

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Diseño y construcción de una antena de apertura para su
aplicación en sistemas de diagnóstico de cáncer de seno en
etapa temprana**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de Maestro en
Ciencias

Presenta:

Rafael García Baeza

Ensenada, Baja California, México
2015

Tesis defendida por

Rafael García Baeza

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Ricardo Arturo Chávez Pérez
Director del Comité

Dr. José Luis Medina Monroy

Dr. Arturo Velázquez Ventura

Dr. Víctor Ruiz Cortés



Dr. Miguel Ángel Alonso Arévalo
Coordinador del Posgrado

Dr. Jesús Favela Vara
Director de Estudios de Posgrado

Rafael García Baeza © 2015

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor

Resumen de la tesis que presenta **Rafael García Baeza** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Altas Frecuencias.

Diseño y construcción de una antena de apertura para su aplicación en sistemas de diagnóstico de cáncer de seno en etapa temprana.

Resumen aprobado por:

Dr. Ricardo Arturo Chávez Pérez
Director de tesis

Este trabajo de tesis tiene como propósito presentar el estudio y diseño de antenas de apertura para su aplicación en un sistema de diagnóstico de cáncer de mama en etapa temprana. Durante el desarrollo del proyecto se tiene contemplado estudiar las estructuras de antena de apertura con guía de onda rectangular y terminación piramidal truncada. En función de los resultados obtenidos en el proceso de simulación, la estructura seleccionada será construida y caracterizada eléctricamente. El prototipo final se optimizará para que presente los mejores parámetros de diseño tales como: frecuencia (2.4 GHz), ganancia, relación de onda estacionaria de voltaje (ROEV), ancho de banda, pérdidas por retorno y patrón de radiación.

Palabras clave: **Antenas de apertura, guía de onda rectangular, parámetros de diseño, diagnóstico de cáncer de mama**

Abstract of the thesis presented by Rafael García Baeza as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in electronics and telecommunications with orientation in high frequency.

Design and construction of an aperture antenna for use in breast cancer diagnosis at early stage.

Abstract approved by:

Dr. Ricardo Arturo Chávez Pérez
Thesis director

This thesis aims to present the study and design of aperture antennas for use in a system of diagnosis of breast cancer at early stage. During the project it is planned to study the structures of aperture antennas with rectangular waveguide and truncated pyramidal termination. Depending on the results obtained in the simulation process, the structure selected will be constructed and characterized electrically. The final prototype will be optimized to obtain the best design parameters such as: frequency (2.4 GHz), gain, voltage standing wave ratio (VSWR), bandwidth, return loss and radiation pattern.

Key words: **Aperture antennas, rectangular waveguide, breast cancer diagnosis**

Dedicatoria

A mis familia y seres queridos.

Agradecimientos

A mis padres y a mi hermana por el gran apoyo que siempre me brindan, sin ustedes no podría lograr nada, son mi apoyo fundamental y mi motor para ser mejor día a día.

A mi director de tesis el Dr. Ricardo Arturo Chávez Pérez, por dirigirme y estar conmigo durante este periodo de mi carrera profesional, por compartir sus conocimientos e ideas, así como sus experiencias que me ayudaron para poder concluir este proyecto y tesis.

A los miembros del comité: Dr. Víctor Ruiz Cortés, Dr. José Luis Medina Monroy, Dr. Arturo Velázquez Ventura, por todos sus comentarios y consejos durante todo este tiempo

A todos mis profesores del área Altas Frecuencias: Dra. Carmen Maya, Dr. Apolinar Reynoso, M.C. Benjamin Ramirez y M.C. Jesús Ibarra, al profesor de la materia señales y sistemas; Dr. Miguel Alonso Arévalo del area de telecomunicaciones, a todos ellos por compartir sus conocimientos y consejos conmigo.

A mis amigos de microondas; Chuy, Julio, Fredy, Fernanda, Katherine, Figo y Reinaldo; a mis amigos de telecomunicaciones Neto, Rogger, Roi, Pol, Gio a mis amigos del area de control; Topacio, Rigo. Espero siga la amistad por mucho tiempo.

A mis amigos personales Andrés, Vania, Lili, Pirson, Rey, Jonathan, Pamela por su amistad y momentos compartidos.

A Ivanna Garin por ser una parte importantísima en mi vida hoy y siempre, tú eres un gran apoyo y motivación para crecer personal y profesionalmente, muchas gracias por compartir tu tiempo y vida conmigo, que de una u otra manera haces más agradable y dichosa la mía.

Al CONACyT y al CICESE por el apoyo económico para realizar mis estudios.

Tabla de contenido

Página

Resumen español	ii
Resumen inglés	iii
Dedicatorias	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xi
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Justificación.....	4
1.2 Antecedentes	5
1.3 Objetivos	8
1.4 Organización de la tesis	9
Capítulo 2. Teoría de antenas de apertura	11
2.1 Introducción	11
2.2 Antenas de apertura	11
2.2.1 Principios fundamentales de antenas de apertura	13
2.2.1.1 Principio de Huygens.....	13
2.2.1.2 Teorema de equivalencia	15
2.2.2 Análisis de aperturas.....	16
2.2.2.1 Campos radiados por aperturas	17
2.2.2.2 Equivalente electromagnético de una apertura	18
2.3 Antenas de corneta rectangular.....	21
2.3.1 Antena de corneta sectorial en el plano H	22
2.3.2 Antena de corneta sectorial en el plano E.....	25
2.3.3 Antena de corneta sectorial piramidal	26
2.4 Propiedades y parámetros de una antena de apertura	27
Capítulo 3. Diseño y simulación de la antena	31
3.1 Introducción	31
3.2 Guía de onda rectangular	31
3.2.1 Modo de propagación en la guía de onda rectangular	32
3.2.2 Diseño de la antena.	34
3.3 Simulación de la antena de apertura	36
3.3.2 Simulación del alimentador	36
3.3.3 Simulación del conjunto guía de onda-alimentador.....	37
3.3.4 Simulación de la antena completa con las aperturas agregadas.....	38
3.3.4.1 Resultados teóricos. Pérdidas por retorno (Parámetro S_{11})	40
3.3.4.2 Resultados teóricos. Ganancia (G).....	41
3.3.4.3 Obtención del patrón de radiación teórico de la antena	42
Capítulo 4. Contrucción y caracterización de la antena	45
4.1 Introducción	45
4.2 Plano de la antena	45

4.3	Construcción de la antena	46
4.4	Caracterización eléctrica.....	46
4.4.1	Pérdidas por retorno (Parámetro S_{11})	46
4.4.2	Medición de la ganancia de la antena.....	49
4.4.3	Medición del patrón de radiación	53
Capítulo 5.	Resultados, análisis y discusión.....	60
5.1	Introducción	60
5.2	Sobre el diseño	60
5.3	Sobre la caracterización o medición	61
Capítulo 6.	Conclusiones.....	62
6.1	Conclusiones generales.....	62
6.2	Aportaciones	63
6.3	Recomendaciones	63
Lista de referencias bibliográficas	65

Lista de figuras

Figura	Página
Figura 1. Detección de cáncer de mama utilizando radiación ionizante (Mamografía)... 1	
Figura 2. Espectro electromagnético (N174 2008)..... 2	
Figura 3. Absorción atmosférica..... 4	
Figura 4. Modelo experimental para la detección de cáncer de mama (Chávez, Medina,2008). 8	
Figura 5. Estructura de apertura donde los campos eléctricos se propagan verticalmente y magnéticos horizontalmente 12	
Figura 6. Antenas de apertura..... 13	
Figura 7. Onda plana incidiendo sobre un cilindro metálico..... 14	
Figura 8. Resolución de las ecuaciones de onda para los campos para un cilindro de 3 longitudes de onda de diámetro. 14	
Figura 9. Guía de onda abierta utilizada como radiador. 17	
Figura 10. Distribuciones de fuentes y apertura en el plano $z=0$ 18	
Figura 11. Apertura equivalente en el plano $z=0$ 19	
Figura 12. Apertura equivalente de la boca de guía..... 20	
Figura 13. Antenas de corneta rectangular (a) antena de corneta sectorial plano H (b) Antena de corneta sectorial plano E (c) antena de corneta sectorial piramidal..... 21	
Figura 14. Antena sectorial en el plano H (a) geometría utilizada (b) sección transversal en el plano xz (plano H). (Stutzman 2002). 23	
Figura 15. Antena sectorial en el plano E (a) geometría elemental (b) sección transversal vista en el plano yz (plano E) (Stutzman, 2002). 26	
Figura 16 Antena de corneta piramidal (a) geometría elemental (b) sección transversal vista en el plano xz (plano H) , (c) sección transversal vista en plano yz (plano E). (Stutzman, 2012)..... 27	
Figura 17 Guía de onda rectangular (Sadiku, 1998) 31	
Figura 18. Modos de propagación en una guía de onda (Sadiku 1998) 32	
Figura 19 Vista de planta de las dimensiones de la guía de onda calculadas..... 35	

Figura 20. Dibujo del diseño del conector en el simulador CST.....	36
Figura 21. Pérdidas por retorno (parámetro S_{11}) del alimentador con $L=3\text{cm}$	37
Figura 22. Diseño del conjunto guía de onda-alimentador en el simulador CST.	37
Figura 23. Pérdidas por retorno (parámetro S_{11}) del diseño del conjunto guía de onda-alimentador, con el simulador CST.	38
Figura 24. Diseño con el simulador CST, mostrando el ángulo como parámetro de diseño.	39
Figura 25. Diseño final de la antena de apertura obtenido con el simulador CST.	40
Figura 26. Parámetro S_{11} (pérdidas por retorno) de la antena simulada.....	41
Figura 27. Ganancia de la antena de apertura simulada.	42
Figura 28. Obtención del patrón de radiación simulado del diseño final.	43
Figura 29. Patrón de radiación en 3D de la antena de apertura.	44
Figura 30. Plano de la antena.	45
Figura 31. Prototipo final de la antena de apertura.	46
Figura 32. Arreglo experimental para obtener las pérdidas por retorno de la antena....	47
Figura 33. Pérdidas por retorno (parámetros S_{11}) medidos.	48
Figura 34. Comparación de resultados, parámetros S_{11} , valores teóricos V.S. medidos.....	49
Figura 35. Arreglo experimental para la obtención de la ganancia de la antena protitipo.....	51
Figura 36. Ganancia de las antenas en azul (Vivaldi 1) en rojo (Vivaldi 2) y en verde (Antena de apertura).	52
Figura 37. Comparación de ganancia: valores teóricos v.s. medidos.	53
Figura 38. Arreglo experimental utilizado para la obtención del patrón de radiación (plano E).....	54
Figura 39. Medición del patrón de radiación (plano H).....	55
Figura 40. Patrón de radiación, plano H (izquierda), plano E (derecha).	56
Figura 41. Representación polar de la comparación de resultados valores medidos vs teóricos del patrón de radiación en plano E.	57

- Figura 42. Representación cartesiana de la comparación de resultados medidos vs teóricos del patrón de radiación en el plano E.57
- Figura 43. Representación polar de la comparación de resultados medidos vs teóricos del patrón de radiación en plano H.....58
- Figura 44. Representación cartesiana de la comparación de resultados medidos vs teóricos del patrón de radiación en plano H.....59

Lista de tablas

Tabla

Página

Tabla 1 Parámetros propuesto de diseño para la antena de apertura	9
Tabla 2. Estándares de guías de onda rectangulares en el mercado.	33
Tabla 3. Parámetros utilizados en el diseño final simulado para la antena de apertura....	40

Capítulo 1. Introducción

El cáncer de seno es la causa más común de muertes relacionadas al cáncer a nivel mundial, más de un millón de mujeres son diagnosticadas con la enfermedad cada año, según reportes de salud de (Reuter Health, 2008). En los datos proporcionados por (INEGI, 2004), la mortalidad por cáncer mamario en México mantiene una tendencia ascendente, diariamente mueren un poco más de 10 mexicanas por cáncer mamario.

Hasta ahora en nuestro país, el método de diagnóstico por excelencia es la mamografía por rayos X, como se ve en la figura 1, este método presenta varios inconvenientes; el primero de ellos es que los rayos X por tratarse de energía ionizante los convierte en un factor de riesgo para utilizarlo en forma continua, motivo por el cual muchas mujeres se muestran reticentes para practicarse este examen. Un segundo factor, es que la mamografía es un método en el cual el seno de la mujer es oprimido entre dos placas, lo que provoca dolor en pacientes que presentan mayor sensibilidad, por último, el método no es 100 % confiable (Nass, 2001), aproximadamente el 15 % de todos los cánceres de seno pasan desapercibidos cuando se practica la mamografía, mientras que el 75 % de los tumores detectados resultan ser tumores benignos. Este tipo de problemas motiva la investigación para desarrollar nuevas soluciones tecnológicas para aplicarlas entre el diagnóstico temprano de cáncer de seno.



Figura 1. Detección de cáncer de mama utilizando radiación ionizante (Mamografía).

En cambio, la energía de microondas se encuentra en el espectro de energía no ionizante, como se observa en la figura 2. En esta figura se ve, que la energía de microondas resulta más segura para usarse en el desarrollo de herramientas de diagnóstico. Otra ventaja del uso de las microondas, es que de acuerdo a las propiedades electromagnéticas de los tejidos biológicos (Chávez, Medina, Velázquez, & Olvera, 2008), es posible diferenciar entre un tumor benigno y un tumor maligno sin necesidad de utilizar métodos invasivos (biopsia), esta característica es lo que hace atractivo emplear energía de microondas como herramienta adicional a otras como la mamografía por rayos X, y la resonancia magnética nuclear, entre otras (Chávez, Medina, 2008).

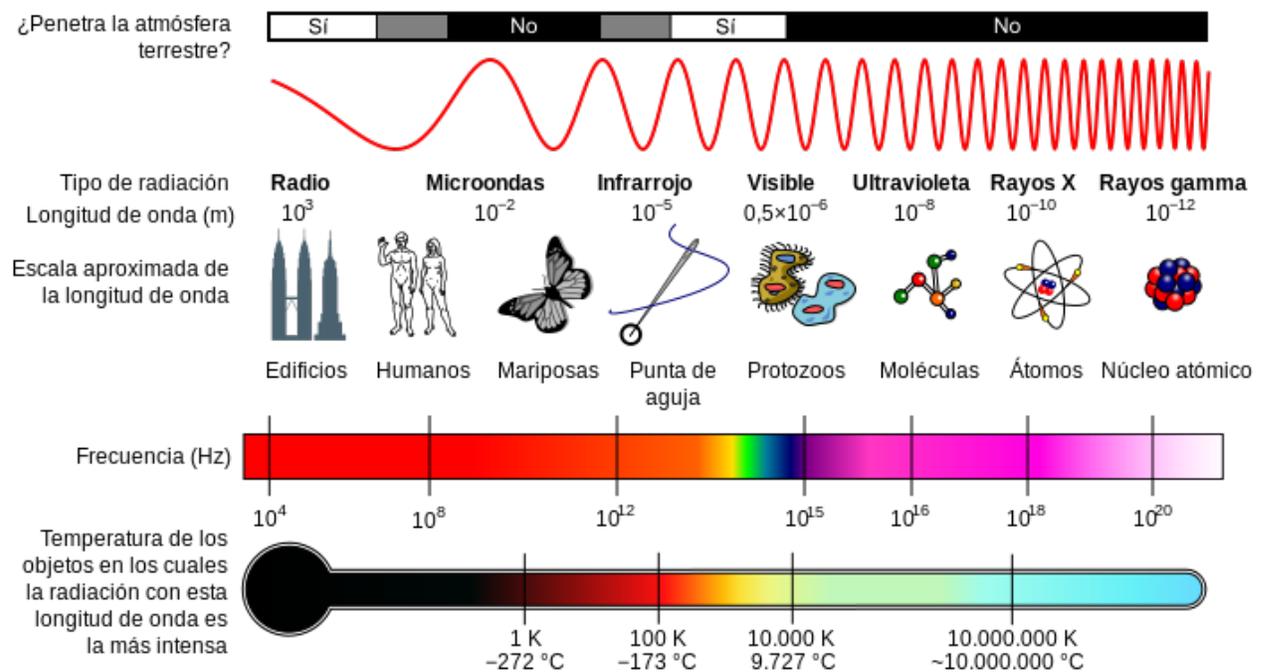


Figura 2. Espectro electromagnético (N174 2008)

Como se sabe, el uso del espectro electromagnético está regulado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, sección de radio comunicaciones (UIT-R) y no cualquier banda de frecuencias puede ser utilizada. Existe la banda llamada ISM por sus siglas en inglés (Industrial, Scientific and Medical), éstas son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en las áreas industrial, científica y médica. Actualmente, estas bandas se utilizan en

comunicaciones de redes de área local inalámbrica, conocidas como WLAN (del inglés wireless local area network, por ejemplo Wi-Fi) o en las redes inalámbricas personales también llamadas WPAN (del inglés wireless personal area network, por ejemplo Bluetooth).

Las bandas ISM fueron definidas por la UIT. El uso de estas bandas de frecuencia está abierto a todo el mundo sin necesidad de licencia, respetando las regulaciones que limitan los niveles de potencia transmitida (Úcar, 2012). En resumen, las bandas de frecuencias ISM incluyen las siguientes: (902 a 928 MHz), (2.4-2.4835 GHz) y (5.725-5.85 GHz). Por lo que, para este proyecto de tesis se escogió la frecuencia de 2.4 GHz. Se tiene el concepto erróneo de que debido a que el cuerpo humano contiene una cantidad considerable de agua (75 % de agua al nacer y cerca del 65 % en la edad adulta), la máxima absorción de energía electromagnética caería en el rango de 2.4 GHz, esto no es del todo cierto como se explica en el siguiente párrafo.

Cualquier onda electromagnética aporta energía al medio por el que se propaga, pero, en el caso del agua es mayor. No obstante, hay frecuencias mucho más adecuadas para conseguir este propósito. Lo anterior se aprecia en los diagramas de absorción en función de la frecuencia y el medio de propagación. La energía que se pierde por efecto de la radiación al propagarse, provoca que el medio de propagación se caliente, lo anterior ocurre a diferentes frecuencias (Úcar, 2012).

En la figura 3, se presenta la gráfica de atenuación de la energía electromagnética (EM) en función de la frecuencia. Esta atenuación se debe a la absorción de la energía por parte de los gases componentes de la atmósfera, en la figura 3 se muestran las curvas para el oxígeno (línea continua) y para el agua (línea discontinua). En la gráfica se observa claramente que a la frecuencia de 2.4 GHz, la atenuación es despreciable, la EM no es absorbida por el agua y por tanto no hay calentamiento (hay que tener en cuenta que esta curva corresponde con el vapor de agua, para agua líquida los valores de absorción son menores). El primer pico de absorción para el agua, se localiza a los 22 GHz, en cambio para el oxígeno ocurre a los 63 GHz, los picos de absorción más significativos para el agua se localizan arriba de los 100 GHz (ondas milimétricas) (Úcar, 2012).

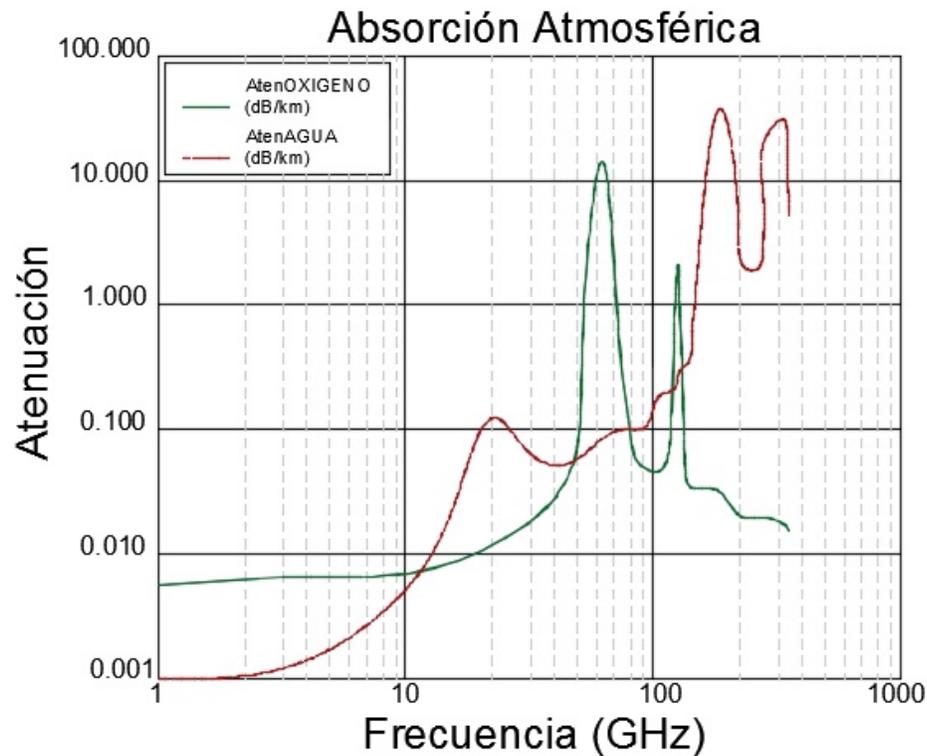


Figura 3. Absorción atmosférica

1.1 Justificación

La tecnología de microondas está avanzado a tal grado, que ahora existe la posibilidad de desarrollar herramientas para diagnóstico así como también herramientas para tratamiento de tumores malignos (técnica conocida como diatermia). Con esto, el campo de la medicina se verá enriquecido, debido a que los pacientes serán tratados y diagnosticados con mayor certidumbre.

En este trabajo se investigó el comportamiento eléctrico de varias estructuras de antenas de apertura de tipo piramidal truncada. La razón de utilizar las antenas de apertura es debido a sus características eléctricas: (patrón de radiación, ganancia, directividad, etc. (Cardama,1998). Durante el desarrollo del trabajo se estudió diferentes estructuras y se escogieron las antenas que presentaron las mejores características eléctricas. Para lograr lo anterior, se simularon varios diseños, se construyeron un número importante de prototipos los cuales se caracterizaron eléctricamente en el laboratorio de microondas con el equipo de medición adecuado.

1.2 Antecedentes

En la literatura especializada se han reportado los siguientes trabajos encaminados a la detección de cáncer de mama:

En el artículo de (Sugitani; et al, 2012) se reporta un arreglo de antenas planares de ultra ancho de banda (UWB) para un sistema de detección de cáncer de mama basado en el principio del radar. El tamaño del elemento de antena es de 44 mm x 52.4 mm. El ancho de banda y la frecuencia central de la antena son 12.5 GHz y 6 GHz respectivamente. En este artículo, se reportan los resultados de las mediciones de la permitividad y la conductividad de un tumor de mama humano para poder seleccionar algunos materiales para poder realizar un modelo que pueda emular las características del tejido biológicos de la mama. En este estudio, se utilizó un arreglo planar compacto de antenas (UWB) para la detección de cáncer y fue desarrollado para reducir el tamaño del arreglo de antenas a un tamaño parecido al de la palma de la mano. El conjunto de antenas se colocó formando una pila de capas dieléctricas que emulan la piel y al tejido adiposo de la mama, cuyos valores de espesor son: capa 1 (35.2 mm) y capa 2 (7.40 mm). El ancho de banda medido a un valor de $S_{11} = -10\text{dB}$ fue de 12.5 GHz (3.5-15 GHz), que cubre el espectro de la frecuencia central de 6 GHz.

En el artículo de (Yin, Li, 2012) se propone una antena de microcinta circular para el diagnóstico no invasivo para detección de cáncer de mama. Se consideraron diferentes planos de tierra en la simulación para obtener mejores resultados. En los resultados de dicha simulación se concluye, que el efecto de enfoque de la energía en la región del tumor es mejor cuando el tamaño del plano de tierra de la antena disminuye. En el caso de hipertermia se utilizó un diseño especial de antenas que es la parte fundamental para el sistema de tratamiento, se prefiere una antena lo menos invasiva posible externa por factores de comodidad de los pacientes y reducir de igual manera el riesgo de infecciones.

En el trabajo de (Ruvio; et al, 2010) se reporta el rendimiento de tres diferentes topologías de antena, se analizan en términos de los parámetros más importantes para

aplicaciones de formación de imágenes de cáncer de mama en microondas. Dos monopolos y una antena Vivaldi son investigadas en presencia de la piel y el tejido mamario en el rango de frecuencia de 0.75 a 2.25 GHz (ancho de banda de funcionamiento 100%). Los resultados de tres antenas fueron analizadas cuando se colocan a una distancia de 5 mm de un modelo de dos capas que simula los tejidos de (piel + mama). Este artículo discute los mecanismos de radiación para diferentes casos tratados y sus efectos sobre los parámetros fundamentales en aplicaciones de imágenes de cáncer de mama, tales como la adaptación de impedancia, la penetración de campo, la polarización y el factor de fidelidad.

En el artículo de (Erwin T. Rosenbury, 2002) se presenta una antena de banda ancha compatible con tecnología de impulso y de bajo costo. La antena puede utilizarse para transmisión o recepción. Dentro del sistema, los impulsos en las señales viajan a través de un punto de avance con respecto a un plano de tierra. Una estructura geométrica en forma de aleta y conocida en inglés como "ridge" está conectada al punto de alimentación y a través de una resistencia de terminación al plano de tierra. La aleta conectada a la tierra sirve para recibir o radiar energía electromagnética. La aleta puede ser un alambre o una superficie plana. Por otra parte, la aleta se aloja dentro de una cavidad resonante. Las paredes laterales de la cavidad pueden tener varias formas longitudes formando un ángulo con respecto a la aleta.

En el trabajo de (Sil, Fear, 2005) se utilizó una antena la cual fue probada y caracterizada eléctricamente, las reflexiones fueron grabadas y los algoritmos de formación de imagen fueron probados, se menciona en el artículo, uno de los métodos comúnmente usados en la detección del cáncer, que es; la resonancia magnética, habla de las características eléctricas propias de cada tejido, tanto de tumores como de otros tejidos. Se reporta que la mama y la antena tienen que estar sumergidos en un líquido para reducir el desacoplamiento que ocurre entre el interior y exterior de la mama. Adicionalmente se requiere de unas antenas cercanas para explorar un determinado volumen de líquido con permitividad mayor. La antena utilizada para iluminar el modelo de la mama es un monopolo tipo Wu-King resistivamente cargado, esta es utilizada por tener gran eficiencia en UWB, el monopolo tiene una longitud de 10.8 mm, fue fabricada utilizando resistencias en chip de alta frecuencia. El sustrato

utilizado tiene una permitividad relativa $\epsilon_r=3.02$ F/m y una conductividad eléctrica $\sigma=0.001$ S/m y tiene características eléctricas parecidas al aceite de canola. Las antenas se fabricaron con el mismo perfil y al comparar con la simulación se observó un buen comportamiento, la impedancia de la antena simulada se convierte de un dipolo a un monopolo, los resultados presentan un buen acoplamiento entre los prototipos fabricados y los simulados.

En el artículo de (Klemm, et al, 2007) El rendimiento del sistema se verifica experimentalmente y los resultados de la detección de tumores pequeños esféricos se presentan. El sistema de radar utilizado contiene una antena de apertura. En este mismo artículo los autores reportan un modelo de pecho curvo 3D con propiedades eléctricas adecuadas. Se presentan los resultados, utilizando la red de antenas simétricas de segunda generación y se citan sus diseños y parámetros. El arreglo se forma alrededor de la parte inferior de una esfera de 78 mm de radio, con cuatro filas de cuatro antenas. Las antenas están alineados en filas y columnas, y el arreglo tiene dos ejes de simetría. Debido al diseño de la antena más pequeña (reducción de tamaño de 50%), no hay suficiente espacio libre para los cables y conectores de alimentación que permiten una geometría simétrica. A la frecuencia de 6 GHz, los materiales tienen los siguientes valores: a) grasa de mama/permitividad del medio 10 F/m, atenuación en la grasa=0.8 dB/cm; b) permitividad de la piel=30 F/m, atenuación en la piel=16 dB/cm; c) permitividad del tumor 50 F/m.

En el artículo de (Q. H. Liu, et al, 2005), hacen un barrido a la glándula mamaria enviando un pulso de energía de microondas de ultra ancho de banda (UWB) por medio de una antena o un arreglo de antenas.

Para dar una idea de como sería un sistema de detección se puede utilizar el modelo teórico propuesto por (Chávez, Medina, 2008), el cual se ilustra en la figura 4. En este modelo, parte de la energía de microondas incidente es reflejada por la piel, la energía remanente será absorbida por el tejido biológico compuesto por grasa y tejido normal, cuando la energía de microondas alcance un tumor maligno, la energía de microondas sufrirá un efecto de dispersión, fenómeno que será más acentuado a medida que el tejido maligno sea mayor (A.P O'Rourke-2007, M. Lazebnik-2007). Para obtener la

imagen del tumor detectado será necesario diseñar un algoritmo de procesamiento de imagen (no contemplado dentro de este proyecto de tesis) para eliminar la energía de microondas reflejada por la piel y el tejido normal (E. J. Bond,2003), (D. W. Winters, 2006) quedando sólo la energía de microondas reflejada por el tejido maligno.

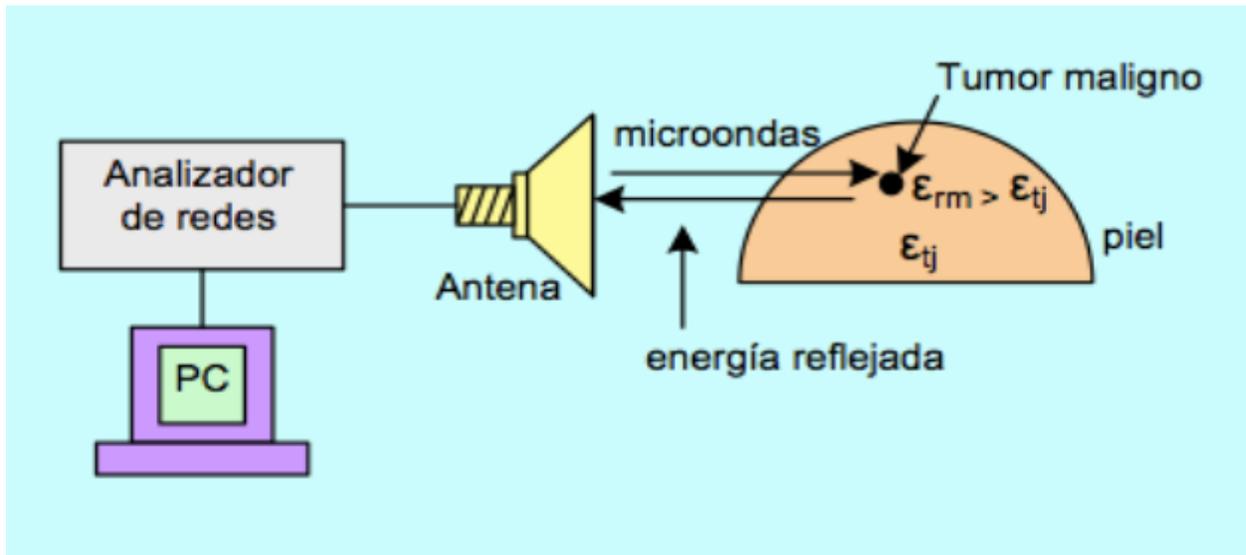


Figura 4. Modelo experimental para la detección de cáncer de mama (Chávez, Medina,2008).

1.3 Objetivos

Desarrollar una antena de apertura tipo piramidal truncada con las siguientes especificaciones técnicas.

Tabla 1 Parámetros propuesto de diseño para la antena de apertura

Parámetro	Valor
Descripción	Antena de apertura tipo piramidal truncada
Ganancia	10 dBi
Pérdidas por retorno	Menor a -10 dB
Ancho de banda	500 MHz
Directividad	30 grados
Impedancia	50 ohms
Polarización	Lineal
Dimensiones	Ver figura
Peso	Menor a 500 gramos
Conector	Tipo SMA

1.4 Organización de la tesis

Esta tesis está organizada en 6 capítulos, en el capítulo 2 se describe la teoría fundamental de antenas de apertura, sus tipos y variantes, así como sus principios fundamentales de análisis. Se describen los parámetros más importantes que son de mayor importancia.

En el capítulo 3 se describe el diseño y simulación de la antena, se muestran los parámetros que se toman en cuenta, se presentan los cálculos necesarios de diseño, se describe cómo se inicia el diseño partiendo de una guía de onda rectangular como parte fundamental, además, en éste capítulo se describe paso a paso la simulación mediante el paquete informático comercial Computer Simulation Technology (CST, por sus siglas en inglés).

En el capítulo 4 se describe el proceso de construcción del prototipo final, se menciona el equipo utilizado así como los cuidados que deben tenerse al construir antenas con estas herramientas industriales, también en este capítulo se describe el proceso de caracterización eléctrica, se muestran los resultados obtenidos de las pérdidas por retorno (parámetro S_{11}), ganancia y por último el patrón de radiación. Se comparan los resultados obtenidos de la medición con los obtenidos mediante simulación electromagnética.

En el capítulo 5 se hace el análisis y se discuten los resultados obtenidos, al final se hace un resumen.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones de este trabajo, se mencionan las aportaciones y finalmente se dan las recomendaciones enfatizando que trabajo futuro se debe realizar para continuar con esta importante línea de investigación.

Capítulo 2. Teoría de antenas de apertura

2.1 Introducción

En este capítulo se presenta la teoría de antenas de apertura, poniendo especial atención a los parámetros de diseño, se mencionan las características más importantes de este tipo de estructuras, y sus aplicaciones.

2.2 Antenas de apertura

En las antenas que se transmite energía al espacio libre, se generan ciertas formas de onda que están ligadas a su estructura, las ondas así generadas se encuentran asociadas a sus corrientes, campos magnéticos y campos eléctricos. Para explicar este fenómeno físico, se utilizan las ecuaciones de Maxwell (Kraus, 1988).

Todas las antenas tienen en común una región de transición que se encuentra entre una zona donde existe una onda electromagnética guiada y una onda en el espacio libre, la que puede además tener un comportamiento direccional en su radiación como sucede con las antenas de apertura.

Dos misiones básicas debe cumplir una antena: transmitir y recibir; en cada aplicación existen condiciones particulares, sobre la direccionalidad del patrón de radiación de la antena, niveles de potencia que debe soportar, frecuencia de trabajo, ancho de banda y otros parámetros como: ganancia, ancho del haz y relación de onda estacionaria de voltaje (ROEV).

Cuando una antena se utiliza para transmitir energía, es necesario que el diseñador tenga en cuenta en que tipo de aplicación será utilizada, por ejemplo, si se requiere una antena para transmitir alguna estación de radio, se necesitará que ésta sea omnidireccional, pero en este proyecto de tesis, se necesita una antena que pueda radiar la energía EM en una dirección específica, es decir, se desea que la antena sea directiva. Por tanto, el diseño estará en función de la aplicación.

Las antenas con dimensiones pequeñas comparadas con la longitud de onda, como lo dipolos, espiras, monopolos, yagis, etc se analizan a partir de la distribución de corrientes (Fernandez, 2012).

Cuando las antenas son de varias longitudes de onda, y especialmente si existen superficies metálicas de formas curvadas, es complicado calcular el vector de radiación de las corrientes. Esto sucede a frecuencias de microondas, cuando la longitud de onda es del orden de los centímetros(Fernandez, 2012).

En las antenas de apertura se conocen con un cierto grado de aproximación los campos (electromagnéticos). El caso más simple es la guía de onda rectangular como la mostrada en la figura 5. En la guía de onda se propaga en modo fundamental (TE_{10}) y se deja en circuito abierto la guía de onda (corte transversal). Se puede suponer que los campos en la boca de la guía son los mismos que en el interior.

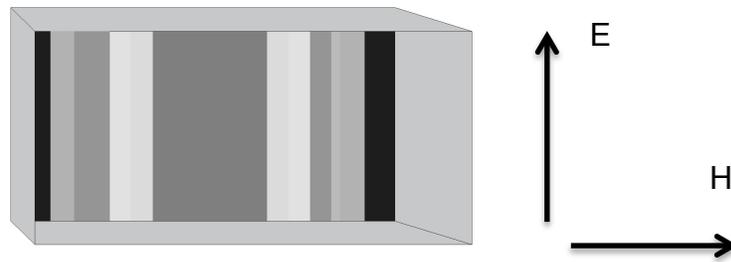


Figura 5. Estructura de apertura donde los campos eléctricos se propagan verticalmente y magnéticos horizontalmente

Otros ejemplos de antenas de apertura son las bocinas como las mostradas en la figura 6, estas permiten aumentar la directividad del patrón de radiación. Los campos electromagnéticos (EM) en la apertura se pueden calcular a partir de los modos de propagación de las guías, junto con los términos de fase que toman en cuenta la propagación. Se hablará mas a fondo de estas antenas en las siguientes secciones.

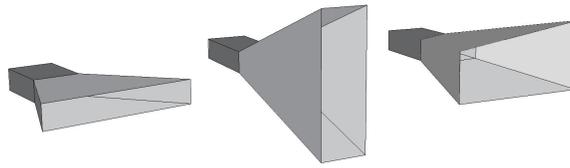


Figura 6. Antenas de apertura

Las antenas de apertura se empezaron a utilizar de manera masiva durante la segunda guerra mundial, mediante el desarrollo de los sistemas de radar y los sistemas de comunicaciones de microondas(Fernandez, 2012).

2.2.1 Principios fundamentales de antenas de apertura

Para dar inicio a la teoría de antenas de apertura conviene mencionar algunos conceptos teóricos que gobiernan el comportamiento de dichas estructuras, estos conceptos son el principio de Huygens, los teoremas de equivalencia y de unicidad.

2.2.1.1 Principio de Huygens

El comportamiento de las antenas de microondas se puede explicar a partir de conceptos generales de óptica geométrica (trazado de rayos). Aunque dicha teoría tiene limitaciones importantes (Fernandez, 2012).

Por ejemplo se podría analizar la incidencia de una onda plana sobre un cilindro metálico mediante el trazado de rayos. Las reflexiones en la superficie producen una dispersión de las ondas incidentes, y un efecto de sombra como el indicado en la figura 7.

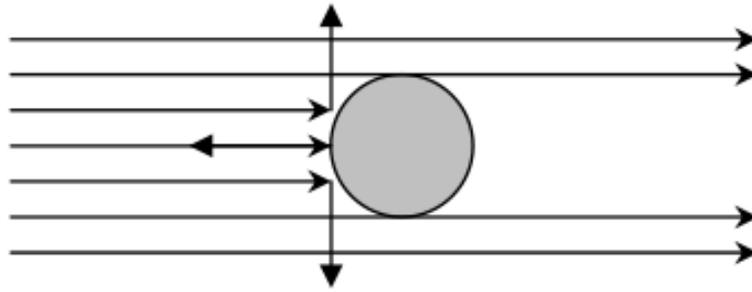


Figura 7. Onda plana incidiendo sobre un cilindro metálico.

Dicho análisis lleva a conclusiones incorrectas. Un análisis electromagnético basado en la resolución de las ecuaciones de onda para los campos lleva a una solución más correcta (Fernandez, 2012).

Haciendo uso de un modelo ondulatorio se puede observar en la figura 8 la interferencia entre la onda incidente y las reflejadas y el efecto de sombra.

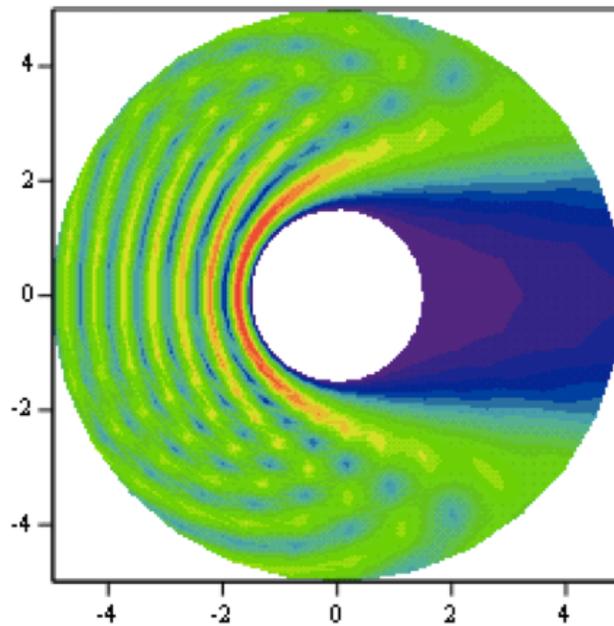


Figura 8. Resolución de las ecuaciones de onda para los campos para un cilindro de 3 longitudes de onda de diámetro.

Los fenómenos básicos de difracción de la luz fueron explicados por Huygens en el año 1690. En el principio de Huygens se plantea que cada punto de un frente de onda se comporta como un radiador secundario de ondas esféricas, de forma que la envolvente de estas ondas forman a su vez un nuevo frente de onda.

2.2.1.2 Teorema de equivalencia

Si V es una región libre de fuentes, exterior a la superficie cerrada S formada por las paredes de la antena y la apertura. Se supondrá que los campos en la superficie S son cero excepto en la apertura S_0 , donde son conocidos como se ve en la figura 10.

Por el teorema de unicidad, si se conoce el valor de las componentes tangenciales de \vec{E} y \vec{H} sobre S , la solución para cualquier punto de V es única y se puede sustituir el conocimiento de las fuentes exteriores a V (fuentes en el interior de la antena) por el conocimiento de los campos tangenciales eléctrico y magnético sobre la superficie S .

El teorema de equivalencia permite entonces sustituir el problema por otro en el que, dentro del volumen que ocupan las fuentes (interior de la antena), se reitera éstas y se impone campos cero, pero sobre S se mantiene los valores tangenciales. Esto implica la existencia de densidades lineales de corrientes eléctrica y magnética.(Cardama, 1998)

$$\vec{J}_s = \hat{n} \times \hat{H}_t \quad (1)$$

$$\vec{M}_s = -\hat{n} \times \hat{E}_t \quad (2)$$

Donde \vec{J}_s y \vec{M}_s son las nuevas fuentes equivalentes, para el campo eléctrico y magnético respectivamente. De esta manera se ha sustituido el problema original por otro equivalente, y en lugar de considerar fuentes reales o primarias, se considera otras equivalentes sobre S . Estas corrientes equivalentes sólo son significativas en la apertura S_0 , El resto de corrientes equivalentes de las paredes exteriores se desprecian en su contribución al campo radiado.

Por ello, para calcular el campo radiado se integran las corrientes equivalentes únicamente sobre la apertura S_o , lo que equivale a considerar solamente la radiación de las corrientes que circulan por el interior de la antena, despreciando las del exterior.

2.2.2 Análisis de aperturas

Cuando se aumenta la frecuencia, las dimensiones eléctricas de las antenas disminuyen y sus formas empiezan a cambiar de las geometrías lineales (Cardama, 1998). Se encuentran estructuras cuya misión es el confinamiento y la conformación de la radiación de una fuente primaria hasta conseguir frentes de onda capaces de generar diagramas secundarios de directividades elevadas y formas de diagrama específicas. En ellas, el responsable de la formación del diagrama de la antena no es ya la fuente primaria, si no la distribución de campos eléctricos y magnéticos en el frente de onda presente en la apertura de salida de la antena al espacio libre, conformados por el conjunto de toda la estructura.

Como ejemplo se estudia la antena de la figura 9, la cual consiste en una guía de onda rectangular alimentada por un conector coaxial. En ella, la radiación de la fuente primaria (conector coaxial) es transformada por la guía rectangular (confinamiento y conformación) en una distribución de campos en la boca de la guía (apertura), que al ser radiados al espacio libre producen el diagrama de radiación de la antena. El análisis de los campos producidos por esta estructura, en apariencia sencilla, mediante las herramientas utilizadas para las antenas lineales, obligaría primero al cálculo de las corrientes existentes sobre los conductores (conector coaxial, paredes interiores y exteriores de la guía) y después al cálculo del vector de radiación por integración de todas estas corrientes sobre una superficie extensa y compleja.(Cardama 1998)

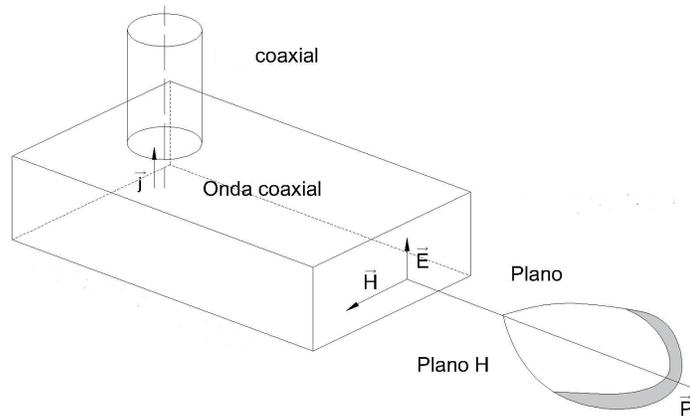


Figura 9. Guía de onda abierta utilizada como radiador.

Dado que la radiación se realiza a través de la boca de la guía (apertura), un planteamiento alternativo sería suponer que los campos radiados al espacio libre por las corrientes en el interior de la guía pueden obtenerse únicamente a partir del conocimiento de la distribución de campos en la apertura. Esto, por una parte, evitaría el cálculo de la distribución de corrientes sobre toda la estructura y, por otra, permitiría realizar la integración sobre una superficie, en general, más simple (Cardama 1998).

Para que este procedimiento sea aplicable, en primer lugar es necesario ver que ambos planteamientos son equivalentes, y en segundo lugar establecer las herramientas que nos permitan calcular la radiación producida por una distribución de campos en lugar de una distribución de corrientes. Mediante el uso del teorema de unicidad y de equivalencia se puede deducir la metodología de análisis de este tipo de antenas.

2.2.2.1 Campos radiados por aperturas

Se entiende por apertura la región plana de superficie S_0 sobre la que existen unos campos iluminantes conocidos, \vec{E} y \vec{H} . Es una situación general y puede referirse por ejemplo a una porción de un frente de onda, a una boca de guía o un conector coaxial. Aunque el término apertura puede generalizarse a cualquier superficie curva, en el análisis que sigue se refiere al caso plano, puesto que es el que mas interés tiene y el que permite además una resolución analítica más simple (Cardama 1998).

Se deducirá en primer lugar el equivalente electromagnético de una apertura y las expresiones necesarias para el cálculo de los campos radiados. A continuación se particularizará las expresiones para aperturas rectangulares.

2.2.2.2 Equivalente electromagnético de una apertura

Sea la apertura plana de superficie S_0 representada en la figura 10, que puede modelar por ejemplo, la boca de guía descrita anteriormente. Los teoremas de unicidad y equivalencia introducidos anteriormente, permitirán sustituir los campos existentes sobre esta superficie por una distribución de corrientes equivalentes.

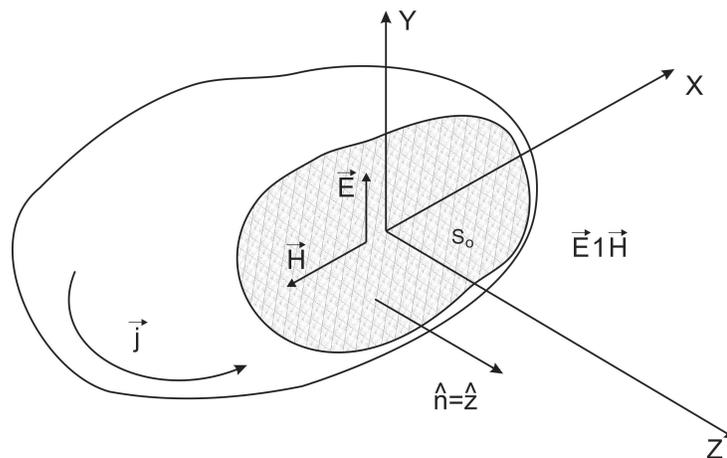


Figura 10. Distribuciones de fuentes y apertura en el plano $z=0$

Sea V la región libre de fuentes exteriores a la superficie cerrada S formada por las paredes de la antena y la apertura. Suponiendo que los campos en la superficie S son nulos excepto en la apertura S_0 , donde son conocidos. Por el teorema de unicidad visto en el apartado anterior, si se conoce el valor de las componentes tangenciales de \vec{E} y de \vec{H} sobre S , la solución para cualquier punto de V es única. A efectos del interior del volumen V se puede sustituir el conocimiento de las fuentes exteriores a V (fuentes en el interior de la antena) por el conocimiento de los campos tangenciales eléctrico y magnético sobre la superficie S . El teorema de equivalencia permite entonces sustituir el problema de la figura 10 por uno equivalente en el que, dentro del volumen que ocupan las fuentes (interior de la antena) se repiten éstas y se imponen campos nulos,

pero sobre S se mantienen los valores tangenciales; $\hat{n} \times \vec{E}$ y $\hat{n} \times \vec{H}$ (ambos problemas son equivalentes). Al hacer esta sustitución los campos no pueden tener una discontinuidad si no existen unas fuentes equivalentes sobre S, dadas por las condiciones de frontera, que implican la existencia de densidades lineales de corrientes eléctricas \vec{J}_s y magnética \vec{M}_s de valor.

Como se indica en las ecuaciones (1) y (2) se ha sustituido el problema original por otro equivalente y se ha pasado de las fuentes reales o primarias a otras equivalentes sobre S. Estas corrientes equivalentes sólo son significativas en la apertura S_0 . Sobre las paredes exteriores de la antena las corrientes equivalentes coinciden con las corrientes inducidas sobre el conductor y, al ser mucho menores que las corrientes equivalentes únicamente sobre la apertura, su contribución al campo radiado puede despreciarse. Por ello, para calcular el campo radiado se integran las corrientes equivalentes únicamente sobre la apertura S_0 y no sobre el resto de la superficie S, lo cual equivale a considerar solamente la radiación de las corrientes que circulan por el interior de la antena y se desprecian las corrientes del exterior (Cardama 1998).

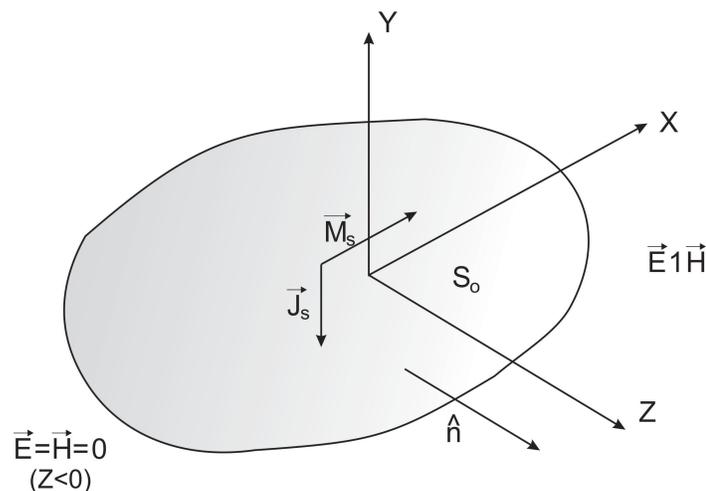


Figura 11. Apertura equivalente en el plano $z=0$.

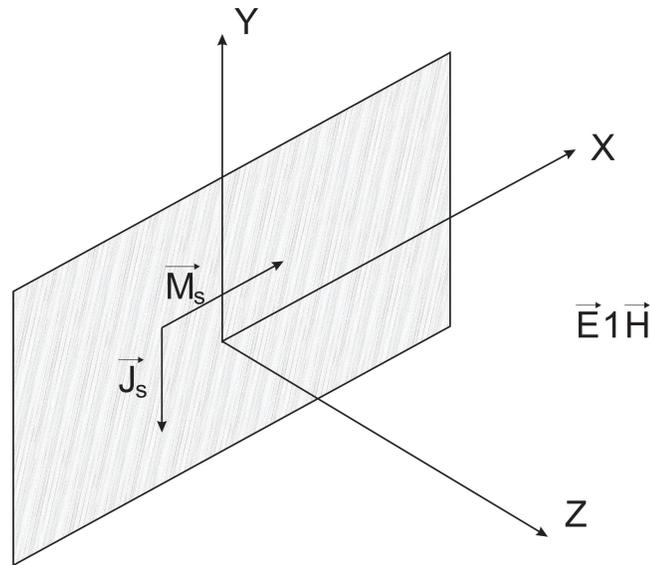


Figura 12. Apertura equivalente de la boca de guía.

A los campos \vec{E} y \vec{H} sobre S_0 se les da el nombre de campos primarios o iluminantes, a las corrientes \vec{J}_s y \vec{M}_s el de corrientes equivalentes o fuentes de Huygens, y a la superficie S_0 el de superficie de Huygens. En la figura 12 se representa la apertura equivalente al problema original de la boca de guía de la figura 9. El teorema de equivalencia nos garantiza la validez de los resultados en el exterior de la antena.

Hay situaciones en las que es difícil conocer con exactitud los campos que realmente existen en la apertura. Este puede ser el caso de la boca de guía abierta en el plano $z=0$.

En efecto, los campos en el interior de una guía rectangular infinita son perfectamente conocidos, pero cuando la guía se interrumpe bruscamente, en la sección del corte aparece una distribución residual de campos eléctricos y magnéticos que se superpone a la distribución original para cumplir las condiciones de frontera en la zona de la discontinuidad. En estos casos es habitual aproximar la distribución real de campos por los de la guía infinita. En la mayoría de las situaciones esta aproximación permite obtener resultados precisos. Con todo hay que tener en cuenta que, dado el teorema de equivalencia esta siendo aplicado a unos campos aproximados, el resultado también lo será y, por lo tanto, las tres formulaciones del teorema de equivalencia pueden proporcionar resultados ligeramente distintos, de los cuales, en principio, ninguno es exacto.

2.3 Antenas de corneta rectangular

La utilización de antenas de corneta, como radiadores de las bocas de guía monomodo, rectangulares y circulares, permite alcanzar directividades moderadas, pero presentan una desadaptación en la boca de la guía. Para mejorar su directividad y adaptación se tiene que aumentar las dimensiones eléctricas, asegurando que la estructura siga siendo monomodo; para ello el agrandamiento tiene que hacerse gradualmente en forma de “bocina” o “corneta”(Stutzman, 2002).

Las antenas de corneta son muy populares en la región de microondas alrededor de 1 GHz. La corneta provee alta ganancia, bajo ROEV, ancho de banda relativamente grande.

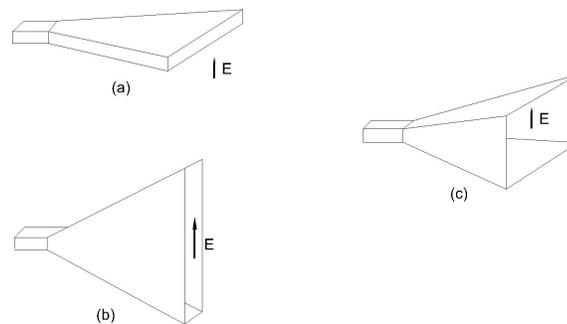


Figura 13. Antenas de corneta rectangular (a) antena de corneta sectorial plano H (b) Antena de corneta sectorial plano E (c) antena de corneta sectorial piramidal.

Las tres estructuras básicas de las antenas de corneta que utilizan la geometría rectangular se muestran en la figura 13. Estas estructuras son alimentadas por una guía de onda rectangular que esta orientada con su pared horizontal. Para el modo dominante de una guía de onda rectangular (TE_{10}) la excitación en el plano E es vertical y en el plano H es horizontal.

Si la corneta se abre en las paredes verticales de la guía y se mantiene en las paredes horizontales se le llama antena de corneta sectorial en el plano \vec{E} , que se muestra en la figura 13 (a). Por otro lado si la corneta se abre sólo en sus paredes horizontales y se

mantiene en las verticales se le conoce como antena de corneta sectorial en el plano \vec{H} , la cual se muestra en la figura 13 (b). Cuando las dos paredes tanto vertical como horizontal se extienden (tanto en el plano \vec{H} como en el plano \vec{E}) se le conoce como antena de corneta piramidal como se muestra en la figura 13 (c) (Stutzman, 2002).

La operación de una antena de corneta puede ser vista análogamente a la operación de un megáfono el cual tiene un radiador acústico en forma de corneta que le provee directividad a las ondas de sonido (Stutzman 2002). La corneta electromagnética actúa como un modo de transición del modo guiado al modo no guiado del espacio libre. Esta transición reduce las ondas reflejadas y enfatiza a las ondas viajeras de interés. Este comportamiento de ondas viajeras, como se ha señalado en otras antenas, producen un bajo ROEV y se obtiene buen ancho de banda.

2.3.1 Antena de corneta sectorial en el plano H

La corneta sectorial en el plano \vec{H} se muestra en la figura 14, esta alimentada por una guía de onda rectangular con dimensiones interiores de a y b , siendo a , la medida de las paredes horizontales y b las medidas de la paredes verticales, la apertura se abre en “ A ” el plano \vec{H} y se mantiene su altura “ b ” en el plano \vec{H} . La sección transversal del plano \vec{H} se muestra en la figura 14 en la cual se indican los parámetros geométricos que son utilizados en el análisis (Stutzman, 2002).

$$l_H^2 = R_1^2 + \left(\frac{A}{2}\right)^2 \quad (3)$$

$$\alpha_H = \tan^{-1} \left(\frac{A}{2R_1}\right) \quad (4)$$

$$R_H = (A - a) \sqrt{\left(\frac{l_H}{A}\right)^2 - \frac{1}{4}} \quad (5)$$

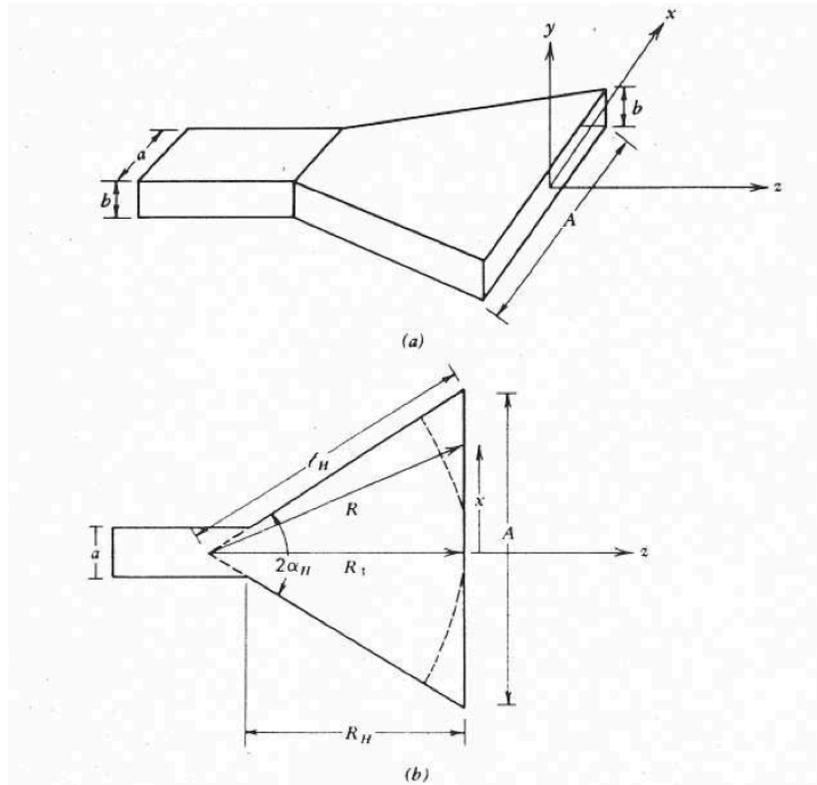


Figura 14. Antena sectorial en el plano H (a) geometría utilizada (b) sección transversal en el plano xz (plano H). (Stutzman 2002).

Las dimensiones de A y R_H (o l_H y R_1) deben ser determinadas para permitir la correcta construcción de la corneta. Es importante investigar los principios de operación y con esto se puede presentar procedimientos de diseño para las dimensiones de la corneta. La clave de todos los problemas de las antenas de apertura es encontrar los campos tangenciales sobre la apertura. El plano de la apertura de una antena sectorial de plano H se muestra en la figura 14, en la cual se muestra desde el plano x-y. Los campos de la apertura como se muestra dan inicio en la guía de onda, y como se sabe esta guía de onda opera en el modo dominante TE_{10} , los campos transversales en la guía de onda están dados por:

$$E_y = E_0 \cos \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta_g z} \quad (6)$$

$$H_x = -\frac{E_y}{Z_g} \quad (7)$$

Donde $Z_g = \eta \left[1 - \left(\lambda/2a \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$ es la impedancia característica de la guía de onda. Los campos que llegan a la apertura son básicamente una versión expandida de los campos de guía de onda. También las ondas que llegan en los diferentes puntos de la apertura no están en fase debido a la diferente longitud de la trayectoria. Es importante conocer estas distribuciones de fase (Stutzman, 2002).

La longitud de trayectoria "R" de la corneta (virtual) que va desde la guía de onda hasta donde termina la apertura, hace que crezcan las dimensiones hacia los bordes de la apertura. Por lo tanto, las ondas llegan a la posición de la apertura, desplazadas del centro de la apertura en fase con ellas (las del centro). La constante de fase (β) cambia en la guía de onda, , hacia la constante de fase en el espacio libre, (β), mientras las ondas avanzan hacia la corneta. Pero para antenas de corneta grandes la constante de fase de las ondas en los alrededores de la apertura son aproximadamente iguales a las del espacio libre. La variación de la fase en la apertura en la dirección X esta dada por:

$$e^{-j\beta(R-R_1)} \quad (8)$$

La fase de apertura es uniforme en la dirección Y. Determinando R usando la figura 14 (b), se obtiene:

$$R = \sqrt{R_1^2 + x^2} = R_1 \left| 1 + \left(x/R_1 \right)^2 \right|^{1/2} \quad (9)$$

$$\approx R_1 \left| 1 + \frac{1}{2} \left(x/R_1 \right)^2 \right| \quad (10)$$

Para $x \ll R_1$ y si se mantiene $\frac{A}{2} \ll R_1$, entonces.

$$R - R_1 \approx \frac{1}{2} \frac{x^2}{R_1} \quad (11)$$

La distribución de amplitud es una versión expandida de ella misma en la guía de onda, el cual es un tipo coseno en la dirección x . Usando este factor y sustituyendo (8) en (10) nos lleva a la distribución de campo eléctrico de la apertura:

$$E_{ay} = E_0 \cos \frac{\pi x}{A} e^{-j \left(\frac{B}{2R_1} \right) x^2} \quad (12)$$

Dentro de la apertura y cero en cualquier otro lugar. La distribución de fase anterior se refiere a menudo un error cuadrático de fase, ya que la desviación de una condición de fase uniforme varía con el cuadrado de la distancia desde el centro de la apertura. Este resultado se puede derivar más rigurosamente mediante la representación de la corneta como una guía de onda radial (Stutzman, 2002).

2.3.2 Antena de corneta sectorial en el plano E

Una antena de corneta rectangular puede estar formada también al crecer la guía de onda en el plano E. El resultado es una antena de corneta sectorial en el plano E, la cual se muestra en la figura 15. Las relaciones geométricas para esta corneta están dadas por: (Stutzman, 2002)

$$l_H^2 = R_2^2 \left(\frac{B}{2} \right)^2 \quad (13)$$

$$\alpha_E = \tan^{-1} \left(\frac{B}{2R_2} \right) \quad (14)$$

$$R_E = (B - b) \sqrt{\left(\frac{l_E}{B} \right)^2 - \frac{1}{4}} \quad (15)$$

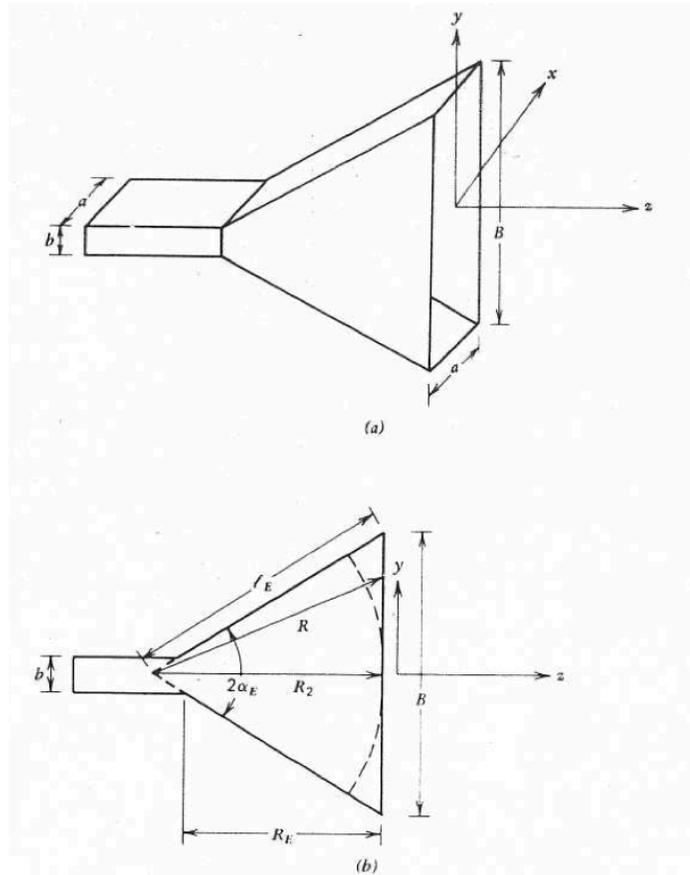


Figura 15. Antena sectorial en el plano E (a) geometría elemental (b) sección transversal vista en el plano yz (plano E) (Stutzman, 2002).

2.3.3 Antena de corneta sectorial piramidal

La antena de corneta mas popular es la antena de corneta piramidal. Como se muestra en la figura 16, se abre en ambas paredes tanto verticales como horizontales (plano E y plano H). Esta configuración dará lugar a un ancho de haz estrecho en ambos planos. Para su análisis se combinan los análisis de ambos planos, tanto E como H (Stutzman, 2002).

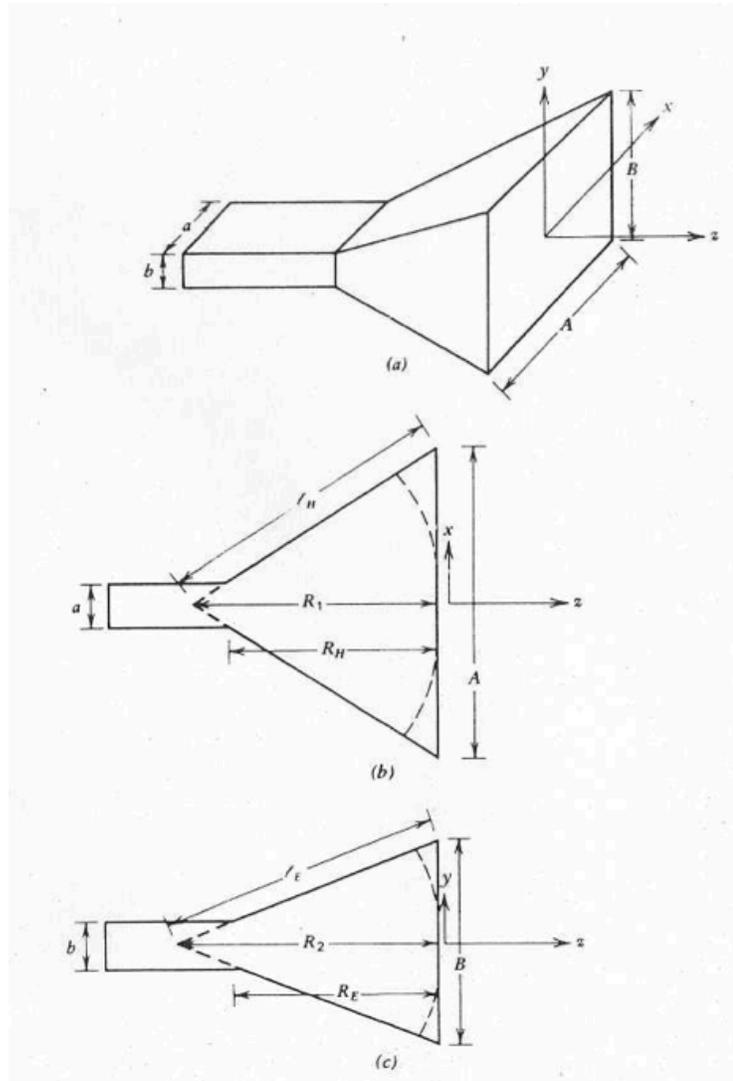


Figura 16 Antena de corneta piramidal (a) geometría elemental (b) sección transversal vista en el plano xz (plano H) , (c) sección transversal vista en plano yz (plano E). (Stutzman, 2012)

2.4 Propiedades y parámetros de una antena de apertura

El diseño de las antenas están influenciados por muchos parámetros como lo son su tamaño, rango de frecuencia, potencia de salida, directividad, ganancia, técnicas de polarización y la impedancia eléctrica. Todos estos parámetros justifican la amplia gama de diseños de antenas disponibles para diferentes aplicaciones (Habash, 2007).

Decibel

Para hacer frente a la amplia gama de números en un sistema de telecomunicaciones, es conveniente utilizar una escala logarítmica para comparar distintos niveles de potencia. Entonces es común utilizar un logaritmo base 10 para dichos casos. También el resultado se multiplica por 10. La unidad es el Decibel pero comúnmente la gente le llama dB. En el caso de trabajar con corrientes y voltajes, el resultado se multiplica por 20. Para un amplificador la ganancia se describe como (Habash, 2007):

$$G = \log\left(\frac{P_o}{P_i}\right) dB \quad (16)$$

donde:

P_o = potencia de salida

P_i = potencia de entrada

Directividad.

Es la propiedad de una antena de concentrar la radiación en una dirección deseada. La directividad es también la relación de la intensidad de la radiación en una dirección dada a la intensidad de la radiación media en todas las direcciones. Esta intensidad de radiación media es igual a la potencia total de la antena dividida entre 4π . Si la dirección no está especificada, la directividad está referida a la dirección de la máxima intensidad de radiación (Habash, 2007).

Ganancia

La ganancia de una antena está definida como el producto de la eficiencia de la antena y la directividad. La ganancia se obtiene de concentrar la potencia radiada en un haz estrecho. La ganancia en cualquier dirección (θ, ϕ) es la densidad de potencia radiada en la dirección (θ, ϕ) dividida entre la densidad de potencia que habría sido radiada en (θ, ϕ) por un radiador isotrópico. Se obtiene una mayor ganancia al aumentar el área de

apertura A_e de la antena en metros cuadrados. Matemáticamente, la ganancia se define como (Habash, 2007):

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (17)$$

donde:

A_e = Área de apertura

λ = Longitud de onda

La ganancia se expresa en dB . El término dB_i se refiere a una ganancia de una antena con respecto a otra antena isotrópica.

Polarización

La polarización de una onda electromagnética es la orientación del vector de intensidad del campo eléctrico E relativo a la superficie de la Tierra. La propagación de la onda tiene una dirección transversal para el campo eléctrico llamado "dirección de polarización". Esto normalmente se encuentra a lo largo de la dirección del campo eléctrico. Existen dos tipos básicos de polarización; lineal y elíptica. La polarización lineal se divide en dos clases, la vertical y la horizontal. La polarización circular es la polarización mas común de las antenas elípticas. Existen dos clases de polarizaciones circulares; circular de mano derecha y circular de mano izquierda (Habash, 2007).

Área efectiva

El área efectiva de una antena de apertura A , esta relacionada a la ganancia G y a la longitud de onda (λ) del espacio libre:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad (18)$$

donde:

λ =Longitud de onda

G= Ganancia

Zona de campo cercano

Esta es una región generalmente de estrecha proximidad a la estructura radiante de antena o de otro tipo, en el que los campos eléctricos y magnéticos, que no presentan una relación de onda plana, la potencia no disminuye con el cuadrado de la distancia de la fuente, sino que varía considerablemente de un punto a otro (Habash, 2007).

Zona de campo lejano

Esta es la región de la antena suficientemente lejana donde la potencia de radiación decrece por unidad de área con el cuadrado de la distancia de la fuente. En el campo lejano los campos electromagnéticos se propagan alejándose de la fuente de radiación. La energía de radiación es almacenada alternativamente en los campos eléctricos y magnéticos de la onda (Habash, 2007).

Capítulo 3. Diseño y simulación de la antena

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta la metodología para el diseño de antenas de apertura a partir de una guía de onda rectangular. El diseño de las dimensiones de las antenas se realizó utilizando las ecuaciones dadas en (Cardama,1998). Se comprobaron las dimensiones obtenidas de la guía con las de las guías de onda comerciales, las cuales correspondieron con la guía de onda rectangular “WR-340”, esta guía de onda, opera en el banda de frecuencias de (2.2-3.3 GHz). Se presenta en este capítulo el funcionamiento de las guías de onda rectangulares.

3.2 Guía de onda rectangular

Una guía de onda es una línea de transmisión muy común por donde se propagán ondas electromagnéticas, la guía de onda mas común es la rectangular pero también existen otras como, las guías de onda elípticas y circulares, idealmente la propagación de ondas electromagnéticas a través de una guía de onda a cierta frecuencia de corte se considera sin pérdidas (constante de atenuación 0), ya que se supone que los conductores son perfectos, sin embargo en una guía de onda práctica, si habrá pérdidas o atenuación debido a las corrientes en las paredes metálicas y pérdidas en el dieléctrico que hay dentro de la guía. Estas guías son sencillas de construir, presentan muy buen ancho de banda y pocas pérdidas a sus frecuencias comunes de trabajo y su comportamiento es muy parecido al de un filtro pasa altas.

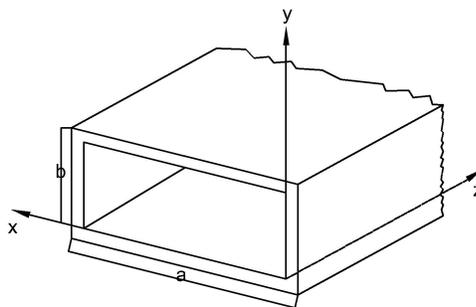


Figura 17 Guía de onda rectangular (Sadiku, 1998)

3.2.1 Modo de propagación en la guía de onda rectangular

En cualquier sistema de microondas, el número de modos que puede existir dentro de una guía de onda rectangular depende de sus dimensiones a y b , del material que hay en su interior, y del dispositivo de excitación (fuente de microondas y frecuencia de operación) acoplado a la guía. Existen distintos modos entre los cuales podemos mencionar (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997).

- Modo TE (Transversal eléctrico), la componente del campo eléctrico en la dirección de propagación es nula.
- Modo TM (Transversal magnético), la componente del campo magnético en la dirección de propagación es nula.
- Modo TEM (Transversal electromagnético), la componente tanto del campo eléctrico como del magnético en la dirección de propagación es nula.
- Modo híbrido, son los que sí tienen componente en la dirección de propagación tanto en el campo eléctrico como en el magnético (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997).

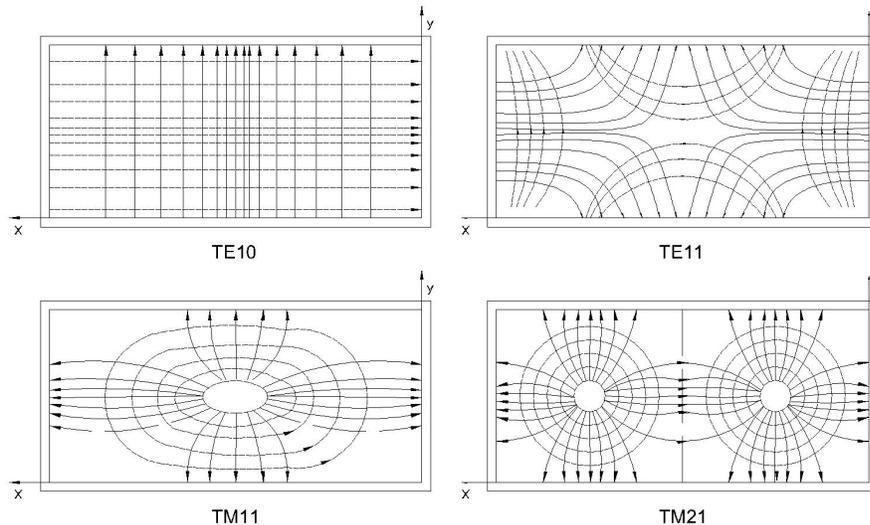


Figura 18. Modos de propagación en una guía de onda (Sadiku 1998)

Si la guía trabaja con varios modos a la vez, la potencia total se distribuye entre ellos, y al querer detectar dicha potencia al final de la línea, la operación se complica y encarece, debido a la instrumentación (sondas, detectores, etc) que se requiere. Por ello, generalmente se prefiere trabajar una guía en un solo modo, es decir, en el modo dominante TE_{10} . Por lo que se refiere al dispositivo de excitación para iniciar la transmisión a lo largo de la guía, en general éste produce muchos modos simultáneamente, con potencias en distintas proporciones. Sin embargo, si la guía opera sólo en el modo TE_{10} , todos los demás modos superiores emitidos por la fuente de microondas son atenuados y no se propagan. Conviene entonces dedicar más atención al modo TE_{10} y examinar sus características más detalladamente (Sadiku, 1998).

Las guías rectangulares son muy útiles, porque tienen un ancho de banda muy grande dentro del cual sólo se propaga el modo dominante. Esto permite transmitir enormes cantidades de información a lo largo de la guía. Hay en el mercado un rango muy amplio de estándares, que tienen las dimensiones adecuadas para trabajar en frecuencias desde los 300 MHz hasta los 300 GHz. En la siguiente tabla se muestran algunos de estos estándares.

Tabla 2. Estándares de guías de onda rectangulares en el mercado.

BJ	IEC 153 R	EIA WR	Rango de frecuencias (GHz)	Ancho a (mm)	Alto b (mm)	Std Tol +/- c (mm)
BJ12	R12	WR770	0.96-1.45	195.58	97.79	-
BJ14	R14	WR650	1.12-1.70	165.1	82.55	0.33
BJ18	R18	WR510	1.45-2.20	129.54	64.77	0.26
BJ22	R22	WR430	1.70-2.60	109.22	54.61	0.22
BJ26	R26	WR340	2.20-3.30	86.36	43.18	0.17
BJ32	R32	WR284	2.60-3.95	72.14	34.04	0.14
BJ40	R40	WR229	3.30-4.90	58.17	29.08	0.12
BJ48	R48	WR187	3.95-5.85	47.549	22.149	0.095
BJ58	R58	WR159	4.90-7.05	40.386	20.193	0.081
BJ70	R70	WR137	5.85-8.20	34.849	15.799	0.07
BJ84	R84	WR112	7.05-10	28.499	12.624	0.057

3.2.2 Diseño de la antena.

El diseño de la antena se basa en la operación de una guía de onda rectangular. Como se desea que la antena opere a la frecuencia de 2.4 GHz se escogen las dimensiones de la guía de onda WR-340 dadas en la tabla 2, estas dimensiones son $a=8.63$ cm y $b=4.31$ cm. Los cálculos de estas dimensiones se dan en (Sadiku, 1998).

Calculando la frecuencia central de operación se tiene:

$$f = \frac{(2.2+3.3 \text{ GHz})}{2} = 2.75 \text{ GHz} \quad (19)$$

Con el valor de la frecuencia anterior, se determina la longitud de onda de la guía de la manera siguiente:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.75 \times 10^9 \text{ H}} = 10.9 \text{ cm} \quad (20)$$

En las guías de onda que operan en el modo dominante TE_{10} , se cumple la relación $a=2b$, (Y Liu, S Gong, 2010). Cabe mencionar que para obtener dimensiones exactas de a y b de recurre al análisis paramétrico (Y Liu, S Gong, 2010).

La frecuencia de corte f_c de la guía de onda, es otro de los parámetros importantes en el diseño, su valor permite conocer que frecuencias de bajo de este valor no se pueden propagar a través de la guía (Chávez, 2011).

$$f_c = \frac{c}{2a} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2(8.63 \text{ cm})} = 1.73 \text{ GHz} \quad (21)$$

La longitud del alimentador de la guía de onda (monopolo), se determinó utilizando el valor calculado de "longitud de onda" λ , en este caso se utilizó una longitud de un cuarto de longitud de onda, $(\lambda/4) = 2.72$ cm. Para determinar la posición del detector en la guía, d es necesario conocer el parámetro (λ_g) correspondiente a la longitud de onda dentro de la guía, este valor se calcula como sigue:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} = \frac{10.9\text{cm}}{\sqrt{1 - (1.73\text{GHz}/2.4\text{GHz})^2}} = 15.72\text{cm} \quad (22)$$

Con este nuevo parámetro, se puede dibujar el plano de la guía de onda rectangular, tomando en cuenta las dimensiones dadas anteriormente.

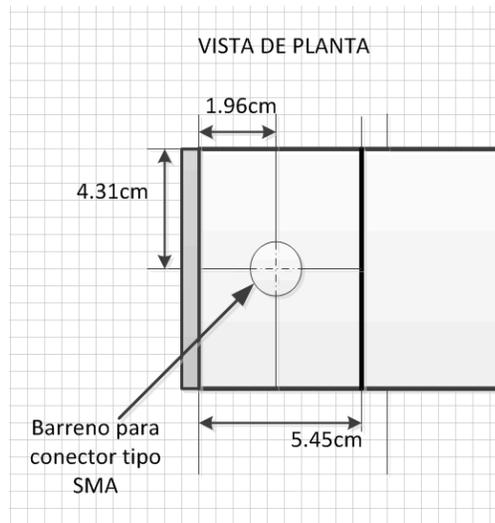


Figura 19 Vista de planta de las dimensiones de la guía de onda calculadas.

Con los valores anteriores, se procede a la simulación y optimización de la guía de onda rectangular.

Adicionalmente se comprobó las dimensiones a y b de la guía de onda a partir de la frecuencia de corte, de la siguiente manera:

$$f_{c(m,n)} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left[\frac{m\pi}{a}\right]^2 + \left[\frac{n\pi}{b}\right]^2} \quad (23)$$

Se sabe que el modo de trabajo fundamental de una guía de onda rectangular es el TE_{10} , entonces se puede sustituir en la ecuación (23) los valores de $m=1$ y $n=0$. Resolviendo la ecuación (23) se obtiene:

$$a = \frac{1}{2f_c\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (24)$$

Conociendo la relación $a=2b$, se obtiene el valor de “b”:

$$b = \frac{1}{4f_c\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (25)$$

donde:

f_c = frecuencia de corte

μ = Permeabilidad en el vacío (aire dentro de la guía) = $4\pi \times 10^{-7} \left(\frac{H}{m}\right)$

ε = Permitividad en el vacío (aire dentro de la guía) = $\frac{10^{-9}}{36\pi} \left(\frac{F}{m}\right)$

3.3 Simulación de la antena de apertura

3.3.2 Simulación del alimentador

El primer elemento que se simuló fue el alimentador de la antena, con la dimensión obtenida de los cálculos anteriores $\left(\frac{\lambda}{4}\right) = 2.72 \text{ cm}$, y utilizando el simulador electromagnético CST. En la figura 20, se presenta el dibujo del monopolo estudiado.

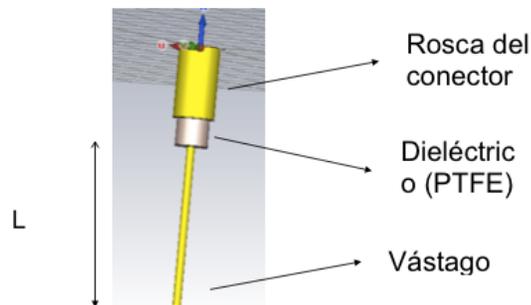


Figura 20. Dibujo del diseño del conector en el simulador CST

Con la longitud anterior, el monopolo presentó unas pérdidas por retorno (S_{11}) no adecuadas para el proyecto, por lo que se tuvo que hacer una modificación a la longitud

original. Cambiando a $L=3$ cm se obtuvo una mejor respuesta a la frecuencia de operación la cual se muestra en la figura 21.

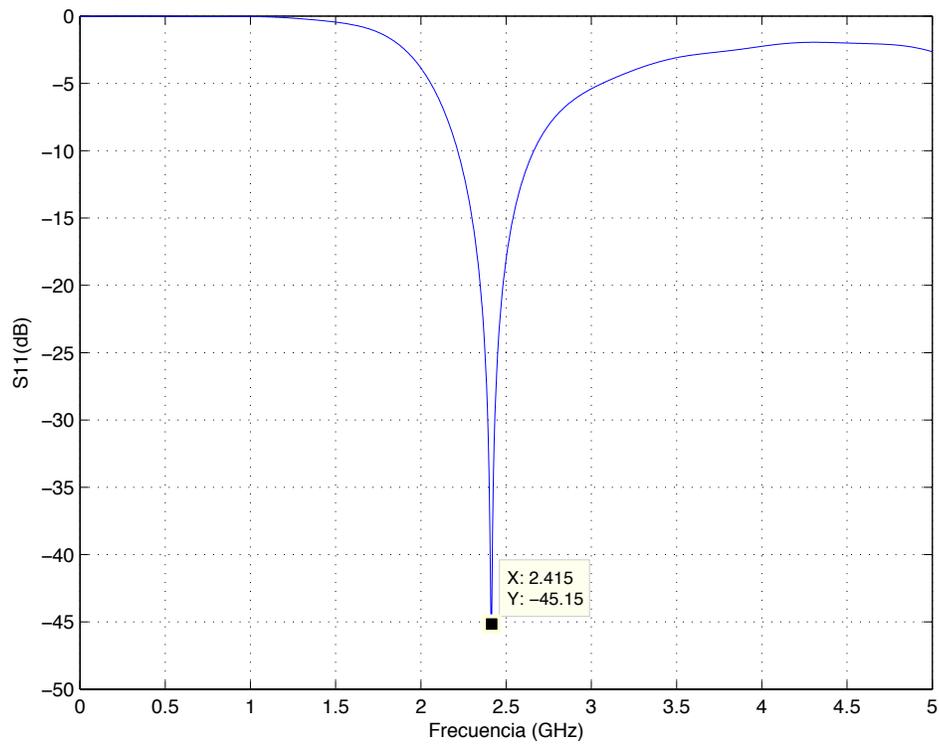


Figura 21. Pérdidas por retorno (parámetro S_{11}) del alimentador con $L=3$ cm.

3.3.3 Simulación del conjunto guía de onda-alimentador

El siguiente paso consiste en simular la guía de onda junto con el alimentador modificado, utilizando los datos obtenidos en el diseño para las paredes de la guía de onda utilizando el simulador CST, el diseño se muestra en la figura 22.

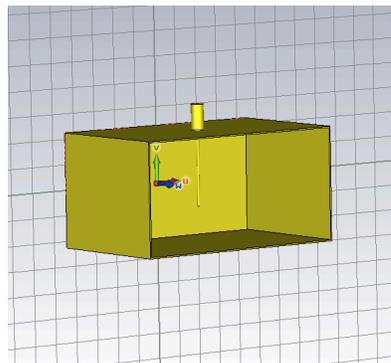


Figura 22. Diseño del conjunto guía de onda-alimentador en el simulador CST.

Al analizar el conjunto anterior con el simulador CST, no se obtuvo una respuesta favorable, por lo que se procedió a optimizar mediante análisis paramétrico las paredes y la longitud del alimentador, para obtener una mejor respuesta.

La guía de onda, con dimensiones $a=4.51$ cm y $b=8.83$ cm, y con la longitud del alimentador optimizada, presentó la respuesta en frecuencia como la mostrada en la figura 23. En este gráfico, se observa que el arreglo alimentador-guía de onda, presenta dos resonancias significativas, una de las cuales se encuentra a la frecuencia de 2.4 GHz con -30 dB de pérdidas por retorno, sin embargo el ancho de banda es algo angosto

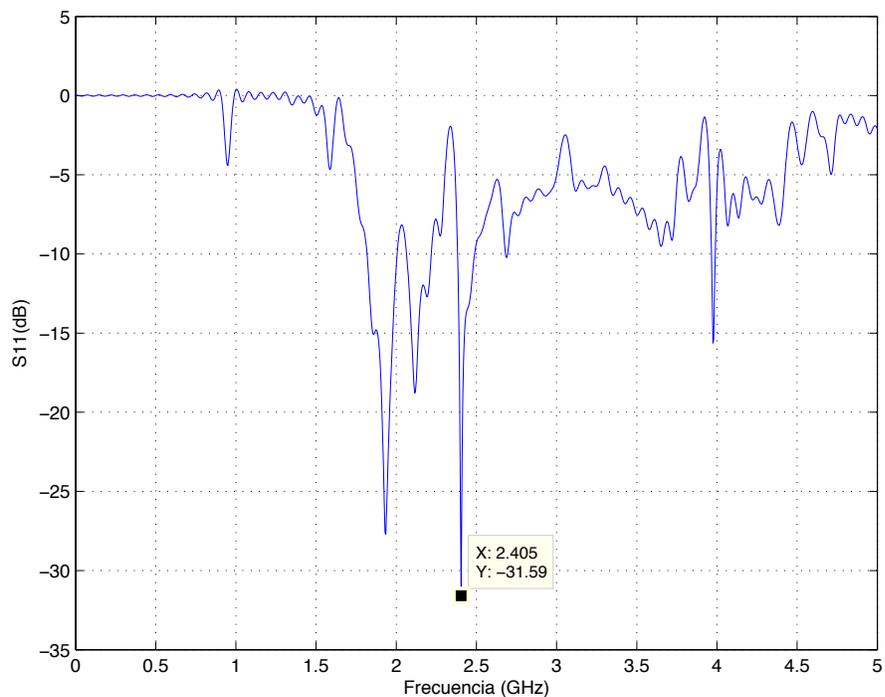


Figura 23. Pérdidas por retorno (parámetro S_{11}) del diseño del conjunto guía de onda-alimentador, con el simulador CST.

3.3.4 Simulación de la antena completa con las aperturas agregadas

En esta etapa, se agregaron las aperturas a la guía de onda para que la antena quedara completa. Con el propósito de facilitar la construcción de la estructura, se decidió eliminar las paredes magnéticas tomando en cuenta los resultados de la simulación. Se observó que el simulador entregaba prácticamente los mismos

resultados con paredes magnéticas que sin ellas. Otro aspecto importante durante esta etapa, fue que se optimizó el ángulo formado de la apertura con respecto a la horizontal, como se observa en la figura 24.

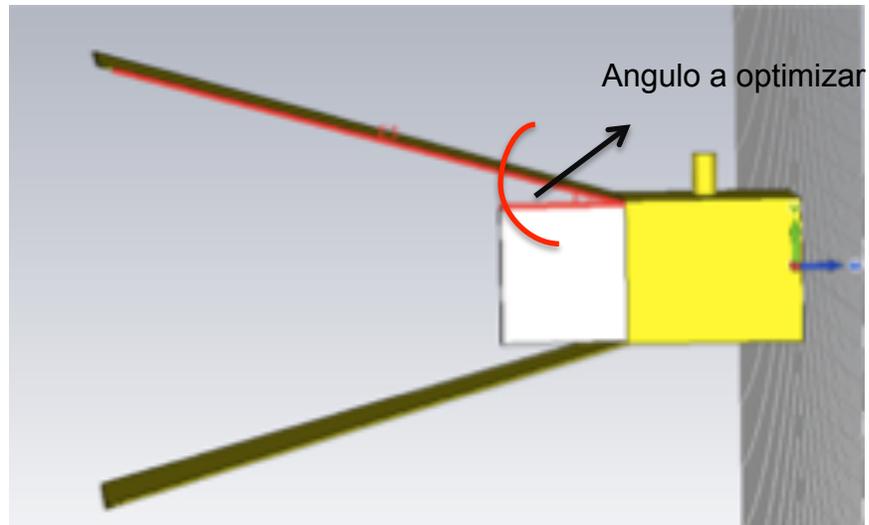


Figura 24. Diseño con el simulador CST, mostrando el ángulo como parámetro de diseño.

Se escogió una longitud de apertura del doble de la profundidad de la guía (como mínimo) en este caso de 5.45 cm, con esto se asegura que la antena proporcione buena ganancia y presente mejor adaptación al modo dominante de propagación. Haciendo la optimización del ángulo de las aperturas, se determinó que la mejor respuesta de la antena, se obtiene para ángulos de apertura de 18.15° .

Con los pasos anteriores, se llegó al diseño final de la antena, este diseño se presenta en la figura 25. Además en la tabla 3, se resumen las dimensiones de la estructura de la antena dadas al inicio del capítulo.

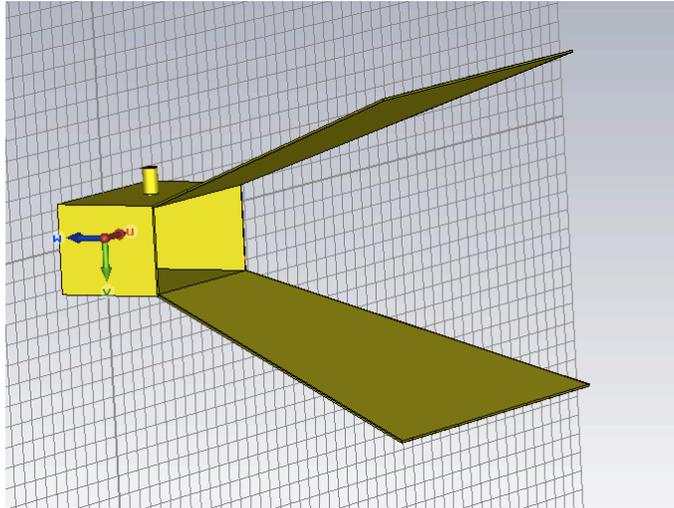


Figura 25. Diseño final de la antena de apertura obtenido con el simulador CST.

Es importante mencionar que aquí están conjuntos todos los parámetros de diseño que se calcularon o se tenían que tomar en cuenta en el diseño al inicio de este capítulo, los datos se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 3. Parámetros utilizados en el diseño final simulado para la antena de apertura.

Dimensiones de las paredes	a=4.51 y b=8.83 cm
Longitud de onda de la guía	5.45 cm
Longitud del monopolo (alimentador)	2.72 cm
λ (longitud de onda)	10.9cm
λ_g (longitud de onda dentro de la guía)	15.72cm
Longitud de las aperturas	16 cm
Ángulo de de las aperturas	18.15 grados
f_c (frecuencia de corte)	1.73 GHz

3.3.4.1 Resultados teóricos. Pérdidas por retorno (Parámetro S_{11})

En esta sección, se presentan los resultados teóricos, obtenidos mediante simulación electromagnética realizada con el paquete informático CST, la gráfica de la figura 26, corresponde a la característica de pérdidas por retorno también conocidas como parámetro S_{11} (dB). La simulación predice que la antena puede operar desde los 2 GHz hasta 2.7 GHz, con lo que se obtiene un ancho de banda de 700 MHz. Dentro de esta

banda, se puede observar dos resonancias a las frecuencias de 2.2 GHz y 2.4 GHz que corresponden a los valores de $S_{11} = -19$ dB y $S_{11} = -16.42$ dB respectivamente. Con los valores obtenidos, se asegura que la antena puede operar a la frecuencia deseada.

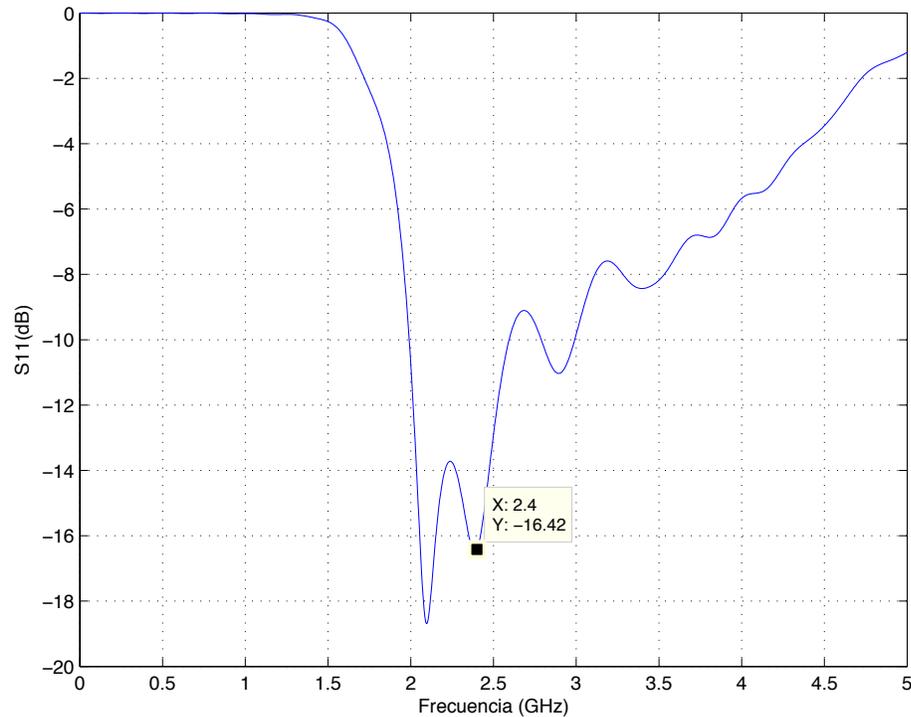


Figura 26. Parámetro S_{11} (pérdidas por retorno) de la antena simulada.

3.3.4.2 Resultados teóricos. Ganancia (G)

El siguiente parámetro de interés es la ganancia de la antena. De la teoría vista en el capítulo 2, se sabe que la ganancia de una antena de apertura está en función del área efectiva y de la longitud de onda. Como la antena diseñada presenta dimensiones grandes, se puede esperar que la ganancia de la antena sea la adecuada para la aplicación deseada.

El resultado obtenido con el simulador electromagnético es el que se muestra en la figura 27. Se puede apreciar que la ganancia de la antena está por arriba de los 11 dB en la banda de operación.

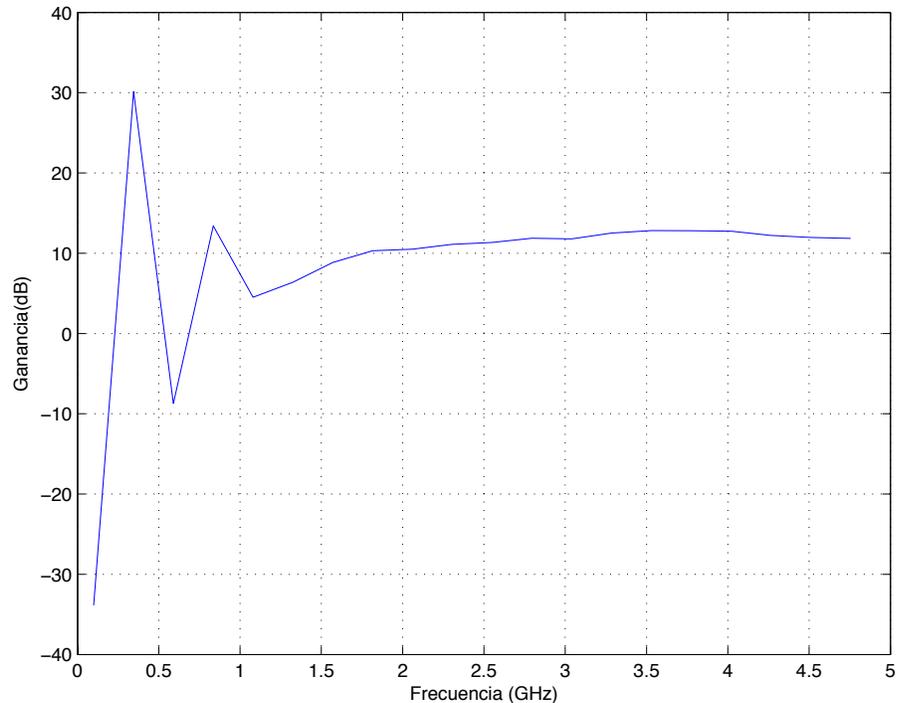


Figura 27. Ganancia de la antena de apertura simulada.

3.3.4.3 Obtención del patrón de radiación teórico de la antena

El patrón de radiación muestra el área de máxima concentración de energía de una antena, esto quiere decir hacia que áreas cubrirá la energía de radiación de la antena, en la figura 28, se observa el patrón de radiación en forma polar de la antena obtenido en la simulación. La antena simulada, presentó un comportamiento muy directivo, con valor de 10.9 dBi en el lóbulo principal. Como se esperaba, esta antena es muy directiva, tiene un ancho de haz de 50.7 grados a la frecuencia de 2.4 GHz. Se concluye que a esta frecuencia, la antena tiene un comportamiento adecuado para la aplicación en la que se desea aplicar.

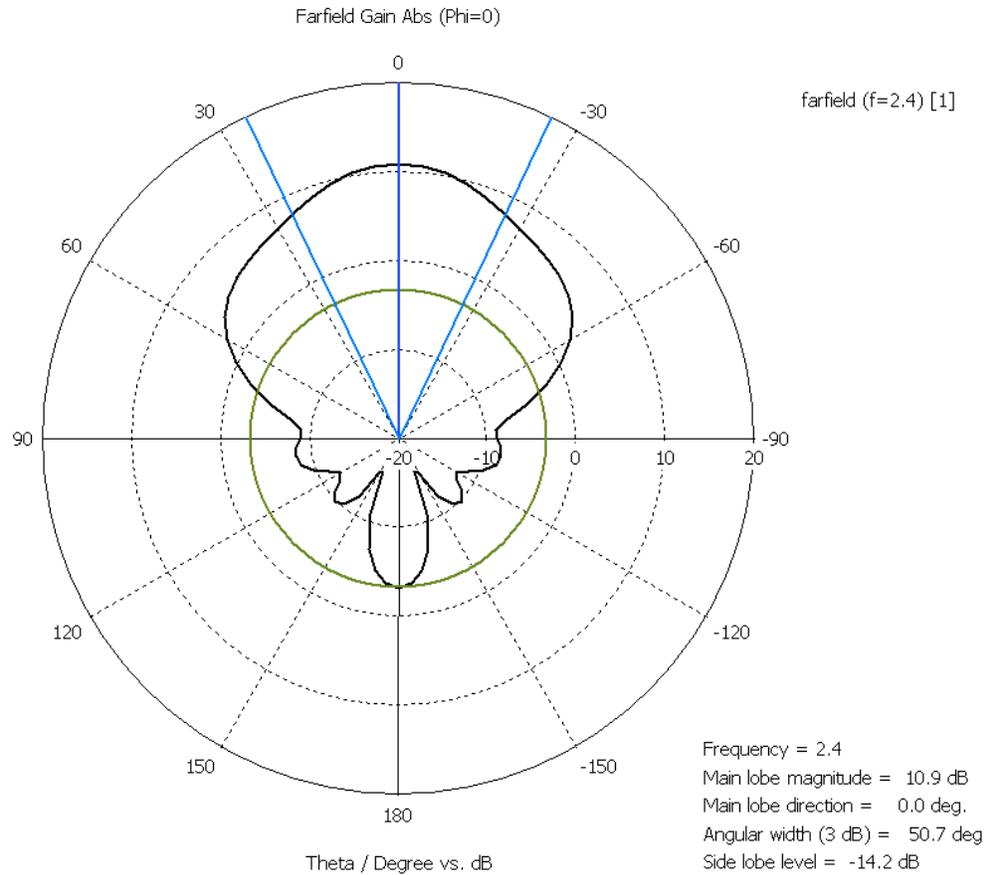


Figura 28. Obtención del patrón de radiación simulado del diseño final.

Otra presentación del patrón de radiación, es como el mostrado en la figura 29. El patrón de radiación está en tercera dimensión. En esta gráfica, se observa con mayor detalle hacia que dirección apunta la energía de radiación generada por la antena, como se ve, a la salida de la apertura se encuentra la máxima energía radiada que es de 10.9 dBi en forma muy directiva.

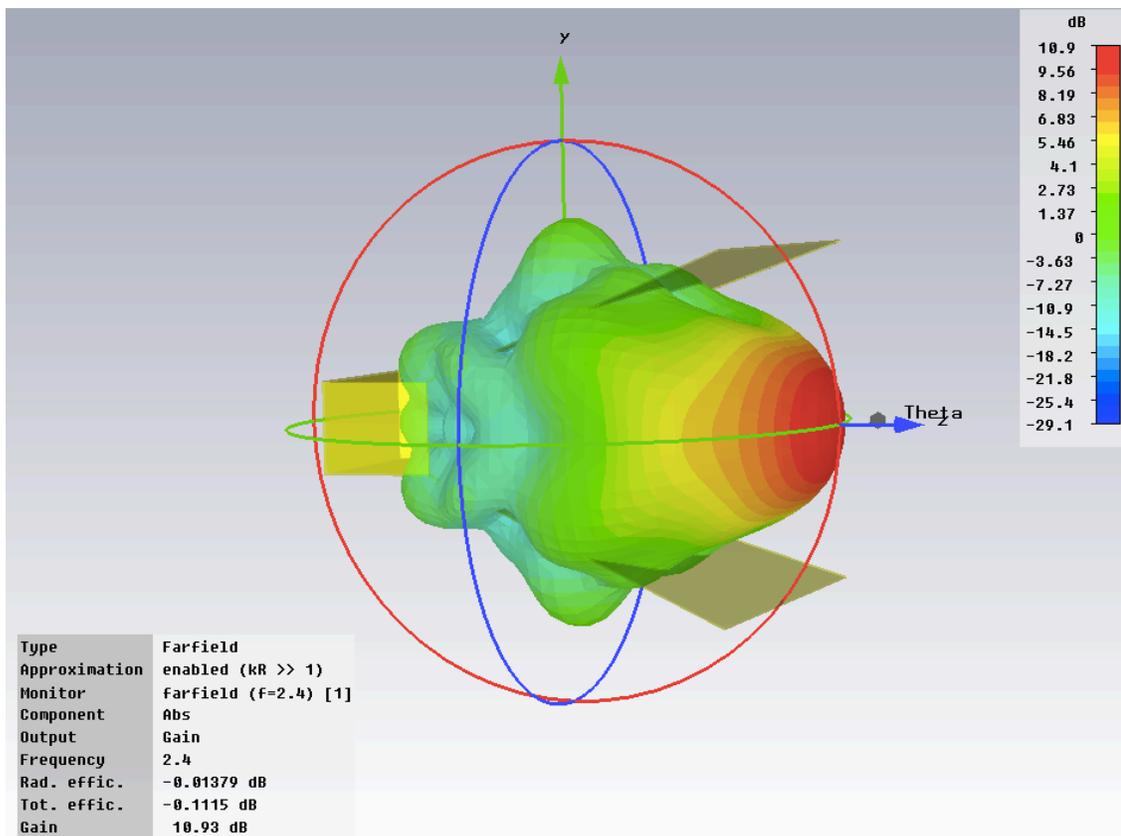


Figura 29. Patrón de radiación en 3D de la antena de apertura.

Capítulo 4. Construcción y caracterización de la antena

4.1 Introducción

En este capítulo se describe el método y forma de construcción de la antena de apertura presentada en el capítulo 3, los lugares utilizados para la caracterización eléctrica fueron el laboratorio de Radio Frecuencia y Microondas de CICESE y la azotea del edificio de física aplicada, que se utilizó para emular una cámara anecoica, para obtener el patrón de radiación de la antena construida.

4.2 Plano de la antena

El plano de la antena se muestra en la figura 30, las dimensiones se dan en centímetros, se especifica el material utilizado.

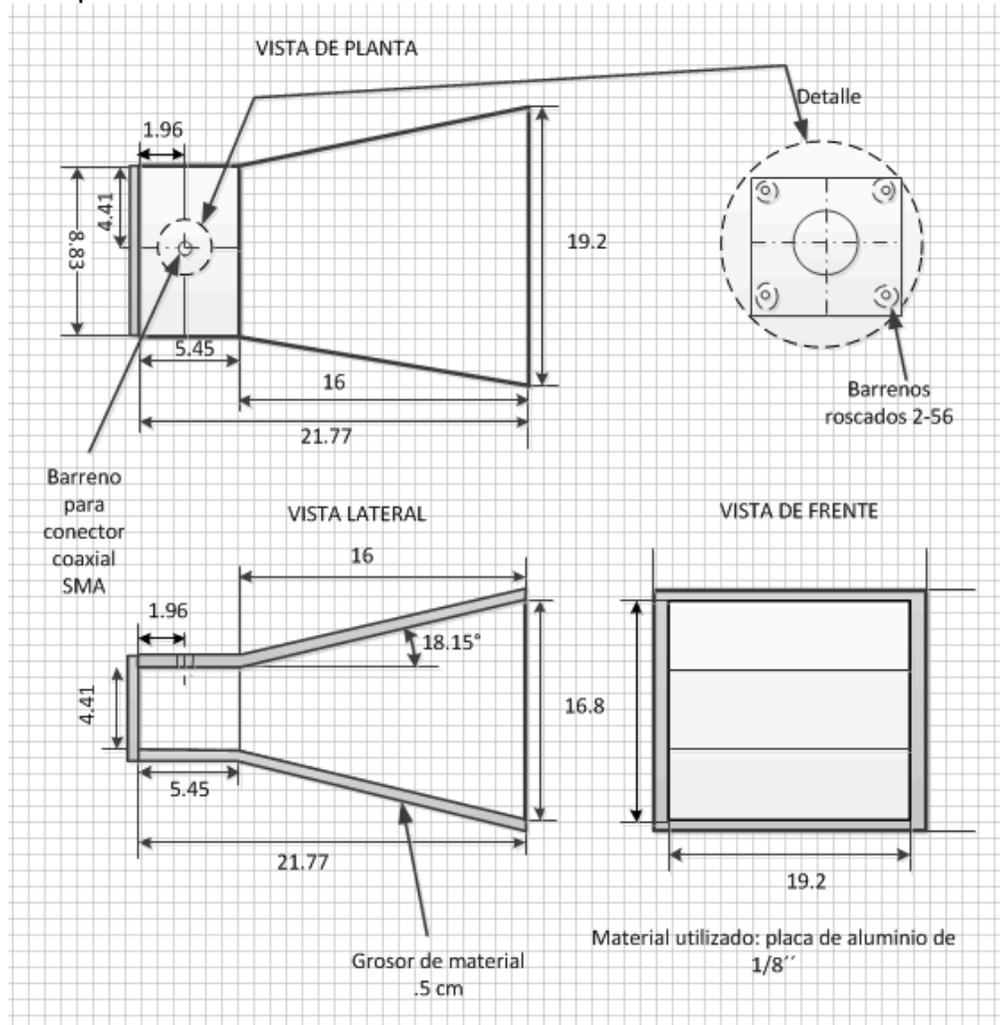


Figura 30. Plano de la antena.

4.3 Contrucción de la antena

Siguiendo las especificaciones dadas en el plano, el prototipo final se construyó utilizando lámina de aluminio calibre No. 20, los cortes, dobleces y barrenos de la lámina se realizaron con; guillotina para lámina, dobladora de lámina y taladro de banco. En la figura 31, se presenta el prototipo incluyendo su alimentador. Se puede notar que en las paredes de la antena se utilizaron tiras de aluminio fijadas con remaches, las tiras sirven para dar rigidez a la antena.

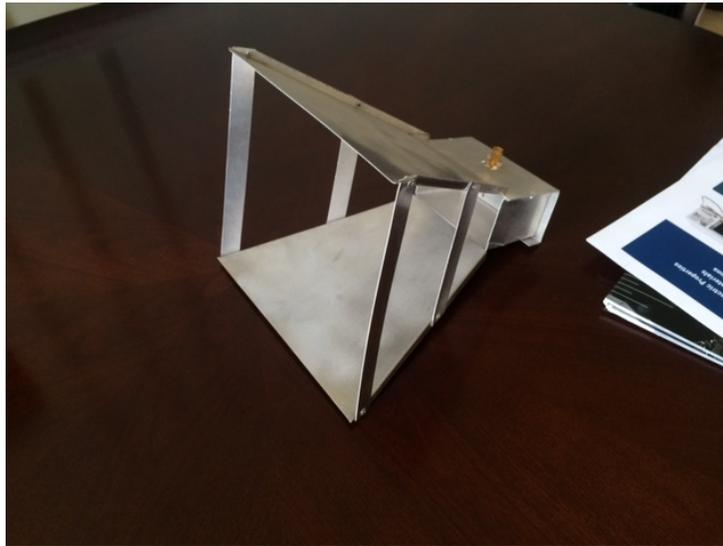


Figura 31. Prototipo final de la antena de apertura.

4.4 Caracterización eléctrica.

4.4.1 Pérdidas por retorno (Parámetro S_{11})

Para obtener las pérdidas por retorno o parámetro S_{11} , se utilizó el analizador de redes vectorial HP-8510-C, el arreglo experimental es el que se muestra en la figura 32. Esta característica proporciona información del grado de adaptación que tiene la antena a la frecuencia de diseño, valores de $S_{11} < -10$ dB aseguran un buen funcionamiento de la antena.

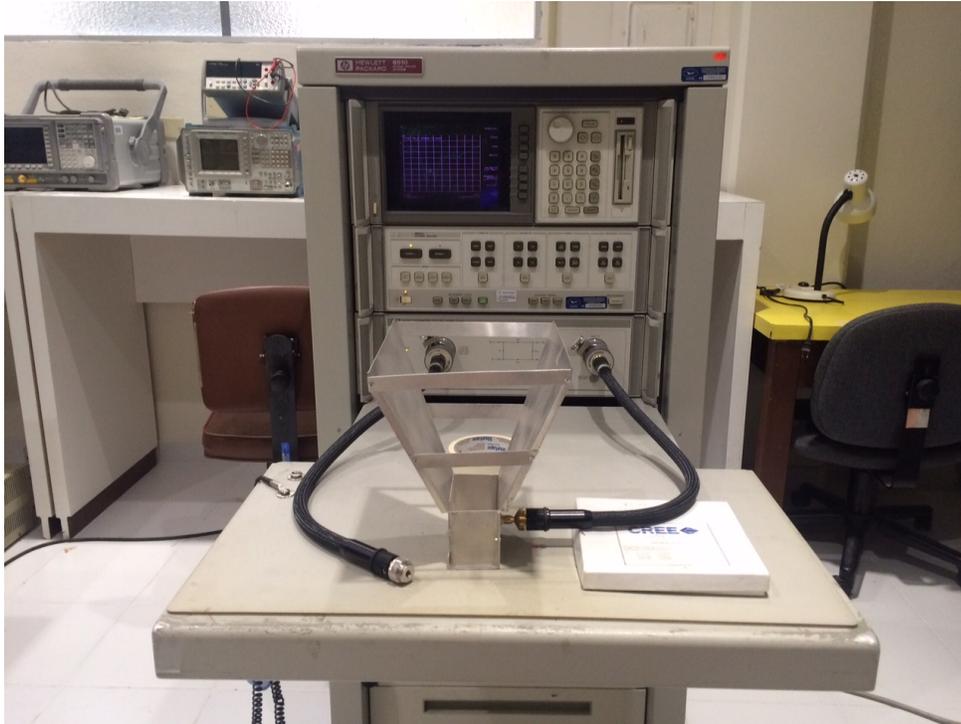


Figura 32. Arreglo experimental para obtener las pérdidas por retorno de la antena.

Los resultados obtenidos son los que se muestran en la figura 33. Se puede observar que la antena opera muy bien en un ancho de banda de 800 MHz, la cual queda comprendida entre 2 GHz y 2.8 GHz. Las pérdidas por retorno S_{11} dentro de esta banda de frecuencias son mejores a los -10 dB, por lo que la antena construida puede utilizarse para los fines que se persiguen.

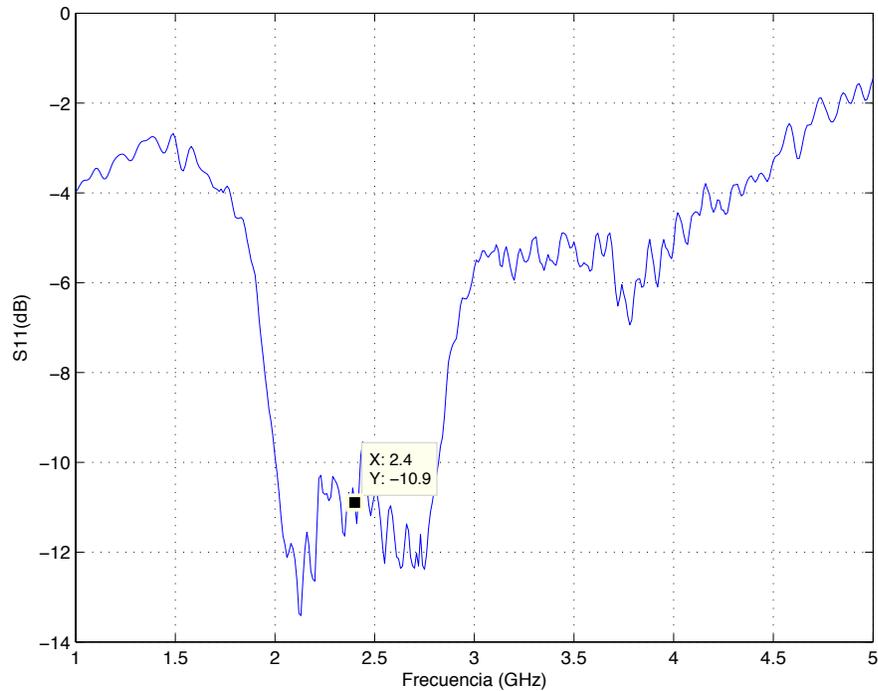


Figura 33. Pérdidas por retorno (parámetros S_{11}) medidos.

En la figura 34, se muestra la comparación entre los valores teóricos y los medidos. Como se puede observar, los valores obtenidos en la simulación son mejores que los obtenidos en la medición, lo anterior se debe a que en la simulación la antena se encuentra en condiciones ideales mientras que en las mediciones se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos: pérdidas de los conectores, pérdidas de los cables de microondas utilizados y también el grado de cuidado que se puso en el momento de calibrar el analizador de redes vectorial. Sin embargo, como se señaló anteriormente, la antena construida puede operar a la frecuencia de 2.4 GHz como estaba previsto en el objetivo de la tesis.

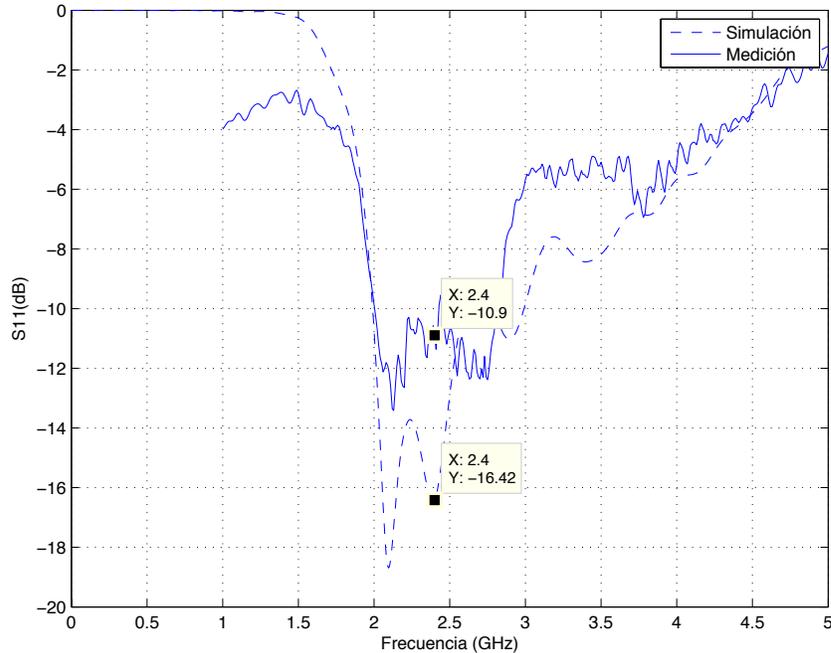


Figura 34. Comparación de resultados, parámetros S_{11} , valores teóricos V.S. medidos

4.4.2 Medición de la ganancia de la antena

En la literatura (Medina, 2008), presenta varios métodos para la medición de la ganancia de una antena, el utilizado en este proyecto fue el mencionado en (Medina 2008), conocido como el método de las 3 antenas, en este método se miden los parámetros S de transmisión (S_{21}) de tres antenas desconocidas y se forma un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, donde estas incógnitas son la ganancia de cada antena desconocida.

El método se inicia realizando la medición entre la antena 1 y 2 (M_{12}), se prosigue con una segunda medición entre la antena 1 y 3 (M_{13}), después se realiza la medición entre la antena 2 y 3 (M_{23}), Es importante mencionar que existen las pérdidas por propagación las cuales se deben tomar en cuenta, estas se agregan y se tienen las siguientes ecuaciones.

$$M_{12} = 20 \log_{10} |S_{21}|_{12} + Pp \quad (26)$$

$$M_{13} = 20 \log_{10} |S_{21}|_{13} + Pp \quad (27)$$

$$M_{23} = 20 \log_{10} |S_{21}|_{12} + Pp \quad (28)$$

Después se plantea un sistema de ecuaciones con tres incógnitas y tres ecuaciones, y este se resuelve para obtener las ganancias de las tres antenas. El sistema de ecuaciones queda como sigue:

$$\begin{bmatrix} M_{12} \\ M_{13} \\ M_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & -0.5 \\ 0.5 & -0.5 & 0.5 \\ -0.5 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{12} \\ M_{13} \\ M_{23} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Resolviendo la ecuación (30) se obtiene la ganancia deseada, para cada frecuencia en la medición. Como se mencionó existen pérdidas por propagación, estas son debidas principalmente a la distancia o separación entre las antenas medidas además los cables utilizados también tienen pérdidas. Es importante asegurarse que las antenas a medir operen a las frecuencias requeridas, una manera de minimizar las pérdidas de propagación es reduciendo la distancia entre las antenas, pero se asume el riesgo de salir de la distancia mínima para satisfacer la distancia en la región de campo lejano a la frecuencia de operación dada.

Se efectúan las mediciones entre las 3 antenas, y se resuelve la ecuación (30) para cada punto de frecuencia de la medición y se determinan así las ganancias de las 3 antenas.

El arreglo experimental para medir la ganancia del prototipo construido es el que se muestra en la figura 35. En la medición de ganancia, se utilizó el programa en matlab desarrollado por (Medina, 2008) y una computadora para la adquisición de datos, además se utilizaron dos antenas Vivaldi como la antena No.1 y No.2 que fueron desarrolladas por (Trujillo, 2012), mientras que la antena No.3 es la antena de apertura prototipo a medir.



Figura 35. Arreglo experimental para la obtención de la ganancia de la antena prototipo.

El resultado de las mediciones de ganancia de las antenas es la que se presenta en la figura 36. En la figura, aparecen tres ganancias correspondientes a las antenas arriba mencionadas. Se observa que la antena de apertura tiene una ganancia mayor que las antenas Vivaldi, lo cual era de esperarse ya que su apertura es mayor que las aperturas de las antenas Vivaldi. La antena de apertura, tiene una ganancia mayor de 11 dB a la frecuencia de 2.4 GHz, lo cual es un valor adecuado para la aplicación que se requiere

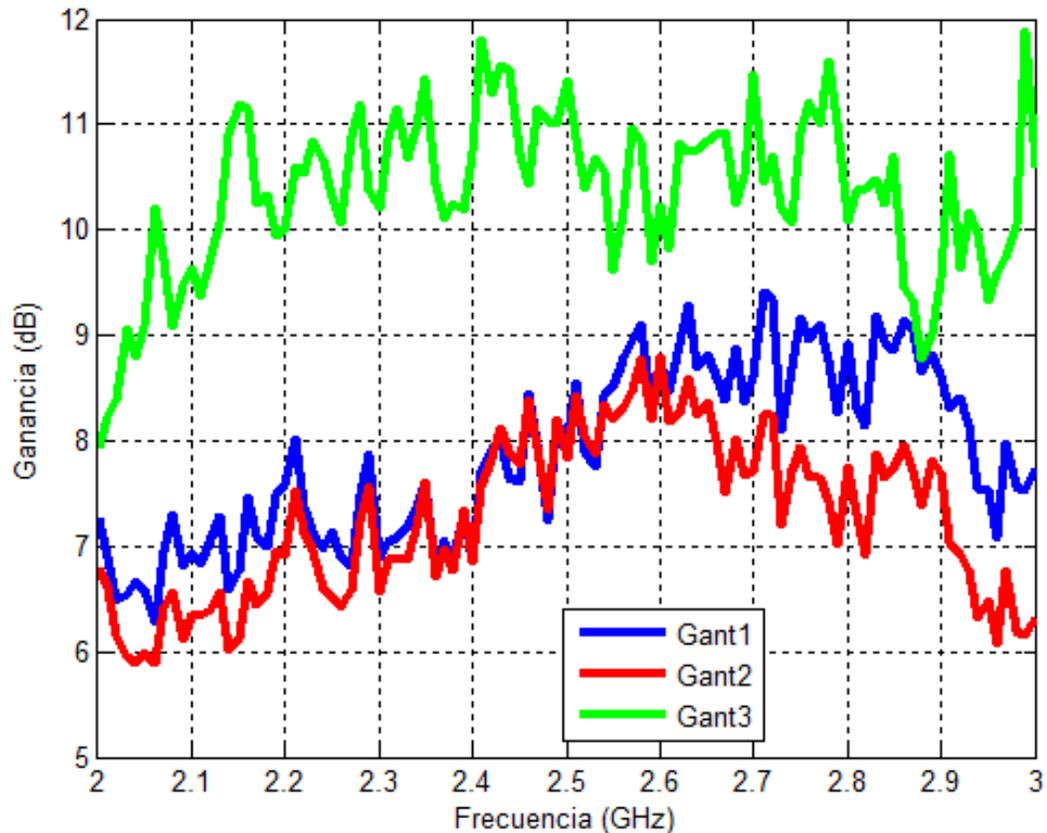


Figura 36. Ganancia de las antenas en azul (Vivaldi 1) en rojo (Vivaldi 2) y en verde (Antena de apertura).

En la figura 37 se presenta la comparación entre la ganancia obtenida con simulador electromagnético CST y la ganancia medida en el laboratorio, para la antena de apertura diseñada en este trabajo. Se puede ver que las curvas obtenidas no siguen las mismas trayectorias en toda la banda. Los valores teóricos quedan por encima de los obtenidos en la medición, resultado que es normal, sin embargo a la frecuencia de interés 2.4 GHz, el valor medido (10.74 dB) coincide con el valor teórico (10.79 dB).

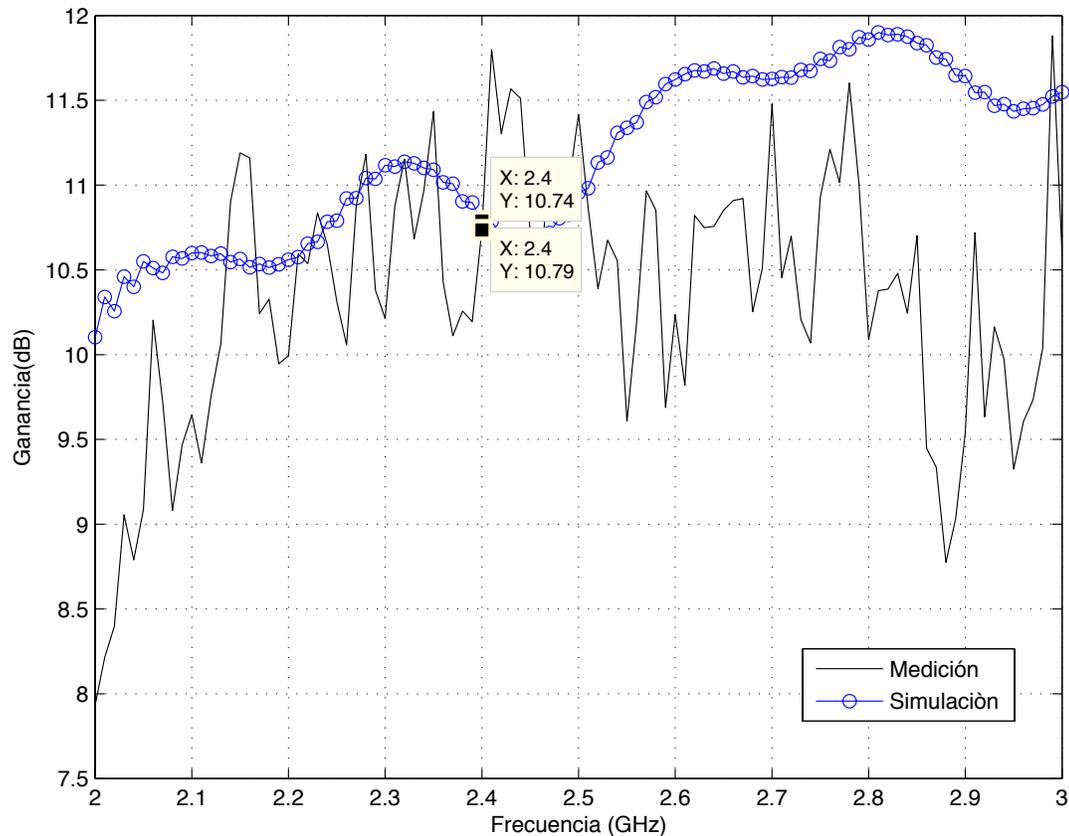


Figura 37. Comparación de ganancia: valores teóricos v.s. medidos.

4.4.3 Medición del patrón de radiación

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos del patrón de radiación de la antena construida. Cabe mencionar, que esta medición se recomienda realizar en el interior de una cámara anecoica, como en el laboratorio se adolece de esta infraestructura, la solución a este problema se resolvió realizando las mediciones en la azotea del edificio y a cielo abierto, de esta manera se puede obtener un patrón de radiación como el que se obtiene en una cámara anecoica (Medina, 2008).

El arreglo experimental para realizar este experimento es el que se muestra en la figura 38. El equipo utilizado consistió de un generador de señales o sintetizador, el cual se encuentra conectado mediante un cable coaxial a la antena transmisora, la cual sirve de antena “patrón”, esta antena es una antena Vivaldi desarrollada por (Trujillo 2012) la cual se aprecia al lado izquierdo en la figura 38. La antena bajo prueba (prototipo),

colocada al lado derecho de la figura 38, se conecta a un analizador de espectro, manteniendo una distancia fija de separación entre las antenas (1.5 m) para no salirse de la región de campo lejano. La antena bajo prueba está colocada sobre un mástil de material aislante rotatorio, el conjunto antena-mástil giran en pasos de un grado que proporciona una mesa giratoria diseñada y construida en CICESE y reportada por (Pacheco, 2015).

Los datos obtenidos son procesados de manera automática utilizando un programa de computadora en matlab desarrollado por (Medina, 2014). En el arreglo experimental se encuentra un motor de DC que proporciona la rotación con ayuda de sensores ópticos para la posición, es controlado por un microcontrolador (Arduino UNO). Se utilizan los puertos de la computadora USB y un modulo GPIB-USB para realizar todas las operaciones y adquisición de datos necesarios.



Figura 38. Arreglo experimental utilizado para la obtención del patrón de radiación (plano E)

El patrón de radiación fue obtenido para los planos eléctrico (E) y magnético (H). Para obtener el plano E, la antena se coloca de manera que el alimentador de la antena (monopolo) quede en forma vertical. Para obtener el plano H, la antena se gira 90° con

respecto al plano E. En la figura 38 se observa la medición del patrón de radiación en el plano E.

A la izquierda de la figura 38, se observa la antena patrón Vivaldi conectada al generador de señales, en el lado derecho de la misma figura, se encuentra la antena bajo prueba conectada a un analizador de espectros, está se encuentra montada en el mastil de la mesa giratoria. La medición se realiza, tomando en cuenta la potencia recibida en el analizador de espectros por la antena bajo prueba, dicha potencia se determina con la siguiente ecuación:

$$P_R = P_T + G_1 + G_2 + Pp \quad (\text{dBm}) \quad (31)$$

Donde G_1 y G_2 representan las ganancias de las antenas 1 y 2, Pp son las pérdidas por propagación, P_R y P_T indican la potencia de recepción y transmisión respectivamente, la potencia de transmisión es la diferencia entre la potencia suministrada por el generador de señales. El patrón de radiación se obtuvo para los dos planos (H y E). Para obtener el patrón en plano E, la antena se colocó sobre el matil manteniendo el alimentador vertical. El patrón en el plano H se obtiene girando la antena 90 grados con referencia el plano E, como se ven la figura 39



Figura 39. Medición del patrón de radiación (plano H).

En la figura 40, se muestran los patrones de radiación medidos tanto para el plano H como el plano E, las mediciones fueron realizadas a la frecuencia de interés 2.4 GHz.

Como se observa el comportamiento es directivo como se esperaba en una antena de apertura, se aprecian los lóbulos principales y los secundarios, con máxima radiación en los 0 grados. Se observa un ancho de haz de aproximadamente 30 grados.

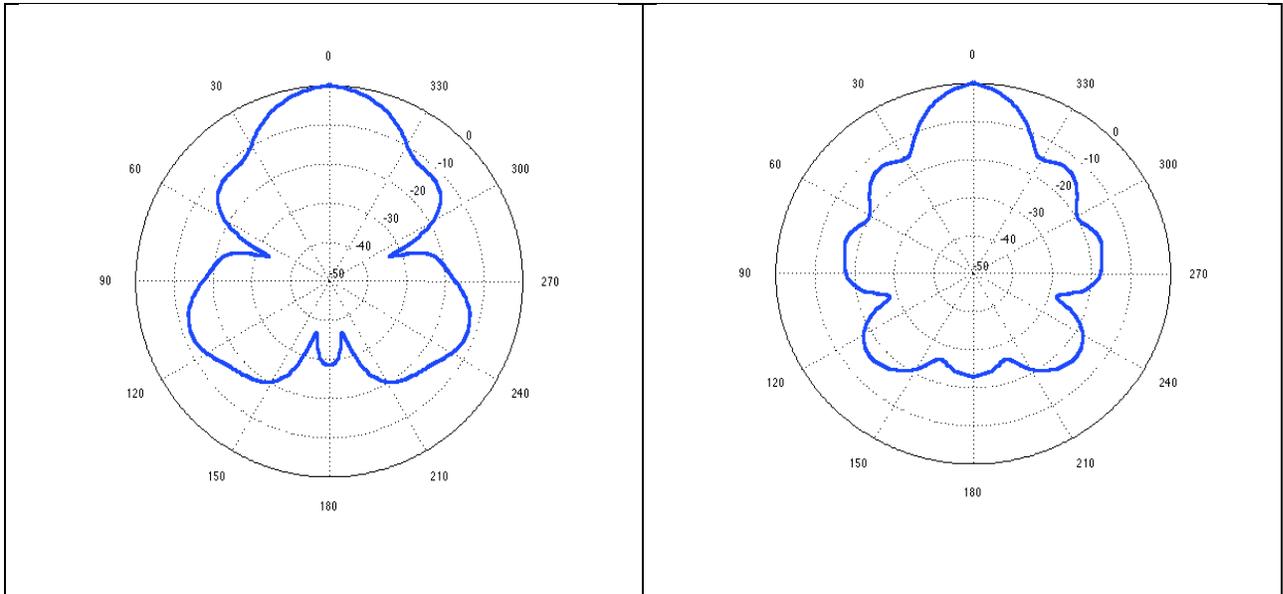


Figura 40. Patrón de radiación, plano H (izquierda), plano E (derecha).

En la figura 41 se muestra la comparación de los resultados obtenidos medidos vs teóricos. Se puede apreciar que los patrones de radiación en el plano E son bastante parecidos, existen pequeñas variaciones en el patrón teórico, esto se debe a las condiciones que se consideran ideales en el programa CST. Se observa que el haz radiado tiene un ancho aproximadamente de 30° .

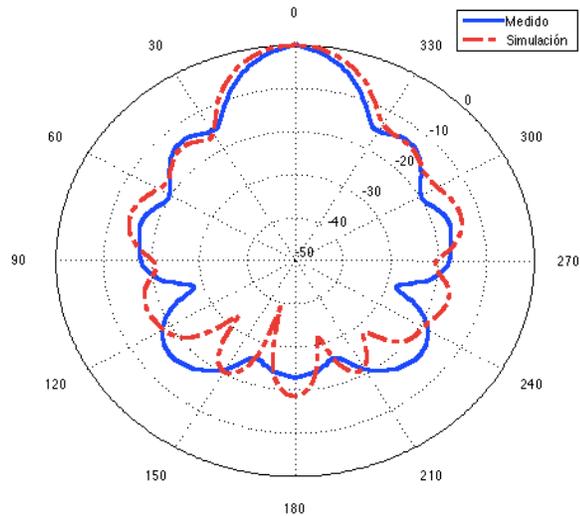


Figura 41. Representación polar de la comparación de resultados valores medidos vs teóricos del patrón de radiación en plano E.

En la figura 42, se muestra otra presentación de la comparación entre los resultados obtenidos de los patrones de radiación medidos vs teóricos. Se puede observar en la figura un comportamiento muy parecido. Se puede concluir que los resultados obtenidos en el plano E son satisfactorios.

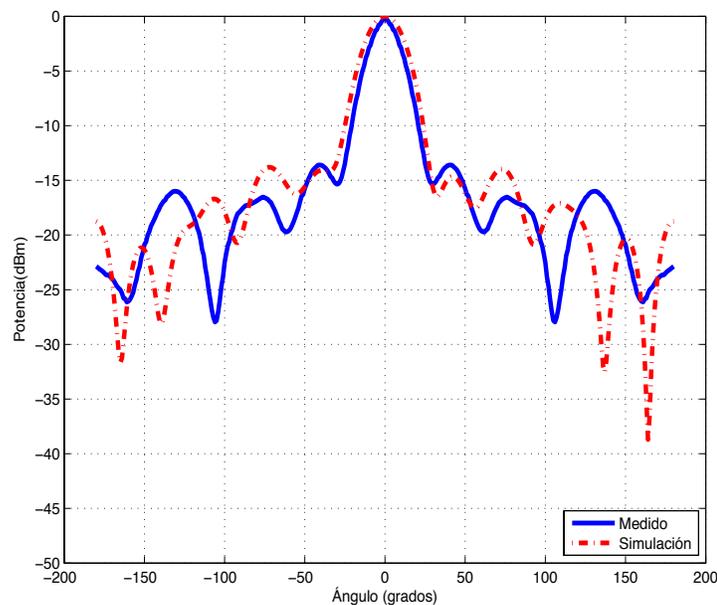


Figura 42. Representación cartesiana de la comparación de resultados medidos vs teóricos del patrón de radiación en el plano E.

En la figura 43, se presenta la comparación del patrón de radiación medido vs patrón de radiación teórico para el plano H en un gráfico polar. En los resultados obtenidos, se puede apreciar una mayor diferencia entre los patrones de radiación en este plano que los obtenidos en el plano E. Se ve que el patrón medido, presenta dos lóbulos laterales mayormente marcados que en el patrón teórico.

En la figura 44, se muestra la representación en el plano cartesiano de la comparación de resultados medidos vs teóricos entre los patrones de radiación en el plano H. En esta figura, se puede apreciar mejor los dos lóbulos laterales del patrón de radiación medido. En ambos resultados la máxima radiación ocurre en los 0° .

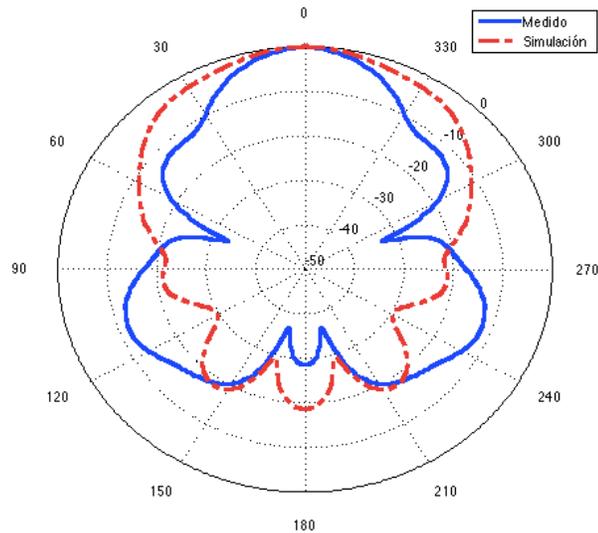


Figura 43. Representación polar de la comparación de resultados medidos vs teóricos del patrón de radiación en plano H.

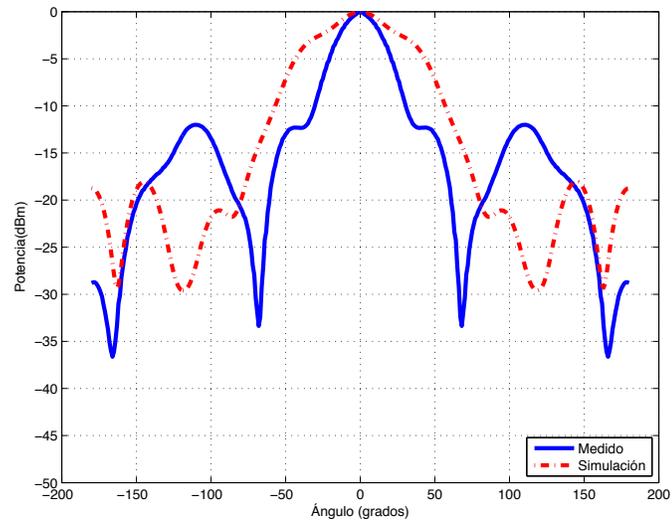


Figura 44. Representación cartesiana de la comparación de resultados medidos vs teóricos del patrón de radiación en plano H.

Capítulo 5. Resultados, análisis y discusión

5.1 Introducción

En este capítulo, se presenta el análisis de los resultados obtenidas en las etapas de diseño, construcción y caracterización eléctrica de la antena de apertura, teniendo en cuenta su aplicación biomédica como fue planteada al inicio de este trabajo.

5.2 Sobre el diseño

Como se estableció al inicio de este trabajo de tesis, uno de los requisitos que debe cumplir la antena por desarrollar, es que sea lo mas directiva posible. En este sentido, se decidió escoger el tipo de antena de apertura (corneta). Esta estructura además de ser directiva, presenta otras ventajas sobre otros tipos de antenas; como ancho de banda y ganancia, ventajas que las hacen atractivas para ser utilizadas en el desarrollo de un sistema de detección de cáncer de mama en etapa temprana. La antena desarrollada, además tener las características eléctricas deseadas, debe ser de fácil construcción y ser lo más económica posible. Este requisito se cumplió, porque en la construcción se utilizó lámina de aluminio calibre No 20, este material es económico, fácil de trabajar y se obtiene en tiendas de materiales.

En la tabla 1 presentada en el capítulo 1, se establecieron las condiciones de diseño, mismas que como se ha visto se han cumplido con éxito.

Durante la etapa de diseño, se recurrió a la herramienta de análisis paramétrico que fue utilizada para optimizar las dimensiones del monopolo del alimentador de la antena, así como también las dimensiones de la guía de onda rectangular. Como se sabe, en el espectro de altas frecuencias, una variación por pequeña que sea en las dimensiones de los elementos, puede modificar considerablemente la respuesta de la antena.

5.3 Sobre la caracterización o medición

Como se ha visto en los resultados presentados en el capítulo 4, la antena de apertura diseñada y construida, cumplió con los requisitos de diseño establecidos. La caracterización eléctrica de la antena se realizó en el laboratorio utilizando equipo especializado, se utilizaron técnicas de medición propias desarrolladas por los investigadores de CICESE. Se resolvió el problema de no contar con una cámara anecoica para obtener el patrón de radiación.

Capítulo 6. Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones generales de este trabajo, las aportaciones mas importantes del mismo, así como las recomendaciones y el trabajo futuro para esta línea de investigación.

6.1 Conclusiones generales

- Las antenas de apertura son utilizadas para aplicaciones donde se necesite tener buena directividad, por esta razón, se propuso investigar este tipo de estructuras, debido a que en la actualidad se busca mejorar día a día el sector biomédico, la ingeniería, ciencia y medicina van de la mano para este propósito.
- Se investigó la teoría de guías de onda rectangulares, sus modos de propagación, así como el diseño de las mismas que es la base del diseño de la antena construida en este trabajo.
- Se realizó la investigación de varios artículos donde se estudió la relación de la ingeniería electrónica con las ramas de la medicina, ya que es una manera de darle a la electrónica un enfoque hacia la rama biomédica teniendo cuidado del paciente sin descuidar su comodidad.
- Para el análisis electromagnético de estructuras en 3D, se concluye que la herramienta de software CST fue muy preciso y de fácil manejo, un entorno amigable e intuitivo, es algo importante de resaltar de este trabajo.
- El prototipo final de la antena de apertura, fue un diseño de buen tamaño, ligero, el cual trabajó muy bien a la frecuencia de 2.4 GHz. De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que, la antena desarrollada puede aplicarse para radiar el cuerpo humano.

6.2 Aportaciones

- Se diseñó y se construyó una antena de apertura, económica, eficiente, ligera y fácil de reproducir porque se construye con materiales de fácil adquisición.
- Se propuso el análisis paramétrico para la optimización del diseño en el simulador electromagnético CST, para mejorar el diseño.

6.3 Recomendaciones

- Se recomienda comenzar el diseño de la antena iniciando con el monopolo que sirve de alimentación a la antena, enseguida, analizar la unión de este con la guía de onda rectangular y efectuar la optimización por último agregar las aperturas para su adaptación al modo de propagación dominante.
- Se recomienda al momento de medir y caracterizar, utilizar cables coaxiales de buena calidad, delgados y de bajo ruido, para que no afecten las mediciones.
- Investigar el comportamiento de los conectores (SMA, Tipo N, etc.) para poder agregarlos y analizarlos en el simulador electromagnético CST logrando así un mejor diseño teórico.
- Se recomienda el uso del simulador CST, por su precisión y por su adaptación a estructuras en 3D, tiene una amplia gama de opciones para lograr el diseño de completo de una antena en 3D o en 2D.
- Se recomienda medir en áreas donde no exista mucha interferencia y ruido, de no contar con una cámara anecoica, para obtener el patrón de radiación, se puede realizar las mediciones en la azotea del edificio de física aplicada de CICESE a cielo abierto.
- Tener cuidado de respetar las especificaciones respecto a las medidas en los planos de fabricación de la antena, ya que pequeñas variaciones en las

dimensiones conducen a que la antena no trabaje en la frecuencia de operación deseada.

Lista de referencias bibliográficas

- Aznar, Á. C., Robert, J. R., Casals, J. M., Roca, L. J., Boris, S. B., and Bastaller, M. F. (1998). *Antenas* (Vol. 3). Universidad Politéc. de Catalunya.
- Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory Analysis and Design* (Vol. 1). John Wiley Sons
- Chávez, R. (2011). *Fundamentos de Líneas de Transmisión*. Convergente, Ed. Ensenada, Baja California, México.
- Chávez, R., Medina, J., Velázquez, A., and Olvera, J. (2008). Detección temprana de cáncer de mama utilizando tecnología de microondas. *Congreso internacional de innovación y desarrollo tecnológico*, p. 1-6.
- Chen, Z. N., Cai, A., See, T. S., and Chia, M. Y. (2005). Small planar UWB antennas in proximity of human head. *Ultra-Wideband*. ICU 2005. 2005 IEEE International Conference on p. 4.
- Collin, R. (2007). *Foundations For Microwave Engineering*. John Wiley & Sons.
- Habash, R. (2007). *Bioeffects and therapeutic applications of electromagnetic energy*. CRC press.
- Kim, J., and Rahmat-Sammi, Y. (2005). Electromagnetic Interactions between Biological Tissues and Implantable Biotelemetry Systems. *In Microwave Symposium Digest, 2005 IEEE MTT-S International* p.4
- Klemm, M., Craddock, I., Leendertz, J., Preece, A., and Benjamin, R. (2007). Breast Cancer Detection Using Symmetrical Antenna Array. *In Antennas and Propagation, 2007. EuCAP 2007. The Second European Conference on p. 1-5*. IET.
- Kraus, J. D. (1988). *Antennas*. McGraw-Hill, Ed.
- Liu, Y., and Gong, S. (2010). Design of a Compact Broadband Double-Ridged Horn Antenna. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 24(5-6), 765-774.
- Medina, J., Diaz, E., Olvera, J., Chávez, R., y Velázquez, A. (2008). Análisis y comparación de metodologías para determinar experimentalmente la ganancia de antenas de RF y microondas. *Simposio de Metrología CENAM*.
- Pacheco, R. (2015). *Diseño y construcción de antenas planares de múltiple resonancia con aplicación en sistemas de microondas*. Tesis de Maestría, Ensenada, Baja California, México.
- Pozar, D. M. (2009). *Microwave Engineering*. John Wiley & Sons.
- Pride, J. M., de Lorenzo, E., y Vera, M. (2003). Estudio de características de dispersión de tumores de mama mediante microondas. *Actas del Symposium Ursi*.

- Ruvio, G., Solimene, R., and Ammann, M. J. (2010). Evaluation of Antenna Types for RF Breast Cancer Imaging using 2-Layer Planar Tissue Model. *In Microwave Conference (EuMC), 2010 European p. 212-215*. IEEE.
- Sadiku, M. N. (1998). *Elementos de electromagnetismo*. Alfaomega, Ed
- Shannon, C., Fear, E., and Okoniewski, M. (2005). Dielectric-filled slotline bowtie antenna for breast cancer detection. *Electronics Letters, 41(7), 388-390*.
- Sil, J., & Fear, E. (2005). Tissue Sensing Adaptive Radar for breast cancer detection: preliminary experimental result. *In Microwave Symposium Digest, 2005 IEEE MTT-S International p. 4*. IEEE.
- Stutzman, W. L., and Thiele, G. A. (2002). *Antenna Theory and Design*. John Wiley y Sons.
- Sugitani, T., Kubota, S., Toya, A., and Kikkawa, T. (2012). Compact Planar UWB Antenna Array for Breast Cancer Detection. *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2012 IEEE p. 1-2*.
- Sugitani, T., Kubota, S., Toya, A., Xiao, X., and Kikkawa, T. (2013). A compact 4x4 planar UWB Antenna Array for 3-D Breast Cancer Detection. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, 12, 733-736*.
- William, H. (1991). *Teoría Electromagnética*. McGraw-Hill, Ed.
- Yang, F., and Mohan, A. S. (2012). Microwave Imaging for Breast Cancer Detection using Vivaldi Antenna Array. *Proceedings of ISAP 2012, 2, 3*.
- Yin, D. X., Li, M., and Li, J. L. (2012). Non-invasive Breast Cancer Thermotherapy Studies Using Conformal Microstrip Antennas. *Antennas, Propagation & EM Theory (ISAPE), 2012 10th International Symposium on p. 159-162*. IEEE.