



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

---

FACULTAD DE CIENCIAS LA ELECTRÓNICA

TÍTULO DE TESIS

ANTENAS EN SUSTRATOS TEXTILES PARA  
APLICACIONES EN ELECTRÓNICA VESTIBLE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LIC. EN ELECTRÓNICA

PRESENTA:

EMMANUEL JAVIER TOBÓN RAMÍREZ



**FCE**

Facultad de Ciencias  
de la Electrónica

ASESORES:

DR. RICHARD TORREALBA MELÉNDEZ

M.C. EDNA ILIANA TAMARIZ FLORES

PUEBLA, PUEBLA, 2021

## **Agradecimientos**

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en momentos de debilidad, por brindarme la vida llena de aprendizajes, momentos de superación, de experiencias, de salir adelante bajo la adversidad de momentos complicados en la vida, pero sobre todo de felicidad.

Le doy gracias a mi madre por estar en todo momento por apoyarme en cada situación y ser mi eje de fuerza, de motivación, de compañía, de amor, por los valores que me ha inculcado y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo, por ser un gran ejemplo de vida a seguir manteniendo la ideología de respeto, constancia, entendimiento y amor.

A mi hermano Ricardo por llenar mi vida de alegrías y amor cuando más lo he necesitado, a mi hermana Laura por ser un ejemplo de superación personal y mental, por ser pilar de fortaleza en situaciones caóticas, a mi hermana Norma por el apoyo otorgado cada momento, por ser un ejemplo de amor, de metas y de unión entre hermanos, a ellos que son esos amigos que no tuve que escoger y que están presentes en mi vida desde el primer momento y para siempre.

A mi tío Héctor por ser una pieza importante en mi vida y clave en mi decisión profesional, por haberme apoyado en las buenas y en las malas, por estar siempre allí tendiéndome la mano cuando lo he necesitado, por todo lo que ha hecho por mí y que estaré eternamente agradecido por su buena voluntad.

Agradezco a él MC Enrique de la Fuente Morales por ser una pieza importante de motivación constante para lograr mis objetivos, apoyándome en las decisiones tomadas a lo largo de la

carrera y siempre tener tiempo para hablar conmigo, ayudarme en las problemáticas que como estudiante llegue a tener y que con gran carisma y docencia estaba para mí.

Le agradezco la confianza, apoyo y dedicación de tiempo a mis profesores, que me impulsaron dentro de la carrera y motivaron en cada oportunidad, que cultivaron conocimientos y experiencias en mi persona y que recordare a lo largo del tiempo.

Gracias a mis asesores Dr. Richard Torrealba Meléndez, MC Edna Iliana Tamariz Flores por confiar en mí y haberme dado la oportunidad de desarrollar la tesis en el Laboratorio de Microondas, por todo el apoyo y facilidades que me otorgaron dentro del mismo, por todo su tiempo y paciencia.

A mis amigos del alma que me ayudaron en todo momento, a Ciro por las asesorías dadas y las ganas de compartir su conocimiento, a Omar Contreras por ser ese amigo siempre fiel que está en la buenas y malas, por siempre brindarme su compañía y paciencia.

Emmanuel J Tobón Ramírez

## **Dedicatoria**

Especial dedicación de esta tesis a mi madre, pues sin ella no se habría logrado. Tu bendición madre mía a lo largo de mi vida me cuida y me lleva por el buen camino. Por eso te dedico este trabajo en ofrenda por tus valores, paciencia y amor de madre, te amo mucho.

# Índice

## Contenido

Capítulo 1. ....	1
Introducción. ....	1
1.1 Marco Histórico ..... 1	1
1.2 Justificación. .... 3	3
1.3 Objetivo ..... 5	5
1.3.1 Objetivos específicos..... 5	5
1.4 Metodología ..... 6	6
1.5 Organización de la tesis..... 8	8
Capítulo 2. ....	9
Teoría de Sustrato y Antenas ..... 9	9
2.1 Introducción _Caracterización del Sustrato Textil ..... 9	9
2.2 Efectos del Sustrato..... 10	10
2.3 Técnica de Caracterización mediante Coaxial Abierto ..... 11	11
2.4 Sustrato Textil..... 11	11
2.5 Antenas..... 13	13
2.6 Tipos de Antenas ..... 14	14
2.6.1 Antenas Dipolo ..... 14	14
2.6.2 Antenas Yagi ..... 15	15
2.6.3 Antenas Panel Plano ( <i>Flat Panel</i> ) ..... 16	16
2.6.4 Antenas Parabólicas (Plato Parabólico)..... 16	16
2.6.5 Antenas de Ranura ..... 17	17
2.6.6 Antenas Microcinta ..... 18	18
2.6.7 Stripline ..... 19	19
2.6.8 Antenas Tipo Parche..... 19	19
2.7 Clasificación según su funcionamiento ..... 21	21
2.8 Parámetros de las antenas ..... 21	21
2.8.1 Principio de radiación de una antena ..... 21	21
2.8.2 Mecanismos de Radiación..... 23	23
2.8.3 Forma de Operación de una Antena ..... 23	23
2.8.4 Patrón de Radiación o Diagrama de Radiación ..... 26	26
2.8.5 Impedancia ..... 29	29
2.8.6 Directividad ..... 30	30

2.8.7 Eficiencia de la Antena .....	30
2.8.8 Ganancia de potencia.....	31
2.8.9 Polarización .....	31
2.8.10 Ancho de Banda .....	31
2.8.11 Parámetros S .....	32
2.9 Conclusiones.....	35
Capítulo 3. ....	36
Antena de Microcinta.....	36
3.1 Introducción .....	36
3.2 Características .....	36
3.3 Métodos de Análisis .....	37
3.4 Modelo de línea de trasmisión.....	38
3.5 Métodos de alimentación de antenas de tipo parche .....	40
3.6 Conclusión .....	41
Capítulo 4. ....	42
Diseño y simulación de las Antenas .....	42
4.1 Introducción .....	42
4.2 Antena para 2.45 GHz .....	43
4.2.1 Diseño de la antena de tipo parche .....	43
4.2.2 Construcción de la antena de parche.....	46
4.3 Caracterización por medio de VNA antena parche .....	49
4.4 Resultados de las pérdidas por Retorno antena parche .....	50
4.5 Diagramas 3D de la antena tipo parche .....	51
4.6 Antena dual para 2.4 GHz y 5.5 GHz .....	53
Capítulo 5. ....	59
Conclusiones y trabajo a futuro .....	59
5.1 Sobre el S11.....	60
5.2 Sobre la Ganancia.....	61
5.3 Sobre el sustrato .....	61
5.4 Sobre el equipo .....	62
5.5 Sobre los diagramas de radiación 3D .....	62
5.6 Trabajo a Futuro .....	62
Bibliografía. ....	64

## Índice de Figuras

Fig. 2.1 Técnica <i>Open - Ended</i> .....	11
Fig. 2.2 Constante dieléctrica .....	12
Fig. 2.3 Antena Dipolo .....	14
Fig. 2.4 Radiación de una Antena Dipolo [26] .....	15
Fig. 2.5 Esquema de una Antena Yagi .....	16
Fig. 2.6 Antena panel plano [28] .....	16
Fig. 2.7 Antena parabólica.....	17
Fig. 2.8 Antena de Ranura .....	18
Fig. 2.9 Antenas de Microcinta.....	18
Fig. 2.10 Antenas Microcinta.....	19
Fig. 2.11 Estructura de una antena tipo parche.....	20
Fig. 2.12 Secuencia de Radiación [35] .....	22
Fig. 2.13 Representación de los tipos de construcciones resonantes .....	23
Fig. 2.14 Radiación de una línea de transmisión al espacio libre.....	24
Fig. 2.15 Representación de una distribución uniforme de carga en un área de sección transversal de un cilindro.....	24
Fig. 2.16 Modelo de una línea transmisión y carga.....	276
Fig. 2.17 Representación de un patrón de radiación en coordenadas polares [36] .....	27
Fig. 2.18 Diagrama de Radiación en coordenadas polares / coordenadas cartesianas [36].....	28
Fig. 2.19 Diagrama de Radiación isotrópico, omnidireccional y directivo .....	29
Fig. 2.20 Red de dos puertos .....	33
Fig. 3.1 Alimentación con sonda de coaxial y línea de microcinta.....	41
Fig. 4.1 Diseño de la antena rectangular.....	44
Fig. 4.2 Parámetro S11 (Coeficiente de Reflexión) de la antena de parche de 2.45GHz con alimentación directa .....	45
Fig. 4.3 Distribución de corriente antena diseñada .....	46
Fig. 4.4 Plano de tierra colocado sobre el sustrato (izq), parche aun en su hoja de cinta (der).....	47
Fig. 4.5 Colocación del parche sobre el sustrato, centrado con ayuda de hojas adheribles y corroboración con una regla del centrado del parche.....	47
Fig. 4.6 Sonda coaxial soldada a) en plano de tierra b) en el parche .....	48
Fig. 4.7 Resultado final de la construcción.....	48
Fig. 4.8 Conexión a el VNA .....	49

Fig. 4.9 Parámetro S11 medido por el VNA.....	50
Fig. 4.10 Comparación Parámetro S11 .....	501
Fig. 4.11 Mapa de radiación para la antena parche.....	52
Fig. 4.12 Mapa de radiación sobre la antena parche .....	52
Fig. 4.13 Diseño de la antena Monopolo planar en forma de U .....	54
Fig. 4.14 Distribución de corriente a) Operación 2.4GHz b) Operación 5.5GHz .....	55
Fig. 4.15 Resultados parámetro S11 antena Monopolo planar en forma de U .....	56
Fig. 4.16 Mapa de radiación para la antena Monopolo planar en forma de U frecuencia 2.4 GHz .	57
Fig. 4.17 Mapa de radiación sobre la monopolo planar en forma de U frecuencia 2.4 GHz .....	57
Fig. 4.18 Mapa de radiación para la antena Monopolo planar en forma de U frecuencia 5.5 GHz .	58
Fig. 4.19 Mapa de radiación vistas para la antena Monopolo planar en forma de U frecuencia 5.5 GHz GHz.....	58
Fig. 4.20 Mapa de radiación sobre la antena monopolo planar en forma de U frecuencia 5.5 GHz	58

## Índice de Tablas

Tab. 2.1.....	12
Tab. 4.1.....	55

## Resumen

En esta tesis se presenta la investigación y estudio sobre las antenas de parche de microcinta, así como de las propiedades dieléctricas en sustratos textiles para lograr el desarrollo, el diseño, simulación y la fabricación de una antena de parche en sustrato textil flexible que opera en la banda 2.45 GHz, para esto se caracterizó el sustrato textil a utilizar de dicha antena el cual funciona para la transmisión y recepción de manera simultánea. En el análisis de los resultados obtenidos se muestran las distribuciones de corriente sobre la antena propuesta. Además, se muestra el diseño y la simulación de la antena tipo parche a través de un análisis paramétrico de sus componentes, se incluyen los resultados simulados de la antena mediante el software de simulación HFSS (*High Frequency Structure Simulator*), los parámetros obtenidos mediante simulación son: coeficiente de reflexión, ganancia y diagramas de radiación en tres dimensiones. También, se muestran las mediciones del coeficiente de reflexión obtenidas con ayuda de un Analizador Vectorial de Redes (VNA, Vector Network Analyzer).

Posterior a ello se efectúa el diseño y simulación de una antena monopolo planar en forma de U el cual trabaja en dos bandas principales de operación: 2.4 GHz y 5.5 GHz para la transmisión y recepción de manera simultánea para sistemas WLAN (*Wireless Local Area Network*) siguiendo el estándar 802.11, el análisis de este diseño y simulación se presentan en el software HFSS para conocer el grado de efectividad al trabajar en doble banda por medio de las pérdidas por retorno (Parámetros S11) para las correspondientes frecuencias.

# Capítulo 1.

## Introducción.

### 1.1 Marco Histórico

Hoy en día los sistemas de comunicación portátil son un área de rápido crecimiento, y un tema con un gran campo de investigación. El desarrollo de la tecnología ha logrado niveles nunca antes vistos donde no solo los teléfonos móviles han conseguido un alto nivel de evolución, sino que además se han desarrollado investigación e innovación para dispositivos que se integren a nuestro cuerpo para realizar funciones novedosas e innovadoras, todas ellas trabajando en conjunto con el concepto llamado tecnología vestible (*wearable technology*). La tecnología vestible corresponde a todo aquel sistema o dispositivo electrónico capaz de adquirir, procesar y almacenar datos y que ha sido integrado a la vestimenta o accesorios que una persona utiliza entorno a su cuerpo. Algunos ejemplos de dispositivos electrónicos vestibles (*wearable device*) pueden ser: lentes, relojes, zapatos, pulseras, gorras, chamarras, camisas. Generalmente los dispositivos vestibles se comunican con otros dispositivos, incluso con el desarrollo del Internet de las cosas (IoT) estos dispositivos se conectan a Internet, con el objetivo de transmitir, analizar y compartir información [2]. Por ejemplo, una pulsera para monitorear la actividad física de una persona mediante la detección de patrones de sueño, calorías quemadas, al desarrollar una actividad física, ritmo cardiaco y temperatura, envía los datos obtenidos a un teléfono inteligente o a la nube por Internet o por correo electrónico al médico que lo supervisa. Otro ejemplo es la

chamarra inteligente para corredores, desarrollada por la UNAM *mobile* [3], vestible capaz de registrar datos como la temperatura corporal, ritmo cardiaco, calorías y recorrido, entre otras funciones por lo cual, teniendo toda esta información, las antenas textiles juegan un papel clave en la implementación de las comunicaciones inalámbricas en la electrónica vestible [3]. Las bandas de frecuencia utilizadas más utilizadas para aplicaciones vestibles son frecuencias ISM por sus siglas en inglés *Industrial, Scientific and Medical*, en específico las frecuencias de 2.4 GHz y 5.5 GHz. Estas frecuencias se utilizan para diversos estándares y aplicaciones como el WiFi. Los protocolos de red inalámbrica más empleados son los del estándar IEEE 802.11, que se encuentran incluidos en todas las computadoras portátiles, tabletas, impresoras y teléfonos celulares.

En un futuro cercano, es probable que una persona lleve una gran gama de equipos y sensores, incluyendo sensores médicos que continuamente se comunicarán entre sí y con el mundo exterior, una tecnología clave para alcanzar este objetivo es vestir la electrónica y las antenas textiles [6]. La ropa inteligente se usará en múltiples emergencias, trajes de trabajadores médicos, militares, aplicaciones espaciales, deportes y así sucesivamente, la capacidad de establecer enlace de comunicación inalámbrica es un requisito esencial para la ropa inteligente [7]. El desarrollo de la electrónica vestible permite desarrollar investigación sobre el diseño de antenas sobre materia textil [1]. Por lo anterior las antenas textiles tienen potenciales y novedosas aplicaciones como: la atención médica, militar, deporte, bomberos, paramédicos y aplicaciones de seguridad.

## 1.2 Justificación.

Esta tesis se deriva debido a la gran evolución que están experimentando los sistemas de comunicaciones inalámbricas que emplean la banda ISM de 2.45Ghz y el desarrollo de la electrónica vestible, con esto surge la necesidad de realizar antenas en sustratos textiles que satisfagan los requerimientos de operación bajo condiciones de portabilidad e integración al cuerpo humano. Además, el uso de las frecuencias dentro de las bandas ISM, que son las bandas de radio reservadas para el desarrollo de investigación y experimentación para fines industriales, médicos y científicos, permite desarrollar diseños de antenas en sustratos textiles que se usen en dichas bandas. En la actualidad hay novedosos y diversos diseños de antenas de microcinta, esto debido a que se pueden integrar a diversos sistemas, tienen peso ligero, son flexible, y son de bajo costo [8-9]. Las antenas que han recibido gran atención por parte de investigadores, ya que su implementación y realización suelen ser muy prácticas, a pesar de los avances que se tiene en este tipo de antenas por lo general las propuestas presentan un ancho de banda limitado. A las antenas de microcinta se les conoce también como antenas de parche, esto debido a que los elementos radiantes y las líneas de alimentación están normalmente depositadas sobre un sustrato dieléctrico. Por ello, las antenas diseñadas en sustratos flexibles se han convertido en una tecnología novedosa para su aplicación en las tarjetas de radiofrecuencia (RFID), en sistemas múltiples de comunicación móviles (*gadgets*), en ropa inteligente y sistemas electrónicos vestibles. Además, han generado un gran interés en nuevas aplicaciones como lo son en las redes inalámbricas de sensores, aplicaciones de salud inteligente, el monitoreo de construcciones, y en la integración en sistemas satelitales. En general, el requisito principal para la antena portátil se basa en materiales textiles y de integrar en la ropa inteligente. Convencionalmente la antena textil

portátil debe proporcionar la frecuencia de operación requerida y ancho de banda. Al mismo tiempo estas antenas tienen que guardar los patrones de radiación omnidireccionales [10-11]. Las antenas integradas en la ropa son un gran campo de investigación sobre todo porque pueden utilizar elementos conductores que ya están en la ropa, como el tejido textil con las que están elaboradas para comprender el impacto que estas tendrían a colocarles dispositivos adicionales. La antena es un factor importante para la transmisión de información y para la aplicación que se vaya a desarrollar. Por lo tanto, para aplicaciones específicas, tales como WiFi deben ser de peso ligero, bajo costo, tamaño compacto, flexible, suave características cómodas y de banda dual o ancho de banda considerable con diagramas de radiación omnidireccional, sin embargo, este tipo de electrónicos tienen que cumplir requisitos especiales relativos a la portabilidad. La discusión sobre antenas textiles para sistemas de WLAN IEEE 802.11 siguiendo las normas de funcionamiento para 2,4 GHz (2,40 GHz a 2,5 GHz) ha permitido obtener diferentes estudios sobre sustratos de antenas con permitividad eléctrica aceptable para el funcionamiento sobre el cuerpo humano tal es el caso de sustratos como denim-mezclilla 100% de algodón (algunos denim vienen compuestos con elastano), fieltro (elaborado con fibras de lana), lycra (elastano, lycra o spandex es una fibra sintética 82% poliéster / 18% elastán ) [16-18]. Por lo tanto, las antenas textiles portátiles se han convertido en el foco de muchos esfuerzos de investigación de la antena debido a su flexibilidad, durabilidad y la idoneidad para diversas aplicaciones [12]. Es importante concentrarse en las propiedades textiles, que afecten las propiedades de radiación de la antena [13].

La distinción principal de una antena de parche flexible de una antena de parche en sustrato rígido es que el sustrato de la antena flexible puede estar hecho de polímeros o de

tejidos textiles, la tela textil con una baja constante dieléctrica o permitividad relativa, la cual puede reducir la pérdida de onda en la superficie, que se ata a la propagación de ondas guiadas dentro del sustrato, como consecuencia, esto mejorará el ancho de banda de impedancia [14].

Para cualquier antena portátil, se requiere mayor ancho de banda de impedancia para tener una mayor tolerancia para hacer frente a una frecuencia de resonancia “ $f_r$ ”, la cual cambia debido a los cambios de forma y medio ambiente [15].

Por tal motivo en esta tesis se estudian las antenas sobre sustratos textiles, principalmente en sustratos de algodón para electrónica vestible. El diseño y simulación de las antenas a realizar se centran en las frecuencias 2.4 GHz y 5.5GHz, las cuales son idóneas para trabajar en la banda de frecuencia ISM para usos en protocolos WLAN 802.11.

## **1.3 Objetivo.**

Diseñar antenas sobre sustrato textil para aplicaciones de electrónica vestible.

### **1.3.1 Objetivos específicos**

- Estudiar los parámetros de las antenas
- Estudiar las propiedades dieléctricas del material textil
- Diseñar una antena de parche de microcinta a 2.45GHz
- Fabricar una antena de parche de microcinta en sustrato textil y caracterizarla mediante la medición de su coeficiente de reflexión
- Diseñar y simular una antena textil del tipo Monopolo planar dual en forma de U con operación multibanda.

- Mediante la simulación se obtendrán, para ambas antenas, los coeficientes de reflexión y los diagramas de radiación 3D

## 1.4 Metodología

En la presente tesis se desarrolla en primer lugar una intensa investigación de las antenas de parche de microcinta en materiales textiles y un análisis de la funcionabilidad de estas en diferentes campos o áreas aplicables. Posteriormente se realizará la caracterización de los sustratos para determinar el uso de uno de ellos para saber cuál tendrá mejores resultados en la implementación de nuestra antena de tipo parche, para ello deberemos conocer la permitividad eléctrica de dicho sustrato, una vez conociendo esta información se realizó el diseño y la simulación de la antena de microcinta a una frecuencia de 2.45GHz apoyado del software HFSS (*High Frequency Structural Simulator*) para que derivado de ello se obtuvieran los parámetros principales: coeficiente de reflexión, ganancia y diagramas de radiación en tres dimensiones.

La antena diseñada en la primera etapa es una antena de microcinta en sustrato textil Dim 100% algodón a una frecuencia establecida de 2.45GHz fabricada en un adhesivo de cobre el cual es diseñado previamente en el software HFSS para posteriormente ser cortado sobre la cinta de cobre y se pueda integrar al sustrato textil, para este caso en particular la mezclilla (DIM) de algodón se caracterizó en el laboratorio con ayuda del VNA (*Vector Network Analyzer*) por medio de la técnica de Coaxial abierto (*Open - Ended*). Una vez teniendo toda la información necesaria y el diseño, se construyó la antena para proceder a la caracterización de ésta por medio de su coeficiente de reflexión, realizando la medición de su coeficiente de

reflexión (parámetro S11) el cual se comparó con los resultados proporcionados por el simulador.

Una vez realizada esta etapa se realizó el diseño de una segunda antena la cual solo se simuló para entendimientos de funcionalidad. Al trabajar ahora con dos bandas de operación, se procedió a la realización del siguiente diseño y simulación, el cual tiene las propiedades de trabajar en multibanda siendo esta una antena de tipo Monopolo planar dual en forma de U, conociendo de esta manera las frecuencias deseadas las cuales son 2.4GHz y 5.5GHz a la que será capaz de trabajar adecuadamente para sistemas WLAN (Wireless Local Área Network) siguiendo el protocolo 802.11, mejor conocida como WiFi.

Finalmente, se realizó el análisis de la primera antena comparando los resultados obtenidos del simulador HFSS y de la construcción proporcionados por el VNA. Una vez terminada la primera etapa, se analizó el diseño de la segunda antena, la cual es Monopolo planar en forma de U y se revisaron los resultados otorgados por el software para analizar la funcionalidad de una antena que trabaja en doble banda de operación y la cual tiene funcionalidad en sistemas WLAN.

## **1.5 Organización de la tesis**

*Capítulo 1.* En este capítulo se muestran las características del trabajo de tesis, la justificación del trabajo a realizar y una introducción de las antenas en sustratos textiles y sus aplicaciones. Por último, se plantean los modelos de las antenas propuestas.

*Capítulo 2.* En este capítulo se presenta la caracterización del sustrato textil y su funcionalidad, la definición de una antena, se presentan los tipos de antenas más comunes, su clasificación y se realiza un repaso de las características principales, así como de sus parámetros más importantes y propiedades.

*Capítulo 3.* En el tercer capítulo se habla de las antenas de tipo parche, sus posibles aplicaciones, se presentan sus componentes principales, se realiza un esquema de los diseños y de la construcción de la antena de microcinta. Por último, se presentan las conclusiones correspondientes a lo hablado en esta sección.

*Capítulo 4.* En este capítulo se presentan los análisis y resultados obtenidos en el diseño y simulación de las antenas. En el caso de la antena tipo parche se comparan los resultados obtenidos en la simulación del software con los resultados obtenidos con ayuda del VNA.

## Capítulo 2.

### Teoría de Sustrato y Antenas

#### 2.1 Introducción

##### Caracterización del Sustrato Textil

Las antenas diseñadas sobre sustratos textiles deben ser discretas, ligeras y para realizar su integración en dispositivos vestibles. Lo anterior se puede lograr utilizando antenas microcinta sobre sustratos flexibles, como son los sustratos textiles.

Cuando se diseñan antenas de microcinta, se emplean sustratos de los cuales previamente se conoce su permitividad y sus pérdidas tangenciales, ya que estas son aportadas por los fabricantes. Sin embargo, para los sustratos textiles el fabricante no proporciona la información de las propiedades dieléctricas del material, Por tal razón es necesario realizar una caracterización del sustrato textil en frecuencias de microondas, para obtener mediante una caracterización experimental las propiedades dieléctricas del material textil donde se diseñará la antena.

La caracterización de materiales mediante la obtención de sus propiedades dieléctricas en frecuencias de microondas se puede realizar aplicando diferentes técnicas, de las cuales destacan las siguientes:

- Cavidades Resonantes
- Métodos de Trasmisión - Reflexión
- Técnicas de Espacio Libre
- Técnicas Basadas en Líneas TFMSL (*Thin Film Microcinta Line*)
- Sonda Coaxial Abierta (*Open - Ended*)

Es importante mencionar que no todos los métodos son apropiados para la caracterización de sustratos textiles.

Por ejemplo, los métodos de Transmisión – Reflexión y algunos métodos de cavidades resonantes, son técnicas que suelen implementar utilizando secciones de guía circular, rectangular, etc. La desventaja de estas técnicas es que la muestra bajo inspección debe tener la forma de la guía, con la finalidad de reducir los espacios de aire entre muestra y guía que pueda generar errores en las medidas. Estos métodos no son empleados para caracterizar materiales textiles ya que, al ser flexibles, es muy difícil eliminar los espacios de aire [20]. Por lo cual para la caracterización del sustrato textil se ocupó la técnica de cable coaxial terminada en circuito abierto *Open - Ended*.

## **2.2 Efectos del Sustrato**

Los sustratos dieléctricos usados en la ingeniería de microondas tiene tres propiedades importantes que afectan el diseño de los circuitos y sistemas de microondas:

***El grosor:*** En el diseño de antenas, el aumento del grosor produce mejoras en la eficiencia de radiación de la antena, por otro lado, el aumento del grosor genera un incremento de las pérdidas en el dieléctrico, así como un incremento de las ondas de superficie [22].

***La constante dieléctrica:*** Con bajas constantes dieléctricas, cercanas a un valor de 3, se logran mejoras en la eficiencia de radiación, reducción en las pérdidas en el dieléctrico y una disminución en las ondas de superficie [22].

**Tangente de Pérdidas:** La tangente de pérdidas se representa, en este caso; como el inverso del factor de calidad, Q, mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{2\pi * \text{energía almacenada en la cavidad}}{\text{Pérdida de energía por ciclo}} \quad 2.1$$

Por lo tanto, la tangente de pérdidas queda expresada de la siguiente forma:

$$\tan(\delta) = \frac{1}{Q} \quad 2.2$$

### 2.3 Técnica de Caracterización mediante Coaxial Abierto

Esta técnica permite obtener mediante mediciones la permitividad del material bajo inspección. Una sonda coaxial abierta es utilizada como elemento de prueba, en conjunto con analizador de redes vectoriales. La sonda se conecta al VNA mediante un cable coaxial. Las mediciones se recolectan en una computadora para realizar el procesamiento y obtener la permitividad del material [21]. En la Fig. 2.1 se puede observar el método de Coaxial Abierto *Open – Ended*. Estos dispositivos pertenecen a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y han sido empleados para la caracterización del sustrato textil.

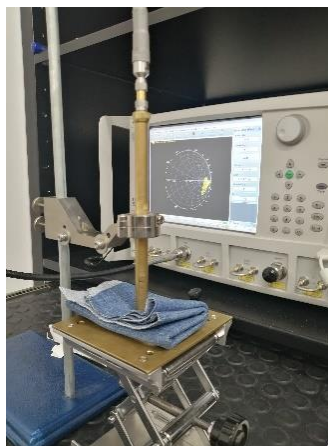


Fig. 2.1 Técnica *Open - Ended*

## 2.4 Sustrato Textil

El sustrato textil empleado y determinado para la realización de la antena es un DIM 100% de algodón, es flexible, reciclable y biodegradable.

Las características de este textil se pueden observar en la figura 2.2 y en la tabla 2.1 se colocan los valores para la frecuencia de 2.45 GHz.

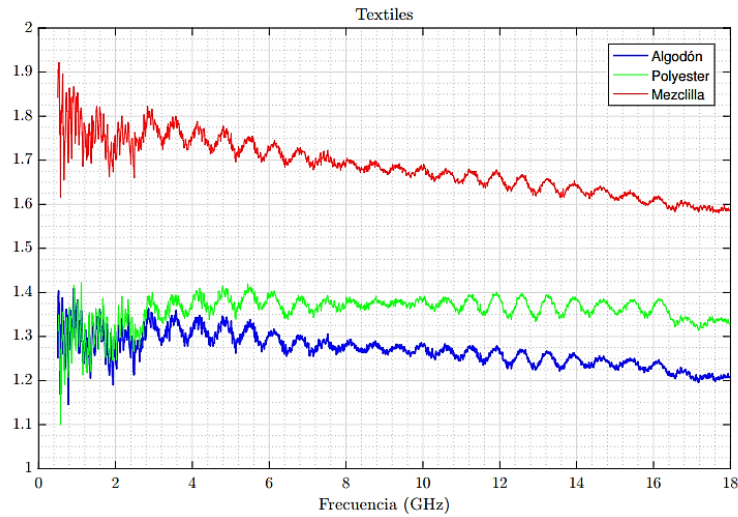


Fig. 2.2 Constante dieléctrica

Tabla 2.1 Características Dim

Sustrato	Tangente de pérdidas ( $\tan \delta$ )	Permitividad ( $\epsilon_r$ )	Grosor (mm)	Frecuencia GHz
DIM	0.002	1.7	0.10	2.45

## 2.5 Antenas

Existen diversos tipos de antenas, dependiendo la aplicación o el sistema será como se defina la estructura y geometría de la antena y se escoja la más apropiada para los sistemas de comunicaciones inalámbricas.

Las antenas son capaces de emitir señales, sin la necesidad de tener un medio físico guiado.

Una antena, según el diccionario *Webster*, es definida como “un dispositivo metálico para la radiación o la recepción de ondas de radio”. Asimismo, la definición por parte de la IEEE se refiere a una antena como “un objeto para radiación o recepción de ondas de radio” [22].

Con lo anterior se determina que una antena es un elemento conductor con la capacidad de emitir y recibir ondas electromagnéticas y son elementos que poseen un solo puerto de conexión. En otras palabras, se dice que una antena es un dispositivo que realiza la transición entre un medio guiado y el espacio libre, y viceversa [23].

Las antenas es que son un dispositivo pasivo y recíproco; pasivo porque no genera una ganancia de amplificación de la señal, y recíproco porque sus características de transmisión y recepción son casi idénticas.

## 2.6 Tipos de Antenas

Dentro de las antenas existen diferentes tipos de antenas, a continuación, se listan los más destacados:

- Antena Dipolo
- Antenas tipo Yagi
- Antenas de Panel Plano (*Flat Panel*)
- Antenas Parabólicas
- Antenas de Ranura
- Antenas Microcinta
- Antenas Parche

### 2.6.1 Antenas Dipolo

Las antenas dipolo consisten en un alambre conductor de media longitud de onda a la frecuencia de resonancia, dividido a la mitad, en cuyo centro se coloca el generador o una línea de transmisión como se observa en la figura 2.3

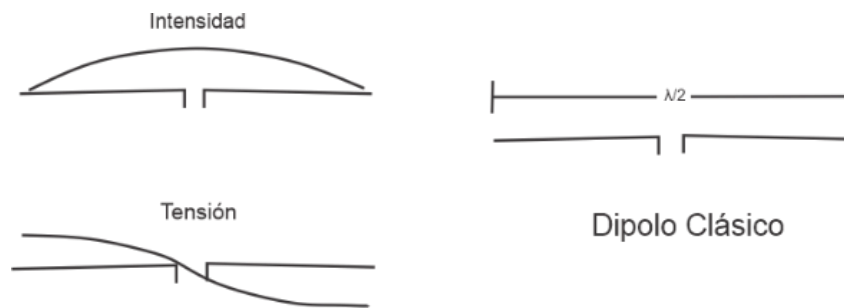


Fig. 2.3 Antena Dipolo

La radiación de un dipolo se presenta en la Figura 2.4, es un plano perpendicular a la dirección del dipolo. El dipolo tiene una radiación omnidireccional: mientras que en el plano del dipolo radia con un máximo en la dirección perpendicular al alambre y un mínimo en la dirección del alambre [25-26].

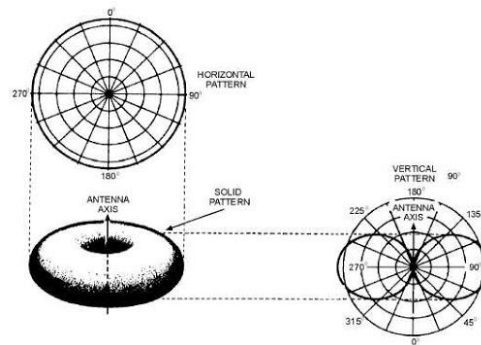


Fig. 2.4 Radiación de una Antena Dipolo [26]

## 2.6.2 Antenas Yagi

Son usadas en Televisión Digital Terrestre (TDT) y Frecuencia Modulada (FM) como antenas receptoras o para radioenlaces, aunque la mayor parte de Yagis que se observan en los techos de las casas son antenas para sintonizar canales de TV. Estas antenas están conformadas por varios elementos. El contar con varios elementos hace que estas antenas sean directivas, ya que los elementos de la antena adicionales tienen como función dirigir la señal hacia un solo punto; otra ventaja de estas antenas es que su ganancia que aumenta con estos elementos. En las antenas Yagi, al tener un mayor número de elementos, se incrementa la ganancia y la directividad de esta. A pesar de que las antenas Yagis son direccionales estas no alcanzan la directividad de las antenas parabólicas, pero si son más directivas que las antenas de tipo panel [27]. Ver figura 2.5

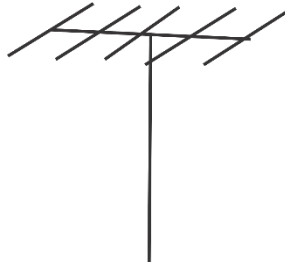


Fig. 2.5 Esquema de una Antena Yagi

### 2.6.3 Antenas Panel Plano (*Flat Panel*)

La Figura 2.6, muestra una antena de panel plano, estas están constituidas por un panel de forma cuadrada o rectangular y están configuradas por antenas o arreglos de antenas de tipo parche [28].



Fig. 2.6 Antena panel plano [28]

Las antenas de panel plano son altamente direccionales ya que el mayor porcentaje de su potencia radiada es en una dirección específica, y pueden ser diseñadas con diferentes valores de ganancia de acuerdo con su geometría.

### 2.6.4 Antenas Parabólicas (*Plato Parabólico*)

Las antenas parabólicas emplean la constitución física de su estructura, tanto como elementos múltiples para incrementar su ganancia y directividad. Su principal elemento es

un plato reflector en forma de una parábola para dirigir las señales de microondas, recibidas por la antena, hacia un punto focal. Este plato tiene como principal función capturar la energía radiada por la antena y dirigirla en un diagrama de radiación estrecho al transmitir. Estas antenas presentan una alta directividad al juntar toda la potencia entregada por una fuente y enfocarla en una dirección determinada [29]. Un ejemplo de esta antena se observa en la Figura 2.7

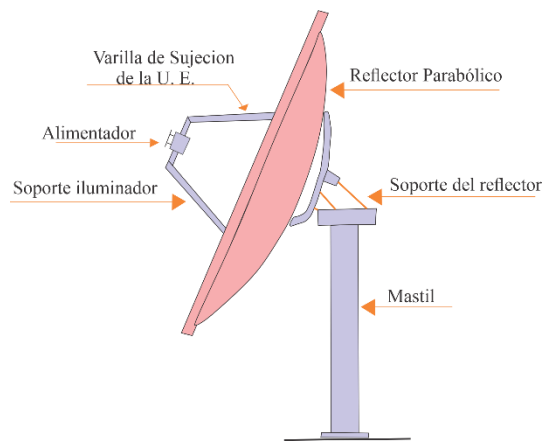


Fig. 2.7 Antena parabólica

### 2.6.5 Antenas de Ranura

Las antenas de ranura presentan propiedades de radiación semejantes a las de los dipolos, tales como los diagramas de radiación en elevación y *azimuth*. La constitución de estas antenas consiste en una ranura estrecha en un plano. Estas antenas tienen poca ganancia, y no son directivas, esto es debido a la semejanza de sus diagramas de radiación con los de los dipolos. Su característica más atractiva es la simplicidad de construcción e adaptación circuitos de microondas [30]. Un ejemplo de esta antena lo observamos en la Figura 2.8

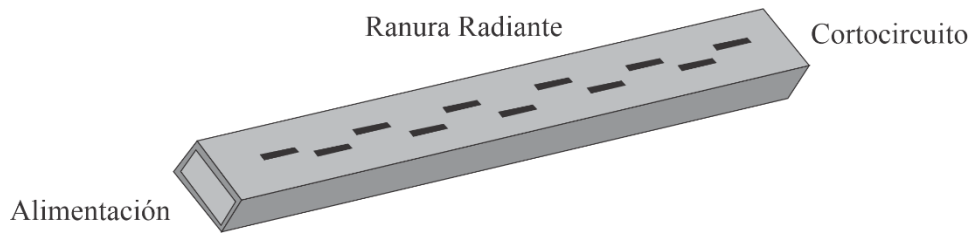


Fig. 2.8 Antena de Ranura

### 2.6.6 Antenas Microcinta

Las antenas de microcinta se constituyen de un parche metálico sobre un sustrato. La geometría del parche puede ser de diversas geometrías. Sin embargo, las geometrías comúnmente empleadas son las del parche cuadrado y circular. Por otro lado, los diseños de este tipo de antenas se integran a dispositivos de microondas implementados en microcinta y suelen ser económicos. Con diferentes geometrías se ha logrado que estas antenas operen en un ancho de banda amplio. Las aplicaciones de estas antenas se dirigen a sistemas de comunicación celular o enlaces de microondas [31]. Un ejemplo se muestra a continuación en la Figura 2.9

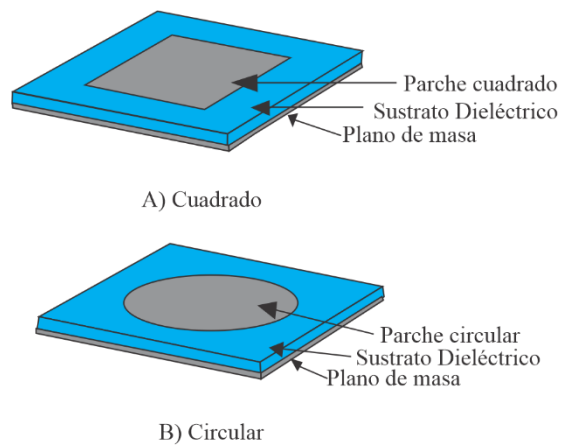


Fig. 2.9 Antenas de Microcinta

## 2.6.7 Stripline

Los dispositivos de microcinta tienen su origen sobre las líneas de tipo *stripline*. Un circuito con tecnología *stripline* está constituido por una línea metálica que y está rodeada por dos líneas paralelas que son planos de tierra. El material sobre el que se colocan las líneas es un sustrato dieléctrico, como fibra de vidrio o cuarzo. La impedancia de estas líneas es afectada por el ancho de la tira, el espesor del sustrato y la permitividad relativa del sustrato donde se diseñara la línea de transmisión. Un aspecto a destacar sobre las líneas *stripline* es que no son dispersivas y no presentan frecuencia de corte.

En la figura 2.10 se observa que la línea central no necesariamente tiene que estar a una distancia equidistante entre los dos planos de tierra. Otro punto importante, es que el material dieléctrico puede no ser el mismo por encima y por debajo de la línea central.

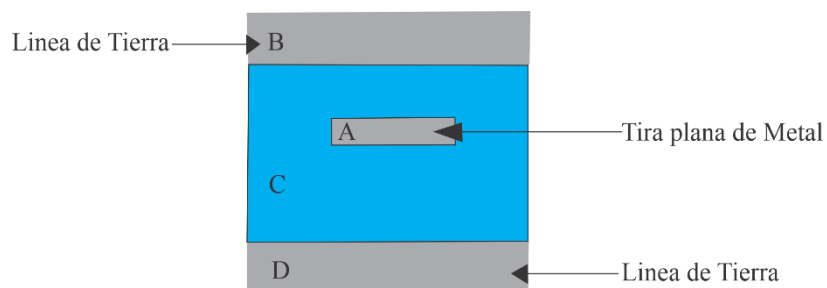


Fig. 2.10 Antenas Stripline

## 2.6.8 Antenas Tipo Parche

Las antenas tipo parche, llamadas también como antenas de microcinta. Estas antenas son planas. Estas están constituidas por líneas de transmisión y resonadores colocados sobre un sustrato dieléctrico. Las dimensiones de la antena están en función de la frecuencia de resonancia a la que se diseñe la antena. En la Figura 2.11 se presenta el diagrama esquemático de una antena de microcinta.

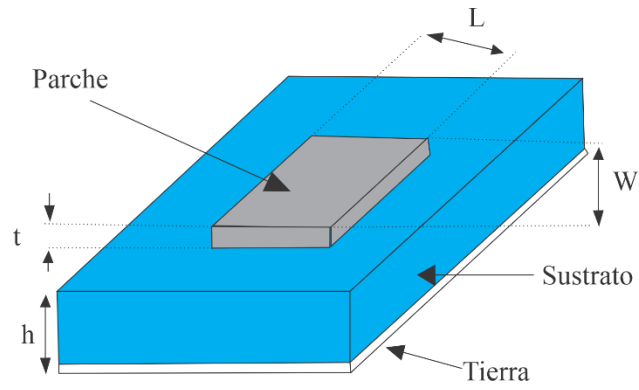


Fig. 2.11 Estructura de una antena tipo parche

La longitud  $L$  es de la mitad de la longitud de onda, de la frecuencia de resonancia. La onda incidente que es suministrada en la línea de alimentación genera una resonancia dentro de la estructura del parche.

## 2.7 Clasificación según su funcionamiento

En este apartado clasificamos las antenas de acuerdo a tres características que se consideran importantes en el diseño de las antenas:

*a) Antenas de Banda Ancha:* Estas antenas se clasifican de esta forma ya que estas pueden operar en un amplio rango de frecuencias, por lo general por encima de los 500MHz. Un ejemplo de antenas de banda ancha son las antenas de corneta, estas suelen tener un ancho de banda incluso en el orden de los GHz

*b) Antenas Miniatura:* Estas antenas son de dimensiones menores a la longitud de onda de diseño, por ejemplo, En [23] reportan antenas de parche que tienen una estructura donde su geometría es impresa en las tarjetas de los dispositivos electrónicos, para lograr su integración [23].

*c) Antenas multifrecuencia:* Son aquellas que presentan dos o más frecuencias de resonancia con un solo elemento de radiación y son útiles para sistemas multifrecuencias como los teléfonos móviles.

## 2.8 Parámetros de las antenas

### 2.8.1 Principio de radiación de una antena

El principio por el cual una antena emite energía en un transmisor de comunicaciones se le conoce como “radiación”. Para que se genere una radiación de ondas electromagnéticas, se tiene que realizar un cambio en la corriente que fluye por la antena.

En la Figura 2.12 se muestra un ejemplo particular de antena, el dipolo, la secuencia de radiación que se produce es la misma para todos los tipos. Por conveniencia, solo se muestran

las líneas de fuerza eléctrica. En [35] se expone que “las líneas de fuerza magnética se generan al mismo tiempo y están en ángulo recto con las anteriores. Las líneas de fuerza eléctrica tienen una dirección de avance hacia afuera durante el incremento del voltaje en la oscilación, y tienden a disminuir en la antena, cuando el voltaje decreciente, pero esto no sucede completamente antes que el voltaje cambie de polaridad, y se generaren nuevas líneas de fuerza en dirección diferente a la que se propagan en el espacio.”

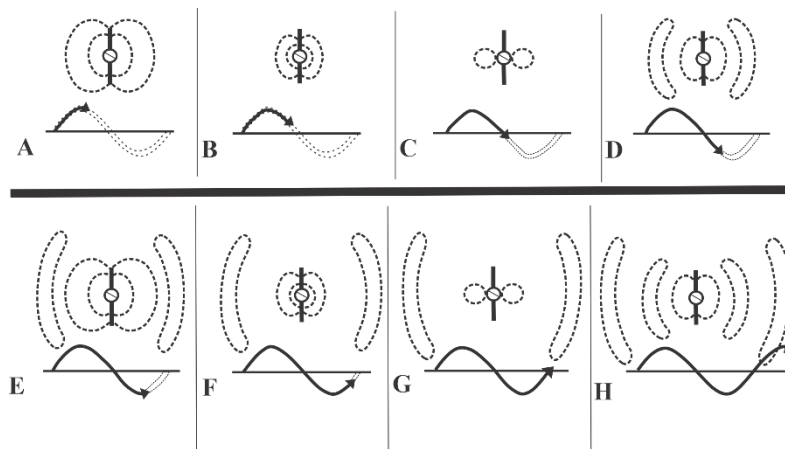
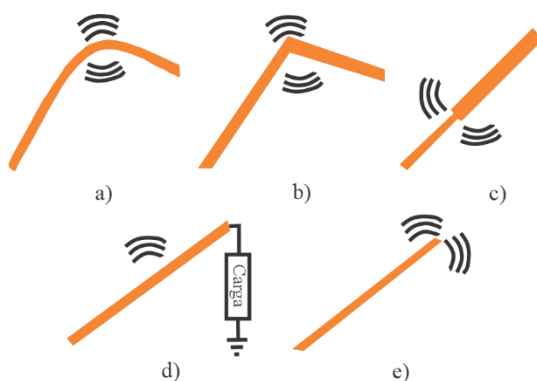


Fig. 2.12 Secuencia de Radiación

## 2.8.2 Mecanismos de Radiación

La radiación, se genera mediante la variación de la corriente que fluye por el elemento radiante, esta variación de la corriente puede ser en el tiempo o una aceleración o desaceleración de la carga. Para el caso de la desaceleración o aceleración de la carga un cable debe ser, discontinuo, curvado, doblado, terminado o truncado, ver Figura 2.13. A continuación se listan una serie de casos especiales dentro del mecanismo de radiación:

- Si la carga se encuentra estática, no existirá radiación.
- Si la carga se encuentra en movimiento con una velocidad constante: no existirá radiación si el cable es extenso,
- Existirá radiación siempre y cuando el cable este doblado, curvado, discontinuo terminado en corto circuito o circuito abierto.



a) cable curvado b) cable doblado c) cable desacoplado d) cable conectado a carga e) cable truncado

Fig. 2.13 Representación de los tipos de construcciones resonantes

## 2.8.3 Forma de Operación de una Antena

Si una línea de transmisión está terminada en circuito abierto, una parte de la señal es radiada y otra reflejada. La onda radiada sufrirá una inversión de fase la onda de voltaje, debido a que el coeficiente de reflexión es  $-1$ . Esta energía radiada es por general pequeña, y se requiere realizar una medición de la eficiencia de radiación de la antena. La eficiencia de

radiación de acuerdo con [34] se define como la razón entre la energía radiada y la reflejada. La visualización de esta radiación se observa en la Figura 2.14 para una antena del tipo cable.

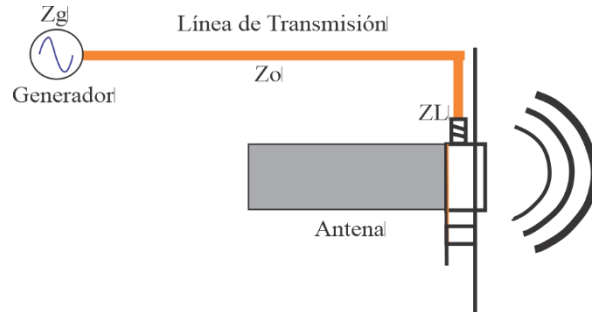


Fig. 2.14 Radiación de una línea de transmisión al espacio libre

Considerando un elemento conductor circular con las características para el flujo de carga, se asume que se tiene una densidad de carga volumétrica, representada por  $qv$  [ $C/m^3$ ], la carga está distribuida de forma uniforme en el conductor con un área de sección transversal  $A$  y volumen  $V$ , tal como se muestra en la Figura 2.15. La carga total,  $Q$ , dentro del volumen  $V$  está desplazada en la dirección  $z$  con una velocidad  $v_z$  [22].

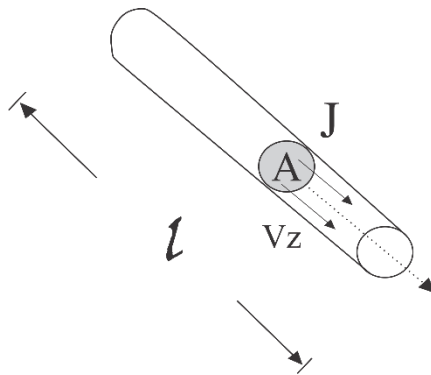


Fig. 2.15 Distribución uniforme de carga en un área transversal de un elemento conductor cilíndrico.

En la figura anterior se observa que la densidad de corriente  $J_z$  [ $A/m^2$ ] sobre la sección transversal del elemento conductor está dada por

$$J_z = q_s v_z \quad 2.3$$

Si el conductor tiene una conductividad infinita, la densidad de corriente  $J_s$  [A/m] reside sobre la superficie del alambre y es dada por

$$J_s = q_s v_z \quad 2.4$$

donde  $q_s$  [C/m<sup>2</sup>] es la densidad de carga superficial. Si el conductor es delgado, la corriente que fluye por el alambre se representa por

$$I_z = q_l v_z \quad 2.5$$

donde  $q_l$  [C/m] es la carga por unidad de longitud [22].

El problema se simplifica considerando un conductor lineal con una carga por unidad de longitud. Si la corriente cambia con respecto al tiempo, la derivada de la corriente para se expresa como:

$$\frac{dI_z}{dt} = q_l \frac{dv_z}{dt} = q_l a_z \left[ \frac{cm}{S^2} \right] \quad 2.6$$

donde  $dv_z/dt = a_z$  [m/s<sup>2</sup>], entonces la ecuación 2.6 se puede escribir como

$$l \frac{dI_z}{dt} = l q_l a_z \quad 2.7$$

La ecuación 2.7 define la relación entre la carga y la corriente, además sirve para relacionar radiación electromagnética. La radiación se genera mediante la variación de la corriente con respecto al tiempo, o bien con una aceleración o desaceleración de la carga dentro del conductor. Para que se produzca una aceleración o desaceleración el cable conductor o alambre debe estar doblado, desacoplado, discontinuo o curvado.

Un mecanismo radiación se diseña considerando una fuente de pulsos unida a una línea de transmisión terminada en circuito abierto o terminado con una impedancia de carga. como se muestra en la Figura 2.16.



Fig. 2.16 Modelo simple de una línea de transmisión y una carga.

Cuando el elemento radiante es alimentado con una fuente, la carga se desplaza por las líneas de fuerza generadas en la fuente. Cuando las cargas son aceleradas desde la fuente, llega a la discontinuidad del elemento, estas son desaceleradas produciendo una onda de reflexión en ese punto. Cuando ocurre esto se producen campos radiantes en el final y a lo largo de la parte resonante del elemento radiante. En [36] se menciona que “la densidad de corriente y la densidad de carga aparecen como términos de una fuente en las ecuaciones de Maxwell, la carga es vista como una cantidad esencial, especialmente para los campos transientes.”

## 2.8.4 Patrón de Radiación o Diagrama de Radiación

Los diagramas de radiación son importantes ya que proporcionan una representación gráfica de las características de radiación de las antenas. Estos diagramas están en función del espacio y por lo general se obtiene en campo lejano. Los diagramas de radiación, para tener una mejor representación se expresan en de coordenadas esféricas. En estos diagramas la la antena se sitúa en el origen y manteniendo constante la distancia (campo lejano) el diagrama se expresará en función de las variables angulares ( $\theta$ ,  $\phi$ ). Debido a que los campos son una

cantidad vectorial, se determina el valor del campo en cada punto de la esfera de radio constante.

En un diagrama de radiación se pueden analizar las siguientes propiedades de radiación pueden ser:

- a) Densidad de flujo de potencia
- b) Intensidad de Radiación
- c) Campo Externo
- d) Directividad
- e) Fase
- f) Polarización

La Figura 2.17 se representa un diagrama de radiación en coordenadas polares.

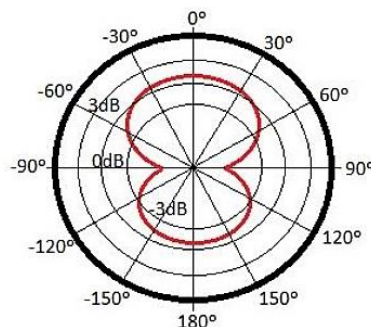


Fig. 2.17 Representación de un patrón de radiación en coordenadas polares [36]

La representación bidimensional de los diagramas de radiación se puede realizar en coordenadas polares o cartesianas. Para las coordenadas polares se representa la dirección del espacio, mientras que el radio indica la magnitud del campo eléctrico.

Los diagramas cartesianos permiten observar los detalles en antenas con directividad alta, por otro lado, los diagramas polares ofrecen información más clara de la distribución de la potencia. La figura 2.18 muestra ejemplos de ambas representaciones

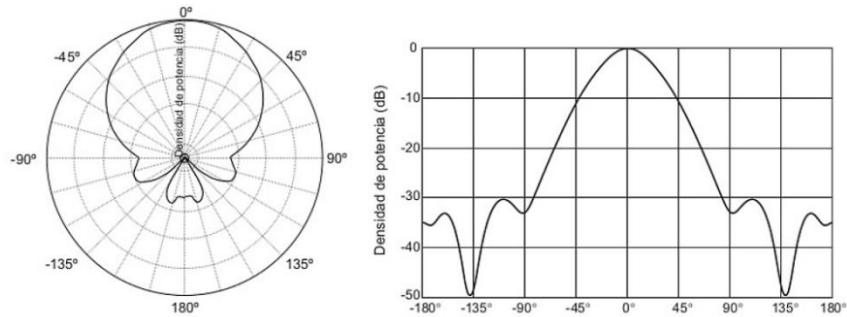


Fig. 2.18 Diagrama de Radiación en coordenadas polares / coordenadas cartesianas [36]

Para apreciar con mayor detalle las características de un diagrama de radiación estos se representan en escalas de decibeles.

Las partes importantes de un diagrama de radiación son el haz principal o *lóbulo principal*, los *lóbulos laterales*. Dentro de los parámetros a evaluar dentro de un diagrama de radiación se listan los siguientes:

- El ancho de haz de media potencia a -3 dB ( $\Delta\theta_{-3dB}$ ) es la distancia angular de las direcciones en las que el diagrama de radiación tiene la mitad del máximo de potencia.
- El ancho de haz entre los primeros ceros del diagrama ( $\Delta\theta_z$ ) es la diferencia angular de las direcciones del espacio en las que el lóbulo principal toma un valor mínimo.
- La relación del lóbulo principal a secundario (SLL) es el cociente, expresado en dB, entre el valor del diagrama en la dirección de máxima radiación y en la dirección del máximo del lóbulo secundario.

Se dice que una antena tiene un diagrama de radiación isotrópico cuando la intensidad de radiación en todas las direcciones del espacio es igual, ver Figura 2.19. Este diagrama se considera como ideal y es de utilidad para establecer los parámetros de directividad.

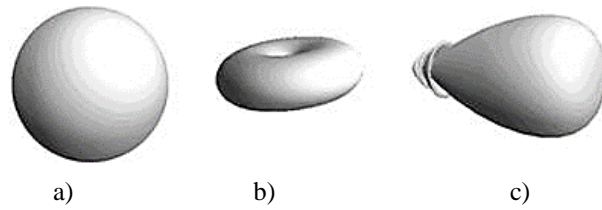


Fig. 2.19 Diagrama de Radiación a) isotrópico, b) omnidireccional c) directivo

### 2.8.5 Impedancia

La impedancia de entrada de una antena tiene una parte real  $R_0(\omega)$  y una imaginaria  $X_0(\omega)$ , ambas dependientes de la frecuencia. Si la impedancia de la antena no presenta una parte imaginaria a una frecuencia, se dice que es una antena resonante. La potencia radiada se define matemáticamente mediante una resistencia de radiación  $R_r$ , está resistencia disiparía la misma potencia de la radiada por la antena.

$$P_{radiada} = I^2 R_r \tag{2.8}$$

Además, en las antenas existen perdidas asociadas por los conductores y el material dieléctrico que constituye a las antenas. La potencia entregada a la antena debe ser igual a la suma de las potencias radiada y de la potencia pérdida por las pérdidas de la antena. Las pérdidas se representan en una resistencia de pérdidas  $R_\Omega$ . La impedancia de entrada es la suma de la radiación y pérdidas.

$$P_{entregada} = P_{radiada} + P_{pérdidas} = I^2 R_r + I^2 R_\Omega \tag{2.9}$$

La presencia de pérdidas en una antena provoca que no toda la potencia entregada por el transmisor sea radiada, por lo que se puede establecer un rendimiento o eficiencia de la antena  $\eta_t$ , esto a través de la relación entre la potencia radiada y la entregada por la fuente,

$$\eta_I = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} \quad 2.10$$

### 2.8.6 Directividad

La directividad, D, se define es la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isotrópica.

$$D = \frac{P_p}{P_{REF}} \quad 2.11$$

Donde,

$P_p$ : es la densidad de potencia radiada en un determinado punto [W/m<sup>2</sup>].

$P_{REF}$ : Es la densidad de potencia de una antena isotrópica [W/m<sup>2</sup>].

### 2.8.7 Eficiencia de la Antena

La eficiencia de la antena se define como la relación de la potencia radiada y la potencia entregada por la fuente a la antena y está dada como:

$$\eta = \frac{P_{radiada}}{P_{radiada} + P_{disipada}} * 100\% \quad 2.12$$

### 2.8.8 Ganancia de potencia

La ganancia se calcula considerando el producto de la directividad y la eficiencia de la antena:

$$G = D * \eta \quad 2.13$$

donde,

D: es la directividad.

$\eta$ : es la eficiencia de la antena.

La ganancia se puede definir en (dB) empleando la siguiente expresión

$$G = 10 \log \left( \frac{P_p * \eta}{P_{REF}} \right) \quad 2.14$$

### 2.8.9 Polarización

La polarización indica la orientación del vector del campo eléctrico en un punto fijo del espacio en un instante de tiempo. La polarización de una antena es la orientación que tendrá la onda radiada al propagarse en una dirección específica. La polarización de una onda se observa en el plano de propagación y se aprecia como una figura geométrica, Para señales armónicas la figura geométrica que se genera por lo general es una elipse. Existen dos casos de particulares interés: que son la polarización línea y la circular.

### 2.8.10 Ancho de Banda

Las antenas operan en un intervalo de frecuencias definido por el diseño o geometría. Este rango de frecuencias, en que la antena opera se le llama ancho de banda.

El ancho de banda (BW) se define de dos formas: primero como la diferencia entre la frecuencia máxima de operación y la mínima frecuencia de operación. Por otro lado tenemos el ancho de banda fraccional que se representa mediante la siguiente expresión:

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_o} \quad 2.15$$

donde,

$f_{max}$ : es la frecuencia máxima de operación.

$f_{min}$ : es la frecuencia mínima de operación.

$f_o$ : es la frecuencia central.

En antenas de banda ultra ancha especifican el ancho de banda de la siguiente:

$$BW = \frac{f_{max}}{f_{min}} : 1 \quad 2.16$$

### 2.8.11 Parámetros S

Las antenas al igual que los dispositivos de microondas se caracterizan como una red de dos puertos, con la finalidad de obtener la respuesta general del dispositivo. Existen diversos parámetros para representar redes de dos puertos, dentro de los que destacan los: Parámetros de impedancia (Z), parámetros de admitancia (Y), parámetros híbridos (H), parámetros de transmisión (T), parámetros ABCD y parámetros de dispersión (S) [22]. La Figura 2.20 presentala representación de una red de dos puertos.

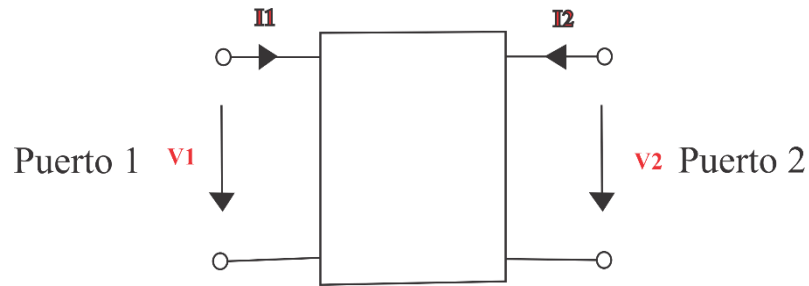


Fig. 2.20 Red de dos puertos

En frecuencias de microondas los parámetros usados son los parámetros S, debido que en el proceso de medición no se requiere tener condiciones de corto circuito y circuito abierto, en las entradas de los puertos, como los demás parámetros.

Los parámetros S en una red de dos puertos son 4 de acuerdo a [38] se definen de la siguiente forma:

- a) S<sub>11</sub>: Este parámetro es la reflexión que existe en el puerto 1 debido. Este parámetro (S<sub>11</sub>) es “el coeficiente de reflexión de puerto 1 en una red de dos puertos” ( $\Gamma$ ).
- b) S<sub>12</sub>: Este parámetro modela la transmisión del puerto 2 al puerto 1. A este parámetro se le conoce como “coeficiente de transmisión inversa”.
- c) S<sub>21</sub>: Este parámetro se le conoce como “coeficiente de transmisión directa”.
- d) S<sub>22</sub>: Es la reflexión en el puerto 2

Los parámetros S se definen como:

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad 2.17$$

$$s_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad 2.18$$

$$s_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad 2.19$$

$$s_{11} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad 2.20$$

Donde:

$$a_1 = \frac{1}{\sqrt{z_0}} (v_1 + z_0 i_1) \quad 2.21$$

$$a_2 = \frac{1}{\sqrt{z_0}} (v_2 + z_0 i_2) \quad 2.22$$

$$b_1 = \frac{1}{\sqrt{z_0}} (v_1 + z_0 i_1) \quad 2.23$$

$$b_2 = \frac{1}{\sqrt{z_0}} (v_2 + z_0 i_2) \quad 2.24$$

Las antenas son elementos de un solo puerto, por lo tanto, solo tienen un parámetro S que es el S11.

## **2.9 Conclusiones**

Teniendo en cuenta las definiciones dadas en este capítulo se tiene una mejor perspectiva de los parámetros para la realización de una antena el cual es un dispositivo radiador y cuáles son las condiciones ideales de operación para la misma y para un óptimo funcionamiento. La aproximación de los resultados calculados y los obtenidos dependerá del entorno en el que sean medidos ya que existen varios factores que pudiesen alterar los resultados. Un dato interesante es que una antena no es un simple conductor estático, ya que hay varios factores como la corriente y el voltaje que pasan a través de la antena y puedan generar campos de radiación para darle un uso específico a la misma, también se estudió las maneras de saber la permitividad eléctrica de los sustratos, también se obtuvo un mejor entendimiento sobre los parámetros S11 (coeficiente de reflexión).

## Capítulo 3.

### Antena de Microcinta

#### 3.1 Introducción

Las antenas de son empleadas en diversos sistemas de comunicaciones inalámbricas en las que sus dimensiones son de gran importancia, principalmente por que suelen ser pequeñas. Sus principales aplicaciones son en los dispositivos móviles, redes vehiculares, satélites, enlaces de microondas [22].

En [39] menciona que “algunas de las principales ventajas que estas antenas ofrecen son: su tendencia a la miniaturización al lograr dispositivos cada vez más pequeños y con componentes livianos”. En [22] resalta su capacidad de integración en diferentes circuitos y ambientes.

Las antenas de microcinta tienen como principal desventaja que son antenas que operan a baja potencia de radiación. Presentan una baja eficiencia, son de ancho de banda reducido, es decir son mono-frecuencia. Además, presentan pérdidas considerables y se ven afectadas por el factor térmico.

#### 3.2 Características

Las antenas del tipo parche están diseñadas usando microcinta a continuación se mencionan sus características principales:

Las antenas de tipo parche rectangulares poseen una línea de alimentación con un largo  $L$ , de ancho  $W$ , por lo general esta línea tiene una impedancia de  $50\Omega$ .

Los rangos de medidas y características de los parámetros mencionados son los siguientes:

- El valor de L puede variar dependiendo de la forma utilizada. Para un parche tipo rectangular que es el estudio de esta tesis se tiene los siguientes rangos:  
$$\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$$
- El grosor del sustrato debe considerar la siguiente relación:  $h \ll \lambda_0$

### 3.3 Métodos de Análisis

En el diseño de una antena de microcinta existen diversos métodos para realizar el análisis y diseño de la antena. El método depende de la precisión que se desee. El método elegido se selecciona de acuerdo a las.

Los principales métodos para el análisis de este tipo de antenas existentes se puede establecer en 3 categorías principales:

**Modelos empíricos:** En [38]. estos modelos son descritos como “modelos con baja precisión a la hora de diseñar, sin embargo, suelen ser más simple a la hora de realizar. Su método de análisis se basa en la suposición de conceptos y estructuras de forma general sin llevar a cabo consideraciones de irregularidades en parámetros. Estos modelos pueden tener un buen nivel de precisión cuando se trabaja en rangos de frecuencias menores a los de las ondas milimétricas ( $f < 30\text{GHz}$ ) sin embargo, conforme se salen de estos rangos suelen ser menos precisos en la mayoría de las veces tienen imprecisiones muy grandes por lo cual es necesario ocupar otros métodos, en especial para estos casos”

Dentro de los modelos empíricos se destacan los siguientes:

- Modelo de línea de transmisión

- Modelo de Cavidad

**Modelos semi - empíricos:** Estos presentan una precisión mayor a la de los modelos empíricos pero inferior a la de los modelos de onda completa. Dentro de los principales modelos empíricos se pueden listar los siguientes:

- Técnica de la transformada de Hankel
- Modelo de corriente superficial eléctrica
- Enfoque variacional
- Enfoque de ecuación integral dual
- Método de reciprocidad
- Técnica de condición de frontera de borde generalizada (GEBC)
- Enfoque variacional generalizado

**Modelos de onda completa:** Son los más precisos a la hora de analizar el diseño sin embargo también suelen ser los más complicados.

En este proyecto de tesis se utilizará la simulación por medio del Software HFSS el cual emplea modelos de onda completa, el programa utiliza un método de elementos finitos modificado.

### **3.4 Modelo de línea de transmisión**

EL modelo de línea de transmisión considera una permitividad eléctrica efectiva  $\epsilon_{ref}$ , que se obtiene considerando las permitividades eléctricas del aire y del sustrato. Además, toma en cuenta que la antena se encuentra inmersa en un solo medio homogéneo con dicha permitividad efectiva. El diseño de la antena usando este modelo se describe mediante los siguientes pasos:

I. Se especifica la frecuencia de operación para trabajar el diseño de la antena al igual que el sustrato en el cual se construirá la antena por lo cual se deben asignar los siguientes valores:

$f_r$  (Frecuencia de operación)

$\epsilon_r$  (Permitividad eléctrica del sustrato)

$h$  (Altura del sustrato)

II. Se calcula el ancho  $w$  de la antena de parche rectangular mediante la siguiente ecuación:

$$w = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad 3.1$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el espacio libre.

III. Se calcula la permitividad eléctrica efectiva usando la ecuación:

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-1/2} \quad 3.2$$

IV. Se obtiene la dimensión  $\Delta L$  usando la siguiente ecuación:

$$\Delta L = 0.142h \frac{(\epsilon_{ref} + 0.3) \left( \frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{ref} - 0.258) \left( \frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad 3.3$$

V. Se calcula la longitud efectiva de la antena usando la siguiente expresión:

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad 3.4$$

### 3.5 Métodos de alimentación de antenas de tipo parche

Un aspecto muy importante a la hora de diseñar una antena consiste en el esquema del tipo de excitación que tendrá, puesto que sin una conexión de alimentación eficiente las antenas de *microcinta* no generan un acoplamiento de impedancia esto sin importar la precisión llevada a cabo para diseñar el elemento radiante. Existen diferentes métodos para alimentar una antena de *microcinta* de forma que radie lo más eficientemente posible en las frecuencias deseadas mediante un correcto acoplamiento de impedancias, a pesar de existir muchos métodos para alimentar a una antena, estos se pueden colocar en 3 categorías principales:

- Alimentación directa
- Alimentación por proximidad
- Alimentación por apertura

A continuación, se describirá la alimentación por sonda coaxial ya que será el empleado para alimentar las antenas diseñadas en esta tesis:

***Alimentación con sonda coaxial y línea de alimentación microcinta:*** Este alimentación consiste en hacer que el pin de un conector coaxial alimente a la línea de *microcinta* mientras. La impedancia dependerá de la posición del conector en relación con el radiador de tal forma que se genere un mejor acoplamiento. Es uno de los métodos más comunes de alimentación de las antenas *microcinta* y no genera la complejidad que el de conector coaxial directo ya que en este caso no se debe perforar el sustrato y será el empleado en este proyecto. En la figura 3.4 se muestra el método de alimentación empleado en nuestra antena.

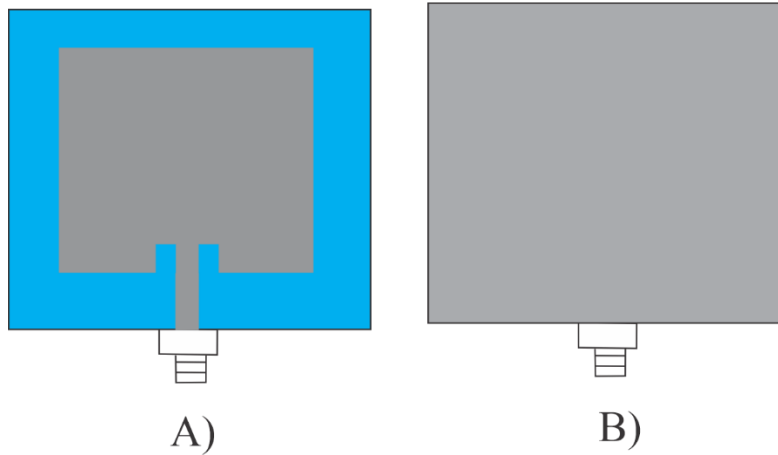


Fig. 3.1 Alimentación con sonda de coaxial y línea de microstrip  
A) Parte frontal pin soldado a línea microstrip B) Parte negativa soldada a plano de tierra

### 3.6 Conclusión

En este capítulo se aprecia la teoría necesaria para llevar a cabo el diseño de nuestra antena de igual manera se ha visto que en las ecuaciones de cálculo, a pesar de ser una herramienta para la aproximación de las dimensiones en entornos ideales, son la base suficiente para el análisis en un esquema general de un dispositivo a realizar, ya que gracias a ello se puede tener un punto de partida. A partir de las definiciones abordadas se tiene una perspectiva de cuáles son los parámetros necesarios para el diseño de un dispositivo radiador, estableciendo las condiciones de operación que se requieren para su funcionamiento.

## Capítulo 4.

### Diseño y simulación de las Antenas

#### 4.1 Introducción

En este proyecto de tesis, el análisis de las antenas de tipo parche que se utilizó fue a partir del uso del software HFSS de simulación de onda completa como ya se mencionó en el capítulo 3, donde se trata de optimizar los diseños modificando las dimensiones de las antenas diseñadas y simuladas, donde se diseña de igual manera el método de alimentación de las mismas para que radien a las frecuencias requeridas y ya antes mencionadas en capítulos anteriores, una vez encontrado un diseño óptimo se procedió a la fabricación de la antena de tipo parche que radia a una frecuencia de 2.45 GHz tratando de obtener la mejor y mayor ganancia posible y un adecuado funcionamiento.

Para este proyecto se plantó el diseño y simulación de una antena de tipo parche el cual fue:

- Una antena de tipo parche que radie a 2.45 GHz y diseñada en un sustrato textil flexible con una ganancia considerable para un buen funcionamiento, posterior a esto se procedió a la construcción sobre el sustrato ya antes mencionado.

Como trabajo adicional para este proyecto se realizó el diseño y la simulación de una antena Monopolo planar en forma de U con doble banda de operación la cual se trató de establecer en las frecuencias 2.4 GHz y 5.5GHz para uso en aplicaciones WLAN, teniendo en cuenta un ancho de banda considerable para poder trabajar en esas frecuencias.

## 4.2 Antena para 2.45 GHz

El primer paso para llevar a cabo las estructuras propuestas fue seleccionar los materiales necesarios para el proyecto de tesis. Para la antena de parche se escogió un sustrato textil muy comúnmente utilizado en la industria para poder de esta manera tener una gran gama de aplicaciones y el cual es un sustrato de gran durabilidad, DIM 100% de algodón (también conocida como mezclilla) de la cual por medio de la técnica de caracterización *Open – Ended* se obtuvo su permitividad eléctrica relativa ( $\epsilon_r$ ) la cual se encontraba en 1.7 y un grosor de 1 mm ( $h$ ).

### 4.2.1 Diseño de la antena de tipo parche

Se cuenta con los parámetros del sustrato, así como el de la frecuencia de resonancia deseada los cuales son:

$$f_r : 2.45 \text{ GHz}$$

$$\epsilon_r : 1.7$$

$$h : 1 \text{ mm}$$

Se utilizaron entonces las fórmulas descritas en el capítulo 3:

$$w = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-1/2}$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{ref} + 0.3) \left( \frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{ref} - 0.258) \left( \frac{w}{h} + 0.8 \right)}$$

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L$$

Realizando los cálculos se obtuvieron originalmente las siguientes medidas:

W= 46 mm,  $\epsilon_{ref} = 0.3391$  ,  $\Delta L= 3.2095$ , L=52mm.

Como se ha mencionado con anterioridad, el modelo de línea de transmisión no genera un diseño óptimo en relación con las dimensiones ya que con este diseño la frecuencia de operación 2.45GHz es obtenida al excitar el largo L de la antenna que es el lado más pequeño.

Como se logró una operación excitando el lado más largo, al ancho W puede ser reducido considerablemente, lo cual se realizó con ayuda del software HFSS. Se buscó que el ancho se redujera hasta que su resonancia estuviera alejada de los 2.4 GHz. Las medidas finales de la antenna fueron las siguientes. Ver figura 4.1:

L=52mm

W=46 mm

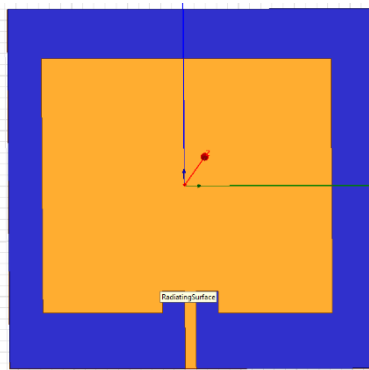


Fig. 4.1 Diseño de la antena rectangular

Como ya se mencionó anteriormente el plano de tierra tiene las mismas dimensiones del sustrato.

Se simuló la respuesta de esta antena con alimentación directa de una línea de microcinta con inserciones y un puerto de  $50\Omega$  para comprobar su correcto funcionamiento antes de proceder a su realización. La optimización de la impedancia a  $50\Omega$  se realizó modificando la posición de la línea de *microcinta* a lo largo de la dimensión L de la antena hasta encontrar su punto medio donde se genera el mejor acoplamiento para la frecuencia deseada (2.45GHz para nuestro caso). En la figura 4.2 se muestra su respuesta respectiva con el uso del software HFSS.

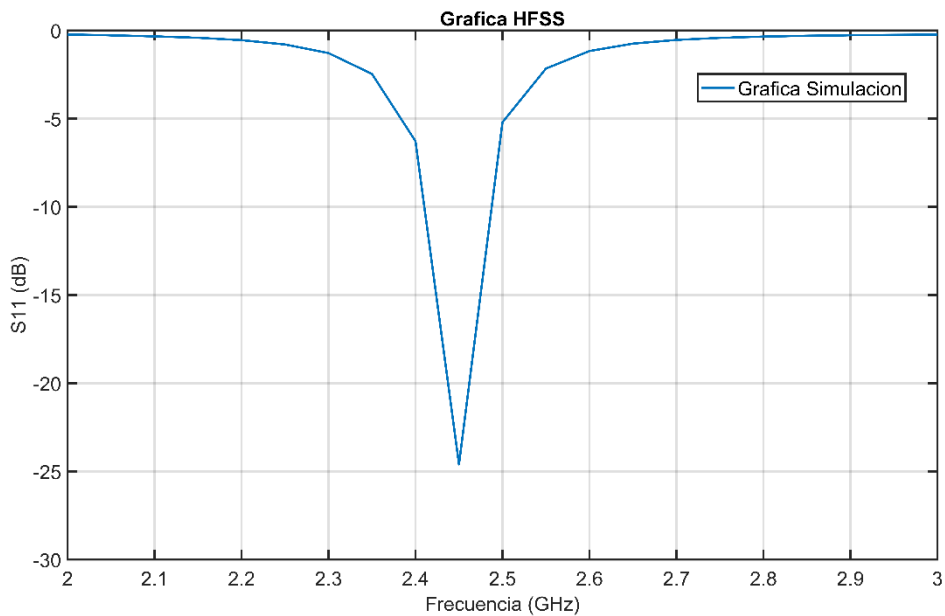


Fig. 4.2 Parámetro S11 (Coeficiente de Reflexión) de la antena de parche de 2.45GHz con alimentación directa

En la Figura 4.2 se puede apreciar el valor aproximado del coeficiente de reflexión de -25 dB para la frecuencia de operación a 2.45 GHz cuando la antena se alimenta directamente de la línea de *microcinta*.

En la figura 4.3 se muestra la distribución de corriente para la antena, se observa que el modo excitado es el L, que es la dimensión de mayor tamaño, con lo que se muestra que la antena entra en resonancia en la frecuencia de diseño.

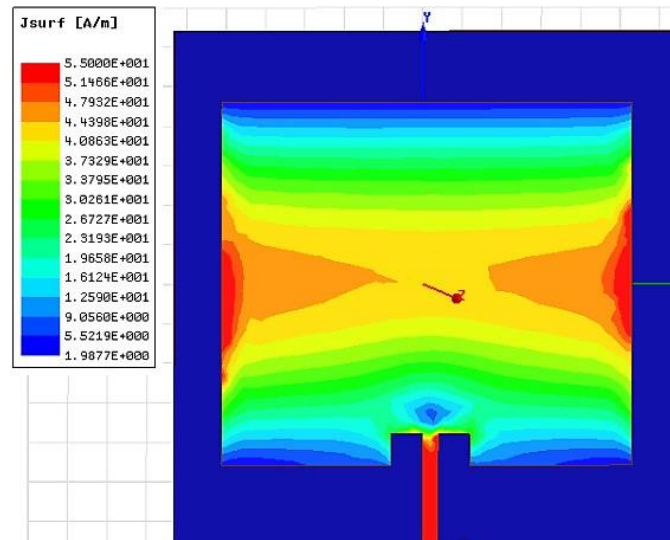


Fig. 4.3 Distribución de corriente antena diseñada

#### 4.2.2 Construcción de la antena de parche

Una vez comprobada la correcta operación de la antena en el simulador se procede a la construcción de ésta con el siguiente procedimiento:

1. Con la cinta de cobre adherible se generan los cortes con las medidas correspondientes procurando tener un margen de error de menos del 1 %, el cual se realiza con un corte computacional para tener las inserciones lo más exactas como ya fueron diseñadas previamente.
2. Se corta el sustrato a la medida indicada por el diseño para la implementación de las láminas de cobre que ya tienen las medidas diseñadas, como las medidas del sustrato son las mismas que las del plano de tierra se procedió a colocar el plano

de tierra y después se corta el sustrato a el tamaño del mismo plano que son: 65 mm \* 65 mm como se observa en la figura 4.4.



Fig. 4.4 Plano de tierra colocado sobre el sustrato (izq), parche aún en su hoja de cinta (der)

Una vez colocado el plano de tierra, se corta el sustrato excedente para continuar con el paso 3 el cual es la colocación del parche.

3. Se colocó la parte frontal de la antena diseñada el cual es el parche y que deberá quedar centrado como fue hecho en nuestro software HFSS para obtener los resultados similares a los que se obtuvieron en la simulación. En la figura 4.5, con diferentes técnicas se corroboró que la colocación del parche fuera lo más cercana al del simulador.

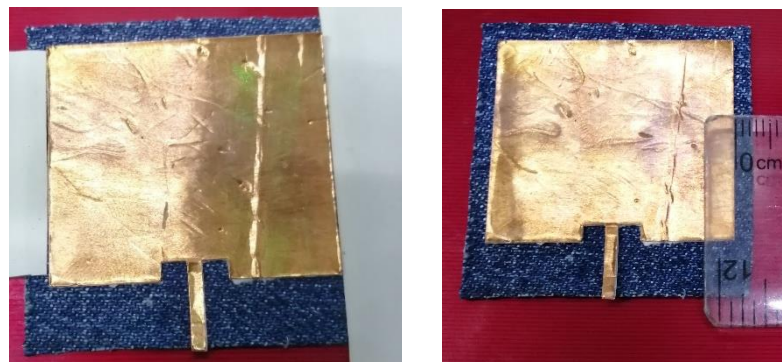
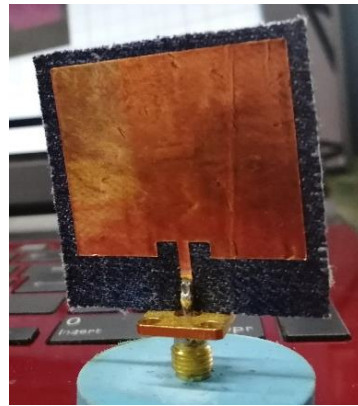


Fig. 4.5 Colocación del patch sobre el sustrato, centrado con ayuda de hojas adheribles y corroboración con una regla del centrado del patch

- Una vez colocado el plano de tierra y el parche, se coloca el conector coaxial SMA, donde la parte negativa va soldada a tierra y el pin central al parche como se observa en la figura 4.6.



a)



b)

Fig. 4.6 Sonda coaxial soldada a) en plano de tierra b) en el parche

De esta manera se llega al resultado final (figura 4.7) y se procedió a la caracterización con ayuda del VNA para la medición del coeficiente de reflexión.

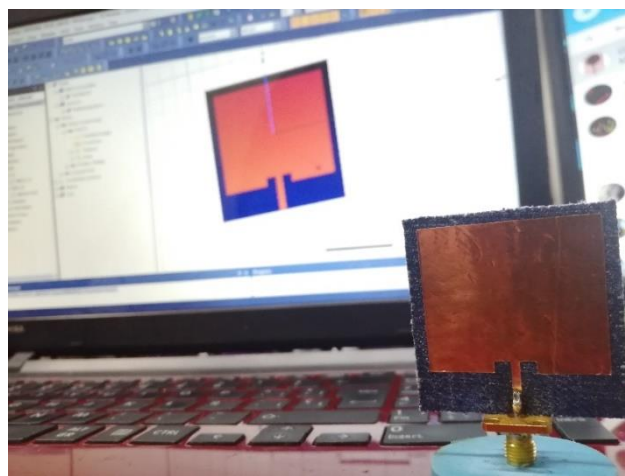


Fig. 4.7 Resultado final de la construcción

### 4.3 Caracterización por medio de VNA antena parche

La antena fue caracterizada por medio del VNA para obtener su coeficiente de reflexión (S11) la cual fue conectada con ayuda de un cable coaxial (Figura 4.8).



Fig. 4.8 Conexión a el VNA

Una vez obtenidas las mediciones con el VNA se graficaron con ayuda del software MATLAB, para ello se creó un script (consultar Apéndice A). Este script lee el archivo Excel obtenido por medio del VNA.

#### 4.4 Resultados de las pérdidas por Retorno antenna parche

La figura 4.9 muestra los resultados de la medición del S11, donde se observa que la frecuencia de resonancia se encuentra en 2.45 GHz con una magnitud del S11 de -26.49 dB.

Esta antena presenta un ancho de banda de 77 MHz.

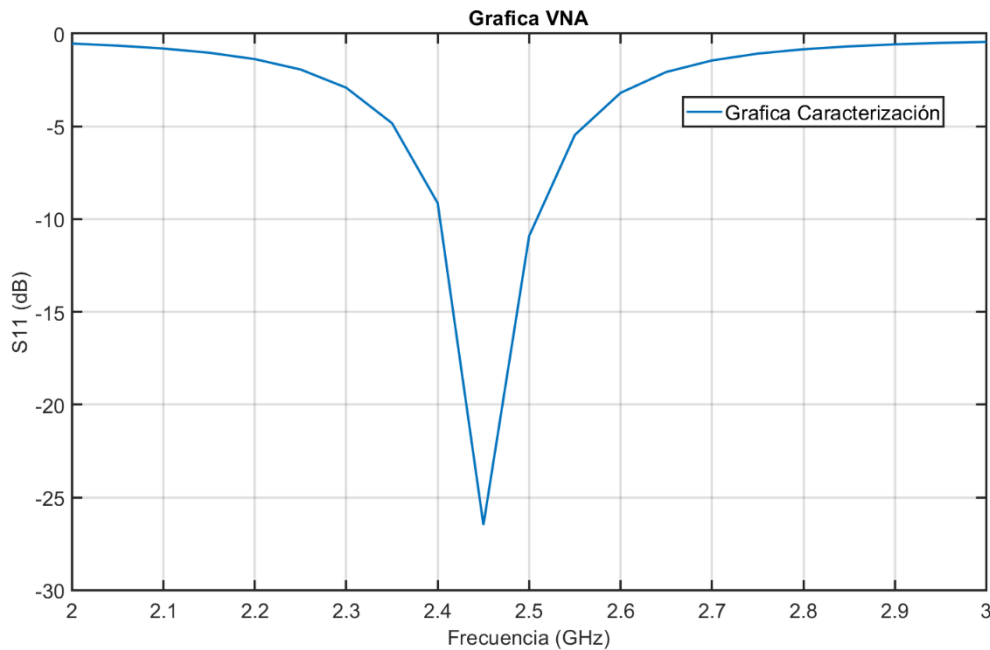


Fig. 4.9 Parámetro S11 medido por el VNA

En la Figura 4.9 se observa la medición del S11 en cuya frecuencia de 2.45GHz se obtuvieron pérdidas por retorno (S11) de -26.49 dB.

Como se presentó en la sección 4.2 de este proyecto de tesis, en la gráfica obtenida mediante el software HFSS (Figura 4.2) se aprecia una gráfica muy similar a la gráfica obtenida por el VNA por lo que se realizó una comparación para tener una mejor referencia.

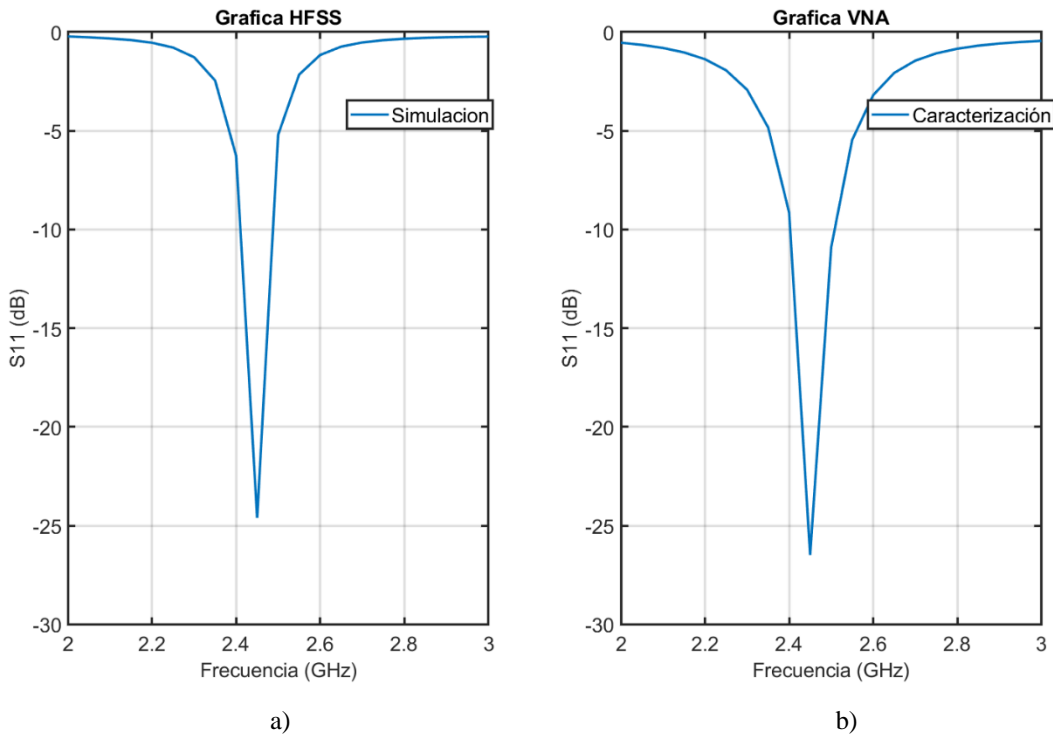


Fig. 4.10 Comparación parámetro S11 a) simulada b) experimental

En la Figura 4.10 se observa que la antena de tipo parche simulada presenta una magnitud del S11 de -24.60 dB y la antena fabricada una magnitud medida del S11 de -26.49 dB. Los resultados medidos están en concordancia con los simulados.

## 4.5 Diagramas 3D de la antena tipo parche

Como parte del análisis de radiación de la antena tipo parche, se presentan los diagramas de radiación 3D de la banda de operación 2.45GHz. En la figura 4.11 se presenta dicho diagrama, por medio de la escala situada de lado izquierdo, se observa que la máxima radiación se concentra en la parte superior partiendo de nuestra antena, con una ganancia de 4.04 dB, lo que significa una concentración de ganancia en el eje Z. El diagrama de radiación presentado tiene un comportamiento direccional, esto debido a que el plano de tierra funciona como un reflector y esto hace que la energía se dirija hacia el eje Z.

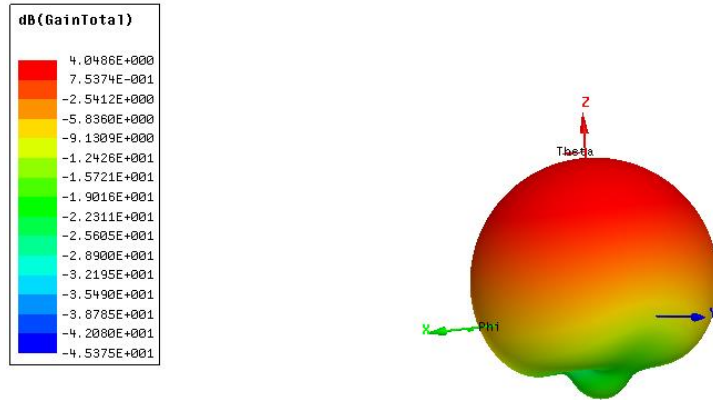


Fig. 4.11 Mapa de radiación para la antena patch

A continuación, en la figura 4.12 se presenta el diagrama de radiación situado sobre la antena para tener una mejor apreciación de como radia nuestra antena realizada.

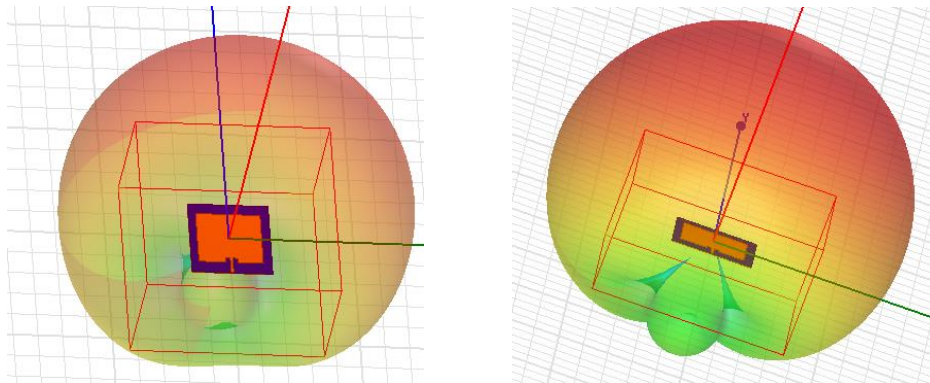


Fig. 4.12 Mapa de radiación sobre la antena patch.

## 4.6 Antena dual para 2.4 GHz y 5.5 GHz

Se propuso un diseño compacto de una antena monopolo doble en forma de U con operación multibanda para el sistema IEEE 802.11. Con el uso de monopolo dobles en forma de U, modos multiresonantes cercanos a los 2.4 GHz y 5.5 GHz para cumplir las especificaciones del sistema. El ancho de banda de impedancia obtenido en las bandas operativas puede alcanzar aproximadamente 100/780 MHz para las bandas 2.4/5.5 GHz respectivamente.

Los diseños de antenas monopolo (MA) relacionados para la aplicación WLAN se han presentado utilizando MA en forma de L invertida [41], MA en forma de rombo con ranuras [42], antena F invertida [43], MA con ranuras ramificadas [44], MA con franjas horizontales rectangulares y plano de tierra trapezoidal [45], antena L monopolo espejada [46], MA rectangular asimétrica con franjas adicionales [47] y una MA rectangular plana conectada con un disco circular mediante orificio [48]. Sin embargo, para estos MA existe la desventaja de tener un tamaño de antena más grande [42],[44],[46] o una estructura de antena compleja [47].

Adicionalmente existe una demanda creciente de antenas que tienen un tamaño más compacto para integrarse adecuadamente en los dispositivos portátiles prácticos para dicho sistema. Por lo tanto, en este proyecto de tesis se creó una propuesta de diseño para una Antena Monopolo Planar en forma de U con doble banda de operación. La antena monopolo plana propuesta también proporciona los diagramas de radiación casi omnidireccionales con ganancias de antena máximas y eficiencias de radiación.



Tabla 4.1. Medidas de la antena Monopolo planar en forma de U.

NOMBRE	DIMENSIÓN	NOMBRE	DIMENSIÓN	NOMBRE	DIMENSIÓN
RA	2.95 mm	RL	6.9 mm	W	1.7 mm
WI	0.5 mm	VE	13.2 mm	AE	1.2 mm
VI	5.0 mm	AI	1.4 mm	HI	14 mm
IA	1.0 mm	IC	5.2 mm	EC	3.0 mm
Z	1.2 mm	HE	21 mm	EA	1.8 mm
Y	10 mm	X	3.0 mm	G	25 mm

En la Figura 4.14 se muestra la distribución de corriente para la antena Monopolo planar en forma de U, se puede observar que el modo excitado para cada modo de operación en este caso el lado izquierdo es el que está en operación a la frecuencia 2.4 GHz y el del lado derecho a 5.5 GHz, con ello se observa una operación correcta.

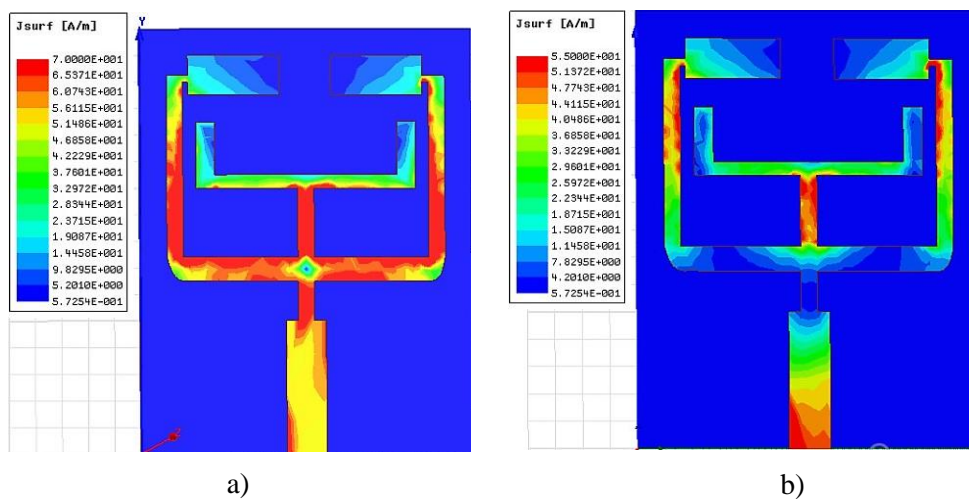


Fig. 4.14 Distribución de corriente a) Operación 2.4GHz b) Operación 5.5GHz

Como observamos en la distribución de corriente, dependiendo de la frecuencia serán las líneas que se exciten y de ellas dependerá el buen funcionamiento de la antena.

A continuación, se obtiene el parámetro S11 para saber el funcionamiento y evaluarlo para cada una de ellas y conocer el ancho de banda para las frecuencias principales que para este proyecto de tesis es de 2.4 GHz y 5.5 GHz.

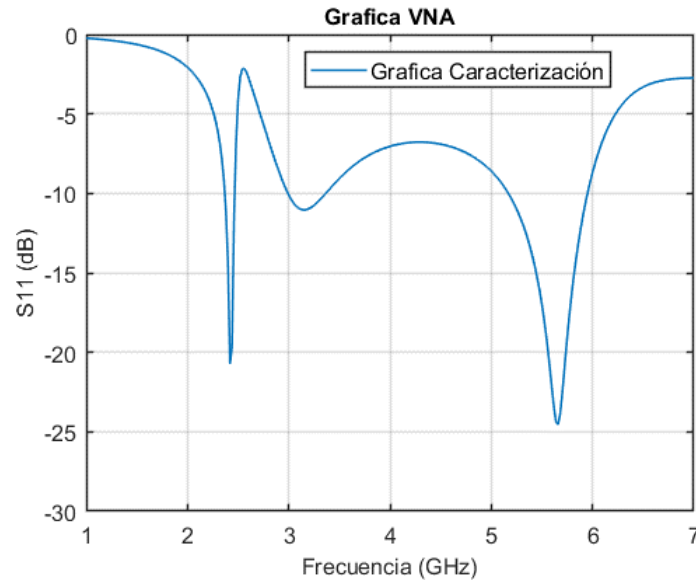


Fig. 4.15 Resultados parámetro S11 antena Monopolo planar en forma de U

En la figura 4.15 obtenemos la gráfica de el parámetro S11 graficada en el simulador HFSS, donde se observa el ancho de banda que funciona para la antena cuando se encuentra por debajo de -10dB.

Para la frecuencia 2.4 GHz tenemos que la antena empieza a proporcionar un buen funcionamiento pasando los 2.37 GHz y tiene un ancho de banda de 100 MHz terminado en 2.47 GHz.

Para la frecuencia de 5.5 GHz tenemos que la antena comenzará a funcionar desde los 5.17 GHz teniendo un ancho de banda considerable de 780 MHz terminando en la frecuencia 5.95 GHz.

Como parte del análisis de radiación de la antena monopolo planar en forma de U, se presentan los diagramas de radiación 3D en las dos bandas operación.

En la figura 4.16 se presenta el diagrama de radiación para 2.45 GHz, por medio de la escala situada de lado izquierdo, se observa que la máxima radiación se concentra en la parte exterior en forma de anillo, con una ganancia de 7.5 dB, lo que significa una concentración de ganancia en el eje XZ.

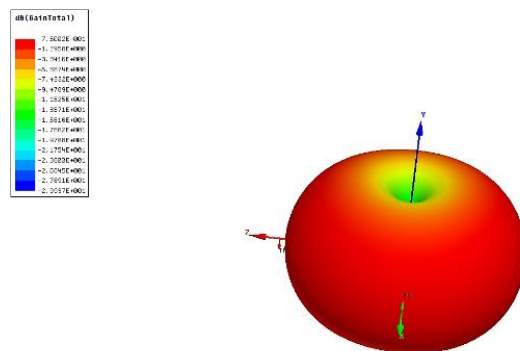


Fig. 4.16 Mapa de radiación para la antena Monopolo planar en forma de U frecuencia 2.4 GHz

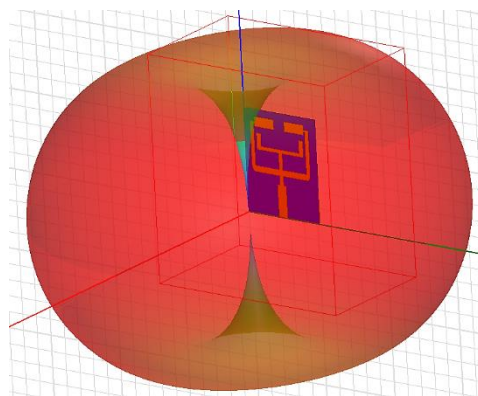


Fig. 4.17 Mapa de radiación sobre la antena monopolo planar en forma de U frecuencia 2.4 GHz

En la figura 4.18 se presenta el diagrama de radiación para 5.5 GHz, por medio de la escala situada de lado izquierdo, se observa que la máxima radiación se concentra en la parte

exterior en forma de anillo, con una ganancia de 4.5 dB, lo que significa una concentración de ganancia en el eje XZ.

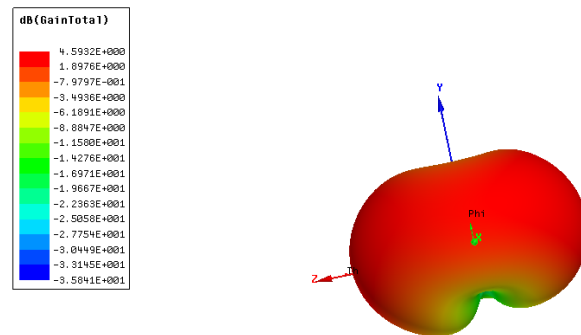


Fig. 4.18 Mapa de radiación para la antena Monopolo planar en forma de U frecuencia 5.5 GHz

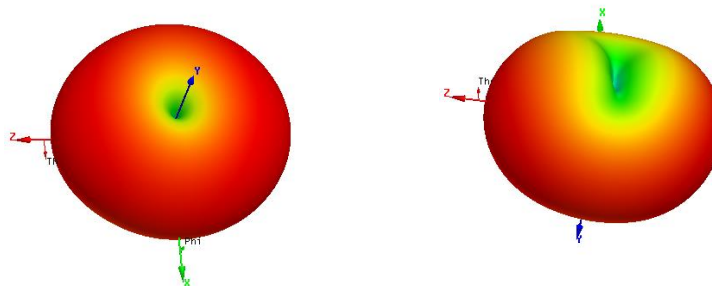


Fig. 4.19 Mapa de radiación vistas para la antena Monopolo planar en forma de U frecuencia 5.5 GHz

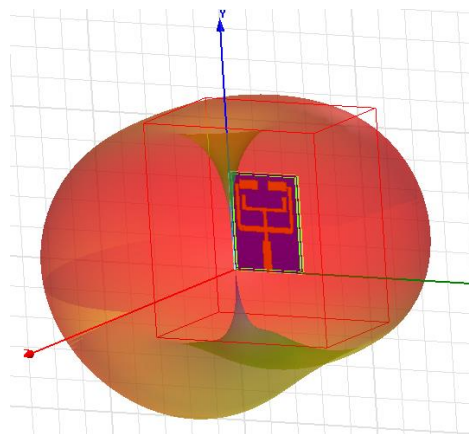


Fig. 4.20 Mapa de radiación sobre la antena monopolo planar en forma de U frecuencia 5.5 GHz

## Capítulo 5.

### Conclusiones y trabajo a futuro

Los avances de las tecnologías en la actualidad suelen ser cada vez más rápidos e innovadores, por lo que resulta vital resolver problemas que tienden a ser un reto donde se debe contemplar bajos costos y de alta calidad. Para poder entender la naturaleza de las cosas, el estudio de fenómenos resulta esencial, así como el desarrollo de innovadoras técnicas de estudio y diseño de nuevos dispositivos que mejoren la calidad de vida y faciliten las actividades de los usuarios en el día a día. Las aportaciones prácticas de este proyecto de tesis se enfocaron a la creación de antenas que pueden funcionar para dos estándares muy conocidos, prácticos y de mucha utilización en el área de la tecnología como son: Bluetooth y WiFi. Por lo tanto, las antenas diseñadas pueden ser utilizadas para una gran variedad de aplicaciones donde se implementan dichos estándares, fundamentalmente para las comunicaciones inalámbricas que se operan en la actualidad. Las aportaciones conceptuales sobre las antenas, la caracterización de sustratos y el procedimiento de este trabajo, alimentan un flujo de información importante para los desarrolladores o diseñadores de antenas que necesitan ser implementadas para dichas frecuencias, ya que al ser una tecnología reciente aún se encuentra en proceso de investigación para así crear circuitos funcionales en diferentes campos y aplicaciones.

En cuestión de antenas se trabajó con la estructura rectangular, la cual no es tan reciente, pero se hizo énfasis en lograr mayor eficiencia, así como la factibilidad de integración en un sustrato textil muy utilizado en la industria. Se observó que la estructura de la antena

realizada presentó resultados más parecidos al de la simulación logrando de esta manera, una antena que se puede utilizar para los diferentes sistemas de comunicación.

La antena monopolo planar en forma de U presentó un buen reto para este proyecto de tesis ya que se buscaba la radiación de dos bandas (2.4 GHz y 5.5GHz) las cuales debían tener un ancho de banda para operar en los sistemas de las bandas ISM. El ancho de banda encontrado en la simulación para la antena monopolo planar en forma de U tiene un rango considerable al igual que una ganancia aceptable, dejando esto como elemento de información para trabajos futuros como puede ser su construcción y los resultados que ofrece.

## **5.1 Sobre el S11**

En los análisis realizados sobre las pérdidas de retorno de los resultados obtenidos mediante el software HFSS y el equipo VNA, las mediciones simuladas y realizadas sobre la antena parche son ligeramente diferentes a la frecuencia central y aun así realiza su función adecuadamente, esto sucede debido a las condiciones sobre las que se caracteriza, recordar que el simulador obtiene las condiciones ideales para un funcionamiento óptimo.

En las mediciones realizadas se obtuvo un comportamiento adecuado de la antena y cumplen con los objetivos ya antes mencionados, la potencia tratada en los diferentes ángulos se sitúa por debajo de los -10 dB, teniendo así una buena potencia de radiación para la transmisión y recepción.

En cuanto a la antena Monopolo planar en forma de U, se observa la generación de un ancho de banda por medio de los monopolos internos y externos logrando de igual manera una potencia adecuada y que se sitúa por debajo de los -10 dB teniendo un ancho de banda

considerable en la frecuencia 5.5 GHz y un ancho de banda moderada para los 2.4 GHz que se propuso en capítulos anteriores.

## **5.2 Sobre la Ganancia**

La ganancia obtenida y mostrada en este proyecto fueron realizadas con las características del ambiente, por lo tanto, las mediciones son definidas de manera real. Se observó que las ganancias para cada una de las antenas eran aceptables y se encontraban en buenos niveles para su implementación. En el caso de la antena tipo parche la ganancia está alrededor de 4 dB que es lo que se espera en este tipo de antenas. En el caso de la antena tipo U, ésta incrementa su ganancia en 2.45 GHz debido al uso de 2 monopolos y esto concuerda con lo reportado en [49].

## **5.3 Sobre el sustrato**

Para el diseño de la antena de tipo parche se eligió el sustrato DIM 100% de algodón debido a que es un textil de fácil adquisición y que suele ser muy utilizado en diferentes campos, para ello tuvimos que conocer su permitividad relativa, ya que al no ser un sustrato donde se diseñen circuitos continuamente, no existe demasiada evidencia de su caracterización, por sus propiedades encontradas como lo es una baja permitividad eléctrica relativa, permite la realización de un diseño más compacto. Otra propiedad importante para destacar en el sustrato textil es el espesor de este ya que es una característica que permite la fabricación de un dispositivo lo suficientemente delgado y flexible.

## **5.4 Sobre el equipo**

Las características del equipo utilizado en este proyecto de tesis son de suma importancia ya sea para la medición de los parámetros o para el diseño de las antenas; de ello dependerá la exactitud de los resultados a la hora de realizar los cálculos. En el caso del VNA dependerá de la precisión del trazado de puntos; en la parte de la calibración depende de los dispositivos empleados, los cuales permiten obtener mediciones en las condiciones más reales posibles y en el cual se someterá la antena construida de tipo parche.

## **5.5 Sobre los diagramas de radiación 3D**

El software de simulación HFSS proporciona varias herramientas de utilidad como lo son los diagramas de radiación en 3D, estos resultados o gráficas permiten tener un mejor entendimiento y perspectiva de la orientación de la radiación respecto a la antena. Además, se obtiene un análisis de la dirección para la máxima radiación, tal como se presentó en el capítulo 4. En el caso de la antena tipo parche, presenta un diagrama direccional sin radiación hacia atrás de la antena y por otro lado la antena U presenta diagramas de radiación omnidireccionales en las frecuencias de resonancia.

## **5.6 Trabajo a Futuro**

Como se explicó en las conclusiones, en este trabajo de tesis se lograron obtener resultados experimentales y simulaciones con muy pequeñas variaciones (antena parche), que son tolerancias completamente aceptables y que son generadas por el tipo de conector y

soldadura empleada, por lo que un paso importante a trabajar en futuro podría ser la optimización de esta etapa.

Otro trabajo a futuro para la antena Monopolo planar en forma de U es la implementación y construcción sobre su sustrato textil para caracterizarla y compararla con los sustentos teóricos puestos en este proyecto de tesis, empleando técnicas de colocación y realización como la mencionada para la antena de tipo parche.

Este proyecto de tesis se limitó a la construcción de una de las dos antenas antes mencionadas debido a la contingencia que presenta nuestra sociedad y por lo cual nos vemos limitados en equipo científico que brinda nuestra institución pero que por lo mismo se encuentra en un periodo de resguardo total, por lo que se podría plantear la continuidad del uso y realización de este proyecto de tesis para futuros investigadores que quieran continuar sobre esta rama de investigación teniendo la teoría aquí recopilada.

## Bibliografía.

- [1] M.Klemm and G.Troester, "Textile UWB Antennas for Wireless Body Area Networks," IEEE Transaction on Antennas Propag., Vol. 54, No. 11, pp. 3192-3197, Sep. 2006
- [2] Nielsen. (2014). Tech-Styles: are consumers really interested in wearing tech on their sleeves? Wired.
- [3] Innovación UNAM. (2014). Una "chamarra inteligente", reciente innovación de UNAM Mobile, UNAM.
- [4] Rakhi and Sonam Thakur, "Performance Analysis of Different Shapes Parche Antennas at 2.45 GHz", International Journal of Engineering Research and Technology, Vol.3, Issue 9, 2014.
- [5] K.S. Lim, M. Nagalingam, and C.P. Tan, "Design and construction of microcinta UWB antenna with time domain analysis," Progress in Electromagnetics Research M, Vol. 3, 153–164, 2008.
- [6] M. A. R. O. M. K. A. R. M. A. A. and K. Kamardin, "Design and Analysis UWB Wearable Textile Antenna," in Proceedings of the 5<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 2012.
- [7] S. and B. G., "A Circular Disk Microcinta WLAN Antenna for Wearable Applications," in Annual IEEE India Conference (AIIC), 2009. doi:10.1109/INDCON.2009.5409355
- [8] S. Gao, A. Sambell and S. S. Zhong" Polarization-agile antennas", IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 48, no. 6, pp.28 -37 2006
- [9] K. L. Wong, S. W. Su and Y. L. Kuo" A printed ultra-wideband diversity monopole antenna", Microw. Opt Technol. Lett., vol. 38, no. 4, pp.257 -259 2003
- [10] J. Huang, T. Jiang, Z. Wang, "A novel textile antenna using composite multiflament conductive threads for smart clothing applications," Microw. Opt. Tech. Lett., 58(5):1232-1236, 2016.

- [11] J. Y. Kim, S. J. Ha, D. Kim, B. Lee, C. W. Jung, "Reconfigurable beam steering antenna using U-slot fabric parche for wrist-wearable applications," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 26(11), 1545-1553, 2012.
- [12] J. S. Chen, et al., "Wearable Textile Microcinta Parche Antenna for Multiple ISM Band Communications", in *Proc. of the IEEE Antennas and Propag. Society Int. Symp. (APSURSI)*, July 2013.
- [13] C. Parmar & S. Joshi, "Wearable Textile Parche Antenna for On-Body Communications", in *Proc. of Global Conf. on Comm. Tech. (GCCT)*, 2015.
- [14] S. Purohit & F. Raval, "A Review on Wearable – Textile Parche Antenna", *Int. J. of Sc. & Engr. Res.*, Vol. 4(12), pp. 696-702, Dec. 2013.
- [15] Q. Liu & Y. Lu, "CPW-Fed Wearable Textile L-Shape Parche Antenna", in *Proc. of 3rd Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propag.*, 2014.
- [16] S. Sankaralingam and B. Gupta, "Determination of Dielectric Constant of Fabric Materials and Their Use as Substrates for Design and Development of Antennas for Wearable Applications," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 12, pp. 3122-3130, Dec. 2010.
- [17] L. Zhang, Z. Wang, D. Psychoudakis, J.L. Volakis, Flexible Textile Antennas for Body Worn Communication. In *Proceedings of IEEE International Workshop on Antenna Technology*, USA, pp. 205–208. March 2012.
- [18] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, 3<sup>rd</sup> ed., Wiley-India, 2010, pp. 819
- [19] Application Note 1217-1, "Basics of measuring the dielectric properties of materials", HP Literature Number 5091-33003, 1992.
- [20] F. L. Peñaranda Foix, P. J. Plaza Gonzalez, B. Garcia Baños, D. Polo Nieves, "A non Destructive Method of Measuring the Dielectric and Magnetic Properties of Laminates Materials in Open Cavities," TH6D-6, April 2004
- [21] Raúl Quechol Elías "Sonda Coaxial para medir propiedades dieléctricas en materiales en el rango de microondas" pp 29-40, Noviembre 2020.

- [22] Balanis A. Constantine. ANTENNA THEORY ANALYSIS AN DESIGN. Third edition. U.S.A: Wiley interscience 2005
- [23] Anguera Jaume; Pérez Antonio. TEORÍA DE ANTENAS Guía de estudio. España: Creative Commons Deed 2008. (Sin obra derivada 2.5: Ingeniería La Salle, estudios semipresenciales).
- [24] Vázquez-Contreras “Constante dieléctrica” mayo 2016 Wayback Machine
- [25] W. Panofsky and M. Phillips “Classical Electricity and Magnetism” Addison-Wesley 2009
- [26] Feynman, Leighton and Sands “Lectures on physics” Addison-Wesley 2016
- [27] Shozo Usami and Gentei Sato, "The Authenticity of the *Newman* Notebook and Its Reference to the *Yagi antenna*" 2005 IEEE
- [28] Wayne Tomasi, SISTEMAS DE COMUNICACIONES ELECTRONICAS Prentice Hall, Cuarta Edición, Edición en español 2003
- [29] Baars, Jacob W. M., The Paraboloidal Reflector Antenna in Radio Astronomy and Communication. (Libro). – Estados Unidos: New York: Ed. Springer, 2007.
- [30] Cardama Aznar, A., Jofre Roca L., Rius Casals J. M., Romeu Robert J. y Blanch Boris S. Antenas. Alfaomega, Barcelona 2000.
- [31] Karen Nallely Olan Nuñez, “Diseño, Modelado y Caracterización de Arreglo de Antenas Microcinta para Aplicaciones del Internet de las Cosas.” INAOE agosto 2019.
- [32] David M. Pozar, "Microwave Engineering", Third Edition, John Wiley & Sons Inc.; ISBN 0-471-44878
- [33] Sara Rodríguez Roberto “DISEÑO DE ANTENAS MICROCINTA SOBRE SUSTRATO TEXTIL” pp 12-30 Tarragona 2017
- [34] Tomasi, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Cuarta edición. Pearson, Prentice Hall.
- [35] Sapiensman “Conceptos de Electrotecnia para aplicaciones industriales - Líneas de Transmisión – El fenómeno de la radiación” 2018

- [36] Miguel Ángel Bolaños Torres “Diseños de una Antena F Invertida con líneas coplanares en sustrato flexible en las bandas GSM 1800 e ISM 2.45 GHz” pp 15-30 2016
- [37] Angel Cardama Aznar “Antenas” Segunda edición Septiembre 2002. El tinter, SAL.
- [38] Raul Hernandez Aquino “Diseño, simulación y construcción de antenas tipo parche para bluetooth y Wi-Fi, bandas 2.4 GHz y 5.8 GHz” Mayo 2008
- [39] Bhartia, P., K.V.S Rao, y R.S. Tomar, “Millimeter-wave microcinta and printed circuit antennas”, Norwood: Artech house, 1991
- [40] Zürcher, Jean – Francois, y Fred E. Gardiol, “Broadband parche antennas”, Norwood: Artech house, 1995.
- [41] J. H. Lu and B. J. Huang, “Planar multi-band monopole antenna with L-shaped parasitic strip for WiMAX application,” *Electron. Lett.*, vol. 46, no. 10, pp. 671–672, May 2010.
- [42] W. S. Chen and Y. H. Yu, “The design of printed rhomb shaped antenna with slits for WiMAX system,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 49, pp. 2503–2508, 2007.
- [43] L. Pazin, N. Telzhensky, and Y. Leviatan, “Multi band flat-plate inverted-F antenna for Wi-Fi/WiMAX operation,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 197–200, 2008.
- [44] W. S. Chen and Y. C. Chang, “CPW-fed printed monopole antenna with branch slits for WiMAX applications,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 50, pp. 952–954, 2008.
- [45] K. G. Thomas and M. Sreenivasan, “Compact triple band antenna for WLAN/WiMAX applications,” *Electron. Lett.*, vol. 45, pp. 811–813, 2009.
- [46] S. Chaimool and K. L. Chung, “CPW-fed mirrored-L monopole antenna with distinct triple bands for WiFi and WiMAX applications,” *Electron. Lett.*, vol. 45, pp. 928–929, 2009.
- [47] S. Y. Lee and C. C. Yu, “A novel wideband asymmetric hybrid antenna for WLAN/WiMAX applications,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 51, pp. 1055–1057, 2009.
- [48] K. G. Thomas and M. Sreenivasan, “A novel triple band printed antenna for WLAN/WiMAX applications,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 51, pp. 2481–2485, 2009.

[49] J. Lu and W. Chou, "Planar Dual U-Shaped Monopole Antenna With Multiband Operation for IEEE 802.16e," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 1006-1009, 2010, doi: 10.1109/LAWP.2010.2087003., 2009.