecuencias de 10 y 13.4GHz. En las dos frecuencias anteriores se observa que la densidad eléctrica se transfiere bien de la línea de alimentación al parche.

3.4.4.1 Análisis de patrón de radiación de la antena

Figura 39. Patrón de radiación cartesiano LAB-VOLT antena 10-13,4GHz.

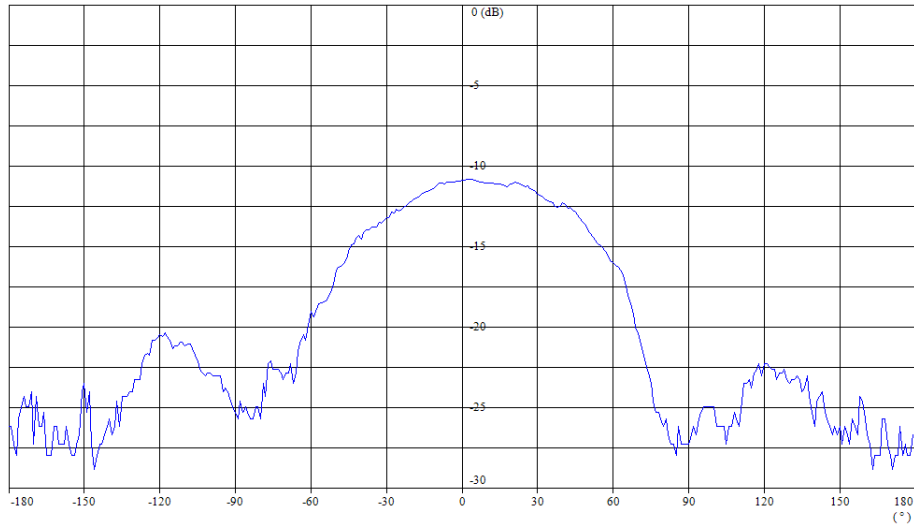


Figura 40. Patrón de radiación cartesiano simulado antena 10-13,4GHz.

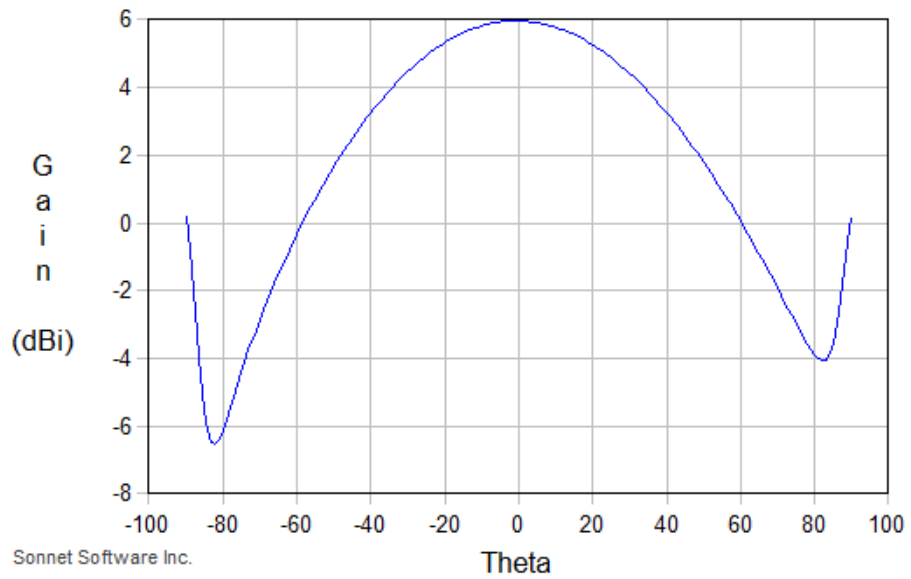


Figura 41. Patrón de radiación medido con LAB-VOLT antenna 10-13,4GHz.

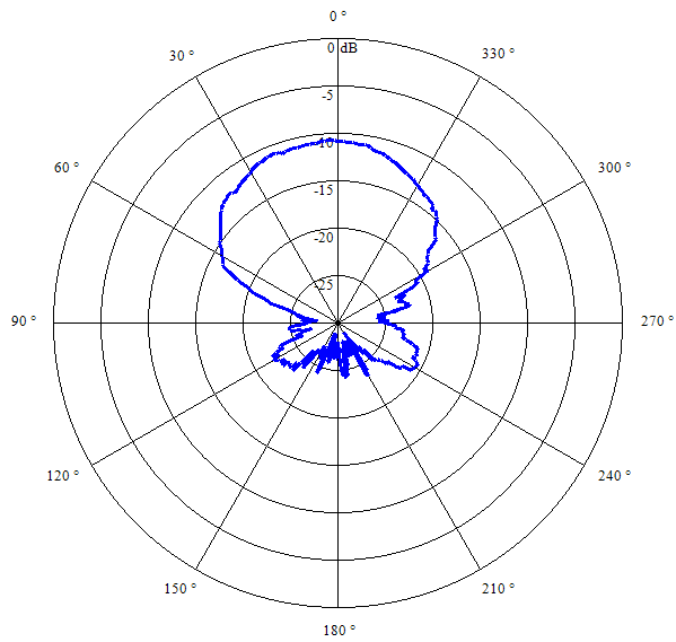
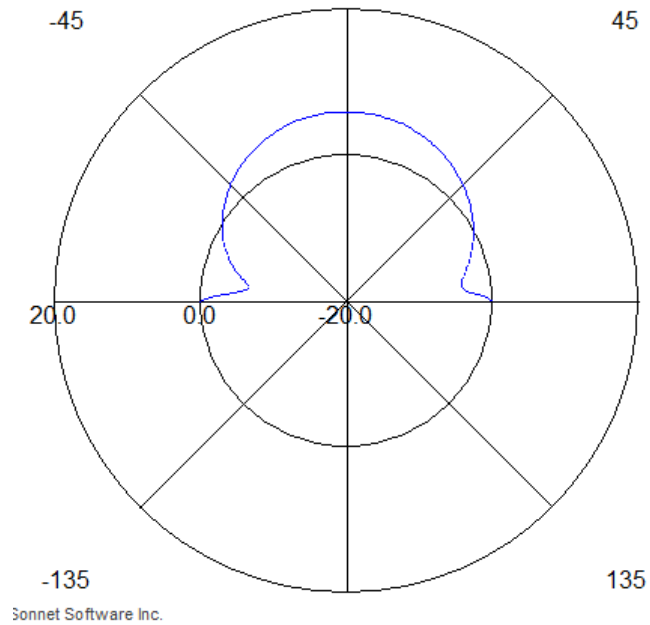


Figura 42. Patrón de radiación simulado antenna 10-13,4GHz.



La tabla 10 muestra porcentaje de error de la antenna de 10GHz y 13,4GHz.

Tabla 11. Datos antena 10GHz-13,4GHz

Angulo	DATOS		DB-->MAGBITUD		NORMALIZADOS		%ERROR
	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB VOLT	
0	-0,063	-25,283	0,986	0,003	0,239	0,035	85,152
1	-0,790	-25,687	0,834	0,003	0,202	0,032	84,004
2	-1,622	-25,687	0,688	0,003	0,167	0,032	80,623
3	-2,429	-24,918	0,572	0,003	0,139	0,039	72,153
4	-3,097	-24,918	0,490	0,003	0,119	0,039	67,522
5	-3,571	-25,687	0,439	0,003	0,106	0,032	69,654
6	-3,850	-23,476	0,412	0,004	0,100	0,054	46,160
7	-3,968	-24,276	0,401	0,004	0,097	0,045	53,985
8	-3,967	-22,240	0,401	0,006	0,097	0,071	26,484
9	-3,885	-22,067	0,409	0,006	0,099	0,074	24,925
10	-3,750	-22,611	0,422	0,005	0,102	0,066	35,800
11	-3,582	-22,611	0,438	0,005	0,106	0,066	38,235
12	-3,394	-22,611	0,458	0,005	0,111	0,066	40,849
13	-3,195	-22,811	0,479	0,005	0,116	0,063	46,039
14	-2,989	-23,242	0,503	0,005	0,122	0,057	53,401
15	-2,779	-22,811	0,527	0,005	0,128	0,063	50,960
16	-2,569	-22,811	0,554	0,005	0,134	0,063	53,280
17	-2,358	-22,240	0,581	0,006	0,141	0,071	49,243
18	-2,149	-23,476	0,610	0,004	0,148	0,054	63,613
19	-1,940	-22,811	0,640	0,005	0,155	0,063	59,576
20	-1,733	-21,439	0,671	0,007	0,163	0,086	47,137
21	-1,528	-20,769	0,703	0,008	0,170	0,100	41,169
22	-1,325	-20,414	0,737	0,009	0,179	0,109	39,076
23	-1,124	-20,769	0,772	0,008	0,187	0,100	46,402
24	-0,924	-19,882	0,808	0,010	0,196	0,123	37,212
25	-0,727	-18,987	0,846	0,013	0,205	0,151	26,269
26	-0,532	-19,323	0,885	0,012	0,214	0,140	34,748
27	-0,339	-18,987	0,925	0,013	0,224	0,151	32,573
28	-0,148	-18,529	0,967	0,014	0,234	0,168	28,296
29	0,041	-18,458	1,009	0,014	0,245	0,171	30,200
30	0,227	-18,387	1,054	0,014	0,255	0,174	32,037
31	0,411	-18,318	1,099	0,015	0,266	0,176	33,807
32	0,593	-17,987	1,146	0,016	0,278	0,190	31,494
33	0,772	-17,800	1,194	0,017	0,289	0,199	31,375
34	0,949	-17,284	1,244	0,019	0,301	0,224	25,802
35	1,123	-16,452	1,295	0,023	0,314	0,271	13,670

Angulo	DATOS		DB-->MAGBITUD		NORMALIZADOS		%ERROR
	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB VOLT	
36	1,295	-16,278	1,347	0,024	0,326	0,282	13,617
37	1,464	-16,193	1,401	0,024	0,339	0,288	15,283
38	1,631	-15,989	1,456	0,025	0,353	0,301	14,537
39	1,795	-15,717	1,512	0,027	0,366	0,321	12,400
40	1,956	-15,288	1,569	0,030	0,380	0,354	6,834
41	2,114	-14,867	1,627	0,033	0,394	0,390	1,022
42	2,270	-14,775	1,687	0,033	0,409	0,399	2,472
43	2,423	-14,426	1,747	0,036	0,423	0,432	2,025
44	2,574	-14,289	1,809	0,037	0,438	0,446	1,726
45	2,721	-14,483	1,871	0,036	0,453	0,426	5,960
46	2,866	-14,103	1,934	0,039	0,469	0,465	0,736
47	3,007	-13,925	1,999	0,041	0,484	0,485	0,098
48	3,146	-13,925	2,063	0,041	0,500	0,485	3,049
49	3,282	-13,778	2,129	0,042	0,516	0,501	2,798
50	3,415	-13,754	2,195	0,042	0,532	0,504	5,203
51	3,545	-13,730	2,262	0,042	0,548	0,507	7,489
52	3,671	-13,476	2,329	0,045	0,564	0,538	4,724
53	3,795	-13,521	2,396	0,044	0,581	0,532	8,363
54	3,916	-13,343	2,464	0,046	0,597	0,554	7,144
55	4,034	-13,171	2,532	0,048	0,613	0,577	5,993
56	4,149	-13,171	2,599	0,048	0,630	0,577	8,443
57	4,260	-12,828	2,667	0,052	0,646	0,624	3,427
58	4,369	-12,906	2,735	0,051	0,663	0,613	7,496
59	4,474	-12,657	2,802	0,054	0,679	0,649	4,368
60	4,577	-12,789	2,869	0,053	0,695	0,630	9,408
61	4,676	-12,619	2,935	0,055	0,711	0,655	7,919
62	4,772	-12,491	3,000	0,056	0,727	0,674	7,242
63	4,865	-12,402	3,065	0,058	0,743	0,688	7,324
64	4,955	-12,229	3,129	0,060	0,758	0,716	5,530
65	5,041	-12,112	3,192	0,061	0,774	0,736	4,863
66	5,125	-12,030	3,254	0,063	0,789	0,750	4,897
67	5,205	-11,934	3,315	0,064	0,803	0,767	4,546
68	5,282	-11,824	3,374	0,066	0,818	0,786	3,825
69	5,356	-11,702	3,432	0,068	0,832	0,809	2,750
70	5,427	-11,583	3,489	0,069	0,845	0,831	1,664
71	5,494	-11,539	3,543	0,070	0,859	0,840	2,199
72	5,558	-11,510	3,596	0,071	0,871	0,845	2,992

Angulo	DATOS		DB-->MAGBITUD		NORMALIZADOS		%ERROR
	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB VOLT	
73	5,619	-11,397	3,647	0,073	0,884	0,868	1,802
74	5,677	-11,285	3,696	0,074	0,896	0,890	0,590
75	5,732	-11,124	3,743	0,077	0,907	0,924	1,890
76	5,783	-11,045	3,787	0,079	0,918	0,941	2,533
77	5,831	-11,006	3,829	0,079	0,928	0,949	2,315
78	5,876	-11,071	3,869	0,078	0,937	0,935	0,236
79	5,917	-10,968	3,906	0,080	0,946	0,958	1,195
80	5,956	-10,968	3,941	0,080	0,955	0,958	0,308
81	5,990	-10,942	3,972	0,080	0,963	0,963	0,090
82	6,022	-10,942	4,001	0,080	0,970	0,963	0,637
83	6,050	-10,905	4,028	0,081	0,976	0,972	0,417
84	6,075	-10,917	4,051	0,081	0,982	0,969	1,275
85	6,097	-10,867	4,071	0,082	0,986	0,980	0,624
86	6,115	-10,817	4,088	0,083	0,991	0,992	0,095
87	6,130	-10,805	4,102	0,083	0,994	0,994	0,035
88	6,142	-10,892	4,113	0,081	0,997	0,975	2,211
89	6,150	-10,793	4,121	0,083	0,999	0,997	0,138
90	6,155	-10,817	4,126	0,083	1,000	0,992	0,813
91	6,156	-10,780	4,127	0,084	1,000	1,000	0,000
92	6,154	-10,968	4,125	0,080	1,000	0,958	4,181
93	6,149	-10,981	4,120	0,080	0,998	0,955	4,344
94	6,140	-11,019	4,112	0,079	0,996	0,946	4,996
95	6,128	-11,019	4,100	0,079	0,993	0,946	4,726
96	6,112	-11,032	4,085	0,079	0,990	0,944	4,664
97	6,093	-11,032	4,067	0,079	0,985	0,944	4,241
98	6,070	-11,071	4,046	0,078	0,980	0,935	4,600
99	6,044	-11,097	4,021	0,078	0,974	0,930	4,599
100	6,014	-11,084	3,994	0,078	0,968	0,932	3,653
101	5,981	-11,111	3,964	0,077	0,960	0,927	3,497
102	5,944	-11,177	3,930	0,076	0,952	0,913	4,153
103	5,904	-11,272	3,894	0,075	0,943	0,893	5,344
104	5,860	-11,097	3,855	0,078	0,934	0,930	0,468
105	5,812	-11,097	3,813	0,078	0,924	0,930	0,627
106	5,761	-10,968	3,768	0,080	0,913	0,958	4,900
107	5,706	-11,045	3,721	0,079	0,902	0,941	4,356
108	5,648	-11,071	3,671	0,078	0,890	0,935	5,133
109	5,586	-11,137	3,619	0,077	0,877	0,921	5,038

Angulo	DATOS		DB-->MAGBITUD		NORMALIZADOS		%ERROR
	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB VOLT	
110	5,521	-11,272	3,565	0,075	0,864	0,893	3,380
111	5,452	-11,217	3,509	0,076	0,850	0,904	6,363
112	5,379	-11,341	3,450	0,073	0,836	0,879	5,135
113	5,302	-11,411	3,390	0,072	0,821	0,865	5,293
114	5,222	-11,539	3,328	0,070	0,806	0,840	4,120
115	5,138	-11,732	3,265	0,067	0,791	0,803	1,537
116	5,051	-11,763	3,200	0,067	0,775	0,798	2,880
117	4,960	-11,902	3,133	0,065	0,759	0,772	1,739
118	4,865	-12,030	3,065	0,063	0,743	0,750	0,968
119	4,766	-12,112	2,997	0,061	0,726	0,736	1,358
120	4,664	-12,162	2,927	0,061	0,709	0,728	2,590
121	4,558	-12,246	2,856	0,060	0,692	0,714	3,103
122	4,448	-12,456	2,785	0,057	0,675	0,680	0,767
123	4,335	-12,546	2,713	0,056	0,657	0,666	1,308
124	4,217	-12,402	2,641	0,058	0,640	0,688	7,575
125	4,096	-12,263	2,568	0,059	0,622	0,711	14,209
126	3,972	-12,367	2,496	0,058	0,605	0,694	14,760
127	3,843	-12,564	2,423	0,055	0,587	0,663	12,966
128	3,711	-12,509	2,350	0,056	0,569	0,672	17,930
129	3,575	-12,732	2,278	0,053	0,552	0,638	15,605
130	3,435	-12,809	2,206	0,052	0,534	0,627	17,296
131	3,292	-13,006	2,134	0,050	0,517	0,599	15,839
132	3,145	-13,214	2,063	0,048	0,500	0,571	14,256
133	2,993	-13,431	1,992	0,045	0,483	0,543	12,529
134	2,838	-13,613	1,922	0,044	0,466	0,521	11,832
135	2,680	-13,900	1,853	0,041	0,449	0,488	8,559
136	2,517	-14,156	1,785	0,038	0,433	0,460	6,272
137	2,351	-14,371	1,718	0,037	0,416	0,437	5,084
138	2,180	-14,568	1,652	0,035	0,400	0,418	4,429
139	2,006	-14,806	1,587	0,033	0,385	0,396	2,928
140	1,828	-14,929	1,523	0,032	0,369	0,385	4,232
141	1,645	-15,056	1,461	0,031	0,354	0,374	5,561
142	1,459	-15,255	1,399	0,030	0,339	0,357	5,276
143	1,269	-15,570	1,339	0,028	0,325	0,332	2,297
144	1,074	-15,831	1,281	0,026	0,310	0,313	0,724
145	0,875	-15,949	1,223	0,025	0,296	0,304	2,633
146	0,672	-16,152	1,167	0,024	0,283	0,290	2,641

Angulo	DATOS		DB-->MAGBITUD		NORMALIZADOS		%ERROR
	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB-VOLT	SIMULADOR	LAB VOLT	
147	0,465	-16,278	1,113	0,024	0,270	0,282	4,577
148	0,253	-16,408	1,060	0,023	0,257	0,274	6,567
149	0,036	-16,728	1,008	0,021	0,244	0,254	4,065
150	-0,186	-17,394	0,958	0,018	0,232	0,218	6,052
151	-0,412	-17,987	0,909	0,016	0,220	0,190	13,658
152	-0,644	-18,529	0,862	0,014	0,209	0,168	19,616
153	-0,882	-19,152	0,816	0,012	0,198	0,146	26,433
154	-1,125	-19,983	0,772	0,010	0,187	0,120	35,755
155	-1,374	-20,302	0,729	0,009	0,177	0,112	36,771
156	-1,630	-21,024	0,687	0,008	0,166	0,095	43,202
157	-1,893	-21,741	0,647	0,007	0,157	0,080	48,836
158	-2,164	-22,240	0,608	0,006	0,147	0,071	51,462
159	-2,443	-22,811	0,570	0,005	0,138	0,063	54,611
160	-2,732	-23,476	0,533	0,004	0,129	0,054	58,386
161	-3,030	-24,584	0,498	0,003	0,121	0,042	65,462
162	-3,339	-25,283	0,464	0,003	0,112	0,035	68,430
163	-3,660	-25,283	0,431	0,003	0,104	0,035	66,009
164	-3,994	-25,687	0,399	0,003	0,097	0,032	66,551
165	-4,341	-26,138	0,368	0,002	0,089	0,029	67,341
166	-4,702	-25,687	0,339	0,003	0,082	0,032	60,628
167	-5,075	-26,649	0,311	0,002	0,075	0,026	65,625
168	-5,457	-27,241	0,285	0,002	0,069	0,023	67,246
169	-5,839	-27,241	0,261	0,002	0,063	0,023	64,235
170	-6,204	-27,943	0,240	0,002	0,058	0,019	66,907
171	-6,520	-26,138	0,223	0,002	0,054	0,029	46,060
172	-6,733	-27,241	0,212	0,002	0,051	0,023	56,053
173	-6,763	-27,241	0,211	0,002	0,051	0,023	55,750
174	-6,512	-27,241	0,223	0,002	0,054	0,023	58,239
175	-5,902	-27,241	0,257	0,002	0,062	0,023	63,708
176	-4,931	-26,649	0,321	0,002	0,078	0,026	66,742
177	-3,694	-26,138	0,427	0,002	0,103	0,029	71,859
178	-2,354	-26,649	0,582	0,002	0,141	0,026	81,626
179	-1,092	-25,687	0,778	0,003	0,188	0,032	82,849
180	-0,059	-25,283	0,986	0,003	0,239	0,035	85,164

En la tabla 11 se observó que el error relativo generado al comparar los datos obtenidos por medio del simulador y del equipo de simulación lab-volt es un poco

menor al obtenido en la antena numero 2 igualmente sigue siendo considerable a los lados del lóbulo principal. Estos errores al igual que en la antena 2 son ocasionados por ciertos factores existentes en el área de medición y en las consideraciones especiales que hace el software de simulación al hacer el trazo del patrón de radiación.

A pesar de los errores que se pueden observar que el patrón de radiación de la antena 3, esta alcanza una magnitud de radiación máxima de aproximadamente -9dB la cual es razonable.

Analizando la tabla 11 podemos obtener:

Tabla 12. Cálculos de datos tabla 10

ERROR MAXIMO (%)	ERROR MINIMO (%)	ERROR PROMEDIO (%)
85,16374825	0,00	21,63789808

Figura 43. % Error antena 10-13,4GHz

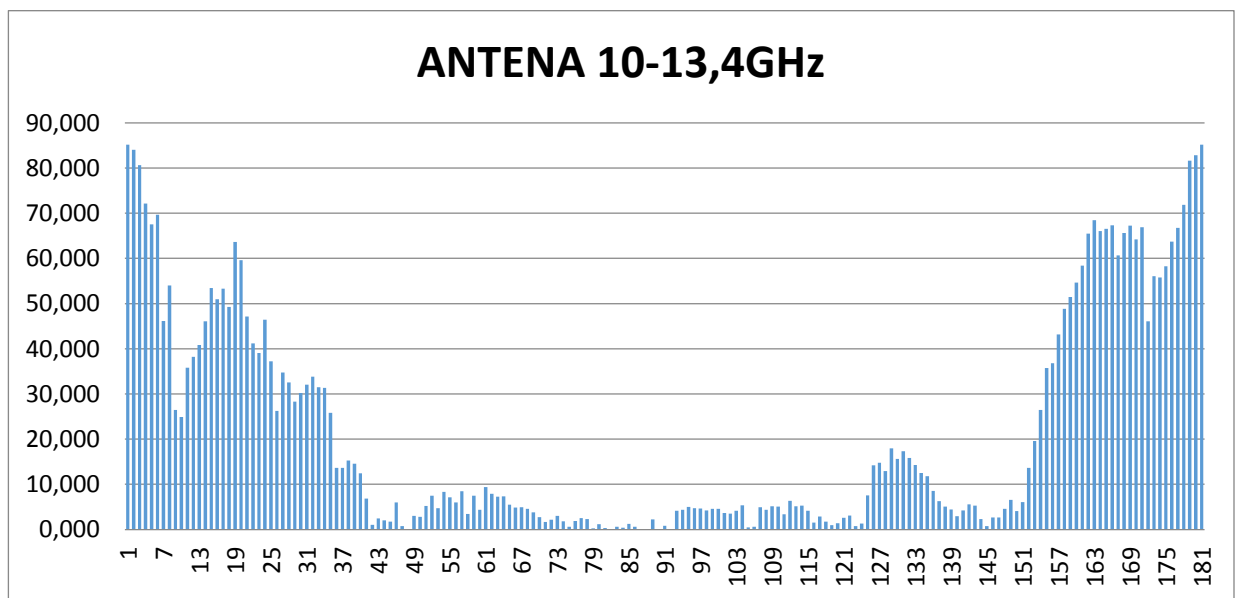
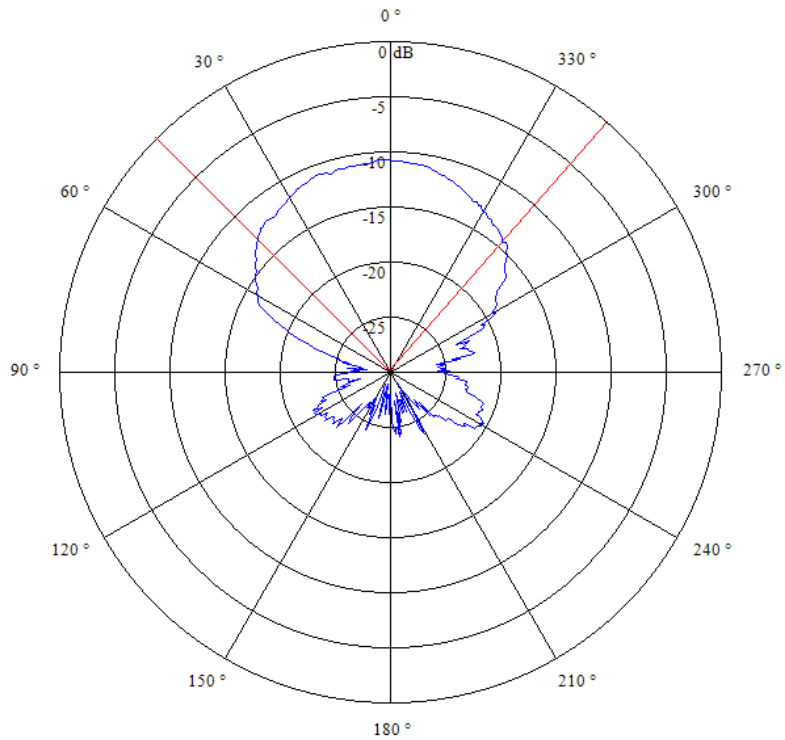


Figura 44. Potencia mitad antenna 10-13,4GHz



Potencia mitad = $134^\circ - 49^\circ$

Potencia mitad = 86°

Tabla 13. Potencia mitad antenna 10-13,4GHz

PROMEDIO %ERROR POTENCIA MITAD	DESVIACION ESTANDAR POTENCIA MITAD
4,84494905	4,2925

En la tabla 13 se observa una mejoría satisfactoria en el promedio del porcentaje de error.

CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- En este trabajo se analizó el patrón de radiación de antenas tipo parche con incisión en forma de U con diferentes dimensiones, donde se obtuvo como resultado un error menor del 30% en el patrón de radiación completo.
- Se observó por medio del software de simulación que al realizar pequeñas alteraciones en las dimensiones de la metalización de la antena rectangular tipo parche con incisión en U y alimentada por línea microstrip genera desplazamientos en las frecuencias de las dos bandas.
- Se observó por medio del software de simulación que la antena rectangular tipo parche con incisión en U no permite alterar de forma significativa la separación existente entre sus dos bandas de resonancia.
- Se comprobó que la antena tipo parche rectangular con incisión en U no realiza un corrimiento de la banda de trabajo sino que se genera una nueva banda de trabajo, se comprobó con la realización de tres antenas las cuales se diseñó una antena tipo parche rectangular que radie en 7GHz y con esas mismas medidas se diseñó otra con la incisión en U que radia en 7GHz y 10GHz, con las medidas de una antena que radia en 10GHz se diseñó otra con incisión en U y se comprobó que esta aun radiaba a 10GHz y su nueva frecuencia la cual es de 13.5GHz.
- Para futuros proyectos que tenga que ver con la construcción y análisis de antenas tipo parche rectangular con incisión en U o para cualquier otro tipo de antena Multibanda, sería conveniente contar con equipos que permitan la correcta medición experimental de las mismas (sistemas de elaboración y medición que trabajen en rango amplio de bandas y no solo a 1 y 10 GHz, analizador vectorial de espectros).

REFERENCIAS

- [1] IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas, 22, junio, 1983. 31p. Revisión of ANSI/IEEE Std 145-1973.
- [2] CARDAMA, Aznar Ángel; JOFRE, Roca Lluís; RUIZ, Juan Manuel; ROMEU, Robert Jordi; BATALLER, Miguel Ferrando. Antenas: 2da Edición. Editorial Alfaomega. 2002. N°468.
- [3] GARCIA Domínguez Armando, Cálculo de Antenas: Antenas de última generación para tecnología digital y métodos de medición, cuarta edición, editorial marcombo, 2010. N° 230.
- [4] RAMESH GARG, Prakash Bhartia, INDER B AHL, Apisak Ittipiboon. Microstrip Antenna Desing Handbook. Artech House, 2001. 845p.
- [5] BIFFI GENTILI, G; PIAZZESI, P; SALVADOR, C. Dual-Banda slot antenna, Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings. Agosto, 1995. Vol. 142, p. 225 – 232.
- [6] WONG, K. L.. Slot-loaded, meandered rectangular microstrip antenna whit compact dual frequency operation, Electronics Letters, Vol. 34. Agosto, 1998. p. 1048-1050.
- [7] SZE, Jia-Yi; WONG, Kin-Lu. Bandwidth Enhancement of a Microstrip-Line-Fed Printed Wide-Slot Antenna. IEEE transactions on antennas and propagation. Julio, 2001. Vol. 49. N° 7. p. 1020-1024.
- [8] Shafai, L. ; Jacob, N.. “Investigation of wide-band microstrip slot antenna”. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, Vol 52. Mar., 2004. p. 865 – 872.
- [9] HERNANDEZ AQUINO, Raúl. Diseño, simulación y construcción de antena tipo parche para bluetooth y WI-FI, bandas 2.4 ghz y 5.8 ghz. Puebla.: Universidad de las Américas Puebla. Escuela de Ingeniería y Ciencias. Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica. 2008. 141p.
- [10] A. BALANIS, Constantine. MODERN ANTENNA HANDBOOK. john wiley y sons. 2008. 1704p.
- [11] Antenna-theory. VSWR. [en línea]. 2009. [citado el 5 de julio de 2014]. Disponible en internet: <http://www.antenna-theory.com/definitions/vswr.php>
- [12] J. C. Colombo. Medición De Parámetros De Dispersión S. medidas electrónicas II. 2012.
- [13] Antenna-theory. Smith Chart. [en línea]. 2009. [citado el 6 de julio de 2014]. Disponible en internet: <http://www.antenna-theory.com/tutorial/smith/chart.php>

- [14] RAMESH Garg. [Et al]. Microstrip Antenna Design Handbook. Artech House. 2001. 845p.
- [15] KAI FONG Lee... [Et al]. The Versatile U-Slot Patch Antenna. En: Antennas and Propagation magazine. Febrero 2010. Vol 52. pp. 71 – 88p.
- [16] TONG, Hong. SYSTEM STUDY AND DESIGN OF BROAD-BAND U-SLOT MICROSTRIP PATCH ANTENNAS FOR APERSTRUCTURES AND OPPORTUNISTIC ARRAYS. Trabajo de grado (opta título de master). Monterrey, California. Naval Postgraduate School. 2005. 88p.
- [17] ROGERS Corporation. RT/Duroid 5880. [en línea]. [Citado el 6 de julio de 2014]. Disponible en internet <http://www.rogerscorp.com/documents/606/acm/RT-duroid-5870-5880-Data-Sheet.pdf>.
- [18] ESCOLANO, Álvaro. Diseño y Simulación De Antena Plana. Trabajo de grado (opta título ingeniero técnico de Telecomunicación). Pamplona. Universidad Pública de Navarra. Escuela Técnica Superior De Ingenieros Industriales y De Telecomunicaciones. 2007. 67p
- [19] BALANIS, Constantine. Antenna Theory-Analysis And Design, 2da edición. New York. John Wiley and Sons. 1997. 960p
- [20] Sonnet. SONNET USER´S GUIDE. Abril 2013
- [21] SOPHOCLES, Orfanidis. Electromagnetic Waves and Antennas, Rutgers University. 1st ed. 2004. 819p.
- [22] QUINTERO RODRIGUEZ, Gustavo de José y SARMIENTO LOPEZ, Luis Carlos. ANÁLISIS DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE UNA ANTENA TIPO PARCHE DE ARREGLO MATRICIAL DE PARCHES RECTANGULARES. Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico). Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Electrónica, 2012. 86p.
- [23] KRAUS, Gunthard. Design of Patch Antennas. [en línea]. 2011. [citado 11 de Julio de 2014]. Disponible en internet: http://www.gunthard-kraus.de/Tutorial_Sonnet/pdf_English/Tutorial_Sonnet_e.pdf.
- [24] Lee, Kai Fong; Steven Yang, Lung Steven, Kishk Ahmed A. U-slot Patch Antenna for dual band or multi band applications. IEEE Antenna Technology. Marzo 2009. P.1-4

[25] Arif, Sana; Nasir, Syeda Areeba; Mustaqim, Muhammad; Khawaja, Bilal A. Dual U-Slot Triple Band Microstrip Patch Antenna for Next Generation Wireless Networks. IEEE [Emerging Technologies](#). Diciembre 2013. p.1-6

[26] MARTÍNEZ CAMPOS, Sergio y JIMÉNEZ BERMÚDEZ, rosa. Análisis de la simulación del patrón de radiación de una antena tipo parche. Trabajo de grado [Ingeniero Electrónico]. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Escuela de Ingenierías y Administración. Facultad de Ingeniería Electrónica, 2012. Director: Guzmán Serna, Fabio Alonso.

[27] ORTEGA LEÓN, Eduardo Rafael. Diseño y elaboración de una guía de prácticas de laboratorio basada el equipo de medición de espectro de radiación de LAB-VOLT. Trabajo de Grado [Ingeniero Electrónico]. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Electrónica, 2012. Director: Guzmán Serna, Fabio Alonso.

[28] GARCIA OTERO, Gabriel Enrique y LAMUS AVENDAÑO, Roxana. Elaboración de un software para la simulación del patrón de radiación una antena microcinta circular con la herramienta Maltlab. Trabajo de grado. [Ingeniero Electrónico]. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Electrónica, 2012. Director: Guzmán Serna, Fabio Alonso.

[29] QUINTERO RODRIGUEZ, Gustavo de José y SARMIENTO LOPEZ, Luis Carlos. Análisis del patrón de radiación de una antena tipo parche de arreglo matricial de parches rectangulares. Trabajo de Grado [Ingeniero Electrónico]. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Electrónica, 2012. Director: Guzmán Serna, Fabio Alonso.

[30] GOMEZ TIBADUIZA, José Alberto y MOLINA GOMEZ, José Oswaldo. Análisis del patrón de radiación de una antena microstrip anillo circular. Trabajo de Grado [Ingeniero Electrónico]. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Electrónica, 2013. Director: Guzmán Serna, Fabio Alonso.

[31] ACELA GARCÍA, Edgar Giovanni y RIVERA MORA, José Leonardo. Diseño y construcción de una antena triangular tipo parche. Trabajo de Grado [Ingeniero Electrónico]. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional

Bucaramanga. Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Electrónica, 2013.
Director: Guzmán Serna, Fabio Alonso.

[32] ALVAREZ PIZARRO, Yuli Andrea y MURILLO NIÑO, Adriana María. Arreglo lineal de parche rectangular para una antena Microstrip. Trabajo de Grado [Ingeniero Electrónico]. Bucaramanga Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Electrónica, 2012.
Director: Guzmán Serna, Fabio Alonso.