

**ANÁLISIS DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE UNA ANTENA TIPO PARCHÉ DE
ARREGLO MATRICIAL DE PARCHES RECTANGULARES**

**GUSTAVO DE JOSE QUINTERO RODRÍGUEZ
LUIS CARLOS SARMIENTO LOPEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2012**

**ANÁLISIS DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE UNA ANTENA TIPO PARCHÉ DE
ARREGLO MATRICIAL DE PARCHES RECTANGULARES**

**GUSTAVO DE JOSÉ QUINTERO RODRÍGUEZ
LUIS CARLOS SARMIENTO LÓPEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título
de
Ingeniero Electrónico.**

**Director de tesis
Esp. FABIO ALONSO GUZMÁN SERNA
Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2012**

Nota de aceptación

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, Marzo del 2012

A Dios que me fortalece, mis padres y hermanos que me han acompañado y Apoyado en esta Etapa de mi vida dándome el apoyo en todos los momentos.

Gustavo De José Quintero Rodríguez

A Dios por la salud brindada y a mis padres y hermano Por siempre apoyarme en todos Los momentos de mi vida.

Luis Carlos Sarmiento López

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

La universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga por brindar una educación integral y hacernos crecer como profesionales y personas con sentido humano.

Al ingeniero Fabio Alonso Guzmán por brindarnos su apoyo y conocimiento en el desarrollo de este trabajo

A los profesores, amigos y demás que de alguna forma aportaron para nuestra formación profesional a lo largo de estos años.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	17
OBJETIVO GENERAL	17
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1. CONCEPTOS BÁSICOS DE ANTENAS PARCHE	18
1.1. TEÓRIA DE LAS ANTENAS	18
1.1.1. Historia de las Antenas.	18
1.2 ANTENAS	19
1.3 TIPOS DE ANTENAS	21
1.3.1 Antenas de Alambre	21
1.3.2 Antenas de Apertura	22
1.3.3 Antenas Microstrip.	22
1.3.4 Antenas de Reflexión.	22
1.3.5 Antenas de Lentes.	23
1.4 PARÁMETROS MÁS IMPORTANTES DE UNA ANTENA	23
1.4.1 Diagrama de Radiación	23
1.4.2 Lóbulos del Patrón de Radiación	24
1.4.3 Patrones Isotrópico, Direccional y Omnidireccional	25
1.4.4 Densidad de Potencia Radiada.	26
1.4.5. Intensidad de Radiación	26
1.4.6 Directividad de una Antena.	27
1.4.7 Eficiencia de una Antena	27
1.4.8 Ganancia de una Antena.	27
1.4.9. Ancho de Banda de una Antena	28
2. ANTENAS DE PARCHE O MICROSTRIP	29
2.1. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS	29
2.2 MÉTODOS DE ALIMENTACIÓN	31
2.2.1 Alimentación por línea microstrip.	31
2.2.2. Alimentación por sonda coaxial.	32
2.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS	33
2.3.1 Modelos empíricos	33
2.3.2 Modelos semi-empíricos	42
2.3.3 Modelos de onda completa.	43
2.4 ACOUPLE DE IMPEDANCIAS	43
2.5. ARREGLOS DE ANTENAS MICOSTRIP	44

2.5.1 Patrón de radiación de un arreglo microstrip	47
3. METODOLOGÍA DEL PROYECTO	49
3.1. DESARROLLO DEL PROYECTO	49
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	60
5. MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR	73
5.1. FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR	73
6. CONCLUSIONES	83
7. TRABAJOS FUTUROS	84
BIBLIOGRAFÍA	85

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Antena como un mecanismo de transición	20
Figura .2. Circuito equivalente de una antena	21
Figura 3. Ejemplo de una antena microstrip	22
Figura 4. Patrón de radiación en tres dimensiones	24
Figura 5. Lóbulos y ancho de haz del patrón de radiación de una antena.	25
Figura 6. Antena microstrip y sistema de coordenadas. a) Microstrip antenas. b) sistema de coordenadas para cada ranura. c) Vista lateral	30
Figura 7. Formas más representativas de elementos microstrip	31
Figura 8. Alimentación por línea microstrip. a) Alimentación directa. B) alimentación con inserciones.	32
Figura 9. Alimentación por sonda coaxial	33
Figura 10 FringingEffects de una antena de parche rectangular. a) Línea microstrip. b) Líneas de campo eléctrico	34
Figura 11. Longitud física y efectiva de parches microstrip rectangular.	36
Figura 12 Circuito equivalente de un parche microstrip	37
Figura 13 Distribución de cargas y creación de la densidad en el parche	39
Figura 14 Condiciones de frontera	40
Figura 15 Modelos de circuito resonante con pérdidas.	42
Figura 16. Acople de impedancias entre la línea de alimentación y el parche	43
Figura 17 Topología de arreglos microstrip. a) Arreglo lineal. b) Arreglo matricial	45
Figura 18. Diagrama de flujo para calcular las características de la antena y diagrama de flujo para obtener la frecuencia real	49
Figura 19. Diagrama de flujo para importar y exporta datos.	50
Figura 20. Diagrama de flujo para graficar y diagrama de flujo para calcular diferencias en db.	51
Figura 21. Diagrama de transición de estados del simulador completo	51
Figura 22 Antena número 1.	54
Figura 23 Patrón de radiación de la antena número 1.	55

Figura 24 Características para la construcción de la antena número 2.	56
Figura 25 Antena número 2.	56
Figura 26 Vista posterior del soporte del equipo.	57
Figura 27 Antena número 3.	57
Figura 28 Pruebas de la antena 3. a) Plano H. b) Plano E	58
Figura 29 Patrón de radiación de la antena número 3.	58
Figura 30 Patrón de radiación 3D de la antena número 3.	59
Figura 31 Diferencia grafica entre patrones	60
Figura 32 Diferencias en db	60
Figura 33 Ancho de banda para el plano eléctrico	61
Figura 34 Ancho de banda para el plano magnético	62
Figura 35 Diferencia del Plano E entre un Parche y un Arreglo	63
Figura 36. Diferencia del Plano E entre un arreglo 2x2 y un Arreglo 2x4	64
Figura 37. Modulo de inicio del simulador	73
Figura 38. Modulo menú del simulador	74
Figura 39 Modulo del botón simulación	75
Figura 40. Modulo del botón Gráficos	76
Figura 41. Modulo del botón Importar y Exportar	77
Figura 42 Exportar valores simulados.	78
Figura 43. Exportar valores simulados.	79
Figura 44. Importar valores simulados	79
Figura 45 Datos Importados	80
Figura 46. Modulo del botón Contrastar Patrones.	81
Figura 47. Comparación de Patrones.	81
Figura 48. Diferencias en db	82

GLOSARIO

Ancho de haz: Es el margen angular de direcciones en las que el diagrama de radiación de un haz toma el valor de la mitad del máximo.

Antena isotrópica: Físicamente esta antena no existe puesto que es ideal. Se define como una antena puntual que radia energía uniformemente en todas direcciones.

Cámara anecoica: Recinto blindado que atenúa las reflexiones de la onda electromagnética y emula un espacio libre

Constante dieléctrica: Es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio.

Dieléctrico: Material que es mal conductor, por lo que en algunos casos puede ser utilizado como aislante eléctrico, y además si este es sometido a un campo eléctrico externo, puede establecer en él un campo eléctrico interno.

EHF: (Extremely High Frequency) Banda de frecuencias más alta en la gama de las radiofrecuencias. Comprende las frecuencias de 30 a 300 GHz.

Estereorradián: Unidad derivada del Sistema Internacional que mide ángulos sólidos. Es el equivalente tridimensional del radián.

Fringing Effects: Debido a que la dimensión del parche es finita a lo largo de la longitud y el ancho, se presenta el efecto de los bordes en las esquinas del parche.

GUI: Interfaz Gráfica de Usuario (Graphic User Interface), es una plataforma de diseño personalizada que permite el ingreso, la interacción y la visualización de información por parte del usuario de la aplicación desarrollada.

HPBW: Ancho de banda de potencia mitad (half power beamwidth)

Lóbulo principal: Es el margen angular en torno a la dirección de máxima radiación. Está comprendido entre dos mínimos relativos.

Longitud de onda: La longitud de una onda es el período espacial de la misma, es decir, la distancia que hay entre crestas.

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

SHF: (Super High Frequency) Banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 3 GHz a 30 GHz.

Vector de Poynting: Puede definirse como el producto vectorial del campo eléctrico y el campo magnético y cuyo módulo da la intensidad de la onda

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ANÁLISIS DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE UNA ANTENA TIPO PARCHE DE ARREGLO MATRICIAL DE PARCHES RECTANGULARES

AUTOR(ES): GUSTAVO QUINTERO RODRÍGUEZ-LUIS
CARLOS SARMIENTO LOPEZ

FACULTAD: Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): Esp.FABIO ALONSO GUZMÁN SERNA

RESUMEN

Este proyecto consiste en el análisis del patrón de radiación de una antena tipo parche de arreglo matricial de parches rectangulares, basado en los cálculos arrojados por un software de simulación diseñado en el entorno de matlab, mediante módulos GUI. Se comparan resultados entre el patrón de radiación de la antena diseñada, obtenido mediante el equipo lab-volt y el patrón de radiación obtenido mediante el simulador diseñado.

PALABRAS CLAVES:

Microstrip, Patrón de radiación, GUI, Campo, HPBW

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: ANALYSIS OF RADIATION PATTERN OF AN ANTENNA PATCH TYPE MATRIX UNDER RECTANGULAR PATCH.

AUTHOR(S): GUSTAVO QUINTERO RODRÍGUEZ-LUIS
CARLOS SARMIENTO LOPEZ

FACULTY: ELECTRONIC ENGINEERING

DIRECTOR: FABIO ALONSO GUZMÁN SERNA

ABSTRACT

This project consists in the analysis of the radiation pattern of a patch type antenna in a matrix arrangement of rectangular patches, based on calculations obtained from a simulation software designed within Matlab environment by using GUI models. Results of the radiation pattern from the antenna are compared, those results were obtained by using the Lab-Volt equipment and the radiation pattern obtained from the designed simulator.

KEYWORDS:

Microstrip, Landlord of radiation, GUI, field, HPBW.

INTRODUCCIÓN

En un mundo como el de hoy donde la tecnología inalámbrica presenta un gran desarrollo y el principal objetivo es llegar a superar o por lo menos igualar el rendimiento de las comunicaciones mediante líneas de transmisión o alambres, se hace realmente importante el estudio de las antenas y de sus diversas aplicaciones puesto que estas son la base de cualquier red de comunicación inalámbrica.

Una antena puede ser vista como un dispositivo con el cual se puede transmitir y recibir ondas de radio. Convierte la onda guiada por línea de transmisión en ondas electromagnéticas las cuales se pueden transmitir por el espacio libre. En la actualidad existen diversos tipos de antenas, las cuales dependiendo de su forma y orientación, pueden captar diferentes frecuencias, así como niveles de intensidad.

A pesar de la gran variedad de antenas que existen hoy en día, este trabajo de grado se basó en el estudio de las antenas microstrip o de parche, teniendo como objetivo principal el diseño de una antena microstrip de arreglo matricial de 2x2. Con el diseño de un software en el entorno de matlab, que permitiera simular un arreglo de antenas se pudo lograr contrastar los resultados entre la antena real diseñada y una simulada, midiendo que tanta diferencia hay entre los patrones de radiación de las mismas. El manual de funcionamiento de simulador lo podrá encontrar en el capítulo V.

En el capítulo II de este libro se encontrara toda la información básica sobre antenas que necesita conocer para una mejor comprensión de cómo se llevó a cabo este proyecto. Toda la metodología y especificaciones de diseño las podrá encontrar en el capítulo III, explicada de una manera clara y concisa.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir una antena microstrip con un arreglo matricial 2x2 de parches rectangulares para una frecuencia específica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un algoritmo para el diseño de la antena, el patrón de radiación y la línea de alimentación.
- Construir la antena con base en los resultados del algoritmo.
- Comprobar experimentalmente el patrón de radiación de la antena diseñada.
- Contrastar los resultados obtenidos experimentalmente con los obtenidos en el algoritmo.

1. CONCEPTOS BÁSICOS DE ANTENAS PARCHE

1.1. TEORÍA DE LAS ANTENAS

En un mundo donde la información en tiempo real se hace altamente necesaria para la correcta toma de decisiones, las antenas juegan un papel determinante. En la actualidad gracias a ellas tenemos acceso a todo tipo de información casi que en cualquier lugar y en cualquier momento. En las últimas décadas la tecnología de las comunicaciones inalámbricas ha evolucionado de manera sorprendente, por esto las antenas tipo parche han sido objeto de investigación para los diferentes sectores de las comunicaciones.

1.1.1. Historia de las Antenas. A fines del siglo xix, James Clerk Maxwell concluía una de las páginas más importantes en la historia de la ciencia: un tratado que sintetizaba la teoría de la electricidad y el magnetismo en una sola: la teoría electromagnética. En este tratado, Maxwell mencionaba la factibilidad con la cual los efectos electrico-magneticos viajaran a grandes distancias llevando consigo información de algún tipo [1].

Sin embargo, sería un catedrático alemán, Heinrich Hertz, quien poco después comprobaría prácticamente la teoría de Maxwell, haciendo uso de generadores de chispas eléctricas como transmisores, así como de dipolos resonantes como elementos radiadores (llamados dipolos hertzianos, en su honor) [3].

Más tarde, en 1901, Guillermo Marconi, ya con el auxilio de tubos al vacío y otros dispositivos, dio carácter comercial a las comunicaciones a grandes distancias: la radio [1].

Tabla 1. Sucesos más relevantes a través de la historia de las antenas y de las comunicaciones.

AÑO	SUCESO
1926-1927	Se da la invención de la antena Yagi-Uda, por el profesor japonés Shintaro Uda, y la difusión de los resultados por Yagi.
1932	Arnold Sommerfeld estudia las radiaciones producidas entre medios dieléctricos (hoy ampliamente usadas en antenas de parche o de microcinta)
1938	Los reflectores parabólicos son usados como radiotelescopios por Grote Reber
1939-1945	Durante la segunda guerra mundial se usan el radar -inventado en 1930 y las comunicaciones inalámbricas con fines tácticos
1969	Se lleva a cabo el lanzamiento del primer satélite de comunicaciones comerciales, y con ello, las comunicaciones más allá de la atmósfera proliferan, con la puesta de estos equipos en el espacio.
1990	La telefonía celular y las comunicaciones personales impactan por lo amplio de su mercado y rápido crecimiento.

Fuente: José Abel Hernández Rueda, Antenas: principios básicos, análisis y diseño, universidad autónoma de baja california, 1998.

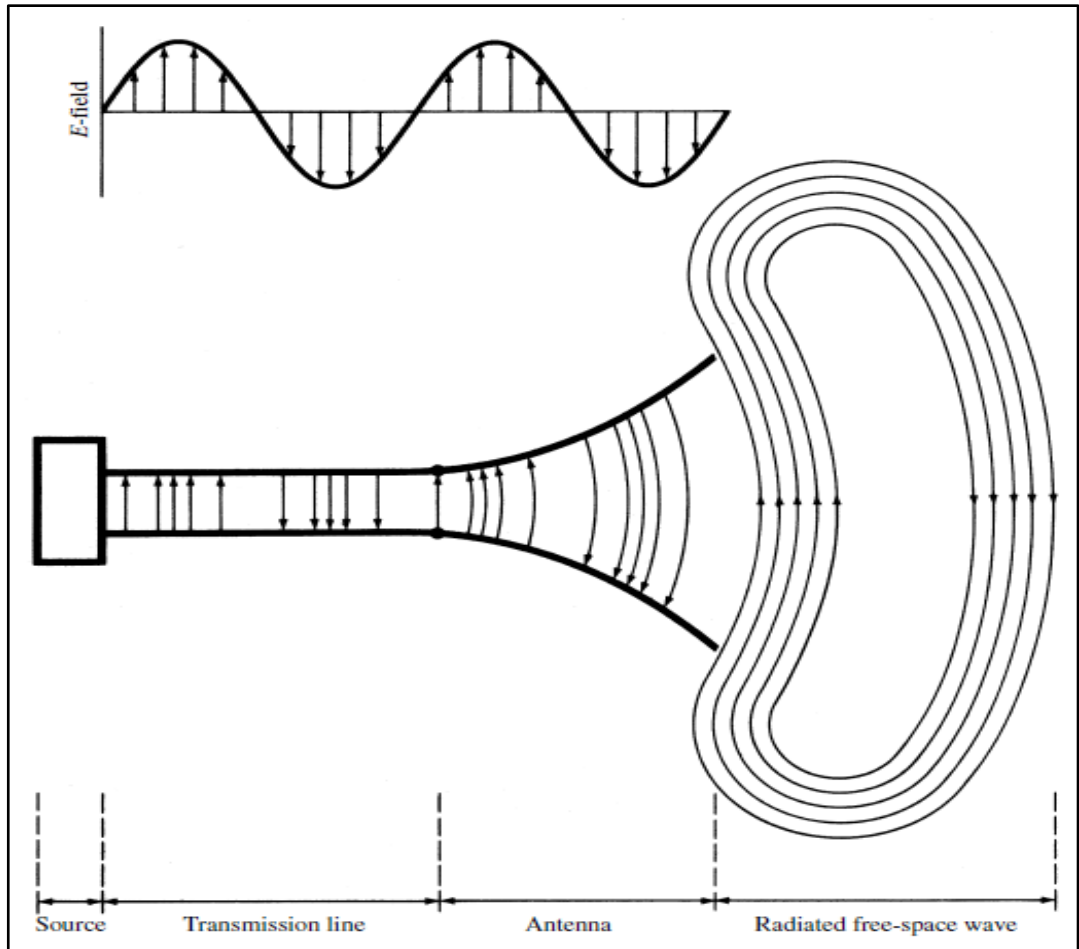
1.2 ANTENAS

Una antena se define en el diccionario Webster como un dispositivo generalmente metálico (barra o cable) para irradiar o recibir ondas de radio. El estándar IEE (IEE std 145-1983) define la antena como “un medio para irradiar o recibir ondas de radio”. En otras palabras, la antena es la transición entre la estructura de espacio libre y un dispositivo de guía como se muestra en la figura 1 [2].

El hilo conductor del dispositivo o la transmisión puede tomar la forma de una línea coaxial o un tubo hueco (guía de onda) y se utiliza para el transporte de energía electromagnética de la fuente de transmisión de la antena, o desde la antena

hasta el receptor. En el primer caso se tiene una antena de trasmisión y en el segundo una antena receptora [2].

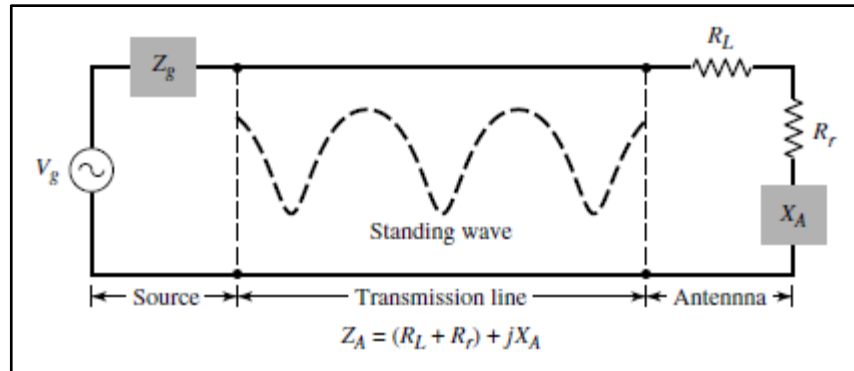
Figura 1. Antena como un mecanismo de transición



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

El circuito equivalente de thevenin para una línea de trasmisión del sistema de antena de la figura 1.1 se muestra en la figura .2, donde se representa la fuente como un generador ideal, la línea de trasmisión está representada por una línea con impedancia característica Z_c y la antena está representada por una carga $Z_A = (R_L + R_r) + jX_A$. Donde la resistencia de carga R_L representa las pérdidas por conductor y por el dieléctrico. R_r es conocida como la resistencia de radiación y se utiliza para representar la radiación de la antena. La reactancia X_A se utiliza para representar la parte imaginaria de la impedancia asociada a la radiación por la antena [2].

Figura .2. Circuito equivalente de una antena



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

En condiciones ideales se esperaría que la potencia que genera la fuente sea transmitida en su totalidad a la resistencia de radiación R_r , sin embargo y debido a las pérdidas intrínsecas como las pérdidas por conducción, por el dieléctrico y por desacoplamiento de impedancias no toda la potencia es transmitida y se generan dos tipos de ondas viajando en direcciones opuestas: ondas transmitidas que van desde la fuente hacia la carga y ondas reflejadas que viajan en dirección contraria. Estas ondas en direcciones opuestas generan interferencia constructiva o destructiva que deriva en las llamadas ondas estacionarias (standing waves) [2].

1.3 TIPOS DE ANTENAS

Dependiendo del área para la que se desee y las condiciones en las que se vaya a usar una antena, se pueden fabricar diferentes tipos de antenas, con diferentes tamaños y diferentes características, a continuación se presenta una breve descripción sobre las más importantes.

1.3.1 Antenas de Alambre. Las antenas de alambre son las más conocidas, puesto que las vemos en la cotidianidad de nuestras vidas, como por ejemplo en automóviles, edificios, barcos y aviones. Existen varias formas de antenas de alambres como los monopolos, dipolos, las antenas de lazo y antenas de hélices [2].

1.3.2 Antenas de Apertura. Las antenas de apertura son más comunes en frecuencias de microondas. Hay muchas configuraciones geométricas de una antena de apertura, las cuales pueden tomar la forma de una guía de onda o un cuerno, cuya abertura puede ser cuadrada, rectangular, circular elíptica o cualquier otra configuración [2].

1.3.3 Antenas Microstrip. Las antenas microstrip se hicieron muy populares en la década 1970, principalmente para aplicaciones de aeronaves y naves espaciales ya que se pueden adaptar a casi cualquier superficie o estructura. Hoy en día se utilizan para aplicaciones gubernamentales y comerciales. Estas antenas consisten en un parche metálico sobre un sustrato de tierra [2].

El parche metálico puede adoptar muchas configuraciones diferentes, sin embargo los parches rectangulares y circulares suelen ser los más populares debido a su facilidad de análisis y fabricación. En la figura 3 se muestran un ejemplo de una antena microstrip.

Figura 3. Ejemplo de una antena microstrip



Fuente: Sergio Martínez, Rosa Jimenez; análisis de la simulación del patrón de radiación en una antena tipo parche, Bucaramanga, 2010, Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico), Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela Ingenierías, Facultad de ingeniería electrónica.

1.3.4 Antenas de Reflexión. Su funcionamiento se basa en la reflexión de las ondas electromagnéticas por la cual las ondas que inciden paralelamente al eje principal se reflejan y van a parar a un punto denominado foco, el cual está centrado en el paraboloide. En el caso de una antena receptora, en cambio si se trata de una antena emisora, las ondas que emanan del foco (dispositivo de emisión) se ven reflejadas y abandonan el reflector en forma paralela al eje de la

antena [3]. Utilizan extensamente en sistemas de comunicaciones en las bandas de UHF a partir de unos 800 MHz y en las de SHF y EHF [3].

Las antenas con reflector parabólico, o simplemente antenas parabólicas se

Entre sus características principales se encuentran la sencillez de construcción y elevada direccionalidad. La forma más habitual del reflector es la de un paraboloides de revolución, excitado por un alimentador situado en el foco [3].

1.3.5 Antenas de Lentes. Las antenas de lentes utilizan principalmente para colimar la energía incidente divergente para evitar que difunda en direcciones no deseadas. Se pueden utilizar en las mismas aplicaciones de los reflectores parabólicos o frecuencias altas. El tamaño de este tipo de antenas puede aumentar considerablemente en frecuencias bajas [2].

1.4 PARÁMETROS MÁS IMPORTANTES DE UNA ANTENA

No siempre las antenas se construyen para trabajar en un mismo sistema, Por lo contrario se diseñan antenas para darles diferentes usos y para trabajar en diferentes ambientes por esto se debe conocer los parámetros que las describen para evaluar y poder conocer el efecto que va a producir sobre nuestro sistema.

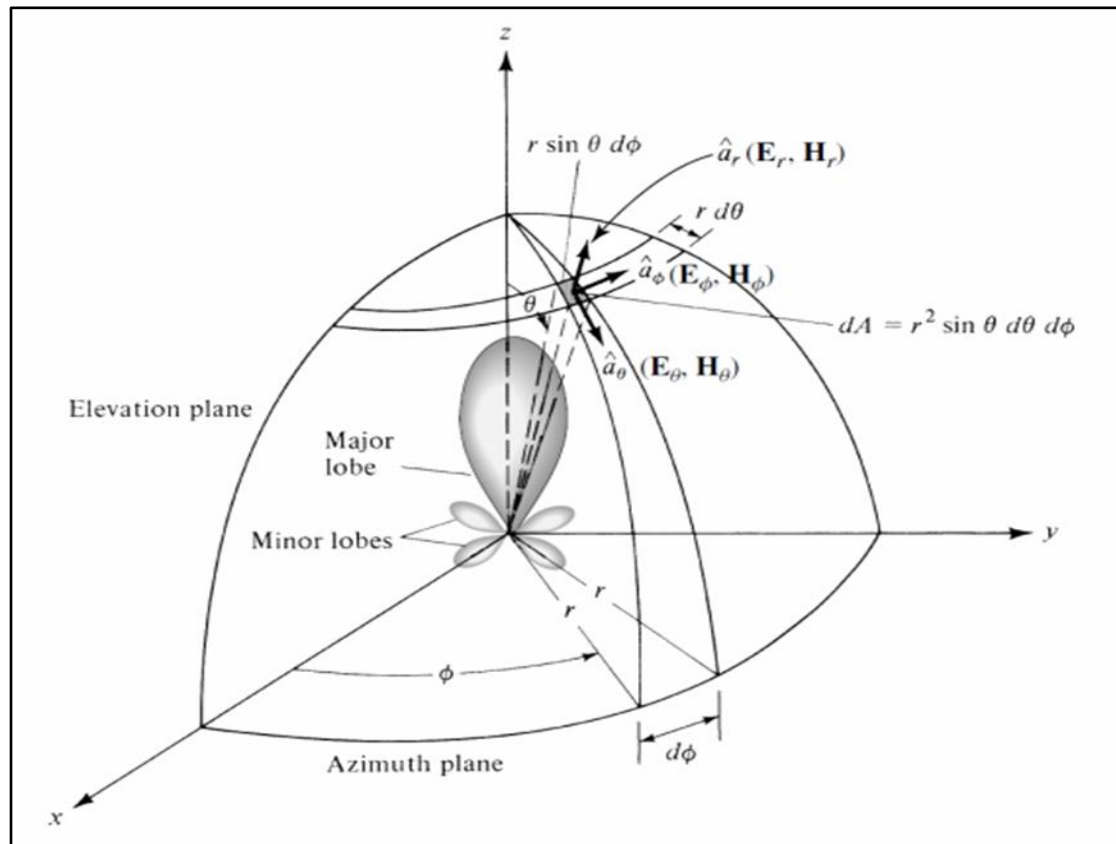
1.4.1 Diagrama de Radiación. El diagrama de radiación también conocido como patrón de radiación se define como una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de la dirección y nunca depende de la distancia entre un punto y la antena [2].

La representación del diagrama de radiación se puede dibujar en plano cartesiano, en plano polar en dos dimensiones o tres dimensiones. Cuando la representación del patrón de radiación está construido en plano polar de tres dimensiones puntos correspondientes a la energía radiada de la antena se grafican en dos planos, plano de elevación que se encuentra en función del ángulo θ ($g(\theta)$) y plano azimutal que puede verse como un plano horizontal y está en función del ángulo φ ($f(\varphi)$) (figura.4). Es frecuente que a estos planos se les conozca como planos \vec{E} y \vec{H} .

El patrón de radiación es una característica que solo se puede tener en cuenta cuando la persona que manipula la antena receptora este alejada a una distancia

de 5λ , puesto que cuando se está muy cerca de la antena transmisora o a una distancia menor a λ , los campos electromagnéticos no se propagaran en el espacio libre como ondas radiadas. Estos efectos son conocidos como campos lejanos y campos cercanos.

Figura 4. Patrón de radiación en tres dimensiones

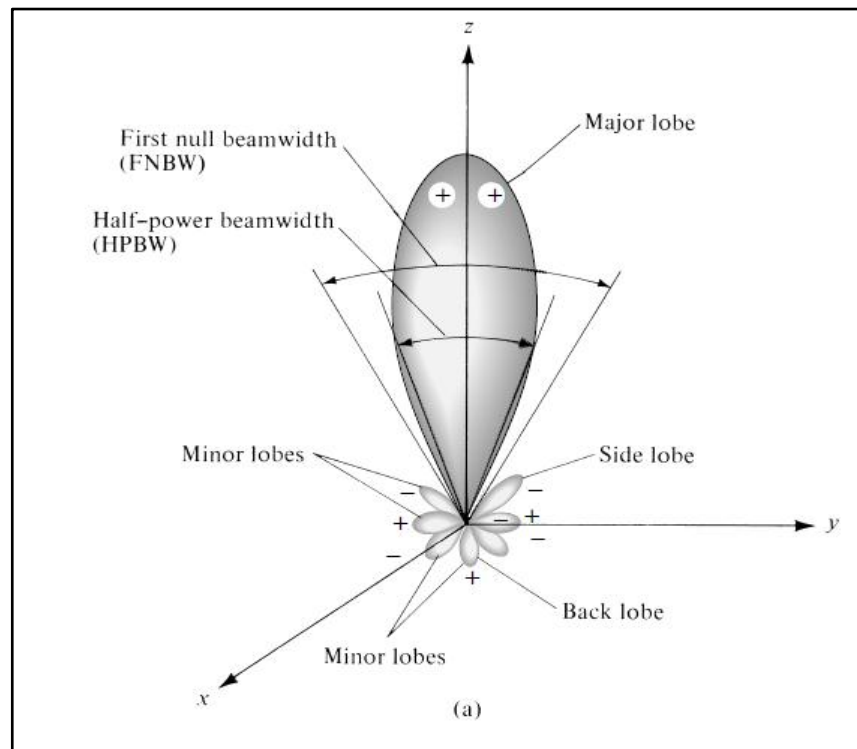


Fuente: Constantine A. Balanis., Antenna Theory, Analysis And Design., Tercera Edition, John Wiley y Sons., 2005.

1.4.2 Lóbulos del Patrón de Radiación. Los lóbulos del patrón de radiación se conocen como el área del mismo, que está rodeada por regiones de relativamente baja intensidad de radiación. Se pueden clasificar en lóbulo mayor o principal, lóbulos laterales y lóbulos posteriores [2]. En la figura 5 se observa un patrón simétrico tridimensional con sus diferentes lóbulos [2].

Cuando el diagrama de radiación contiene un lóbulo mayor o principal se dice que la antena es altamente direccional, el ancho en grados de dicho lóbulo se conoce como ancho de haz.

Figura 5. Lóbulos y ancho de haz del patrón de radiación de una antena.



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

1.4.3 Patrones Isotrópico, Direccional y Omnidireccional. Un radiador isotrópico se define como “Una antena hipotética, sin pérdida de la radiación, igual en todas las direcciones”. A pesar de que es ideal y no es realizable físicamente, a menudo es tomado como referencia para expresar las propiedades de directividad de las antenas reales. Una antena direccional es aquella que tiene la propiedad de irradiar o recibir ondas electromagnéticas con mayor eficacia en algunas direcciones. Este término se aplica generalmente a una antena cuya máxima directividad es significativamente mayor que la de un dipolo de media onda. El patrón omnidireccional es el que presenta un patrón no direccional en un plano, si no direccional en todos los planos [2].

1.4.4 Densidad de Potencia Radiada. La densidad de potencia radiada de una antena se describe como la potencia por unidad de superficie que radia una antena siendo inversamente proporcional a la distancia. Para calcular la potencia de cualquier onda electromagnética se puede recurrir al vector de Poynting. La potencia contenida en un área es igual a la integral cerrada de superficie del producto punto entre el vector de Poynting y el diferencial de área. [2], como se observa en la siguiente ecuación.

$$\mathcal{P} = \oiint_S \mathcal{W} \cdot d\mathbf{s} = \oiint_S \mathcal{W} \cdot \hat{\mathbf{n}} da \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde se tiene que:

\mathcal{P} = es la potencia total instantánea en \mathcal{W} .

\mathcal{W} = es el vector de Poynting puntual.

$\hat{\mathbf{n}}$ = es vector unitario normal a la superficie.

da = es el área infinitesimal de la superficie cerrada en m^2 .

La potencia radiada promedio de una antena depende de la densidad de potencia promedio y esta se puede hallar por medio de:

$$\mathbf{W}_{av}(x, y, z) = [\mathcal{W}(x, y, z; t)]_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \quad \text{Ecuación (1.2)}$$

Integrando el área deseada se puede hallar la potencia radiada promedio con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} P_{rad} = P_{av} &= \oiint_S \mathbf{W}_{rad} \cdot d\mathbf{s} = \oiint_S \mathbf{W}_{av} \cdot \hat{\mathbf{n}} da \\ &= \frac{1}{2} \oiint_S \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot d\mathbf{s} \end{aligned} \quad \text{Ecuación (1.3)}$$

1.4.5. Intensidad de Radiación. La intensidad de radiación se define como la potencia radiada por unidad de ángulo sólido y su unidad es el watt/estereorradián; por ser un parámetro de zona lejana es apropiado al momento de calcular la directividad de una antena. Se puede calcular como:

$$U = r^2 W_{rad} \quad \text{Ecuación (1.4)}$$

1.4.6 Directividad de una Antena. La directividad de una antena se refiere a la concentración de ganancia en una determinada dirección, en cuanto la directividad sea mayor, menos equitativamente estará repartida la dirección de la antena y se concentrara en una dirección. Entre más alta sea la directividad, el haz de radiación será más afilado [4]. La directividad de una antena microstrip se calcula como:

$$D = \frac{4 \left(\frac{\pi W}{\lambda_0} \right)^2}{\int_0^{\pi} \left[\frac{\text{sen} \left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta \right)}{\cos \theta} \right]^2 \text{sen}^3 \theta d\theta} \quad \text{Ecuación (1.5)}$$

1.4.7 Eficiencia de una Antena. Para calcular la eficiencia total se debe tener en cuenta la eficiencia de reflexión y la eficiencia de radiación. Estas dos eficiencias indicaran que tan buena puede ser una antena emitiendo una señal y que tan bien está adaptada la antena a la línea de transmisión. La eficiencia total de una antena se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad \text{Ecuación (1.6)}$$

Dónde:

e_r = eficiencia de reflexión.

e_c = es la eficiencia de conductor asociada con las pérdidas por efecto Joule.

e_d = es la eficiencia del dieléctrico asociada con las pérdidas del mismo.

1.4.8 Ganancia de una Antena. La ganancia de una antena es uno de los parámetros más importantes. La ganancia tiene en cuenta las propiedades direccionales y la eficiencia de la antena. Se dice que la ganancia es la razón de la intensidad de radiación en cualquier dirección a la radiación de intensidad que sería obtenida si la potencia aceptada por la antena fuera radiada de manera isotrópica [4]. La ganancia de una antena se expresa como:

$$\text{Ganancia} = 4\pi \frac{\text{intensidad de radiacion}}{\text{potenmcia total entregada}} = 4\pi \frac{U(\theta, \Phi)}{P_{in}} \quad \text{Ecuación (1.7)}$$

1.4.9. Ancho de Banda de una Antena. Se le conoce como ancho de banda al conjunto de frecuencias en el cual al menos unos de los parámetros que representan la antena permanece constante o con muy pocas variaciones. Los parámetros a los que se hace referencia pueden ser en general los parámetros de impedancia, diagrama de radiación o polarización. Por ejemplo, una antena con un ancho de banda de 10,9GHz a 12,8GHz está diseñada para captar todas las frecuencias comprendidas entre los dos límites citados, lo que implica que tiene un ancho de banda de 1,9GHz a partir de 10,9GHz. En forma general el ancho de banda está ligado con las características buscadas en el funcionamiento de una antena [2].

2. ANTENAS DE PARCHE O MICROSTRIP

En las aeronaves de alto rendimiento, naves espaciales, satélites, misiles y demás aplicaciones donde el tamaño, peso, costo, rendimiento, facilidad de instalación y perfil aerodinámico son una limitación, las antenas parche pueden ser requeridas como solución gracias a que cumplen con dichos requerimientos. En la actualidad hay muchas otras aplicaciones gubernamentales y comerciales, tales como telefonía móvil y comunicaciones inalámbricas, que tienen especificaciones similares, para cumplir estos requisitos existen las antenas microstrip [2].

Las antenas microstrip se pueden adaptar a la superficie que se desee, plana o no plana, siendo estas simples y baratas de fabricar utilizando tecnología moderna de circuitos impresos. Algunas de las desventajas de estas antenas son: presentan modos de alto orden, tienen bajas eficiencias, ancho de banda estrecho, baja pureza de polarización y excitan ondas de superficie, que conviene tener en cuenta y en su caso eliminar [2].

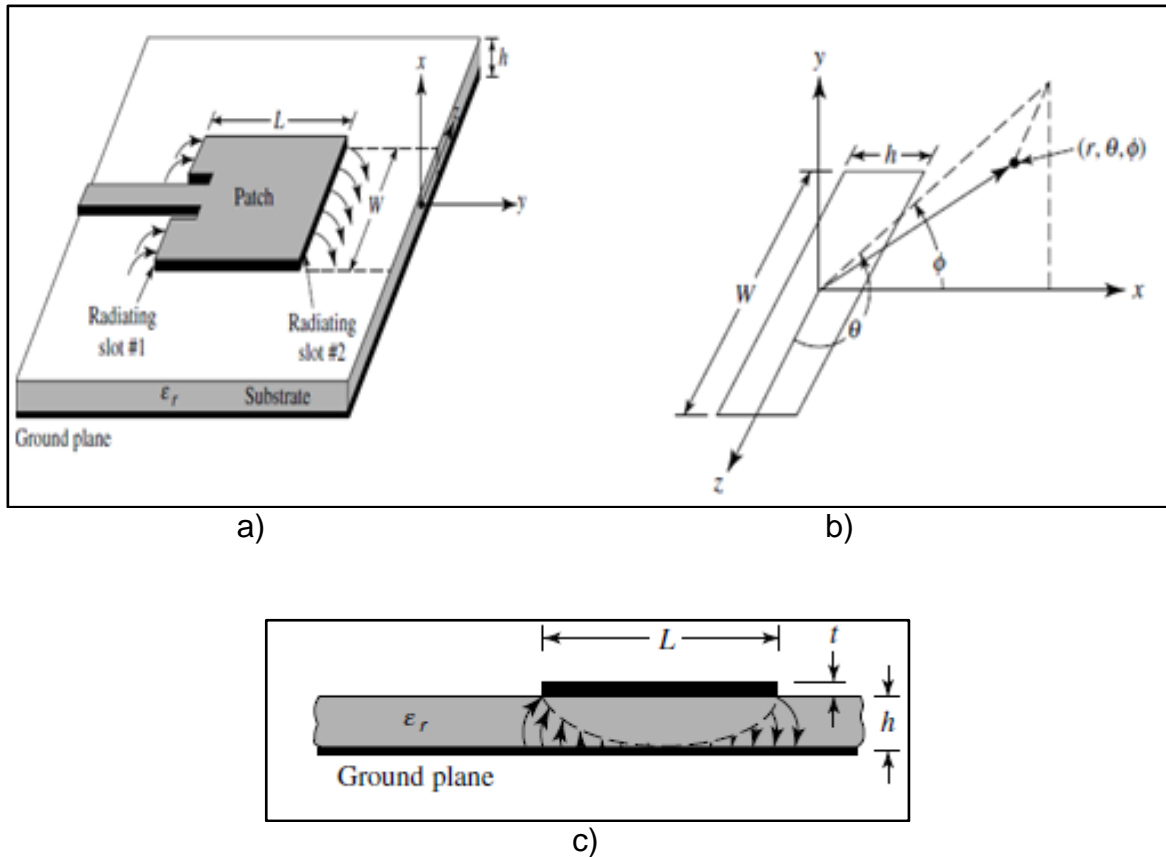
En las antenas microstrip el diseño del parche dependerá de la aplicación que se requiera, los diseños van desde un simple parche rectangular hasta diseños fractales.

2.1. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

Una antena microstrip consiste de una capa muy fina ($t \ll \lambda_0$ donde λ_0 es la longitud de onda del espacio libre y t es el espesor del cobre) de una tira metálica (parche) colocada a una pequeña fracción de una longitud de onda ($h \ll \lambda_0$ por lo general $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$) por encima de un plano de tierra como se ilustra en la figura 6. El parche se diseña para que tenga un patrón de radiación considerable, esto se logra eligiendo adecuadamente el modo de la excitación [2].

Para un parche rectangular, la longitud L del elemento está dada generalmente por $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$. El parche y el plano de tierra están separados por una lámina dieléctrica (sustrato) como se muestra en la figura 6.

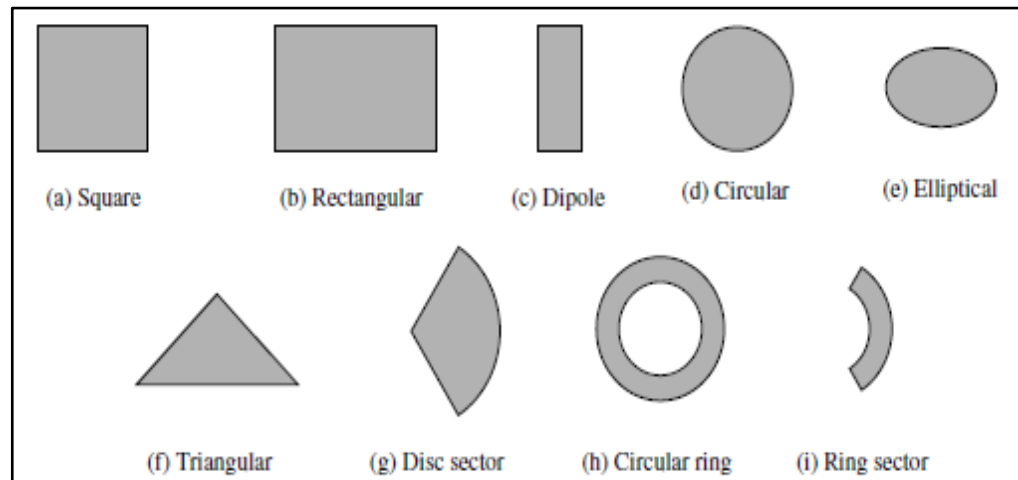
Figura 6. Antena microstrip y sistema de coordenadas. a) Microstrip antenas. b) sistema de coordenadas para cada ranura. c) Vista lateral



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

Existen numerosos sustratos que se pueden utilizar para el diseño de antenas microstrip y por lo general sus constantes dieléctricas se encuentran dentro del rango de $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Los sustratos más gruesos cuya constante dieléctrica está más cercana al extremo inferior del rango dado proporcionan un mayor rendimiento de la antena puesto que mejoran el ancho de banda y la eficiencia, pero a costa de grandes tamaños de los elementos. Los elementos radiantes y las líneas de alimentación son por lo general fotograbados sobre el sustrato dieléctrico. El parche de radiación puede ser cuadrado, rectangular, circular, elíptico o cualquier otra configuración. Estos se muestran en la figura 7. Los parches cuadrado, rectangular y circular son los más comunes debido a la facilidad de análisis, fabricación y sus buenas características de radiación.

Figura 7. Formas más representativas de elementos microstrip



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

2.2 MÉTODOS DE ALIMENTACIÓN

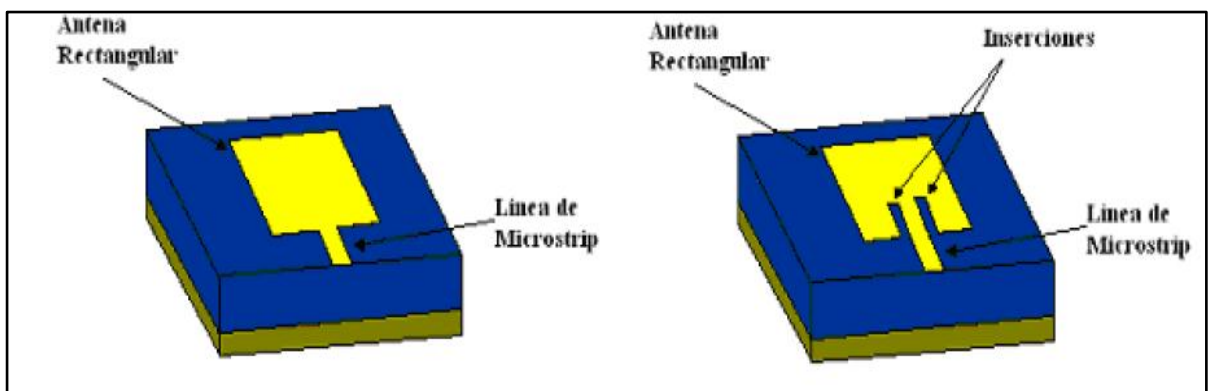
En el diseño de una antena la alimentación de la misma será un aspecto crítico, debido a que si la red de alimentación no es lo suficientemente eficiente, la antena no funcionara correctamente por muy bien que este diseñado el elemento radiante. Existen varios métodos de alimentación para lograr que el parche radie lo más eficientemente posible en el rango deseado de funcionamiento, mediante un acoplamiento de impedancias adecuado [5].

Los métodos de alimentación se pueden dividir en tres grupos: la alimentación directa, la alimentación por proximidad y la alimentación por ranura. Para el caso de este proyecto se utilizó la alimentación directa la cual se basa en un contacto directo entre la estructura de alimentación y elemento radiante (parche). Los dos ejemplos típicos de alimentación directa son: alimentación por línea microstrip y alimentación por cable coaxial [5].

2.2.1 Alimentación por línea microstrip. La alimentación por línea microstrip consiste en conectar el parche directamente a una línea microstrip, diseñada con una impedancia característica adecuada para una óptima adaptación. Este método es sencillo de realizar sin embargo se obtiene una baja eficiencia en relación al ancho de banda y al acoplamiento. Sobre todo si el sustrato es

demasiado fino, ya que las ondas de superficie y la radiación espuria de alimentación se incrementan, lo que limita el ancho de banda (entre un 2 y un 5 %). Este tipo de alimentación tiene dos variantes principales, una de ellas consiste en la conexión directa de la línea microstrip en un borde del parche. La otra opción se basa en una conexión directa, pero no en el borde del parche, sino realizando una inserción en el parche [5]. En la figura 8 se muestran las dos variantes mencionadas.

Figura 8. Alimentación por línea microstrip. a) Alimentación directa. B) alimentación con inserciones.



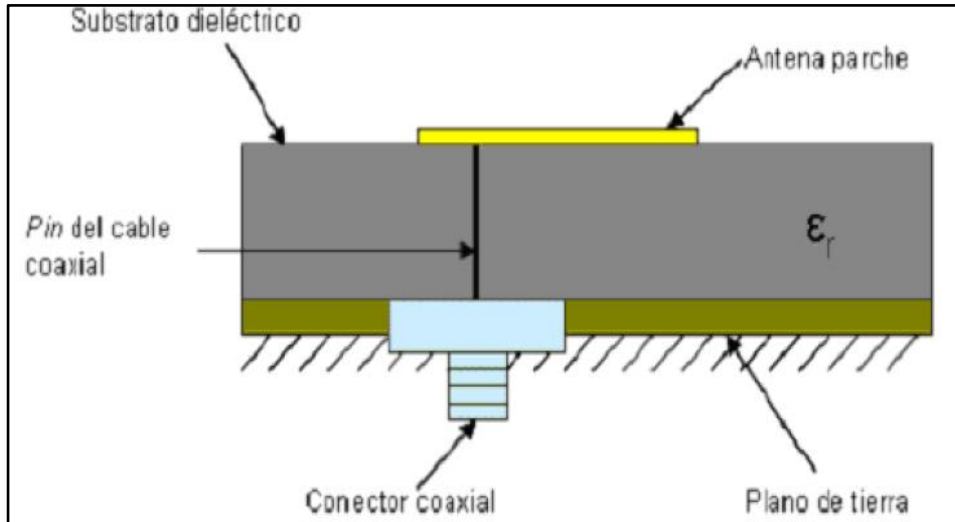
a) b)

Fuente: Alberto Fórneas Alonso; Análisis y Diseño de un array de parches para aplicaciones radar en vehículos, Madrid, 2011, Trabajo de grado (Ingeniero de telecomunicaciones), Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones.

2.2.2. Alimentación por sonda coaxial. Este tipo de alimentación, consiste en que el hilo central del cable coaxial, conectado directamente con el parche, mientras que el conductor exterior del cable, se conecta al plano de tierra. La impedancia dependerá de la posición de la sonda respecto al parche, de forma que al colocarla correctamente, se generará un mejor acoplamiento. Para antenas de parche (por lo general para frecuencias relativamente bajas, hasta los 3GHz) es uno de los métodos más tradicionales, no obstante podemos encontrar dificultades en la fabricación, ya que el hilo central debe perforar el plano de tierra y el sustrato, y debe estar soldado al elemento radiante, para su buen funcionamiento. Comparando este tipo de alimentación con la de línea microstrip, esta proporciona bajos niveles de radiación espuria, sin embargo ofrece un ancho de banda menor y en ocasiones dificultades para su fabricación si el sustrato es

muy fino con $h < 0.02 \lambda_0$ [5]. En la figura 9 se puede observar una antena alimentada por sonda coaxial.

Figura 9. Alimentación por sonda coaxial



Fuente: Alberto Fórneas Alonso; Análisis y Diseño de un array de parches para aplicaciones radar en vehículos, Madrid, 2011, Trabajo de grado (Ingeniero de telecomunicaciones), Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones.

2.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS

Para el diseño de antenas microstrip existen diversos métodos de análisis, dependiendo de la precisión y el grado de sencillez que se busque se debe seleccionar el método que más se ajuste a las necesidades. Los métodos de diseño se pueden dividir en 3 categorías principales que son: Modelos empíricos, modelos semi-empíricos y modelos de onda completa.

2.3.1 Modelos empíricos. Los modelos empíricos son los menos precisos de todos a la hora de diseñar, sin embargo son los más sencillos de realizar. Estos modelos se basan en la suposición de conceptos y estructura sin llevar a cabo consideraciones de irregularidades en parámetros. Los modelos empíricos brindan un buen nivel de precisión cuando se trabaja con frecuencias menores a los de las ondas milimétricas ($f < 30\text{GHz}$), cuando la frecuencia de trabajo se sale de este

rango pueden los modelos presentan altas imprecisiones por cual es necesario recurrir a otros modelos [6].

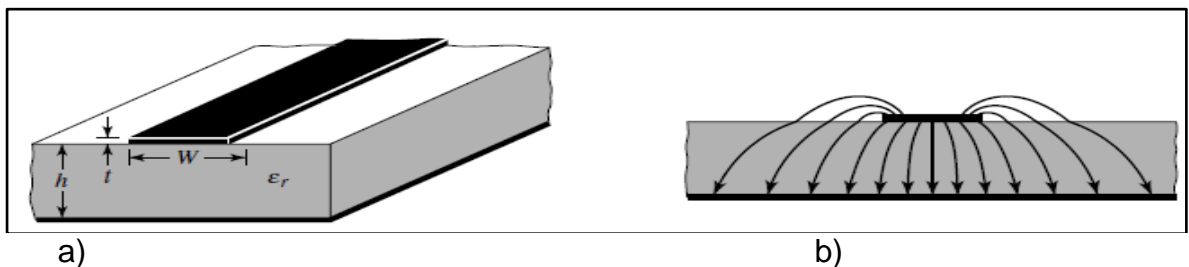
Pese a las limitaciones que tienen los modelos empíricos, estos son de gran ayuda para realizar diseños de los cuales partir en primera instancia. Los principales modelos empíricos son: Modelo de línea de transmisión y modelos de cavidad.

2.3.1.1 Modelo de línea transmisión: El modelo de líneas de transmisión presenta una gran facilidad de diseño aunque también es el menos preciso y solo se puede utilizar para el diseño de antenas de parche rectangular y circular. Para el desarrollo de este proyecto se utilizara el modelo de líneas de trasmisión, por esta razón se hará especial énfasis en este.

El modelo de línea de transmisión representa la antena microstrip por dos ranuras (bordes del parche) que en adelante se conocerán como ranura # 1 y ranura # 2. Estas radian, cada una con un ancho W (Ancho del parche), una altura h (Alto del sustrato) y separadas a una distancia L .

En una antena microstrip, la distribución de los campos presenta un efecto conocido como *Fringing Effects*, los cuales generan líneas de radiación, como se puede observar en la Figura 10 b).

Figura 10 Fringing Effects de una antena de parche rectangular. a) Línea microstrip. b) Líneas de campo eléctrico



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

Los *Fringing Effects* varían para cada diseño, dependiendo de la frecuencia de trabajo escogida y del sustrato que se utilice. Estos efectos pueden hacer que la longitud y ancho efectivo de la antena no sean iguales a sus dimensiones físicas. A su vez los *Fringing Effects* se pueden presentar en dos medios de una antena parche: el aire y el sustrato dieléctrico escogido, lo que genera que se tengan dos permitividades eléctricas distintas y la distribución de los campos sea diferente de un medio a otro [2].

Para solucionar el problema de tener dos permitividades distintas el modelo de líneas de transmisión combina ambas permitividades (aire y sustrato) para formar una permitividad eléctrica efectiva ϵ_{ref} y asumir que la antena se encuentra inmersa dentro de un solo medio homogéneo con dicha permitividad constante en toda la superficie [2].

La permitividad eléctrica efectiva viene dada por la siguiente ecuación:

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad \text{Ecuación (1.9)}$$

Dónde:

ϵ_{ref} = Constante dieléctrica efectiva

W = Ancho del parche

h = Altura del sustrato (constante que depende del material con el que se trabaje)

Para el diseño de una antena microstrip principalmente se debe establecer la frecuencia de trabajo a la que se desea que trabaje la antena y el sustrato que se utilizará. Seguidamente se puede proceder hacer los cálculos del ancho W y la longitud L , las cuales se muestran a continuación.

El ancho W de una antena microstrip rectangular típica está dado por:

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad \text{Ecuación (2.0)}$$

Dónde:

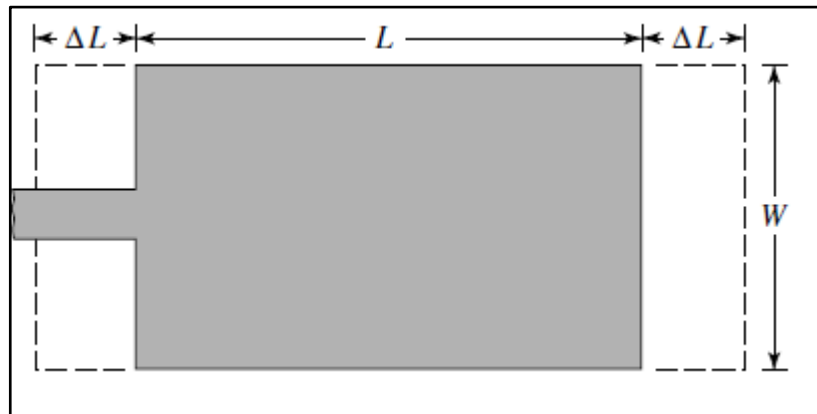
C = velocidad de luz en el espacio libre

f_r = frecuencia de trabajo

ϵ_r = constante dieléctrica

Como se observa en la figura 11 para calcular la longitud real o física del parche se deberá tener en cuenta una extensión de la longitud debido a su línea de alimentación, la suma de la longitud real y la extensión mencionada se le conoce como longitud efectiva [2].

Figura 11. Longitud física y efectiva de parches microstrip rectangular.



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

La longitud efectiva estará dada entonces por:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r\sqrt{\epsilon_{ref}}} = L + 2\Delta L \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

El cálculo de ΔL se hace mediante la siguiente ecuación:

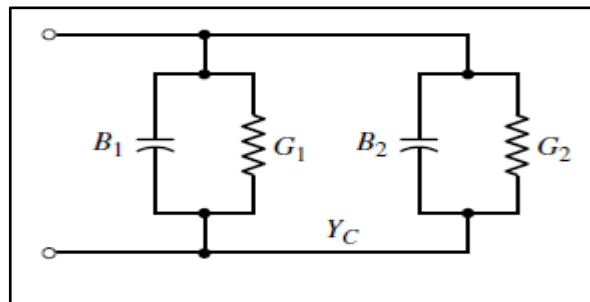
$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{ref} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{ref} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

Teniendo en cuenta los valores anteriores se procede a calcular la longitud real del parche como:

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}}} - 2\Delta L \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

Para entrar a analizar más a fondo el modelo de líneas de transmisión se debe tener en cuenta que las ranuras son consideradas como admitancias “Y” complejas compuestas de una conductancia G y una susceptancia B en paralelo [2]. Como se muestra en la figura 12.

Figura 12 Circuito equivalente de un parche microstrip



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

La admitancia Y estaría dada por:

$$Y_1 = G_1 + jB_1 \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

Donde por una ranura de anchura finita W:

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (K_o h)^2 \right] \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10}$$

$$B_1 = \frac{W}{120\lambda_0} [1 - 0.636 \ln(K_o h)] \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \quad \text{Ecuación (2.5)}$$

La admitancia total de entrada de la antena microstrip y la impedancia de entrada están dadas por:

$$Y_{in} = Y_1 + \tilde{Y}_2 = 2G_1 \quad \text{Ecuación (2.6)}$$

$$Z_{in} = \frac{1}{Y_{in}} = R_{in} = \frac{1}{2G_1} \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

El cálculo del ancho de la línea microstrip se conoce como W_0 y se puede calcular mediante la siguiente ecuación [2]:

$$Z_C = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left[\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right] \frac{W_0}{h} \leq 1$$

$$Z_C = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[\frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]} \frac{W_0}{h} > 1 \quad \text{Ecuación (2.8)}$$

Dónde:

Z_c = impedancia de la línea microstrip a diseñar

Otro modelo que permite calcular el ancho W y el largo L de una línea microstrip es el modelo de wheeler, el cual es el método más antiguo y más utilizado para este cálculo. Las ecuaciones para el cálculo de la línea por este método están dadas por las siguientes ecuación [8]:

$$Wl = \frac{4h}{\frac{e^A}{2} - e^{-A}} \quad ; \quad \frac{W}{h} \leq 2 \quad \text{Ecuación (2.9)}$$

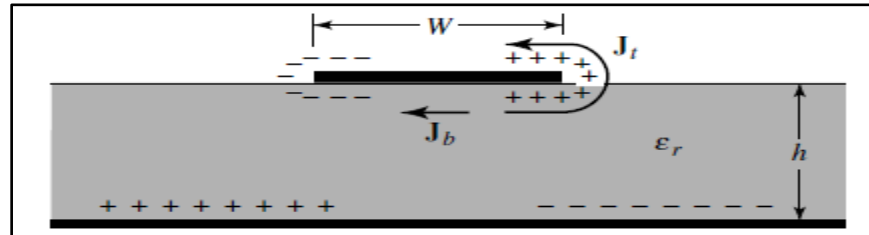
$$Wl = h \left[\frac{\epsilon_r - 1}{\pi * \epsilon_r} \left(\log(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right) + \frac{2}{\pi} (B - 1 - \log(2B - 1)) \right] \quad ; \quad \frac{W}{h} \geq 2 \quad \text{Ecuación (3.0)}$$

$$A = \sqrt{(2\epsilon_r) + 1} * \frac{\pi Zm}{\eta} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} * \frac{0.23 + 0.11}{\epsilon_r} \quad \text{Ecuación (3.1)}$$

$$B = \frac{\pi * \eta}{2 * Zm * \sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{Ecuación(3.2)}$$

2.3.1.2 Modelo de cavidad. Las antenas microstrip se comportan como cavidades resonantes, puesto que en el interior de estas se producen ondas estacionarias entre las paredes eléctricas y magnéticas [7]. Dicho comportamiento se puede apreciar en la figura 13.

Figura 13 Distribución de cargas y creación de la densidad en el parche



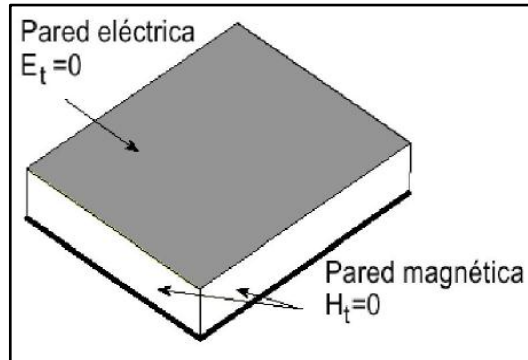
Fuente: Constantine A. Balanis., Antenna Theory, Analysis And Design., Tercera Edition, John Wiley y Sons., 2005.

El modelo de cavidad es válido bajo las siguientes consideraciones:

- Los campos en la región interna se pueden considerar constante a lo largo del eje Z , si el sustrato es suficientemente delgado $h \ll \lambda_0$ [2].
- El campo magnético tiene dos componentes transversales H_x y H_y entre la región limitada por el parche metálico y el plano de tierra, mientras que el campo eléctrico está dado exclusivamente sobre z , componente E_z . Esta hipótesis es debida a la presencia de las dos paredes conductoras eléctricas perfectas [2].
- La corriente eléctrica en el parche, ortogonal a los bordes de la metalización es prácticamente nula; esto implica que la componente tangencial de H a lo largo de los bordes es despreciable. Pueden entonces ser consideradas cuatro paredes de conductores magnéticos perfectos desde el momento que $dE/dn = 0$ [2].
- Cuando se refiere a un conductor eléctrico perfecto (CEP), se trata de un medio magnético ideal, teniendo una conductividad, σ , infinita [2].
- Cuando se refiere a un conductor magnético perfecto (CMP), se trata de un medio eléctrico ideal, con una permeabilidad magnética, μ , infinita [2].

Para poder analizar los campos que se encuentran dentro de la cavidad, hay que resolver la ecuación de onda, sujeta a las condiciones de contorno de los campos tangenciales [7]. Figura 14.

Figura 14 Condiciones de frontera



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

El parche admite varias distribuciones de campo (modos) de acuerdo con la solución de la ecuación de onda homogénea de la ecuación 3.3 [7].

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0 \quad \text{Ecuación (3.3)}$$

La solución de la ecuación diferencial queda como:

$$A_x = A_{0np} \cos\left(\frac{n\pi}{L} y'\right) \cos\left(\frac{p\pi}{W} z'\right) \quad \text{Ecuación (3.4)}$$

Donde la frecuencia de resonancia dependerá del modo dominante que se utilice como se observa en la ecuación 3.5. El modo con la frecuencia resonante de la orden más baja se refiere como el modo dominante.

$$(f_r)_{0np} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2} \quad \text{Ecuación (3.5)}$$

El campo eléctrico radiado total para una antena microstrip está dado por la ecuación 3.6 [2].

$$E_\phi^t = +j \frac{k_0 h W E_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin\theta \frac{\sin(X)}{X} \frac{\sin(Z)}{Z} \right\} \times \cos\left(\frac{k_0 L_e}{2} \sin\theta \sin\phi\right) \quad \text{Ecuación (3.6)}$$

Dónde:

$$X = \frac{k_0 h}{2} \sin \theta \cos \phi \quad \text{Ecuación (3.7)}$$

$$Z = \frac{k_0 W}{2} \cos \theta \quad \text{Ecuación (3.8)}$$

$$k_0 = \frac{2\Pi}{\lambda} \quad \text{Ecuación (3.9)}$$

Para valores muy pequeños de h ($k_0 h \ll 1$) la expresión se reduce a:

$$E_\phi^t \approx +j \frac{2V_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin \theta \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right\} \cos\left(\frac{k_0 L_e}{2} \sin \theta \sin \phi\right) \quad \text{Ecuación (4.0)}$$

El plano E principal para la antena microstrip, el plano x-y ($\theta = 90^\circ$, $0^\circ \leq \Phi \leq 90^\circ$ y $270^\circ \leq \Phi \leq 360^\circ$), para los campos irradiados las expresiones de la ecuaciones (3.7), (3.8) y (4.0) se reducen a:

$$E_\phi^t \approx +j \frac{k_0 W V_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \frac{\sin\left(\frac{k_0 h}{2} \cos \phi\right)}{\frac{k_0 h}{2} \cos \phi} \right\} \cos\left(\frac{k_0 L_e}{2} \sin \phi\right) \quad \text{Ecuación (4.1)}$$

Normalizando la ecuación (4.1)

$$E_\phi^t \approx \left\{ \frac{\sin\left(\frac{k_0 h}{2} \cos \phi\right)}{\frac{k_0 h}{2} \cos \phi} \right\} \cos\left(\frac{k_0 L_e}{2} \sin \phi\right) \quad \text{Ecuación (4.2)}$$

El plano H principal de la antena microstrip, el plano x-z ($\Phi = 0^\circ$, $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$), para los campos irradiados las expresiones de la ecuaciones (3.6), (3.7) y (3.8) se reducen a:

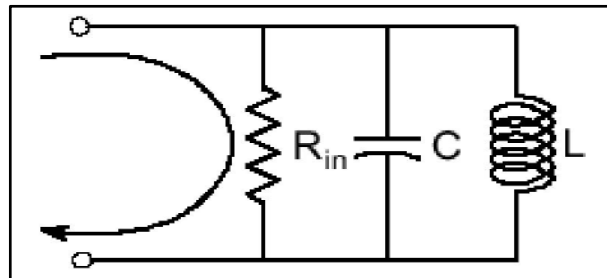
$$E_{\phi}^i \approx +j \frac{k_0 W V_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left\{ \sin \theta \frac{\sin\left(\frac{k_0 h}{2} \sin \theta\right) \sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\frac{k_0 h}{2} \sin \theta \frac{k_0 W}{2} \cos \theta} \right\} \quad \text{Ecuación (4.3)}$$

Normalizando la ecuación (4.3)

$$E_{\phi}^i \approx \left\{ \sin \theta \frac{\sin\left(\frac{k_0 h}{2} \sin \theta\right) \sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\frac{k_0 h}{2} \sin \theta \frac{k_0 W}{2} \cos \theta} \right\} \quad \text{Ecuación (4.4)}$$

En modelo de cavidad, el circuito equivalente para una antena microstrip es similar a un circuito resonante con pérdidas como se muestra en la figura 15.

Figura 15 Modelos de circuito resonante con pérdidas.



Fuente: J. C. García, J. A. Franco: Diseño de antena microstrip para la banda de UHF, Grupo de Control y Procesamiento Digital de Señales, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

2.3.2 Modelos semi-empíricos. Los modelos semi-empíricos presentan una precisión más alta que la de los modelos empíricos, pero menor a la de los modelos de onda completa. A su vez estos modelos presentan una mayor complejidad que los modelos empíricos, pero inferior a la de los modelos de onda completa [6].

Los principales modelos semi-empíricos son:

- Enfoque variacional
- Enfoque variacional generalizado

- Enfoque de ecuación integral dual
- Modelo de corriente superficial eléctrica
- Técnica de la transformada de Hankel
- Método de reciprocidad
- Técnica de condición de frontera de borde generalizado.

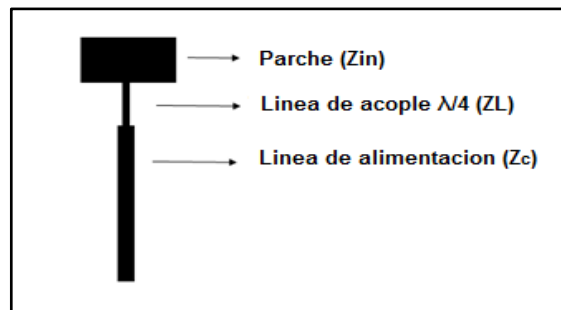
2.3.3 Modelos de onda completa. Los modelos de onda completa presentan el mayor grado de complejidad entre todos y necesitan de herramientas computacionales avanzadas para llevarlos a cabo, sin embargo son los que presentan el mayor grado de precisión a la hora de diseñar [6]. Entre los principales modelos de onda completa se pueden encontrar:

- Método del momento en el dominio del espacio
- Análisis en el dominio de transformada
- Método de momentos en el dominio espectral
- Método de estados (FEM)
- Técnica de la transformada rápida de Fourier en gradiente-conjugado.
- Enfoque de la ecuación integral potencial mixto (MPIE)

2.4 ACOPLA DE IMPEDANCIAS

Para adaptar la impedancia de la línea microstrip (Z_c) y la impedancia del parche (Z_{in}), se hace necesario empelar 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) [9]. En la figura 16 se puede observar el dicho acople.

Figura 16. Acople de impedancias entre la línea de alimentación y el parche



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

La impedancia característica de la línea de acople se conoce como Z_L y está dada por [9]:

$$Z_L = \sqrt{Z_c Z_{in}} \quad \text{Ecuación (4.5)}$$

La línea de acople deberá tener un ancho específico, el cual se podrá calcular mediante la ecuación 2.8 enunciada anteriormente.

2.5. ARREGLOS DE ANTENAS MICROSTRIP

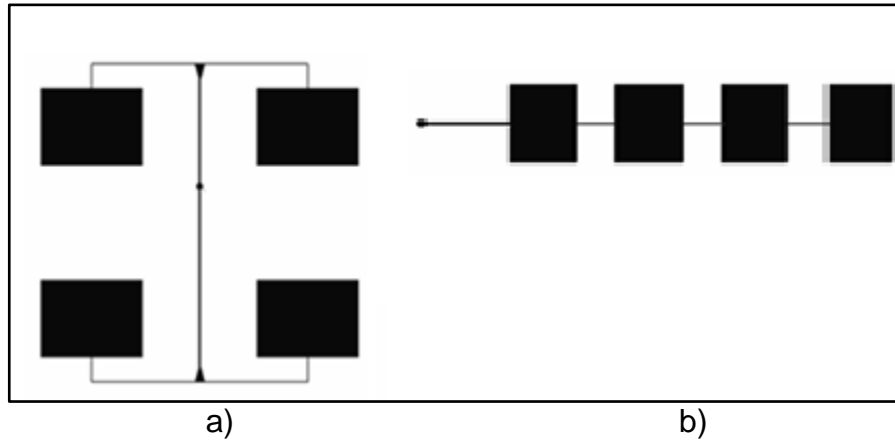
Las antenas microstrip, además de utilizarse como elementos individuales, también son muy populares por que se pueden diseñar arreglos matriciales o lineales con estas. Existen diversas aplicaciones donde se requiere antenas con un ancho de haz angosto, alta directividad y alta ganancia. Un solo parche no puede siempre brindar estas características debido a que su patrón de radiación es omnidireccional y toda la energía radiada se distribuye de manera uniforme en todas direcciones, teniendo como consecuencia una antena no directiva (con respecto a una dirección de propagación específica) y con poca ganancia. Es en este caso donde un arreglo de antenas aparece como una solución [10].

Los parches se pueden agrupar en forma adyacente para formar un arreglo, debido a que se obtiene una interacción entre los elementos por su proximidad, de manera que los campos de cada uno se combinan a lo largo de la dirección perpendicular a ellos y se cancelan en otras direcciones. A medida que se incrementa la cantidad de elementos radiadores (Parches), el patrón de radiación va cancelándose progresivamente en algunas direcciones, esto se debe a que parte de la energía radiada por los lóbulos laterales se trasfiere al lóbulo principal y de esta manera se cumple la ley de conservación de la energía. En consecuencia la antena se vuelve más directiva hacia una dirección en particular incrementando su ganancia [10].

Un arreglo debe estar compuesto por 2^n ($n= 0, 2, 4, 6, \dots$) elementos para mantener la simetría del patrón de radiación y cada elemento se debe interconectar mutuamente, teniendo un punto en común que es el puerto de entrada de la antena.

Los arreglos de antenas microstrip pueden tener una topología matricial o lineal como se observa en la figura 17a y 17b.

Figura 17 Topología de arreglos microstrip. a) Arreglo lineal. b) Arreglo matricial



Fuente: Sergio Buenrostro Rocha: Metodología para el diseño y construcción de una antena de microcinta en la banda de WiMax a 3.5GHz, Tijuana-México, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.

El factor de arreglo (Patrón de radiación del arreglo asumiendo que los elementos utilizados son antenas isotrópicas o ideales) de una antena es de vital importancia en el momento de calcular el patrón de radiación real de la misma. El factor de arreglo para un arreglo microstrip matricial está dado por la ecuación 4.6 [2].

$$AF = \sum_{n=1}^N I_{1n} \left[\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(Kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \right] * e^{j(n-1)(Kd_y \sin \theta \sin \phi + \beta_y)}$$

Ecuación (4.6)

Si los coeficientes de excitación de la amplitud de los elementos de la matriz, en la dirección "Y" son proporcionales a los de la "X", la amplitud del enésimo elemento (m,n) puede ser escrito por :

$$I_{mn} = I_{m1} I_{1n}$$

Ecuación (4.7)

Si además, la excitación de la amplitud de todo el conjunto es uniforme ($I_{mn} = I_0$), entonces la ecuación (4.6) se puede expresar como:

$$AF = I_0 \sum_{m=1}^M e^{j(m-1)(Kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(Kd_y \sin \theta \sin \phi + \beta_y)}$$

Ecuación (4.8)

Al normalizar la ecuación (4.6) el factor de arreglo queda expresado como:

$$Af(\theta, \phi) = \left[\frac{1}{M} * \frac{\sin\left(\frac{M}{2} * \psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right] * \left[\frac{1}{N} * \frac{\sin\left(\frac{N}{2} * \psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right]$$

Ecuación (4.9)

Dónde:

$$\psi_x = K * dx * \sin(\theta) * \cos(\phi) + \beta_x \quad \text{Ecuación (5.0)}$$

$$\psi_y = K * dy * \sin(\theta) * \sin(\phi) + \beta_y \quad \text{Ecuación (5.1)}$$

Dónde:

$dx = dy$ = Distancia entre los parches

M= Número de parches en el eje y

N= Numero de parches en el eje x

Los valores de β_x, β_y, θ y ϕ se pueden calcular mediante las siguientes expresiones:

$$\beta_x = -K * dx * \sin(\theta_0) * \cos(\phi_0) \quad \text{Ecuación (5.2)}$$

$$\beta_y = -K * dy * \sin(\theta_0) * \sin(\phi_0) \quad \text{Ecuación (5.3)}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\sin(\theta_0) * \sin(\phi_0) \pm \frac{n * \lambda}{dy}}{\sin(\theta_0) * \cos(\phi_0) \pm \frac{m * \lambda}{dx}} \right] \quad \text{Ecuación (5.4)}$$

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{\sin(\theta_0) * \cos(\phi_0) \pm \frac{m * \lambda}{dx}}{\cos(\phi)} \right]$$

$$= \sin^{-1} \left[\frac{\sin(\theta_0) * \sin(\phi_0) \pm \frac{n * \lambda}{dy}}{\sin(\phi)} \right]$$

Ecuación (5.5)

Los ángulos θ_0 y ϕ_0 dependen en qué ejes se quiere tener ubicado el lóbulo principal.

2.5.1 Patrón de radiación de un arreglo microstrip. Para calcular el patrón de radiación de un arreglo microstrip se usa el vector de Poynting como se muestra en el siguiente procedimiento.

$$\vec{P} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H} \quad \text{Ecuación (5.6)}$$

Dónde:

E = campo eléctrico

H = campo magnético

Teniendo en cuenta la magnitud del campo eléctrico y magnético la ecuación 5.6 queda como:

$$\vec{P} = \frac{1}{2} |\vec{E}| |\vec{H}| \sin 90^\circ \quad \text{Ecuación (5.8)}$$

Dónde:

90° es el valor del ángulo al que están separados los parches, Como son perpendiculares se tiene este valor y la ecuación (5.8) queda como se muestra a continuación puesto que el seno (90°) es 1.

$$\vec{P} = \frac{1}{2} |\vec{E}| |\vec{H}| \quad \text{Ecuación (5.9)}$$

Como:

$$\eta = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} \quad \text{Ecuación (6.0)}$$

$$|\vec{H}| = \frac{|\vec{E}|}{\eta} \quad \text{Ecuación (6.1)}$$

Dónde:

$$\eta = 120\pi$$

Remplazando estos valores en la ecuación (5.6), se obtiene una nueva expresión como se muestra a continuación:

$$\vec{P} = \frac{1}{2} |\vec{E}| \frac{|\vec{E}|}{\eta} = \frac{1}{2\eta} |\vec{E}|^2 \quad \text{Ecuación (6.2)}$$

Normalizando la ecuación (5.8) se obtiene:

$$\vec{P} = |\vec{E}|^2 \quad \text{Ecuación (6.3)}$$

El campo eléctrico para un parche se puede obtener como se mostró anteriormente en el modelo de cavidad. Finalmente al multiplicar la ecuación (6.3) por el factor de arreglo se obtiene el patrón de radiación total de la antena, el cual queda dado por la ecuación (6.4).

$$P = \left| E'_{\phi} \right|^2 * AF(\theta, \Phi) \quad \text{Ecuación (6.4)}$$

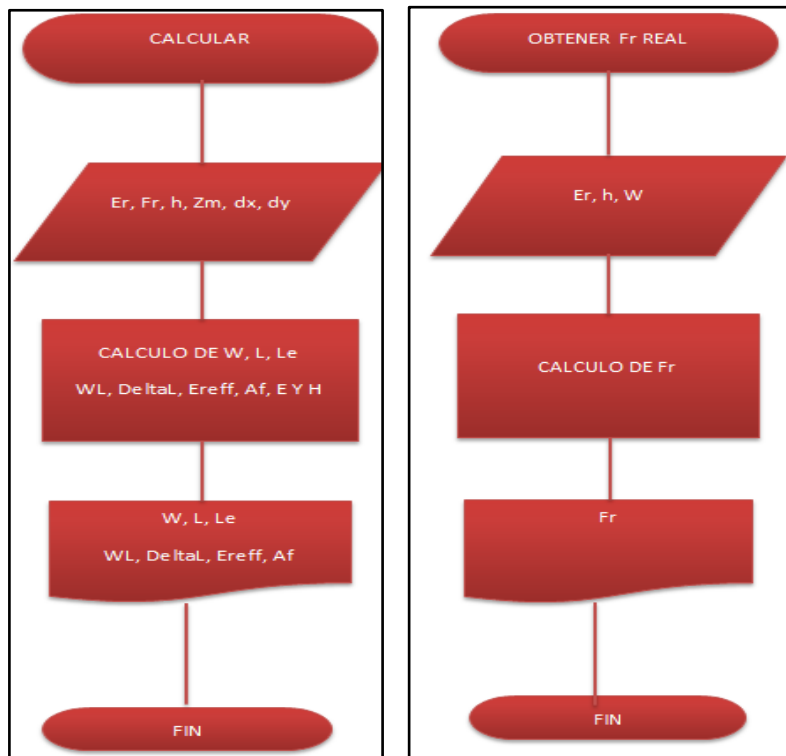
3. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

3.1. DESARROLLO DEL PROYECTO

Se realizó un estudio sobre la importancia de las antenas microstrip, estado del arte, sus características, modelos de diseño y substratos utilizados, el cual permitió conocer más a fondo el tema que se trabajó en este proyecto. Se decidió utilizar el modelo de líneas de transmisión para diseñar la antena, con el cual se construyó el software para obtener la simulación de la misma.

Para la construcción del simulador, se diseñaron diagramas de flujo con las funciones y tareas que debería cumplir este. Los diagramas de flujo se muestran a continuación.

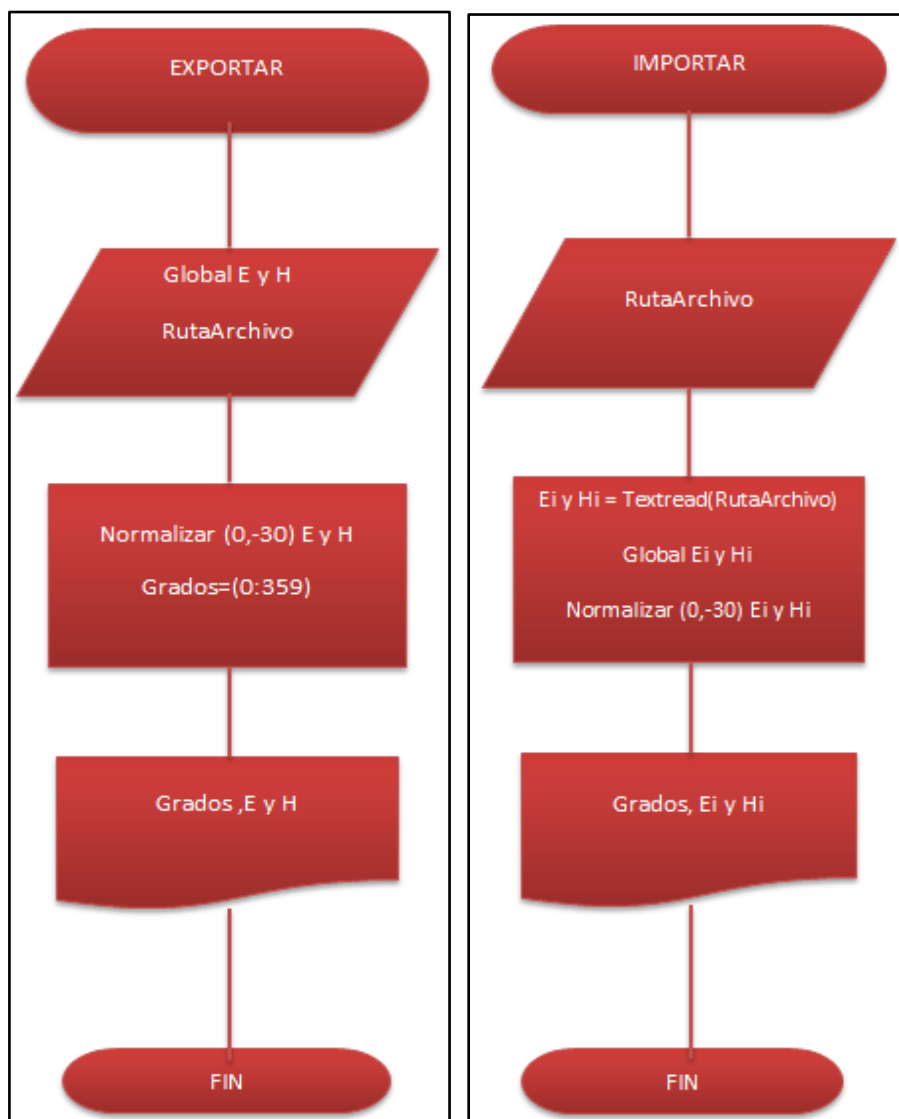
Figura 18. Diagrama de flujo para calcular las características de la antena y diagrama de flujo para obtener la frecuencia real.



Fuente: [Autor]

El modulo del menú “calcular” tiene como variables de entrada las constantes Er y h, la frecuencia a la que se desea trabajar, la impedancia de la línea de alimentación y la distancia que habrá entre los parches del arreglo. Con estos valores este módulo calculara el ancho “W”, longitud “L” , longitud efectiva “Le”, ancho de la línea de alimentación “WL”, Delta L, permitividad dieléctrica efectiva “Ereef”, factor de arreglo “AF” y los campos E y H. las ecuaciones que se utilizan para realizar estos cálculos son (2.0),(2.3),(2.1),(2.9),(2.2),(1.9),(4.9),(4.2),(4.4) respectivamente.

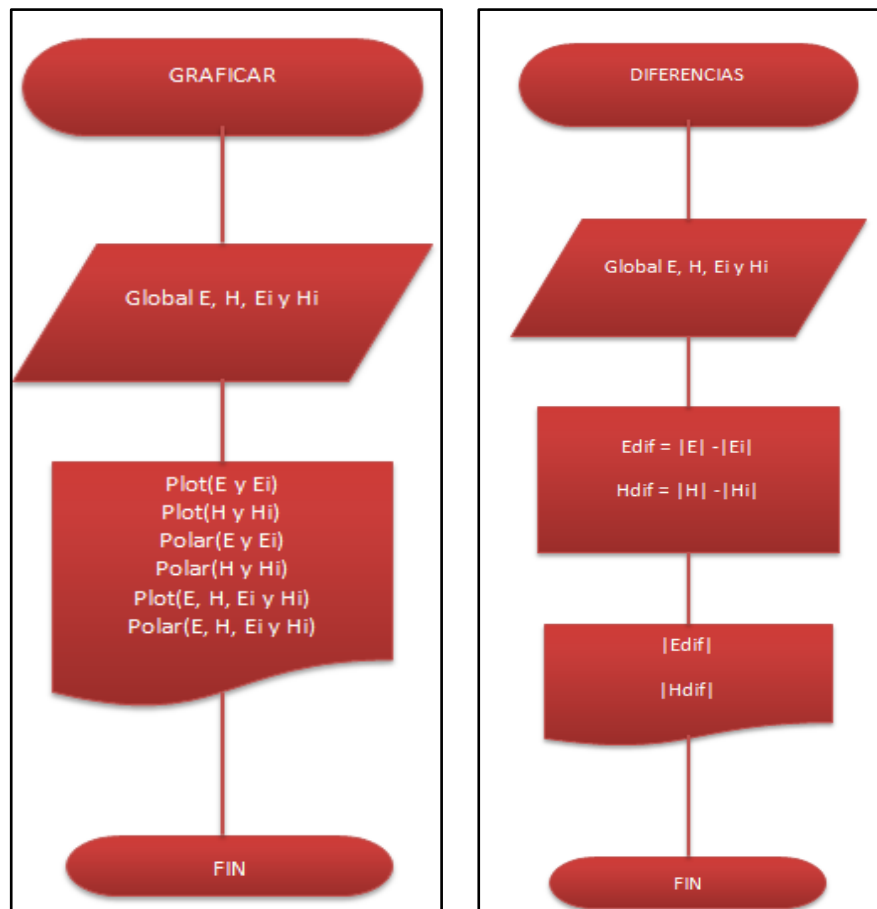
Figura 19. Diagrama de flujo para importar y exporta datos.



Fuente: [Autor]

Un resumen del funcionamiento del módulo que permite importar y exportar datos del simulador se observa de una manera clara en la figura 20. Para exportar los valores de la simulación, se necesitan los valores del campo eléctrico y el campo magnético, los cuales son variables globales en el algoritmo del simulador para poder ser usadas en cualquier momento, estos valores son normalizados antes de ser guardados. Además de esto el algoritmo pide como requisito la ruta donde se desea guardar el archivo de la simulación y posteriormente lo almacena en un archivo “.txt” en la ubicación que se seleccionó. Para importar un archivo el algoritmo pide la ruta de archivo donde se encuentra guardado para luego normalizar estos valores y mostrarlos en una tabla.

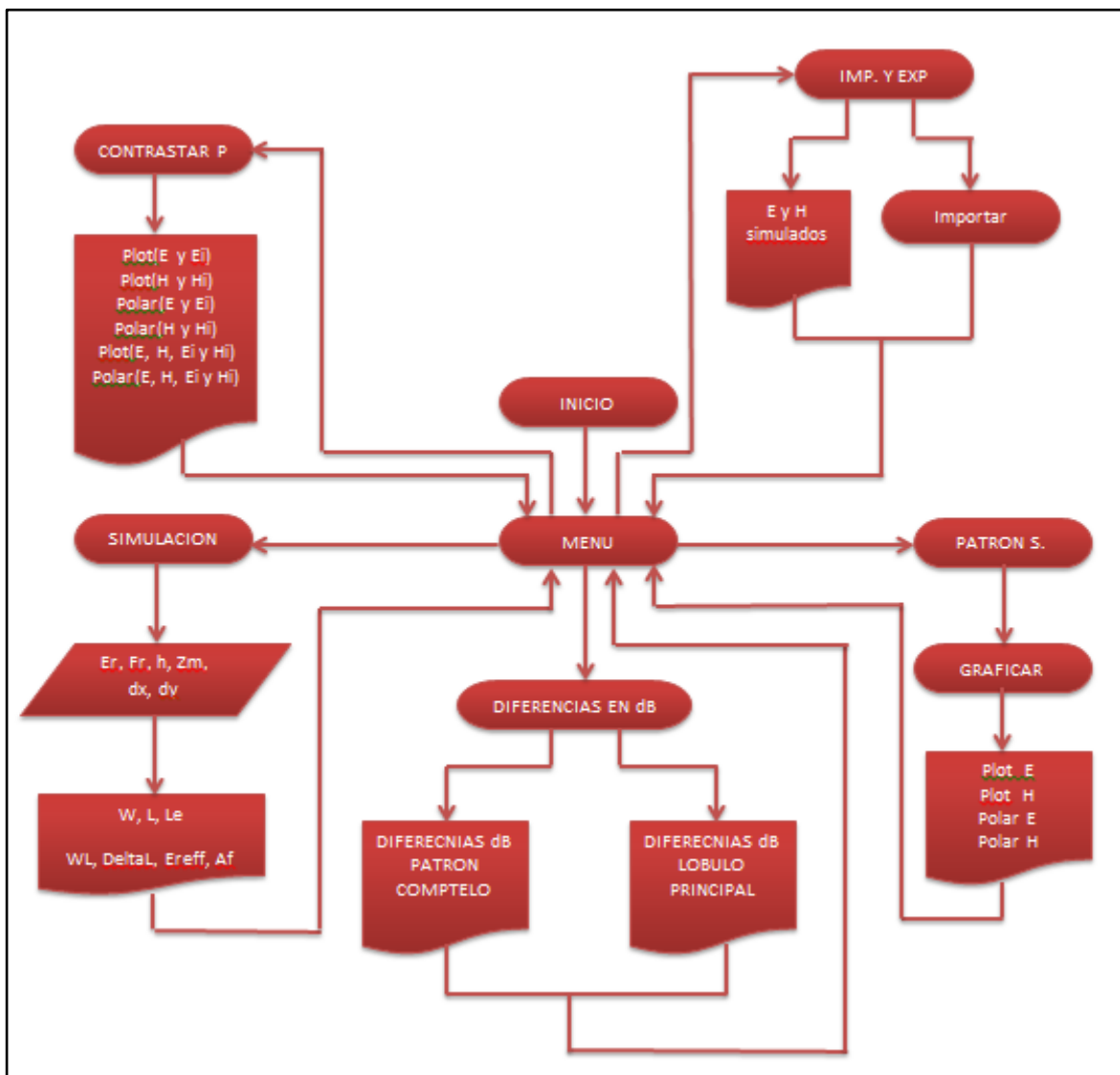
Figura 20. Diagrama de flujo para graficar y diagrama de flujo para calcular diferencias en db.



Fuente: [Autor]

Para poder graficar el patrón de radiación simulado y real el algoritmo requiere las variables globales E (Campo eléctrico simulado), E_i (Campo eléctrico importado), H (Campo magnético simulado), H_i (Campo magnético importado), para luego realizar los gráficos que permiten hacer una comparación de los patrones. Para la calcular la diferencia en decibeles de los patrones simulado y real el algoritmo usa las variables globales E, E_i , H, H_i para luego calcular la diferencia entre E Y E_i y la diferencia entre H y H_i Para una mejor comprensión del funcionamiento de este módulo véase la figura 20.

Figura 21. Diagrama de transición de estados del simulador completo



Fuente: [Autor]

Para una mejor comprensión del funcionamiento del simulador se puede observar el diagrama de transición de estados de este en la figura 21. El usuario recibe la bienvenida con el módulo de inicio y posteriormente accede al módulo del menú, donde se ofrecen los botones simulación, patrón simulado, diferencias en dB, contrastar patrones, exportar e importar. Al entrar al módulo de cada módulo de cada botón mencionado se podrá realizar la acción que dicho botón indica en su nombre y al cerrar estos el simulador volverá automáticamente al módulo menú.

Para el diseño de una antena microstrip mediante el simulador es necesario conocer previamente la constante dieléctrica del material que se va a utilizar y su espesor “h”. El sustrato dieléctrico FR4, está fabricado de resina poliepóxido de fibra de vidrio, el cual ofrece una resistencia mecánica privilegiada ya que es bastante resistente y flexible. El sustrato FR4 tiene una constante dieléctrica de aproximadamente 4.0 [11] y se encuentra en el mercado en láminas de espesor de 0.8mm, 1.2mm y 1.6mm. Como se mencionó en el apartado 2.1 la altura del sustrato debe estar en el rango de $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$, por esta razón se eligió la lámina con grosor de 0.8mm.

Basado en el simulador diseñado, se procede a calcular los parámetros básicos para construir el primer prototipo, bajo el nombre de antena número 1. Dichos cálculos se muestran de una manera organizada en la tabla número 2.

Tabla 2. Características para la construcción de la antena número 1.

Característica	Resultado
Ancho (W)	9.4868 mm
Constante dieléctrica efectiva (ϵ_{eff})	3.5575
Longitud (L)	7.214 mm
Ancho de la línea de alimentación (W_0)	1.45mm
Ancho de la línea de acople $\lambda/4$ (W_L)	0.71 mm

Fuente: [Autor]

Con los resultados anteriores se construyó la antena número 1. La cual se puede apreciar en la figura 22.

Figura 22 Antena número 1.



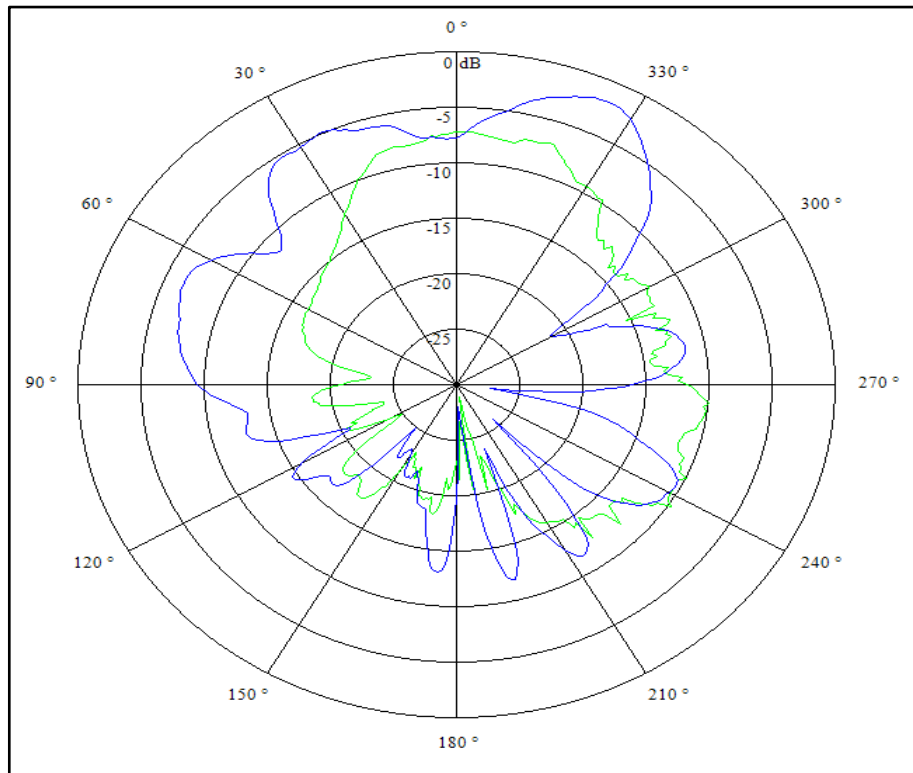
Fuente: [Autor]

Para realizar las pruebas a la antena diseñada se utilizó el “Sistema didáctico y de medición en antenas” lab-volt, modelo 8092 [12].

Los resultados arrojados por este prototipo no fueron los mejores puesto que el Patrón de radiación no fue simétrico en sus dos planos E y H como se esperaba según la simulación (figura 30) y además del lóbulo principal, aparecen más lóbulos secundarios de los esperados, los cuales disminuyen la directividad de la antena.

En el momento de probar este primer prototipo se comprobó que el cable de alimentación debe estar lo más recto posible, debido a que las curvaturas en el cable de alimentación presentan reflexión, las cuales hacen que se distorsione el patrón de radiación que mide el equipo. El patrón de radiación de la antena número 1 se puede apreciar en la figura 23 (Línea azul plano H, Línea verde plano E).

Figura 23 Patrón de radiación de la antena número 1.



Fuente: Software LVDAM-ANT

Teniendo en cuenta que los resultados no fueron los esperados, se decidió rediseñar la antena, haciendo cambios en el ancho de las líneas de alimentación puesto que se utilizó el método de wheeler, el cual es un método más preciso según la bibliografía [8].

Igualmente se rediseñó la simetría de la alimentación ya que la antena está irradiando en sentidos opuestos lo que posiblemente produce la cancelación de los campos eléctricos y no la suma de estos como debería ser. Además de estas consideraciones de modificar la alimentación por sonda coaxial para reducir las pérdidas en las líneas de alimentación, estos cambios se pueden observar en la figura 25.

Realizando el cambio en el software de simulación de la ecuación del ancho de la línea de transmisión por la ecuación del método de wheeler tratado en el enunciado 2.3.1.1, se obtuvieron los siguientes resultados para construir la antena número 2, los cuales se pueden observar en la figura 24.

Figura 24 Características para la construcción de la antena número 2.

Entradas

Er	4	Fr (GHz)	10	h (cm)	0.08
Zm (ohm)	50	dx (cm)	1.5	dy (cm)	1.5

Salidas

W (cm)	0.948683	L (cm)	0.721472	Le (cm)	0.795276
WL (cm)	0.215704	DeltaL (cm)	0.0369024	Ereff	3.55751
Fr Real (GHz)	10	Af	1		

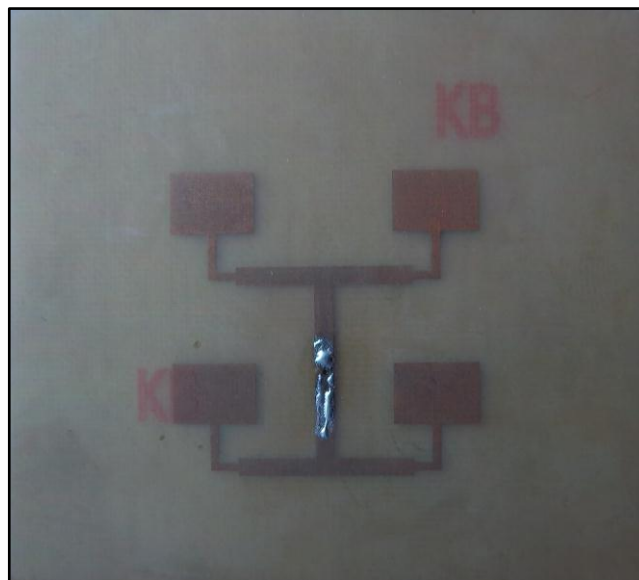
Calcular
Graficos
Obtener Fr Real

Universidad Pontificia Bolivariana

Fuente: [Autor]

Utilizando los resultados arrojados por el simulador se construyó la antena número 2 la cual se puede apreciar en la figura 25

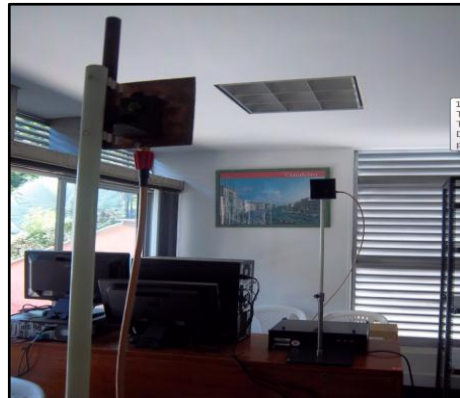
Figura 25 Antena número 2.



Fuente: [Autor]

Teniendo presente que al diagramar el patrón de radiación debe ser simétrico tanto en el plano eléctrico (E) como magnético (H). Para que la antena gire sobre su propio eje se necesita que el soporte que sostiene la antena esté ubicado exactamente en la mitad de la parte posterior del arreglo como se observa en la figura 26. Lo cual es un inconveniente puesto que al hacer la alimentación por sonda coaxial esta coincide con la ubicación del soporte figura 26. Por este motivo la antena número 2 no es el mejor diseño para ser probada en el equipo lab-volt puesto que el patrón se verá deformado si se cambia dichas posiciones.

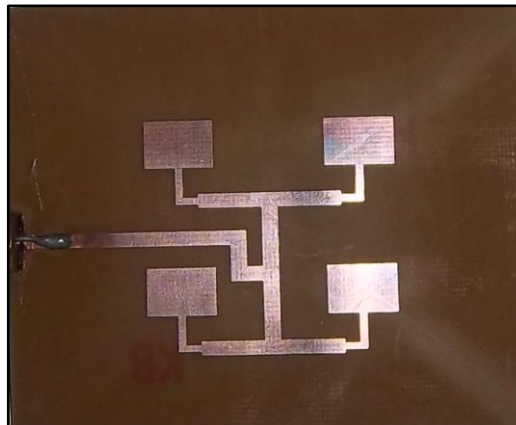
Figura 26 Vista posterior del soporte del equipo.



Fuente: [Autor]

Con el objetivo de poder obtener el patrón de radiación de la antena número 2, Se decidió cambiar solo la alimentación de sonda coaxial por alimentación de línea microstrip la cual, se acomoda mejor al equipo en el que se prueban las antenas. Esta antena fue llamada antena número 3 y su diseño final se puede observar en la figura 27.

Figura 27 Antena número 3.



Fuente: [Autor]

Se realizaron las pruebas a la antena número 3, posicionadas para obtener el plano E y el plano H como se muestra en la figura 28a y 28b.

Figura 28 Pruebas de la antena 3. a) Plano H. b) Plano E



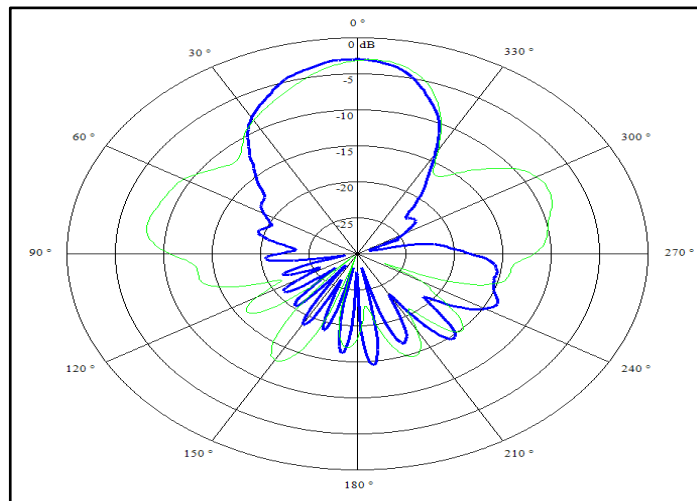
a)

b)

Fuente: [Autor]

El patrón de radiación obtenido para la antena número 3 se muestra a continuación (Línea azul plano E, Línea verde plano H) en la figura 29. Este patrón muestra ser bastante simétrico en el lóbulo principal y se acerca al patrón simulado (figura 30) por esta razón se decidió tomar la antena número 3 como la antena final.

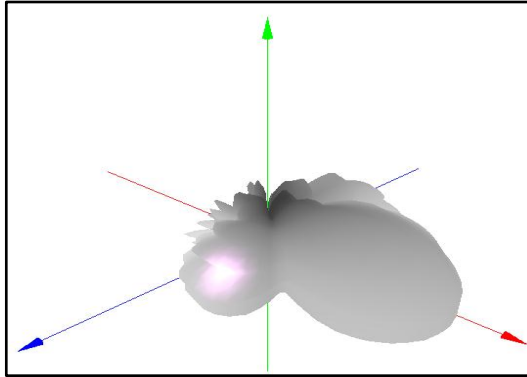
Figura 29 Patrón de radiación de la antena número 3.



Fuente: Software LVDAM-ANT

El Software LVDAM-ANT permite obtener un gráfico 3D con los planos H y E, el cual brinda una mejor perspectiva del patrón de radiación. Figura 30

Figura 30 Patrón de radiación 3D de la antena número 3.



Fuente: Software LVDAM-ANT

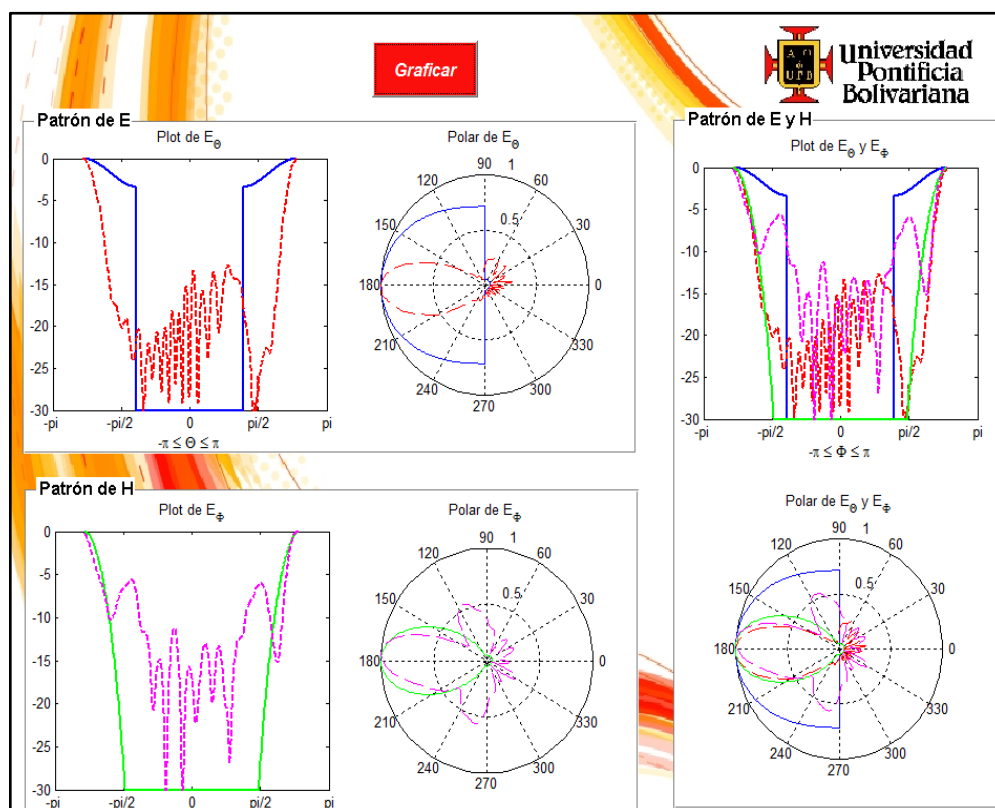
Considerando que los resultados son satisfactorios, se determinó tomar esta antena como el prototipo definitivo para hacer el análisis de los resultados.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para analizar los resultados obtenidos se compararon de forma gráfica y numérica los datos simulados y los datos reales de la antena diseñada, obtenidos a través del LVDAM-ANT.

Realizando la simulación de la antena numero 3 e importando los valores reales de esta, se obtuvo la figura 31. Donde se muestra las diferencias gráficas que hay entre la simulación (Línea Continua) y los datos reales (Línea Punteada) obtenidos.

Figura 31 Diferencia grafica entre patrones



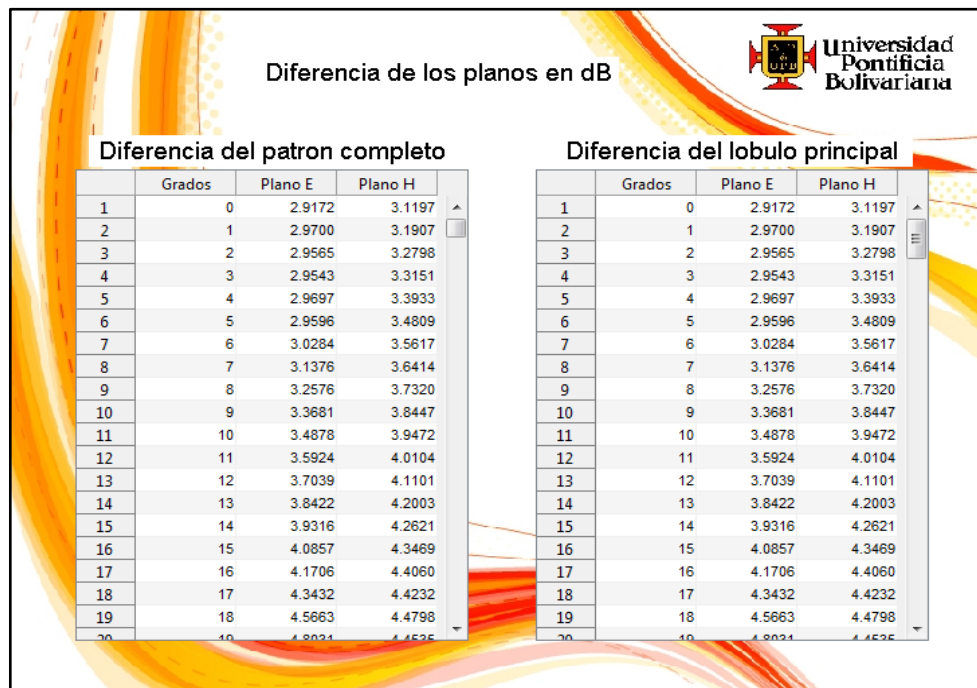
Fuente: [Autor]

Se puede observar de acuerdo a la figura que el patron de radiacion del plano electrico real se aleja del patron de radiacion del plano electrico simulado por el modelo matematico (Cavidades resonantes). Haciendo la salvedad que para el

campo electrico de dicho modelo, este se ve afectado por los efectos de borde los cuales son significativos. Por otra parte el patron de radiacion del plano magnético es bastante cercano al patrón de radiación simulado. Lo que indica que este modelo matematico es apropiado para predecir el patron de radiacion del campo magnético.

Para hacer una comparacion numérica entre la simulacion y la antena real, se le incluyo la opcion al simulador de mostrar la diferencia de los planos en db para tener una nocion de que tan alejados estaban los valores. La tabla de la izquierda de la figura 32 muestra la diferencia punto a punto de todo el patron de radiacion entre los datos reales (Eimportado y Himportado) y los datos simulados (Esimulado y Hsimulado). Mientras que la tabla de la derecha muestra solo la diferencia de los lobulos principales entre los datos reales y los datos simulados ya que estos valores son los verdaderamente importantes a la hora de definir los demas parametros de una antena, tales como el ancho de banda de potencia mitad y la directividad.

Figura 32 Diferencias en db

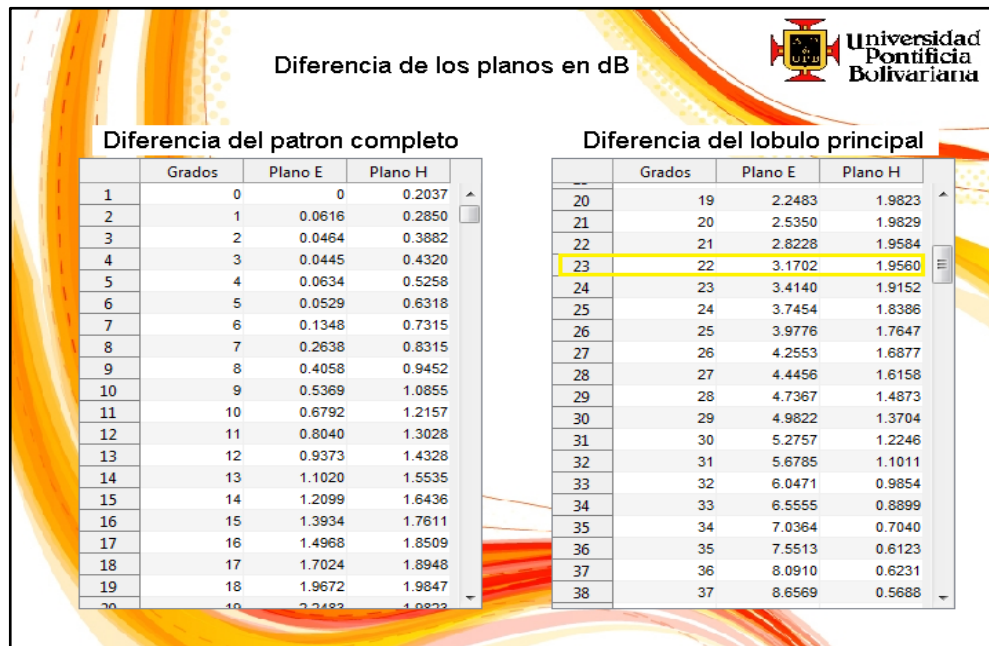


Fuente: [Autor]

La comparación numérica también revela que la diferencia entre el plano H simulado y el plano H real es bastante proximal, mientras que la diferencia entre el plano E simulado y el plano E real es lejana.

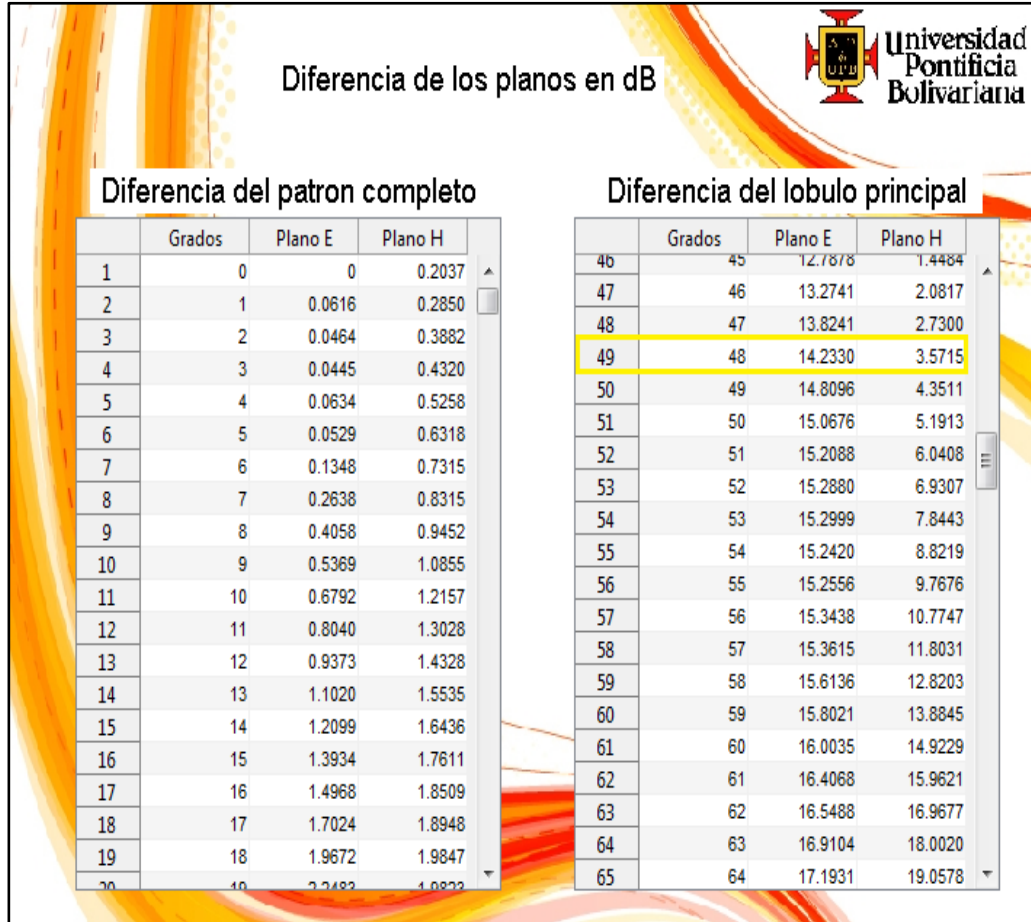
Para calcular el ancho de banda de la antena, se debe tener en cuenta la potencia mitad del lóbulo principal del patrón de radiación. Cuando el plano E o H llegue al valor de -3 db se podrá calcular el ancho de banda de la antena. En la figura 33 y 34 se muestra el valor en el que el plano E y H llegan a -3 db.

Figura 33 Ancho de banda para el plano eléctrico



Fuente: [Autor]

Figura 34 Ancho de banda para el plano magnético

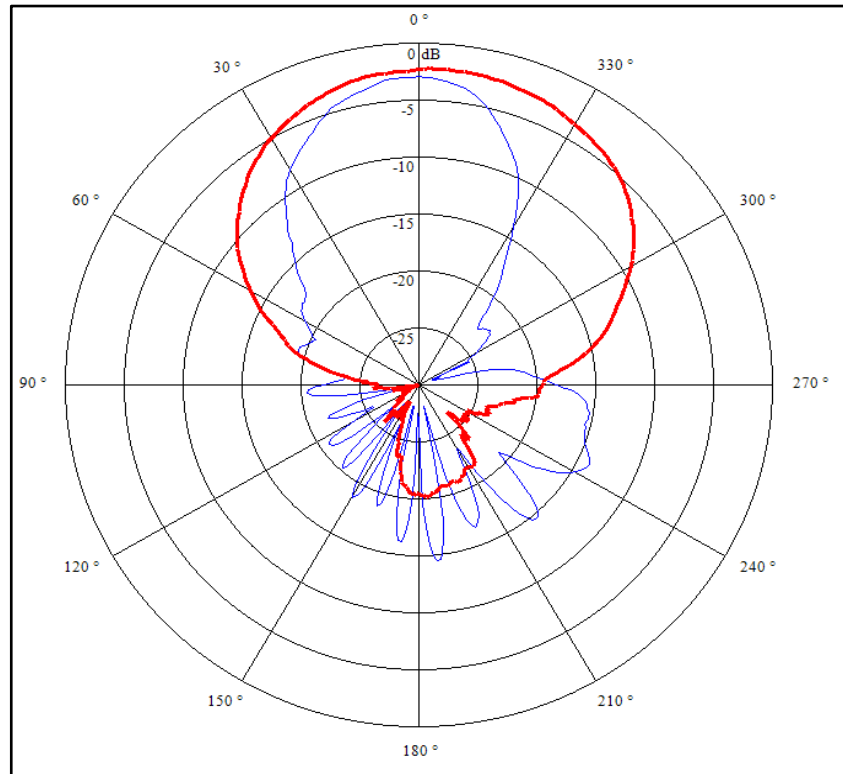


Fuente: [Autor]

Teniendo en cuenta las figuras anteriores se observa que los 3 db de atenuación se logran aproximadamente en 23° para el plano eléctrico y en 49° para el plano magnético, además como el patrón es simétrico, el ancho de banda es el doble para cada uno de los planos. HPBW plano eléctrico 46°, HPBW plano magnético 98°.

Al comparar los planos E del arreglo matricial que se diseñó (Patrón azul) y una antena de un solo parche (Patrón rojo) se comprueban las afirmaciones hechas en el marco teórico apartado 2.5, Las cuales afirman que el lóbulo principal de un arreglo será más directivo que el de un elemento individual, como se observa en la figura 35

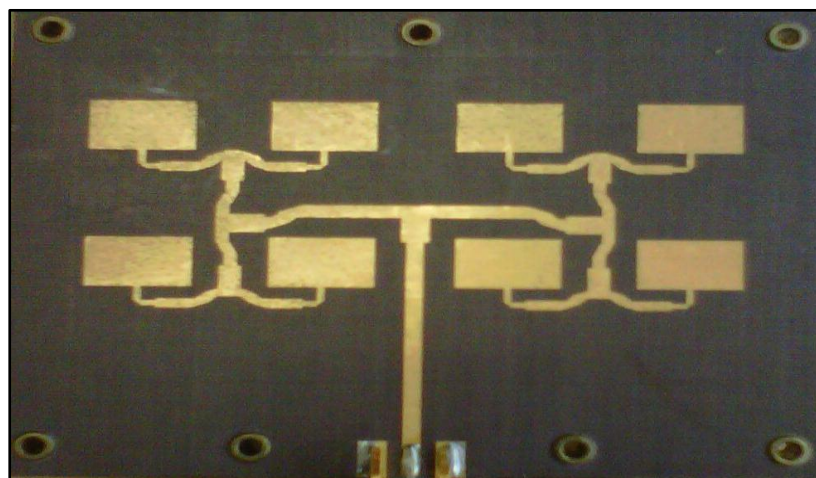
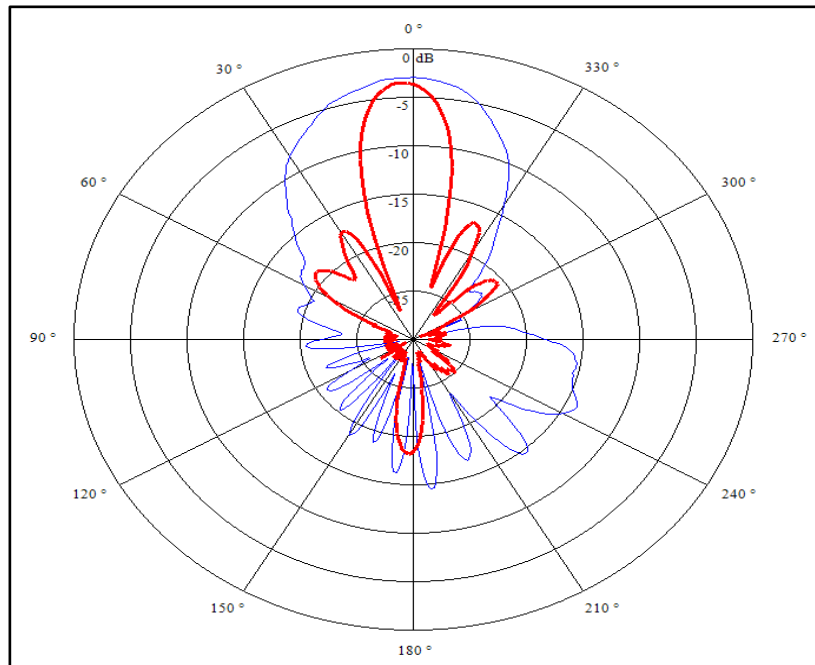
Figura 35 Diferencia del Plano E entre un Parche y un Arreglo



Fuente: [Autor]

El patrón de radiación de la antena número 3 (Línea azul), también se comparó con un arreglo matricial de 2x4 (línea roja) preconstruido por lab-volt, los patrones de radiación para el plano E se pueden observar en la figura 35. Corroborando la afirmación del párrafo anterior.

Figura 36. Diferencia del Plano E entre un arreglo 2x2 y un Arreglo 2x4



Fuente: [Autor]

Para observar de una manera más detallada el error que hay entre la simulación y la realidad se calculó el porcentaje de error y la varianza. Donde se observa que el plano magnético presenta menos error que el eléctrico, esto debido a los ya mencionados efectos de borde. También se observa que al acercarse al valor de la potencia mitad del plano magnético presenta un error aproximado de 0.1% lo que da una confiabilidad al modelo matemático utilizado para simular este. Los cálculos mencionados se pueden observar en la tabla número 3.

Tabla 2. Características para la construcción de la antena número 1.

	Importado		Simulado		Diferencias		Porcentaje Error	
	E	H	E	H	E	H	E	H
0	-0.2759	-6.8013	0	0	0.2759	6.8013	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!
1	-0.5011	-6.8956	-8.90E-04	-0.0056	0.5002102 1	6.89	562.16659	123035.714%
2	-0.6209	-6.9102	-0.0036	-0.0224	0.6173	6.8878	171.472222	30749.107%
3	-0.6209	-6.8085	-0.008	-0.0505	0.6129	6.758	76.6125	13382.178%
4	-0.826	-6.7441	-0.0142	-0.0897	0.8118	6.6544	57.1690141	7418.506%
5	-0.694	-6.6246	-0.0222	-0.1402	0.6718	6.4844	30.2612613	4625.107%
6	-1.1427	-6.7299	-0.032	-0.2019	1.1107	6.528	34.709375	3233.284%
7	-1.348	-6.6455	-0.0435	-0.2749	1.3045	6.3706	29.9885057	2317.425%
8	-1.4395	-6.4876	-0.0567	-0.3591	1.3828	6.1285	24.3880071	1706.628%
9	-1.4951	-6.1538	-0.0717	-0.4545	1.4234	5.6993	19.8521618	1253.971%
10	-1.5605	-5.8465	-0.0884	-0.5613	1.4721	5.2852	16.6527149	941.600%
11	-1.6172	-5.4615	-0.1068	-0.6793	1.5104	4.7822	14.1423221	703.989%
12	-1.5418	-5.1138	-0.1269	-0.8086	1.4149	4.3052	11.1497242	532.426%
13	-1.4488	-4.8763	-0.1487	-0.9493	1.3001	3.927	8.74310693	413.673%
14	-1.5231	-4.7979	-0.1722	-1.1013	1.3509	3.6966	7.84494774	335.658%
15	-1.57	-4.7207	-0.1973	-1.2647	1.3727	3.456	6.95742524	273.266%
16	-1.7612	-4.6635	-0.224	-1.4395	1.5372	3.224	6.8625	223.967%
17	-1.8198	-4.6825	-0.2523	-1.6257	1.5675	3.0568	6.21284185	188.030%
18	-2.3201	-4.6164	-0.2822	-1.8233	2.0379	2.7931	7.22147413	153.189%
19	-2.7383	-4.5511	-0.3136	-2.0325	2.4247	2.5186	7.73182398	123.916%
20	-3.0538	-4.4004	-0.3466	-2.2532	2.7072	2.1472	7.81073283	95.296%
21	-3.4884	-4.1288	-0.3811	-2.4855	3.1073	1.6433	8.15350302	66.115%
22	-3.8872	-4.0149	-0.417	-2.7294	3.4702	1.2855	8.32182254	47.098%
23	-4.0968	-3.6876	-0.4544	-2.9851	3.6424	0.7025	8.01584507	23.534%
24	-4.8199	-3.5868	-0.4931	-3.2524	4.3268	0.3344	8.77469073	10.282%
25	-5.1315	-3.5524	-0.5333	-3.5316	4.5982	0.0208	8.62216389	0.589%

26	-5.6583	-3.6214	-0.5748	-3.8226	5.0835	0.2012	8.84394572	5.263%	
27	-6.1945	-3.7347	-0.6175	-4.1256	5.577	0.3909	9.03157895	9.475%	
28	-6.5659	-3.8264	-0.6616	-4.4406	5.9043	0.6142	8.92427449	13.831%	
29	-6.984	-3.9075	-0.7068	-4.7678	6.2772	0.8603	8.8811545	18.044%	
30	-7.3116	-3.9899	-0.7532	-5.1072	6.5584	1.1173	8.70738184	21.877%	
31	-7.7862	-4.099	-0.8008	-5.4589	6.9854	1.3599	8.72302697	24.912%	
32	-8.1613	-4.04	-0.8494	-5.823	7.3119	1.783	8.60831175	30.620%	
33	-8.6203	-3.9899	-0.8991	-6.1998	7.7212	2.2099	8.58769881	35.645%	
34	-8.9889	-3.9982	-0.9497	-6.5892	8.0392	2.591	8.46498894	39.322%	
35	-9.2147	-4.099	-1.0014	-6.9915	8.2133	2.8925	8.20181746	41.372%	
36	-9.5527	-4.1846	-1.0539	-7.4068	8.4988	3.2222	8.06414271	43.503%	
37	-9.9848	-4.4411	-1.1072	-7.8354	8.8776	3.3943	8.01806358	43.320%	
38	-10.1744	-4.7688	-1.1613	-8.2773	9.0131	3.5085	7.76121588	42.387%	
39	-10.3701	-5.2025	-1.2161	-8.7328	9.154	3.5303	7.5273415	40.426%	
40	-10.6136	-5.7402	-1.2716	-9.2021	9.342	3.4619	7.34664989	37.621%	
41	-10.7817	-6.4338	-1.3278	-9.6855	9.4539	3.2517	7.11997289	33.573%	
42	-11.0428	-7.315	-1.3844	-	10.1833	9.6584	2.8683	6.97659636	28.167%
43	-11.1325	-8.0028	-1.4416	-	10.6956	9.6909	2.6928	6.72232242	25.177%
44	-11.2235	-8.7868	-1.4991	-	11.2229	9.7244	2.4361	6.48682543	21.707%
45	-11.3626	-9.5137	-1.557	-	11.7655	9.8056	2.2518	6.29775209	19.139%
46	-11.5533	-	-1.6152	-	12.3238	9.9381	2.0906	6.15286033	16.964%
47	-11.6509	-10.673	-1.6737	-	12.8981	9.9772	2.2251	5.96116389	17.251%
48	-11.8511	-	-1.7322	-13.489	10.1189	2.4676	5.84164646	18.293%	
49	-12.0582	-11.205	-1.7909	-	14.0968	10.2673	2.8918	5.73303925	20.514%
50	-12.1112	-	-1.8495	-	14.7221	10.2617	3.6347	5.54836442	24.689%
51	-12.3277	-	-1.9081	-	15.3655	10.4196	4.6154	5.46072009	30.037%
52	-12.4389	-	-1.9666	-	16.0275	10.4723	5.6374	5.32507882	35.173%
53	-12.4953	-9.8674	-2.0248	-16.709	10.4705	6.8416	5.17112801	40.946%	
54	-12.6679	-9.252	-2.0828	-	17.4105	10.5851	8.1585	5.08214903	46.860%

55	-12.6679	-8.808	-2.1403	-18.133	10.5276	9.325	4.91874971	51.426%	
56	-12.7265	-8.3021	-2.1975	-	18.8773	10.529	10.5752	4.79135381	56.021%
57	-12.8455	-7.8242	-2.2541	-	19.6443	10.5914	11.8201	4.69872676	60.171%
58	-12.906	-7.3229	-2.3101	-	20.4351	10.5959	13.1122	4.58677114	64.165%
59	-12.967	-6.9545	-2.3654	-21.251	10.6016	14.2965	4.48194808	67.274%	
60	-12.967	-6.6385	-2.42	-	22.0931	10.547	15.4546	4.35826446	69.952%
61	-13.0287	-6.2821	-2.4737	-	22.9628	10.555	16.6807	4.26688766	72.642%
62	-12.967	-5.955	-2.5266	-	23.8618	10.4404	17.9068	4.13219346	75.044%
63	-13.154	-5.7695	-2.5784	-	24.7916	10.5756	19.0221	4.1016134	76.728%
64	-13.091	-5.6018	-2.6291	-	25.7543	10.4619	20.1525	3.97927047	78.249%
65	-13.282	-5.4948	-2.6787	-	26.7519	10.6033	21.2571	3.95837533	79.460%
66	-13.347	-5.4229	-2.7271	-	27.7866	10.6199	22.3637	3.89420997	80.484%
67	-13.5465	-5.4615	-2.7742	-	28.8612	10.7723	23.3997	3.88302934	81.077%
68	-13.6146	-5.4339	-2.8199	-	29.9784	10.7947	24.5445	3.82804355	81.874%
69	-13.6146	-5.4504	-2.8642	-30	10.7504	24.5496	3.75336918	81.832%	
70	-14.1139	-5.5904	-2.9069	-30	11.207	24.4096	3.85530978	81.365%	
71	-14.1888	-5.8049	-2.9481	-30	11.2407	24.1951	3.81286252	80.650%	
72	-14.3416	-5.8286	-2.9875	-30	11.3541	24.1714	3.80053556	80.571%	
73	-14.5784	-6.004	-3.0253	-30	11.5531	23.996	3.81882788	79.987%	
74	-14.8251	-6.1412	-3.0613	-30	11.7638	23.8588	3.84274655	79.529%	
75	-15.2607	-6.2951	-3.0954	-30	12.1653	23.7049	3.93012212	79.016%	
76	-15.8302	-6.3213	-3.1276	-30	12.7026	23.6787	4.06145287	78.929%	
77	-16.1373	-6.4943	-3.1579	-30	12.9794	23.5057	4.11013648	78.352%	
78	-16.9238	-6.4741	-3.1861	-30	13.7377	23.5259	4.31176046	78.420%	
79	-17.5592	-6.6595	-3.2123	-30	14.3469	23.3405	4.46623914	77.802%	
80	-18.4279	-6.7512	-3.2363	-30	15.1916	23.2488	4.69412601	77.496%	
81	-19.453	-6.9323	-3.2582	-30	16.1948	23.0677	4.9704745	76.892%	
82	-20.9456	-7.0442	-3.2779	-30	17.6677	22.9558	5.38994478	76.519%	
83	-21.4572	-7.1894	-3.2954	-30	18.1618	22.8106	5.51125812	76.035%	

84	-22.021	-7.379	-3.3106	-30	18.7104	22.621	5.65166435	75.403%
85	-22.3261	-7.6178	-3.3235	-30	19.0026	22.3822	5.71764706	74.607%
86	-22.021	-7.8594	-3.3341	-30	18.6869	22.1406	5.6047809	73.802%
87	-21.4572	-8.0668	-3.3424	-30	18.1148	21.9332	5.41969842	73.111%
88	-20.4771	-8.2925	-3.3483	-30	17.1288	21.7075	5.11567064	72.358%
89	-19.8406	-8.5286	-3.3518	-30	16.4888	21.4714	4.9193866	71.571%
90	-5.8444	-	-3.353	-30	2.4914	12.9619	0.74303609	43.206%
		17.0381						
270	-6.5235	-	-3.353	-30	3.1705	14.0274	0.94557113	46.758%
		15.9726						
271	-7.4329	-	-3.3518	-30	4.0811	14.8314	1.21758458	49.438%
		15.1686						
272	-6.9613	-	-3.3483	-30	3.613	15.6835	1.07905504	52.278%
		14.3165						
273	-8.3294	-	-3.3424	-30	4.987	16.5726	1.49204165	55.242%
		13.4274						
274	-8.8018	-	-3.3341	-30	5.4677	17.0011	1.63993282	56.670%
		12.9989						
275	-8.3011	-	-3.3235	-30	4.9776	17.5068	1.49769821	58.356%
		12.4932						
276	-9.8738	12.0134	-3.3106	-30	6.5632	17.9866	1.98248052	59.955%
		-						
277	-10.2519	-11.63	-3.2954	-30	6.9565	18.37	2.11097287	61.233%
278	-10.213	-	-3.2779	-30	6.9351	18.5692	2.11571433	61.897%
		11.4308						
279	-9.4152	-11.205	-3.2582	-30	6.157	18.795	1.8896937	62.650%
280	-9.9106	-	-3.2363	-30	6.6743	18.8793	2.06232426	62.931%
		11.1207						
281	-9.5875	-	-3.2123	-30	6.3752	18.9126	1.98462161	63.042%
		11.0874						
282	-8.2729	-	-3.1861	-30	5.0868	18.7266	1.59656006	62.422%
		11.2734						
283	-8.189	-	-3.1579	-30	5.0311	18.6046	1.59317901	62.015%
		11.3954						
284	-7.4085	-	-3.1276	-30	4.2809	18.3885	1.3687492	61.295%
		11.6115						
285	-7.9176	-	-3.0954	-30	4.8222	18.1047	1.55786005	60.349%
		11.8953						
286	-7.5318	-12.3	-3.0613	-30	4.4705	17.7	1.46032731	59.000%
287	-8.8018	-	-3.0253	-30	5.7765	17.2372	1.90939742	57.457%
		12.7628						

288	-7.4329	-	-2.9875	-30	4.4454	16.5726	1.488	55.242%
289	-6.9386	-	-2.9481	-30	3.9905	16.0464	1.35358366	53.488%
290	-7.6577	-	-2.9069	-30	4.7508	15.3931	1.63431835	51.310%
291	-8.6203	-	-2.8642	-30	5.7561	14.3646	2.00967111	47.882%
292	-8.0518	-	-2.8199	-	5.2319	13.6442	1.85534948	45.513%
293	-11.3626	-	-2.7742	-	8.5884	11.7688	3.09581141	40.777%
294	-7.8911	-17.259	-2.7271	-	5.164	10.5276	1.89358659	37.887%
295	-8.079	-	-2.6787	-	5.4003	7.6688	2.01601523	28.666%
296	-7.9709	-	-2.6291	-	5.3418	5.7751	2.03179795	22.424%
297	-7.8911	-	-2.5784	-	5.3127	3.5859	2.06046385	14.464%
298	-7.8911	-	-2.5266	-	5.3645	2.1187	2.12320906	8.879%
299	-7.8123	-	-2.4737	-	5.3386	0.7725	2.15814367	3.364%
300	-7.3841	-	-2.42	-	4.9641	0.2562	2.05128099	1.160%
301	-7.7862	-	-2.3654	-21.251	5.4208	0.6365	2.29170542	2.995%
302	-7.9977	-	-2.3101	-	5.6876	0.523	2.46205792	2.559%
303	-8.2168	-	-2.2541	-	5.9627	0.142	2.64526862	0.723%
304	-8.2448	-18.397	-2.1975	-	6.0473	0.4803	2.75189989	2.544%
305	-9.0526	-	-2.1403	-18.133	6.9123	1.1487	3.22959398	6.335%
306	-8.4152	-	-2.0828	-	6.3324	1.5244	3.04033032	8.756%
307	-9.4836	-	-2.0248	-16.709	7.4588	1.3896	3.68372185	8.316%
308	-9.5875	-	-1.9666	-	7.6209	2.1607	3.87516526	13.481%

		13.8668		16.0275				
309	-9.3813	-	-1.9081	-				
		12.7628		15.3655	7.4732	2.6027	3.91656622	16.939%
310	-8.9889	-	-1.8495	-				
		11.8373		14.7221	7.1394	2.8848	3.86017843	19.595%
311	-9.5527	-	-1.7909	-				
		11.0874		14.0968	7.7618	3.0094	4.334022	21.348%
312	-8.7104	-	-1.7322	-13.489				
		10.1912			6.9782	3.2978	4.02851865	24.448%
313	-8.0518	-9.5874	-1.6737	-				
				12.8981	6.3781	3.3107	3.81077851	25.668%
314	-7.9977	-8.4785	-1.6152	-				
				12.3238	6.3825	3.8453	3.95152303	31.202%
315	-7.4575	-7.5758	-1.557	-				
				11.7655	5.9005	4.1897	3.7896596	35.610%
316	-8.4152	-6.9545	-1.4991	-				
				11.2229	6.9161	4.2684	4.61350143	38.033%
317	-7.8911	-6.2951	-1.4416	-				
				10.6956	6.4495	4.4005	4.4738485	41.143%
318	-7.5318	-5.746	-1.3844	-				
				10.1833	6.1474	4.4373	4.44047963	43.574%
319	-7.9442	-5.2981	-1.3278	-9.6855				
					6.6164	4.3874	4.98297936	45.299%
320	-7.5819	-4.7737	-1.2716	-9.2021				
					6.3103	4.4284	4.9624882	48.124%
321	-7.099	-4.2453	-1.2161	-8.7328				
					5.8829	4.4875	4.83751336	51.387%
322	-6.3158	-3.8628	-1.1613	-8.2773				
					5.1545	4.4145	4.43856023	53.333%
323	-5.6951	-3.4318	-1.1072	-7.8354				
					4.5879	4.4036	4.14369581	56.201%
324	-4.8199	-2.9761	-1.0539	-7.4068				
					3.766	4.4307	3.57339406	59.819%
325	-3.6846	-2.5358	-1.0014	-6.9915				
					2.6832	4.4557	2.67944877	63.730%
326	-3.8598	-2.0902	-0.9497	-6.5892				
					2.9101	4.499	3.06423081	68.278%
327	-3.6185	-1.7175	-0.8991	-6.1998				
					2.7194	4.4823	3.02458014	72.297%
328	-3.45	-1.2986	-0.8494	-5.823				
					2.6006	4.5244	3.06169061	77.699%
329	-3.3485	-0.8639	-0.8008	-5.4589				
					2.5477	4.595	3.18144356	84.174%
330	-3.3109	-0.5665	-0.7532	-5.1072				
					2.5577	4.5407	3.39577801	88.908%
331	-3.2487	-0.3542	-0.7068	-4.7678				
					2.5419	4.4136	3.59634975	92.571%
332	-3.2611	-0.1407	-0.6616	-4.4406				
					2.5995	4.2999	3.92911125	96.832%
333	-3.0898	-0.0497	-0.6175	-4.1256				
					2.4723	4.0759	4.0037247	98.795%
334	-2.6031	-0.0343	-0.5748	-3.8226				
					2.0283	3.7883	3.52870564	99.103%
335	-2.2251	0	-0.5333	-3.5316				
					1.6918	3.5316	3.17232327	100.000%
336	-1.9087	-0.0343	-0.4931	-3.2524				
					1.4156	3.2181	2.87081728	98.945%
337	-1.4395	-0.1115	-0.4544	-2.9851				
					0.9851	2.8736	2.16791373	96.265%

338	-1.0382	-0.2553	-0.417	-2.7294	0.6212	2.4741	1.48968825	90.646%
339	-0.7596	-0.4676	-0.3811	-2.4855	0.3785	2.0179	0.99317764	81.187%
340	-0.17	-0.6414	-0.3466	-2.2532	0.1766	1.6118	0.50952106	71.534%
341	0	-0.8752	-0.3136	-2.0325	0.3136	1.1573	1	56.940%
342	-0.2303	-1.0943	-0.2822	-1.8233	0.0519	0.729	0.18391212	39.982%
343	-0.2606	-1.2815	-0.2523	-1.6257	0.0083	0.3442	0.03289734	21.172%
344	-0.2683	-1.4834	-0.224	-1.4395	0.0443	0.0439	0.19776786	3.050%
345	-0.3526	-1.7389	-0.1973	-1.2647	0.1553	0.4742	0.7871262	37.495%
346	-0.3603	-1.9741	-0.1722	-1.1013	0.1881	0.8728	1.09233449	79.252%
347	-0.6452	-2.265	-0.1487	-0.9493	0.4965	1.3157	3.33893746	138.597%
348	-0.978	-2.6336	-0.1269	-0.8086	0.8511	1.825	6.70685579	225.699%
349	-0.9524	-3.0103	-0.1068	-0.6793	0.8456	2.331	7.917603	343.147%
350	-0.8931	-3.4467	-0.0884	-0.5613	0.8047	2.8854	9.10294118	514.057%
351	-0.8763	-3.7585	-0.0717	-0.4545	0.8046	3.304	11.2217573	726.953%
352	-0.7927	-4.061	-0.0567	-0.3591	0.736	3.7019	12.9805996	1030.883%
353	-0.7021	-4.3646	-0.0435	-0.2749	0.6586	4.0897	15.1402299	1487.705%
354	-0.6533	-4.6211	-0.032	-0.2019	0.6213	4.4192	19.415625	2188.806%
355	-0.5807	-4.9459	-0.0222	-0.1402	0.5585	4.8057	25.1576577	3427.746%
356	-0.4069	-5.4064	-0.0142	-0.0897	0.3927	5.3167	27.6549296	5927.202%
357	-0.2835	-5.7636	-0.008	-0.0505	0.2755	5.7131	34.4375	11313.069%
358	-0.2454	-6.2112	-0.0036	-0.0224	0.2418	6.1888	67.1666667	27628.571%
359	-0.2835	-6.542	-8.90E-04	-0.0056	0.2826102 1	6.5364	317.614505	116721.429%

Varianza	
E	H
0-45	
11.5836721	4.321845175
46-90	
10.3429387	73.50480114
270-315	
1.36265488	55.0750575
316-360	
4.57040729	2.577974341
Max	
56216.659%	123035.7143%
Min	
3.290%	0.589%

Fuente: [Autor]

5. MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR

5.1. FUNCIONAMIENTO DEL SIMULADOR

El simulador fue desarrollado mediante módulos GUI en el entorno de MATLAB. A continuación se describen sus características y funcionamiento para su correcto manejo.

Como bienvenida se tiene el módulo de inicio, el cual brinda información sobre los creadores, director y título del proyecto figura 37.

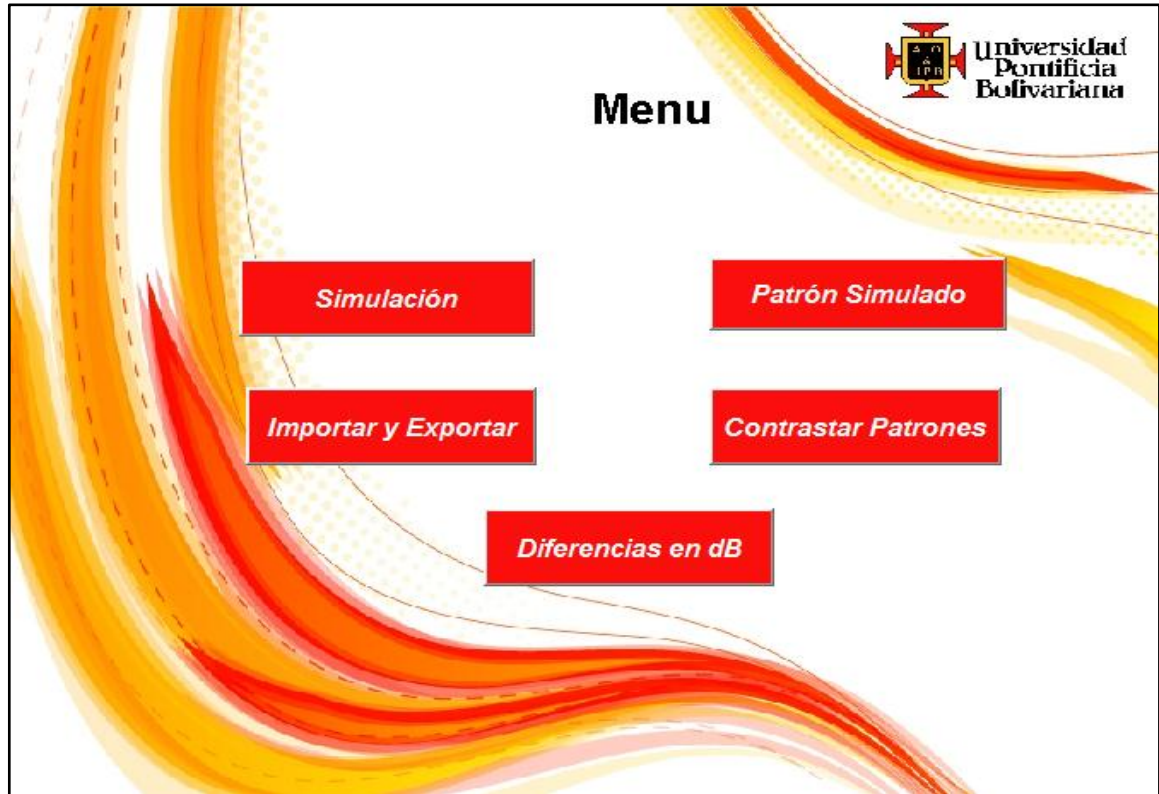
Figura 37. Modulo de inicio del simulador



Fuente: [Autor]

Ubicando el puntero del mouse sobre el botón inicio, parte superior derecha de la figura 37 y presionando el botón izquierdo del mouse, se entra al menú principal ofreciendo al usuario las opciones de simulación, patrón simulado, importar y exportar, contrastar patrones y diferencias en db, como se muestra en la figura 38

Figura 38. Modulo menú del simulador



Fuente: [Autor]

Ubicando el puntero del mouse sobre el botón simulación, ubicado en la parte superior derecha de la figura 38 y presionando el botón izquierdo del mouse, se accede al módulo que permite realizar los cálculos de la simulación. El cual se observa en la figura 39

Figura 39 Modulo del botón simulación

Entradas

Er Fr (GHz) h (cm)

Zm (ohm) dx (cm) dy (cm)

Salidas

W (cm) L (cm) Le (cm)

WL (cm) DeltaL (cm) Ereff

Fr Real (GHz) Af

Calcular

Graficos

Obtener Fr Real

Fuente: [Autor]

Al cargar los valores requeridos por el simulador (E_r , F_r , h , Z_m , dx , dy) y presionando el botón izquierdo del mouse, ubicando el puntero sobre el botón “Calcular” figura 39, el simulador calculará y mostrará los valores (W , L , Le , WL , ΔL , E_{reff}) para el diseño de la antena.

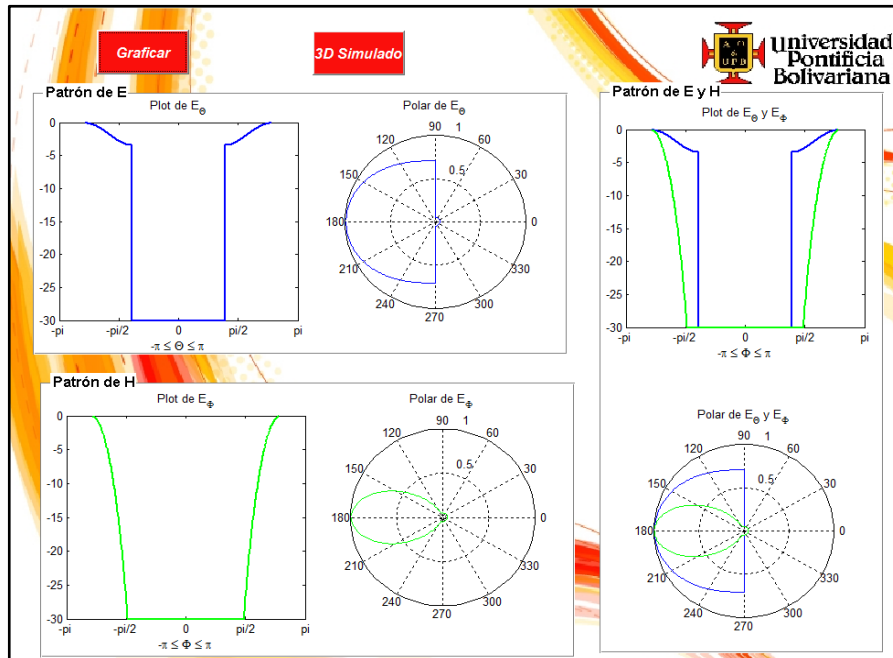
El cálculo de la frecuencia real a la cual trabaja la antena se puede obtener ubicando el puntero del mouse sobre el botón “Obtener Fr Real” ubicado en la parte inferior derecha de la figura 39 y presionando el botón izquierdo del mouse sobre el mismo.

El modulo del botón “Gráficos” también ofrece la opción de graficar el patrón de radiación en 2D y 3D de la simulación, para ello se debe ubicar el puntero del mouse sobre el botón “Graficar”, ubicado en la parte superior izquierda y pulsar el botón izquierdo del mouse figura 40, si se desea obtener el patrón en 3D se debe pulsar el botón derecho del mouse sobre el botón “3D simulado” el cual se encuentra ubicado en la parte superior derecha figura 40.

Cabe resaltar que antes de entrar a cualquier botón del menú de inicio, es necesario realizar primero la simulación con los valores de diseño, de lo contrario

el simulador marcará un error puesto que no se han cargado los datos necesarios para realizar alguna otra acción.

Figura 40. Modulo del botón Gráficos



Fuente: [Autor]

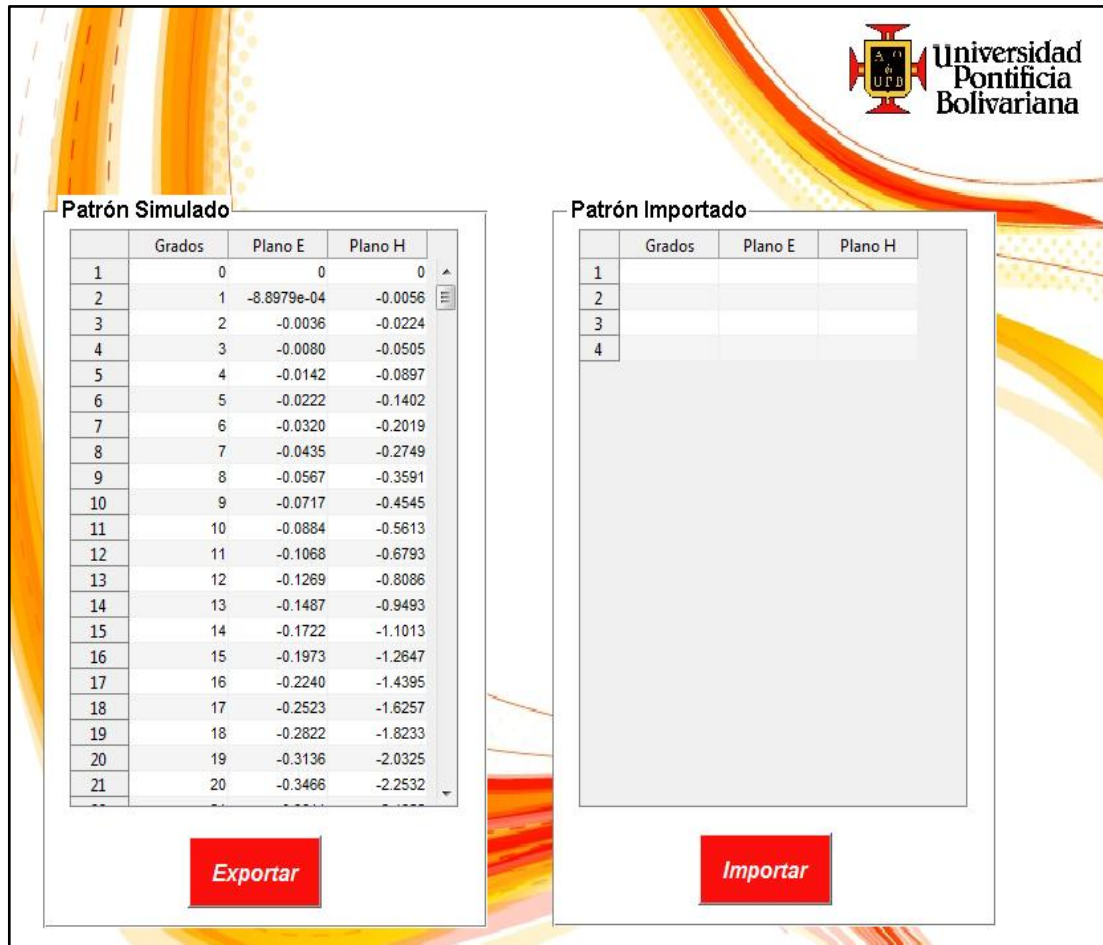
Para volver al menú inicio se cierran todos los módulos abiertos y el simulador automáticamente volverá al menú de inicio conservando los datos de la simulación, por lo cual ya se puede realizar otra acción del menú Figura 38.

El botón “patrón simulado” del menú inicio, ubicado en la parte superior derecha del módulo menú (Grafica 38) cumple la misma función del botón gráficos del módulo del botón simulación.

Los botones “contrastar patrones” y “Diferencias en db” del menú (Grafica 38), dependen del botón “Importar y Exportar” puesto que en estos se realiza una comparación de los valores de la simulación y valores exportados. Es por este motivo que antes de ser usados, es necesario exportar los valores con los cuales se desea comparar la simulación. Para esto se debe pulsar el botón izquierdo del

mouse sobre el botón “importar y exportar”, ubicado en la parte inferior derecha del menú figura 38, el cual despliega el modulo que se observa en la figura 41

Figura 41. Modulo del botón Importar y Exportar



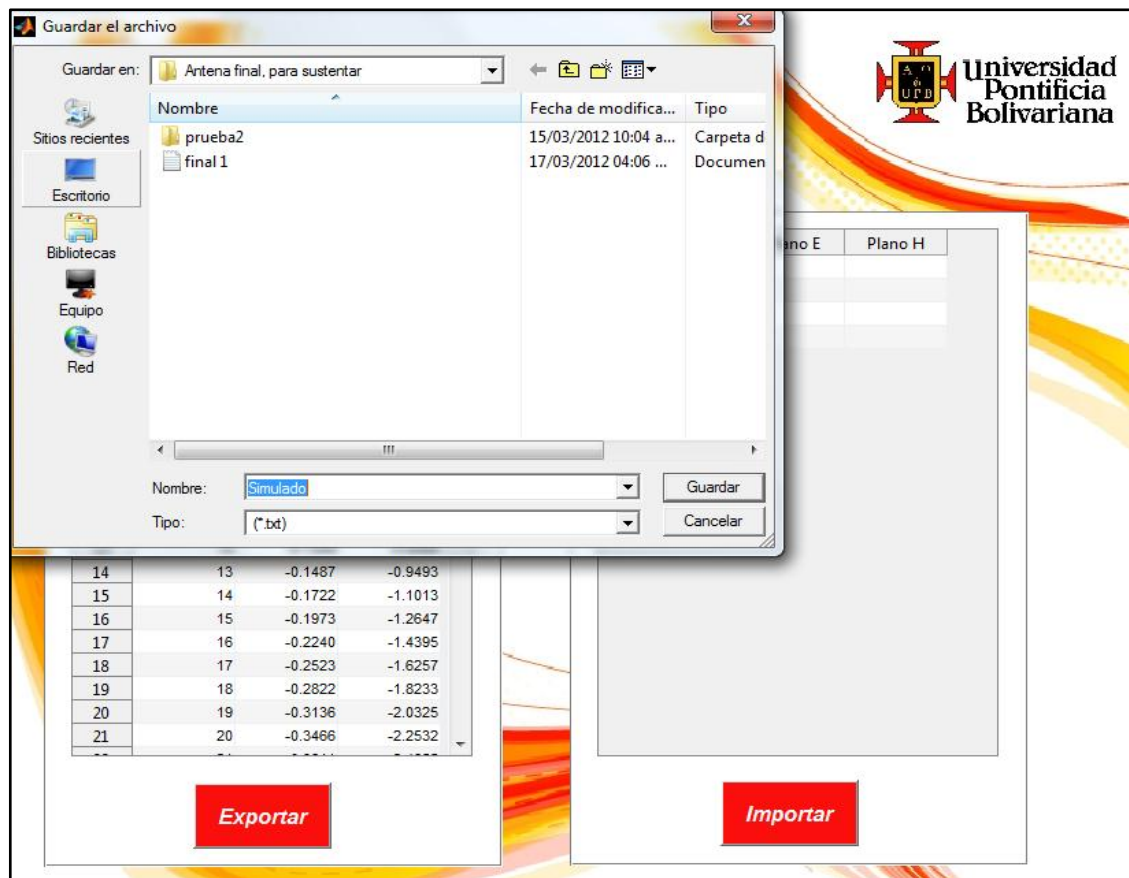
Fuente: [Autor]

Donde la tabla que se muestra en la parte izquierda contiene los valores en db del plano E y H de la simulación y la tabla que se muestra en la parte derecha contendrá los valores que se importen.

Para exportar los valores de la simulación en un archivo de texto “.txt”, se debe pulsar el botón izquierdo del mouse, ubicando el puntero sobre el botón “Exportar”, ubicado en la parte inferior izquierda figura 41, el cual abrirá una ventana pidiendo la ruta donde se quiere guardar el archivo como se muestra en la figura 42.

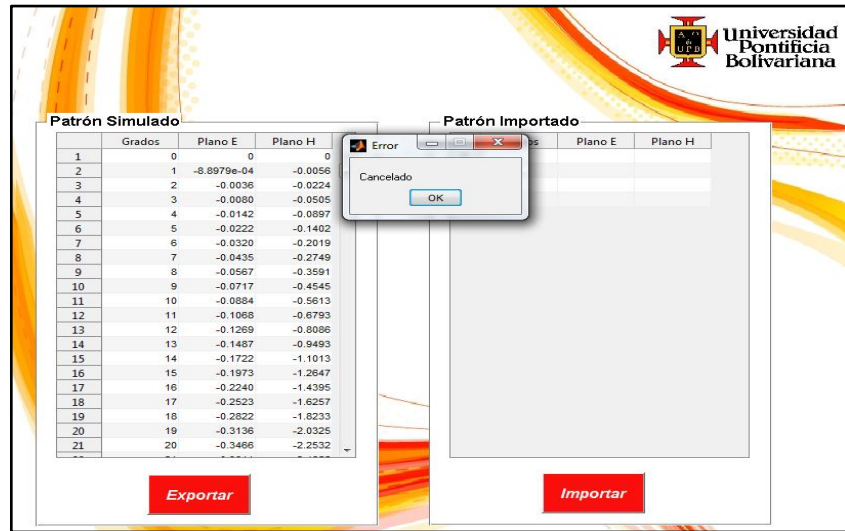
El simulador por defecto guarda el archivo con el nombre de “Simulado” el cual puede ser modificado por el usuario, escribiendo el nombre que se desee sobre el recuadro “nombre”. El usuario escoge la ruta en la que desee guardar los datos de la simulación y debe proceder a pulsar el botón izquierdo del mouse, ubicando el puntero sobre la opción guardar de la ventana, para que el procedimiento de exportar termine figura 42. Si el usuario decide no guardar el archivo debe cancelar la operación pulsando el botón izquierdo del mouse, ubicando el puntero sobre el botón cancelar, el cual mostrara un pequeño recuadro que indica que la operación se canceló figura 43.

Figura 42 Exportar valores simulados.



Fuente: [Autor]

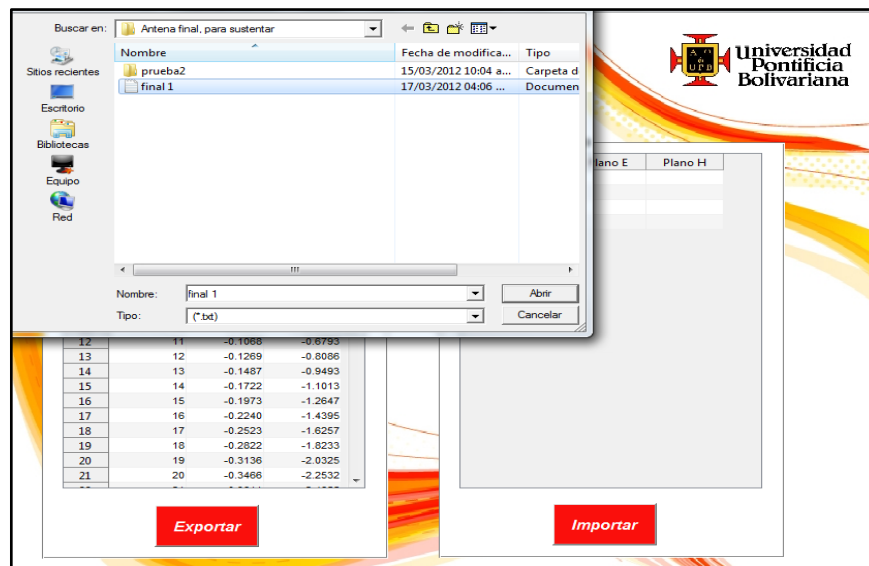
Figura 43. Exportar valores simulados.



Fuente: [Autor]

Para importar datos de una antena real o simulada y poderlos contrastar, se debe pulsar el botón izquierdo del mouse, ubicando el puntero sobre el botón "Importar", ubicado en la parte inferior derecha figura 42, el cual desplegará una ventana como se muestra en la figura 44

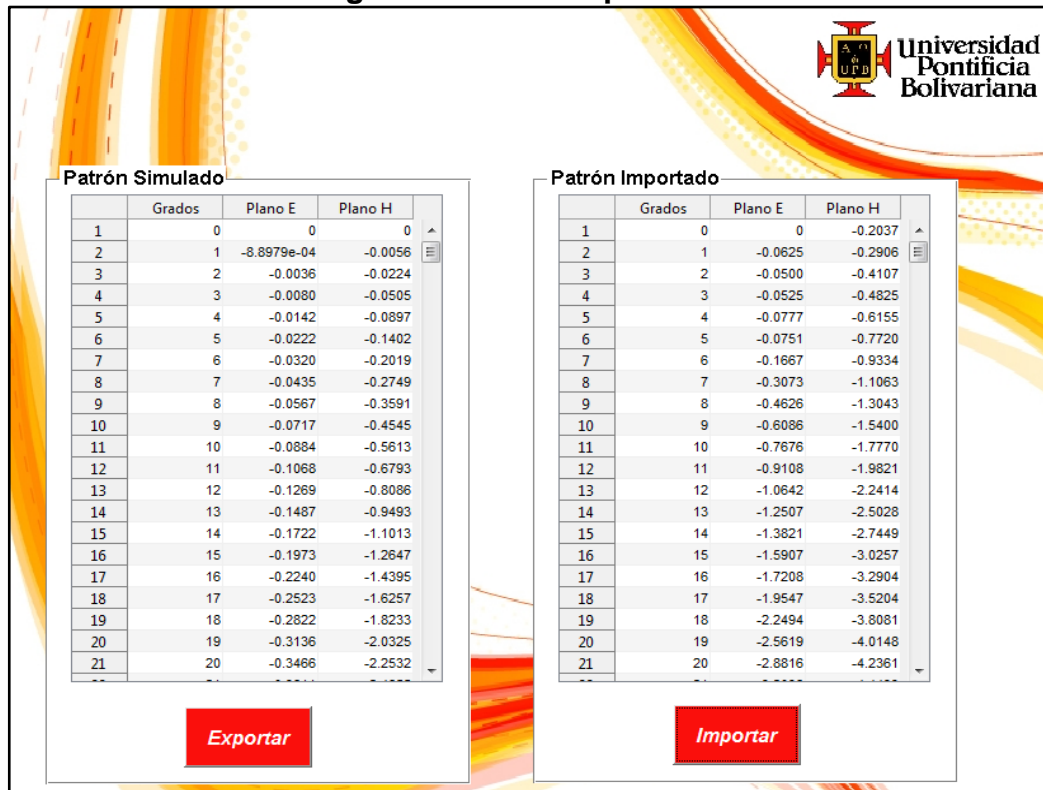
Figura 44. Importar valores simulados



Fuente: [Autor]

Seleccionando el archivo que se desea importar, según la ruta con la cual el usuario lo haya guardado y pulsando el botón izquierdo del mouse, ubicando el puntero sobre el botón “Abrir” de la ventana figura 44, se abrirá y se guardara en la tabla que está ubicada en la parte derecha figura 45.

Figura 45 Datos Importados

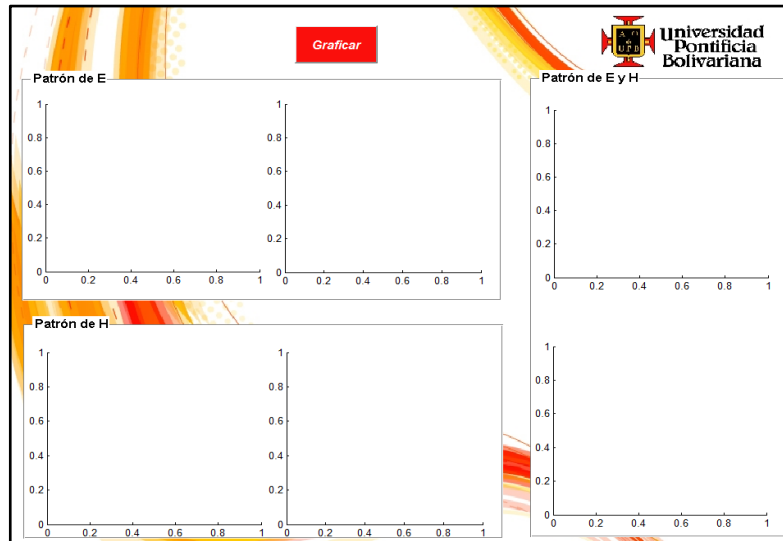


Fuente: [Autor]

Cerrando el modulo del botón “Importar y Exportar” el simulador vuelve automáticamente al módulo del menú figura 35, conservando los valores de la simulación y del archivo exportado, por lo cual ya se puede realizar otra acción como “contrastar patrones” o “diferencias en db”.

Para obtener el grafico que permita comparar el patrón simulado y el patrón real o exportado se debe pulsar el botón izquierdo del mouse, ubicando el puntero sobre el botón “Contrastar patrones”, ubicado en la parte inferior derecha figura 38, el cual despliega un módulo como se muestra en la figura 46.

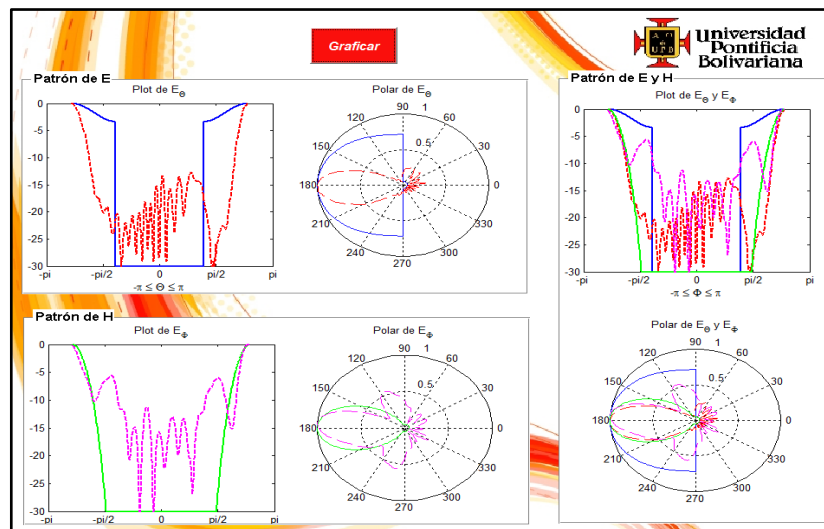
Figura 46. Modulo del botón Contrastar Patrones.



Fuente: [Autor]

Para obtener los gráficos de las comparaciones se debe pulsar el botón izquierdo del mouse, ubicando el puntero sobre el botón “Graficar”, ubicado en la parte superior central figura 46. Al realizar la acción anterior se mostrara las gráficas de los patrones como se muestra en la figura 47.

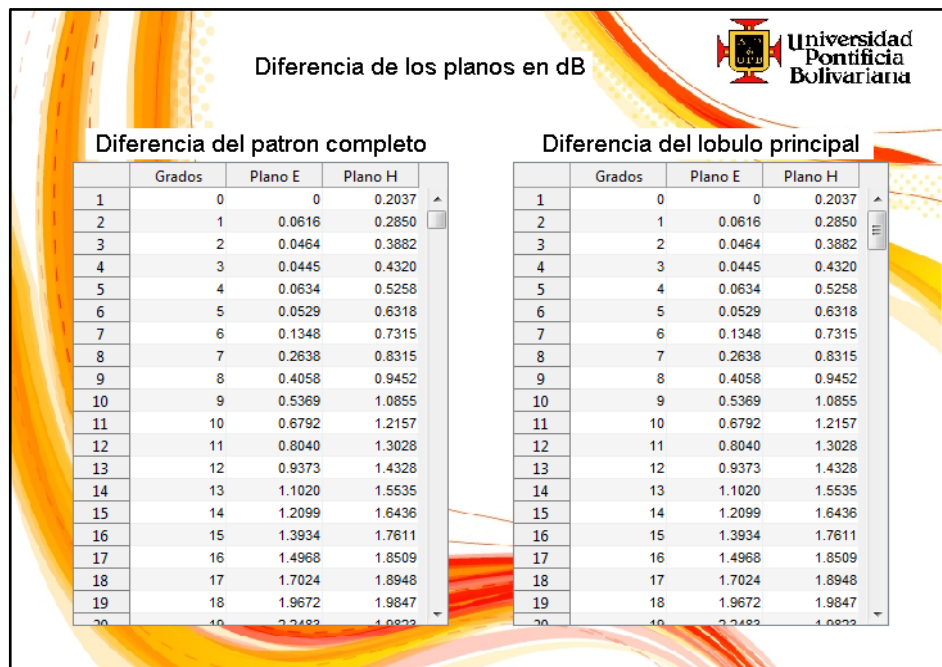
Figura 47. Comparación de Patrones.



Fuente: [Autor]

Para volver al menú inicio se cierra el modulo y el simulador automáticamente volverá a este. El botón “diferencias en db” permite calcular la diferencia entre los valores del campo E y el campo H de la simulación echa y los datos importados. Para ello se debe pulsar el botón izquierdo del mouse, ubicando el puntero sobre el botón “Diferencias en db”, ubicado en la parte inferior central del menú figura 38, el cual mostrara el modulo del botón “Diferencias en db” figura 48.

Figura 48. Diferencias en db



Fuente: [Autor]

El módulo muestra dos tablas, Diferencia del patrón completo (Tabla de la izquierda) y Diferencia del lóbulo principal (Tabla de la derecha) figura 48, lo que permite un mejor análisis de los resultados obtenidos. Para regresar al menú de inicio se cierra el modulo “Diferencias en db” y el software automáticamente regresa a este. Para finalizar el software, primero cierre todos los mulos abiertos y por último de cerrar en el módulo del menú.

6. CONCLUSIONES

- Se pudo comprobar mediante el análisis de resultados que los efectos de borde afectan significativamente el plano eléctrico, debido a que este depende de la longitud efectiva del parche, la cual indica el valor de los efectos de borde, teniendo presente que la antena diseñada se alimenta por un extremo del ancho.
- Los resultados obtenidos de la comparación de una antena microstrip y un arreglo dan la certeza que cuando se tiene mayor número de parches en una antena microstrip se obtiene mayor directividad.
- Con el fin de obtener un patrón más limpio y con menos distorsión sería conveniente realizar las pruebas de funcionamiento en un ambiente sin reflexión alguna, como en una cámara anecoica.
- Con la realización de este proyecto, se diseñó un software de simulación, donde el usuario podrá modificar los parámetros de una antena microstrip y determinar otras construcciones, para poder concluir cómo varía el patrón de radiación respecto a los parámetros de la antena.
- Al analizar la tabla de error se observa que al acercarse al valor de la potencia mitad, el plano magnético presenta un error aproximado de 0.1% lo que da una confiabilidad al modelo matemático utilizado para simular este.

7. TRABAJOS FUTUROS

En el desarrollo de este proyecto se pudo observar que las antenas microstrip al ser probadas en un ambiente robusto como un laboratorio, son afectadas por distintos objetos que causan reflexión y alteran el patrón de radiación de la misma. Por este motivo se propone el diseño de una cámara anecoica que permita probar las antenas microstrip en un mejor entorno.

Se propone el estudio de otros tipos de arreglos, como arreglos lineales y arreglos matriciales de mayor orden, para contrastar resultado con los obtenidos en este proyecto.

El diseño de un software que permita simular un arreglo por diferentes métodos de diseño sería de gran ayuda para poder contrastar resultados entre métodos y poder observar como mejoran o empeoran los parámetros de la antena según este.

Realizar un modelo matemático que permita simular los efectos de borde, sería de gran ayuda para mejorar el simulador diseñado y hacer que la simulación se acerque más a la realidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] HERNÁNDEZ RUEDA, José Abel Antenas: principios básicos, análisis y diseño, universidad autónoma de baja california, 1998.
- [2] Constantine A. Balanis., Antenna Theory, Analysis And Design., Tercera Edition, John Wiley y Sons., 2005.
- [3] ANTENAS. A. CARDAMA, L. JOFRE, J.M. RIUS, J. ROMEU, S. BLANCH, M. FERRANDO. Edicions UPC
- [4] MARTÍNEZ Sergio, JIMENEZ Rosa; análisis de la simulación del patrón de radiación en una antena tipo parche, Bucaramanga, 2010, Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico), Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela Ingenierías, Facultad de ingeniería electrónica.
- [5] FÓRNEAS ALONSO Alberto; Análisis y Diseño de un array de parches para aplicaciones radar en vehículos, Madrid, 2011, Trabajo de grado (Ingeniero de telecomunicaciones), Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones.
- [6] HERNÁNDEZ AQUINO Raúl; Diseño, simulación y construcción de antenas tipo parche para bluetooth y WI-FI, bandas 2.4 ghz y 5.8 ghz, Puebla-México, 2008, Trabajo de grado (Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones), Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería y Ciencias.
- [7] J. C. GARCÍA, J. A. FRANCO: Diseño de antena microstrip para la banda de UHF, Grupo de Control y Procesamiento Digital de Señales, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales
- [8] WHEELER H.A.. Transmission line properties of a strip on dielectric sheet on a plane". IEEE MTT. 25(8). pp. 631-647. 1977.
- [9] SOPHOCLES J. Orfanidis, Electromagnetic Waves and Antennas, Rutgers University, 1st ed., 819 p., 2004.

[10] BUENROSTRO ROCHA Sergio: Metodología para el diseño y construcción de una antena de microcinta en la banda de WiMax a 3.5GHz, Tijuana-México, 2007, Trabajo de grado (Maestro en ciencias), Instituto Politécnico Nacional.

[11] Microcircuitos S.A <<http://www.pcbmicrocircuitos.com/>> [Citado en 29 de Septiembre de 2011].

[12] Lab-volt <<http://www.labvolt.com/>> [Citado en 2 de Febrero de 2012].