



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**Facultad de Ciencias de la Electrónica**

Maestría en Ingeniería Electrónica,  
opción Instrumentación Electrónica

Tesis para obtener el grado de  
**Maestro en Ingeniería Electrónica**

---

**Antena Multibanda Transparente para Comunicaciones  
Vehiculares**

---

Presenta:

Jorge Iván Trujillo Flores

Directores:

Dr. Jesús Manuel Muñoz Pacheco

Dr. Richard Torrealba Meléndez

Dr. Marco Antonio Vásquez Agustín

19/10/2020

---

## Dedicatoria

A mi hermana, por hacerme desear ser el mejor ejemplo de ser humano. A Gustavo, por apoyarme de manera incondicional y quien, sin dudarlo, ha sido un padre excepcional. A la memoria de mis abuelos, quienes siempre creyeron en mi. A mi madre, a quien le debo todo lo que soy y seré. A las personas que, con amor, han guiado mi paso por este mundo.

---

## Agradecimientos

A mis padres, por ser un soporte vital en cada paso de mi vida, por ser el ejemplo de que los triunfos se pueden lograr con trabajo y constancia.

A mi hermana, por hacerme ver la vida siempre con una sonrisa.

A mis asesores, por ser pacientes y comprometidos con mi proceso de aprendizaje y desarrollo para el presente trabajo de tesis.

A la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la BUAP, por haberme dado la oportunidad de cursar el grado de maestría con el apoyo de una beca de colegiatura.

Al CONACyT por apoyar mi desarrollo profesional mediante la beca de maestría.

---

## Resumen

En este trabajo se presenta el diseño, simulación, fabricación y caracterización de una antena multibanda transparente. El material a utilizar como conductor es óxido de indio y estaño (ITO) con una resistencia de hoja ( $R_s$ ), medida, de  $8 \Omega/sqr$ . El óxido conductor transparente (TCO), se encuentra depositado en un sustrato de vidrio con una permitividad de 5,5 y un grosor de 1,1 *mm*. La antena diseñada cuenta con una configuración coplanar con dimensiones de 50 *mm* x 17 *mm* x 1,1 *mm*. La geometría de la antena corresponde a una antena con ranuras de dipolo y acoplamiento capacitivo, alimentada por una guía de onda coplanar (CPW). La caracterización de la antena comprende sus parámetros principales: coeficiente de reflexión, ancho de banda, ganancia y directividad. Estos parámetros fueron medidos y comparados con los resultados simulados. La antena propuesta cumple con los requerimientos, en términos de frecuencia de operación, del estándar IEEE 802.11p. Además, cubre la banda de frecuencias de 1,9 - 2,5 *GHz* la cual es utilizada en LTE Sub 6 *GHz*.

---

# Índice

Capítulos	Página
<b>1. Introducción</b>	<b>10</b>
1.1. Objetivos . . . . .	12
1.1.1. Objetivo general . . . . .	12
1.1.2. Objetivos específicos . . . . .	12
1.2. Justificación . . . . .	12
1.3. Descripción . . . . .	14
<b>2. Teoría de Antenas</b>	<b>16</b>
2.1. Antenas . . . . .	16
2.1.1. Mecanismo de radiación . . . . .	17
2.2. Parámetros fundamentales de las antenas . . . . .	18
2.2.1. Impedancia de entrada . . . . .	19
2.2.2. Eficiencia de la antena y eficiencia de radiación . . . . .	21
2.2.3. Directividad . . . . .	22
2.2.4. Ganancia . . . . .	23
2.2.5. Ancho de banda . . . . .	23
2.3. Películas conductoras transparentes . . . . .	24
2.3.1. Propiedades eléctricas . . . . .	24
2.3.2. Propiedades ópticas: transmitancia ( $T$ ) . . . . .	26
2.3.3. Óxidos conductores transparentes (TCO) . . . . .	27
2.3.4. Técnicas de depósito de óxidos conductores . . . . .	28

---

2.4.	Tipos de antenas . . . . .	31
2.4.1.	Antenas coplanares . . . . .	32
2.4.2.	Antenas transparentes . . . . .	33
2.5.	Conclusiones . . . . .	34
<b>3.</b>	<b>Desarrollo Práctico</b>	<b>35</b>
3.1.	Antena de cobre sobre substrato transparente . . . . .	35
3.1.1.	Diseño de antena . . . . .	36
3.1.2.	Simulación de la antena . . . . .	38
3.2.	Antena de película conductiva transparente sobre substrato transparente . . . . .	40
3.2.1.	Caracterización del óxido conductivo transparente . . .	41
3.2.2.	Diseño y simulación de la antena . . . . .	43
3.3.	Conclusiones . . . . .	50
<b>4.</b>	<b>Resultados</b>	<b>51</b>
4.1.	Antena de cobre sobre substrato transparente . . . . .	51
4.2.	Antena de ITO sobre substrato transparente . . . . .	53
4.2.1.	Coeficiente de reflexión y ancho de banda . . . . .	54
4.2.2.	Directividad . . . . .	57
4.2.3.	Ganancia . . . . .	58
4.3.	Conclusiones . . . . .	60
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>61</b>
5.1.	Diseño, simulación y fabricación . . . . .	61
5.2.	Caracterización . . . . .	62

---

5.3. Trabajo futuro . . . . . 63  
**Anexo A. Publicaciones derivadas del trabajo . . . . . 65**

---

# Índice de figuras

2.1. Antena como dispositivo de transición. . . . .	18
2.2. Antena en modo transmisor. . . . .	20
(a). Antena conectada a generador. . . . .	20
(b). Circuito equivalente de la antena. . . . .	20
2.3. Método de la sonda de cuatro puntas. . . . .	26
2.4. Sistema de depósito por evaporación. . . . .	29
2.5. Proceso físico de pulverización. . . . .	30
2.6. Sistema de depósito por sputtering. . . . .	30
2.7. Geometrías comunes de antenas coplanares. . . . .	33
3.1. Dimensiones de la antena. . . . .	36
(a). Dimensiones parche. . . . .	36
(b). Dimensiones línea de transmisión. . . . .	36
3.2. Simulación antena de cobre sobre substrato transparente. . . . .	39
3.3. Coeficiente de reflexión simulado de la antena de cobre. . . . .	39
3.4. Diagrama de corriente de antena de cobre. . . . .	40
3.5. Esquemático de las posiciones, en la película de ITO, para la medición de la $R_s$ . . . . .	41
3.6. Geometría de la antena transparente. . . . .	44
3.7. Impacto de la variación de dimensiones de la antena en el coeficiente de reflexión. . . . .	46
3.8. Coeficiente de reflexión simulado de la antena de ITO. . . . .	47
3.9. Simulación antena de ITO sobre vidrio. . . . .	47
3.10. Simulación distribución de corriente a (a) 2,1 $GHz$ y (b)5,9 $GHz$ . . . . .	48
3.11. Diagrama de radiación 3D para antena transparente. . . . .	49
3.12. Simulación eficiencia de la antena de ITO. . . . .	50
4.1. Antena de cobre. . . . .	52
4.2. $S_{11}$ simulación y medición. . . . .	52
4.3. Transmitancia de antena fabricada en ITO. . . . .	54
4.4. Coeficiente de reflexión simulado vs medido de la antena de ITO. . . . .	55
4.5. Patrones de radiación simulados y medidos. . . . .	58

---

(a).	Patrón en plano H a 5.9 GHz. . . . .	58
(b).	Patrón en plano E a 5.9 GHz. . . . .	58
(c).	Patrón en plano H a 2.1 GHz. . . . .	58
(d).	Patrón en plano E a 2.1 GHz. . . . .	58
4.6.	Posicionamiento de antenas para medición de ganancia y directividad. . . . .	59

---

## Índice de tablas

3.1. Parámetros del sustrato y frecuencia de resonancia. . . . .	36
3.2. Resultados teóricos dimensiones antena de cobre. . . . .	38
3.3. Resultados teóricos y por análisis paramétrico de la antena de cobre. . . . .	40
3.4. Mediciones resistencia de hoja ( $R_s/sqr$ ) de película de ITO. . . . .	42
3.5. Variables de materiales a utilizar. . . . .	42
3.6. Cálculo de dimensiones de ranuras resonantes . . . . .	44
3.7. Dimensiones de la antena diseñada con ITO. . . . .	45
4.1. Comparativa resultados antena de cobre. . . . .	53
4.2. Análisis comparativo con otras antenas transparentes. . . . .	56
4.3. Comparación del ancho de banda fraccional simulado y medido en antena de ITO. . . . .	56
4.4. Medición de potencia para combinaciones de antenas a 2,1 y 5,9 $GHz$ . . . . .	59
4.5. Ganancia medida (M) y simulada (S) de la antena de ITO. . . . .	60
5.1. Características de la antena multibanda transparente. . . . .	63

---

## Capítulo 1. Introducción

Las comunicaciones han adquirido un papel relevante en el desarrollo de conceptos como el internet de las cosas (IoT) [1]. IoT engloba tecnologías nuevas y emergentes que permiten transformar a las ciudades, con infraestructura convencional, en ciudades inteligentes, con el objetivo de mejorar el desempeño de sus servicios públicos [2,3]. Las ciudades inteligentes, a través de sistemas de comunicación interoperables, son capaces de medir, integrar y analizar información crítica referente a la operación y evolución de dichas ciudades, lo que permite transitar hacia urbanizaciones sostenibles y con una mayor calidad de vida [4–6]. Uno de los principales objetivos, dentro de las ciudades inteligentes, es la integración de movilidad inteligente. Este concepto, define un modelo de transporte que requiere infraestructura innovadora, capaz de gestionar tránsito y transporte que ahorre recursos a través del uso de nuevas tecnologías para maximizar su eficiencia y accesibilidad [7].

Un área específica de *IoT* que permite el desarrollo de ciudades inteligente son las redes vehiculares [8]. Estas redes hacen uso de la comunicación vehículo-vehículo (V2V), vehículo-infraestructura (V2I) [9] y vehículo-todo (V2X) [8]. El desarrollo e implementación de redes vehiculares aporta a la integración de la movilidad con todo lo que está siendo alcanzado por el concepto de *Smart* [10], que incluye desde dispositivos y hogares inteligentes, hasta carreteras, infraestructura y ciudades inteligentes.

En la actualidad, existen diversos sistemas de comunicaciones que se integran con los vehículos debido a la creciente demanda de conectividad en los ambientes vehiculares [11]. Dicha integración se encuentra regulada bajo el marco del estándar vigente IEEE 802.11,

---

sin embargo, la necesidad de mejores prestaciones de tiempo de respuesta ha generado que se desarrolle un nuevo estándar que satisfaga dichas necesidades, el estándar IEEE 802.11p [11,12]. Dicho estándar es el núcleo para el acceso inalámbrico en entornos vehiculares [13–16]. El estándar IEEE 802.11p permite comunicaciones vehiculares definidas en la capa física (PHY) y en la capa de control de acceso al medio (MAC) dentro de las comunicaciones dedicadas de corto alcance (DSRC) [17]. En DSRC, el rango de los 5.85-5.925 GHz se divide en siete canales con un ancho de banda de 10 MHz, lo que representa la mitad del ancho de banda requerido por el estándar 802.11a [17]. Este estándar ofrece transmisión de corto alcance, menor a 300m, y tasas de transferencia de datos de los 6 a los 27 *Mb/s* [13]. Además, el estándar 802.11p requiere una frecuencia portadora de 5,9 *GHz* [15].

Un elemento relevante en el diseño de sistemas de comunicación vehiculares son las antenas, las cuales, deben satisfacer las especificaciones de radiación [18,19]; además, las antenas deben asegurar que no exista intervención con el funcionamiento del vehículo. Usualmente, las antenas están hechas de metal sobre sustratos opacos [20–22], lo que puede resultar poco atractivo para la creciente necesidad de optimizar espacios y ofrecer mejores prestaciones técnicas y estéticas. Por ello encontramos, cada vez con mayor frecuencia, investigación, desarrollo e implementación de antenas transparentes que pueden ser integradas en paneles de celdas solares, dispositivos móviles y, en el caso de la industria automotriz, en parabrisas y ventanas [23].

Para el desarrollo de antenas transparentes se han probado diversos materiales y configuraciones con la finalidad de mejorar la eficiencia de dichas antenas. Algunas de las películas conductoras transparentes que se han probado para su utilización, en este tipo de antenas, incluyen película de poliéster recubierta de plata (AgHT-8) [24], óxido de indio y estaño (ITO) [25], óxido de indio, zinc y estaño (IZTO) [26] y óxido de zinc dopado con galio (GZO) [23].

En esta tesis, se diseñará y fabricará una antena transparente para comunicaciones vehiculares, usando sustrato de vidrio recubierto con ITO. Dicha antena, alimentada con una guía de onda coplanar con operación multibanda para satisfacer los requerimientos del estándar IEEE 802.11p (5,9 *GHz*) y las bandas LTE sub 6 *GHz* [13,21]. Para obtener las frecuencias deseadas, se utilizará una geometría de parche central rectangular con un plano de tierra

---

con ranuras simétricas rectangulares [27, 28]. La caracterización de la antena tendrá como base la medición del coeficiente de reflexión, la ganancia y el diagrama de radiación. En la sección 1.3 se puede consultar, de manera más detallada, el proceso a seguir en este trabajo de investigación.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Objetivo general

Diseñar y fabricar una antena multibanda transparente para comunicaciones vehiculares.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Analizar los parámetros de antenas.
- Analizar y contrastar antenas planas en sustrato.
- Analizar y comparar sustratos y películas conductoras transparentes para seleccionar la película conductiva a utilizar en el diseño (grosor, conductividad,  $R_s$ ).
- Diseñar la antena usando cobre sobre los sustratos transparentes.
- Diseñar la antena usando películas conductoras transparentes sobre sustratos transparentes.
- Fabricar y caracterizar la antena transparente midiendo coeficiente de reflexión, ganancia y diagrama de radiación en 2D.

## 1.2. Justificación

Actualmente, la industria automotriz muestra una creciente necesidad de comunicación debido a la aparición de conceptos como *IoT* y *smart cities*. La implementación de sistemas de comunicación vehículo-vehículo (V2V) y vehículo-infraestructura (V2I) requieren de antenas que cumplan con los requerimientos propuestos por el estándar IEEE 802.11p, es decir, se requiere de antenas que operen en la banda de los 5,9 GHz [12]. A pesar de que existen investigaciones que muestran el desarrollo de antenas que cumplen con los requerimientos

---

técnicos propuestos por el estándar antes mencionado, dichas antenas no cubren la necesidad de eficientar el espacio y la estética de los automóviles. Por ello, se propone el desarrollo de una antena transparente para las comunicaciones dedicadas de corto alcance (DSRC [8], [11]) en aplicaciones vehiculares.

En el campo del desarrollo de antenas transparentes, se han investigado diversos materiales que muestran un desempeño positivo en la transmitancia óptica, así como en la conductividad. Otro punto importante a tener en cuenta es la geometría de la antena, la cual asegura que se obtenga la frecuencia de resonancia deseada.

Existen muchas investigaciones de antenas transparentes con variaciones en términos de geometrías y materiales utilizados. En [25] se presenta una antena transparente para aplicaciones WLAN a  $5\text{ GHz}$ , cuya topología está inspirada en una flor de seis pétalos, fabricada en ITO como película conductiva transparente. Muchos diseños utilizan alimentación por guía de onda coplanar [24, 29, 30], ya que esto permite que la película conductiva transparente sólo se tenga que depositar en uno de los lados del sustrato. En [24], se propone una antena transparente para aplicaciones de banda ultra ancha con alimentación de guía de onda coplanar, usando una película conductiva transparente de AgHT-8 con un radiador rectangular en forma de escalera y un plano de tierra modificado. Además, en [29, 30], se reportan antenas multibanda transparentes, alimentadas con guías de onda coplanares, para aplicaciones  $5G$ . Uno de los problemas principales en el diseño de antenas transparentes, es la resistencia de hoja de las películas conductivas transparentes que tiende a ser mayor a  $5\ \Omega/sqr$ , principalmente al utilizar ITO [31–33]. Generalmente, las antenas fabricadas con ITO muestran un ancho de banda fraccional mayor al 20% generando respuestas de banda ultra ancha.

En el trabajo presentado por Castel *et al.* [34], se utilizan cuatro diferentes películas conductoras transparentes, la primera es una película de cobre ultrafina (Cu) que presenta una conductividad de  $12,05 \times 10^6\ S/m$  y una transparencia máxima del 64%; la segunda es una película de óxido de indio y estaño (ITO) que tiene una conductividad de  $0,12 \times 10^6\ S/m$  y una transparencia máxima del 86%; por otra parte, se presenta una película multicapa ITO/Cu/ITO que muestra una conductividad de  $1,16 \times 10^6\ S/m$  y una transparencia máxima del 61%; finalmente, se presenta una malla de plata con conductividad de  $6,3 \times 10^6\ S/m$  y una transparencia del 81,3%; la frecuencia de resonancia de las antenas es de  $850\ MHz$ .

---

En el trabajo realizado por Green *et al.* [23] se reporta una conductividad de  $3 \times 10^5 \text{ S/m}$  y una transparencia  $> 75\%$  utilizando una película de óxido de zinc fuertemente dopado con galio (GZO), dicha antena tiene una frecuencia de resonancia en  $2,4 \text{ GHz}$ . Otro de los materiales que se han estudiado son las películas multicapa de óxido de indio-zinc-estaño con plata IZTO/Ag/IZTO que muestran una conductividad de  $2 \times 10^6 \text{ S/m}$  y una transparencia superior a  $80\%$  para una antena cuya frecuencia de resonancia está en los  $2,4 - 2,5 \text{ GHz}$  [26].

Para elegir la película conductiva a utilizar en el proceso de fabricación, es necesario realizar un estudio de los efectos que tienen sus principales parámetros (grosor, conductividad y  $R_S$ ) en el rendimiento de la antena.

A pesar de la existencia de investigación y desarrollo alrededor de las antenas transparentes, gran parte de dichas investigaciones se encuentran orientadas a dispositivos personales [26, 35, 36]. Además, las antenas que han sido previamente mencionadas, operan en las bandas VHF y UHF [32, 33]. Esta tendencia muestra la necesidad de una mayor cantidad de estudios relacionados con antenas transparentes que cumplan con las prestaciones requeridas por la industria automotriz.

### 1.3. Descripción

El resto del documento, de este trabajo de tesis, se presenta bajo la siguiente organización:

- **Capítulo 2: Marco Teórico.** Este capítulo presentará los conceptos necesarios para comprender el funcionamiento de las antenas, a través del estudio de los diversos parámetros que determinan el desempeño de éstas. Además, se presentarán las propiedades relevantes de las películas conductivas transparentes y cómo se integran en el desarrollo de antenas a través de configuraciones coplanares.
- **Capítulo 3: Desarrollo Práctico.** En este capítulo se describirá el proceso teórico y práctico en el que se sustenta este trabajo de investigación. Como primer paso, se realizará el diseño de una antena de parche usando cobre como elemento conductor y vidrio como sustrato. Posteriormente, se seleccionará y caracterizará la película conductiva transparente a utilizar en la fabricación de la antena. Finalmente, a partir del análisis de los resultados obtenidos con la antena de cobre y la caracterización de la película

---

conductiva, se procederá al diseño y fabricación de la antena transparente siguiendo la metodología reportada en [37]. Para el diseño de ambas antenas se realizará el análisis paramétrico de las mismas, a través de un software de onda completa (HFSS), donde se obtendrán los siguientes parámetros: impedancia de entrada, coeficiente de reflexión ( $S_{11}$ ), ganancia, distribución de corriente en la antena y diagramas de radiación. Una vez obtenidos los resultados esperados, se fabricarán las antenas siguiendo el procedimiento descrito en [38].

- **Capítulo 4: Resultados.** En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos mediante mediciones del coeficiente de reflexión, ganancia y diagrama de radiación en 2D, estas mediciones se realizarán en el Laboratorio de Caracterización de Sistemas Basados en Microondas de la FCE. El coeficiente de reflexión e impedancia de entrada se medirán usando un analizador vectorial de redes (VectorStar, Anritsu). La ganancia máxima se obtendrá utilizando la técnica de las tres antenas [18], usando un analizador de espectros y un generador de funciones en el rango de microondas. Finalmente, se obtendrán los diagramas de radiación en dos dimensiones usando un analizador de espectros y un generador de funciones en el rango de microondas y empleando la metodología descrita en [18].
- **Capítulo 5: Conclusiones y Trabajo Futuro.** A partir de la fabricación y caracterización de la antena transparente, se analizarán los resultados obtenidos y se pondrá a consideración el trabajo futuro que deberá realizarse para llevar a la aplicación, en la industria automotriz, los resultados de este trabajo de investigación.

---

## Capítulo 2. Teoría de Antenas

En este capítulo se presentan las definiciones pertinentes para la correcta interpretación de los resultados que se muestran en el capítulo 4; dichos resultados obtenidos a partir del desarrollo práctico que se describe en el capítulo 3. Para ello, a continuación se describen conceptos básicos relacionados con el mecanismo de radiación de las antenas, así como los tipos de antenas más comunes, haciendo un especial énfasis en las antenas coplanares. Posteriormente, se presenta una breve revisión de los parámetros fundamentales de las antenas. Finalmente, se presentan las propiedades y métodos de fabricación de las películas conductoras transparentes, así como una breve revisión de los óxidos conductores transparentes.

### 2.1. Antenas

En el Estándar IEEE una antena es “aquella parte de un sistema emisor o transmisor que está diseñada para irradiar o recibir ondas electromagnéticas” [8]. Con base en esta definición, podemos decir que una antena es un dispositivo que recibe información a través de una línea de transmisión (medio guiado) y nos permite enviar y/o recibir dicha información a través del espacio libre (medio no guiado). Uno de los objetivos principales de las antenas es radiar la mayor cantidad de potencia suministrada a través de la línea de transmisión; dicha radiación debe cumplir con la directividad adecuada para la aplicación en que se busca implementar, en este caso, comunicaciones dedicadas de corto alcance (DSRC [8], [11]) para aplicaciones vehiculares. Por otra parte, un segundo objetivo de la utilización de antenas es la recepción de las ondas radiadas; para cumplir con ambos objetivos, las antenas deben

---

contar con ciertas prestaciones en términos de directividad, ganancia, ancho de banda, ancho de haz, eficiencia de haz, eficiencia e intensidad de radiación, impedancia y polarización [18], [19]. La necesidad del cumplimiento de dichos requerimientos técnicos, así como algunos requerimientos específicos de otra naturaleza (estéticos, espacio, etc.), dan paso a la existencia de diversos tipos de antenas. Tanto los requerimientos, como la clasificación de las antenas serán discutidos en las secciones posteriores.

### 2.1.1. Mecanismo de radiación

Para comprender el funcionamiento de las antenas, es importante conocer cómo se logra la radiación, es decir, cómo se generan los campos electromagnéticos. A partir del análisis del desplazamiento de las cargas a través de un alambre, es posible llegar a la relación básica entre corriente y carga [18]. Si se tiene un alambre de longitud  $l$ , entonces

$$l \frac{dI_z}{dt} = l q_l \frac{dv_z}{dt} = l q_l a_z \quad (1)$$

donde,

$l$ : longitud del alambre

$I_z$ : corriente a través del alambre

$q_l$ : carga por unidad de longitud

$v_z$ : velocidad de la carga a través del alambre

$a_z$ : aceleración de la carga a través del alambre

Esta ecuación no sólo describe la relación entre corriente y carga, también describe la relación fundamental de radiación electromagnética. A partir de dicha relación, se puede aseverar que “para generar radiación, debe existir una corriente variante en el tiempo o una aceleración (desaceleración) de la carga” [18]. Por lo tanto, si una carga se encuentra estática, no se crea corriente y, como consecuencia, no existe radiación. Si el cable es recto e infinito y la carga se está moviendo a una velocidad constante, no existe radiación. En este caso, el cable tendría que estar curvo, doblado, discontinuo, terminado o truncado para que, en estas discontinuidades, se cree una variación de la velocidad (aceleración/desaceleración) y, por lo tanto, se genere radiación. Finalmente, también se puede asegurar que existe radiación cuando

---

la carga se encuentra oscilando en movimiento armónico, incluso si el cable es recto [18].

A pesar de que las cargas eléctricas son necesarias para excitar los campos, éstas no se necesitan para que éste continúe existiendo en el espacio abierto. Es decir, al ser irradiado el campo electromagnético (cuando éste abandona la antena) no es necesario que existan cargas eléctricas para que éste se siga propagando [18]. En la Figura 2.1, se muestra la forma en que son irradiados los campos después de haber sido generados por la aceleración de las cargas.

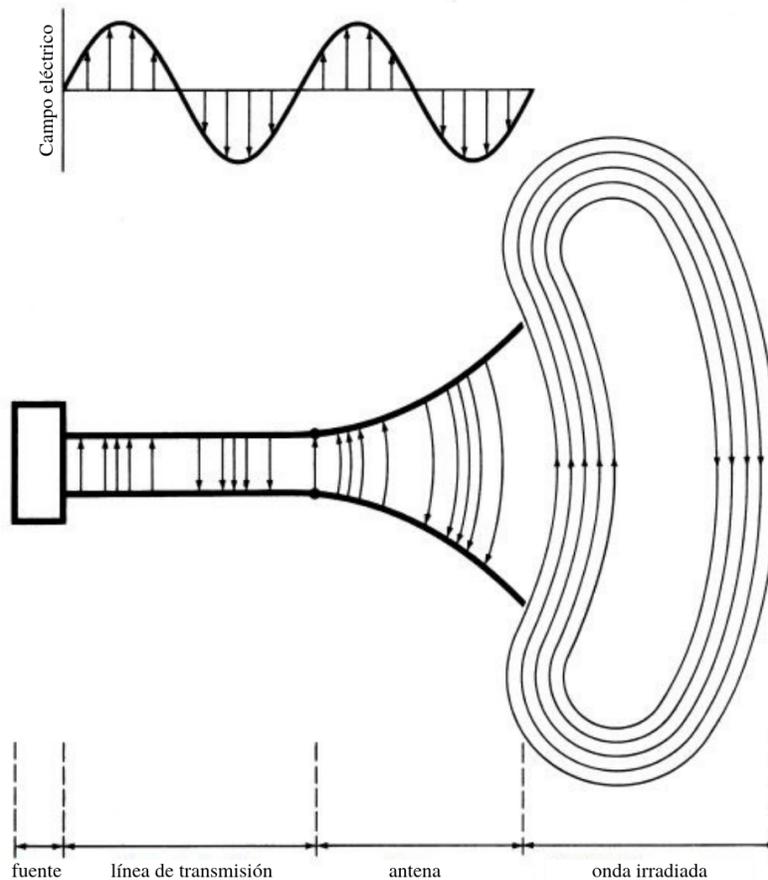


Figura 2.1: Antena como dispositivo de transición [18].

## 2.2. Parámetros fundamentales de las antenas

Una antena es un dispositivo que formará parte de un sistema más amplio y complejo. Por ello, es necesario conocer y describir adecuadamente cada uno de los parámetros de la antena y, de esta manera, es posible saber cómo será su interacción con los demás elementos de dicho sistema. El conocimiento de los requerimientos del sistema, permite diseñar una

---

antena o antenas que cumplan con las características necesarias. A continuación, se describen los parámetros fundamentales de las antenas con base en las definiciones proporcionadas en el Estándar IEEE para definiciones de términos para antenas (IEEE std 145-2013).

### 2.2.1. Impedancia de entrada

La impedancia de entrada es definida como “la impedancia que presenta una antena en sus terminales” [19]. La impedancia de entrada es un parámetro relevante ya que, la corriente necesaria para que la antena pueda irradiar con la potencia requerida, estará determinada por el voltaje entregado por el generador y por la impedancia de entrada. En la Figura 2.2a se muestra una antena conectada a un generador en las terminales a-b. En la Figura 2.2b se observa el circuito equivalente de dicho arreglo.

A partir del circuito equivalente mostrado en la Figura 2.2b, podemos definir a la impedancia de la antena ( $Z_A$ ) y la impedancia del generador ( $Z_g$ ) como

$$Z_A = R_L + R_r + jX_A \quad (2)$$

$$Z_g = R_g + jX_g \quad (3)$$

donde,

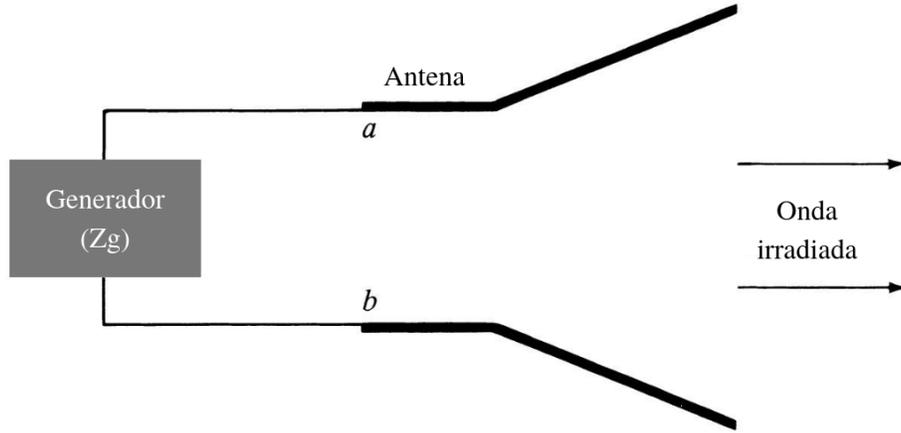
$R_L$ : resistencia de carga, debida a las pérdidas relacionadas con la estructura de la antena

$R_r$ : resistencia de radiación

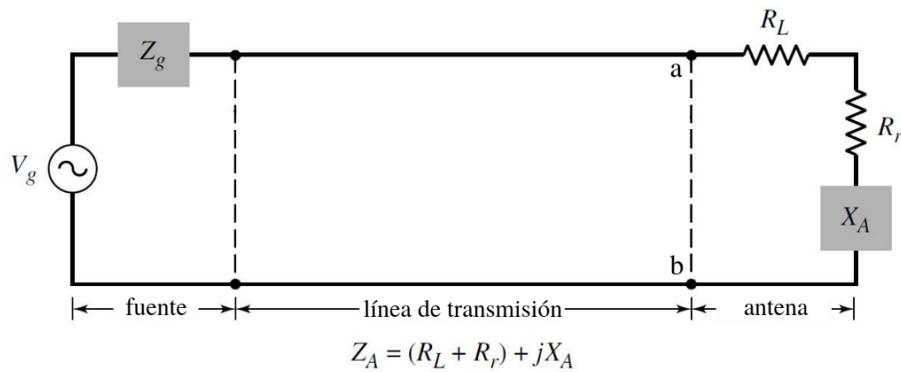
$X_A$ : reactancia/resistencia reactiva, que es la parte imaginaria de la impedancia relacionada con la radiación de la antena

$R_g$ : resistencia del generador

$X_g$ : reactancia del generador



(a) Antena conectada a generador.



(b) Circuito equivalente de la antena.

Figura 2.2: Antena en modo transmisor [18].

Como se ha mencionado previamente, la antena formará parte de un sistema, por lo que será conectada a un transmisor (en este caso un generador) y, en un caso ideal, se busca que irradie la mayor cantidad de potencia que sea posible. Esta máxima transferencia de potencia ocurre cuando

$$R_r + R_L = R_g \quad (4)$$

$$X_A = -X_g \quad (5)$$

al cumplirse estas condiciones de máxima transferencia de potencia, la mitad de la potencia del generador será irradiada por la antena y la mitad restante se disipa en forma de

---

calor por la resistencia del generador ( $R_g$ ) . La impedancia de entrada de la antena depende de factores como la geometría y la frecuencia de operación. Debido a la gran cantidad de geometrías que puede adquirir la antena, la obtención de la impedancia mediante métodos matemáticos puede ser complicada o dar espacio a error, por ello, la impedancia se obtiene, generalmente, mediante métodos experimentales [18].

### 2.2.2. Eficiencia de la antena y eficiencia de radiación

La eficiencia de la antena se mide a partir de las reflexiones debidas a un mal acople de impedancias entre la línea de transmisión y la antena y, por otra parte, a las pérdidas debidas a la conducción y al dieléctrico. El primero de ellos está relacionado directamente con la impedancia de entrada de la antena y la impedancia característica de la línea de transmisión. El segundo, depende de la estructura de la antena. La forma general de la eficiencia de la antena se expresa como

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (6)$$

donde,

$e_0$ : eficiencia total (sin dimensiones)

$e_r$ : eficiencia de reflexión (debida al acople de impedancias)

$e_c$ : eficiencia de conducción

$e_d$ : eficiencia dieléctrica

La eficiencia de reflexión se puede expresar como

$$e_r = 1 - |\Gamma|^2 \quad (7)$$

donde  $\Gamma$  es el coeficiente de reflexión de voltaje en las terminales de entrada de la antena, también expresado como  $S_{11}$ . Este coeficiente se puede calcular mediante la ecuación

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (8)$$

donde,

---

$Z_{in}$ : impedancia de entrada de la antena

$Z_0$ : impedancia característica de la línea de transmisión

Finalmente, otro valor importante a obtener para la medición de las antenas es la relación de onda estacionaria o voltage standing wave ratio (VSWR)

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - \Gamma} \quad (9)$$

La medición de  $e_c$  y  $e_d$ , generalmente, es difícil de calcular por métodos numéricos, por ello, se obtiene a través de métodos experimentales y de manera conjunta, es decir,  $e_{cd}$ . Debido a esto, la ecuación de la eficiencia de la antena se puede expresar como

$$e_0 = e_r e_{cd} = e_{cd}(1 - |\Gamma|^2) \quad (10)$$

La eficiencia  $e_{cd}$  que se obtiene de manera conjunta, es llamada eficiencia de radiación de la antena. Dicha eficiencia se define como “la relación entre la potencia entregada a la resistencia de radiación  $R_r$  con la potencia entregada a  $R_r$  y  $R_L$ ” [18]. La aplicación de esta definición da como resultado

$$e_{cd} = \left[ \frac{R_r}{R_L + R_r} \right] \quad (11)$$

### 2.2.3. Directividad

La directividad total de la antena, en una dirección específica, se define como “la suma de las directividades parciales para dos polarizaciones ortogonales cualesquiera” [19]. Siendo definidas las directividades parciales, en una dirección dada, como “aquella parte de la intensidad de radiación correspondiente a una polarización indicada, dividida entre la intensidad de radiación total promediada en todas las direcciones” [19]. La forma matemática que describe esta definición es

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (12)$$

---

donde,

$D$ : directividad

$U$ : intensidad de radiación

$U_0$ : intensidad de radiación de una fuente isotrópica

$P_{rad}$ : potencia total radiada

#### 2.2.4. Ganancia

La ganancia se define como “la relación de la intensidad de radiación, en una dirección dada, con la intensidad de radiación que se obtendría si la potencia aceptada por la antena fuera radiada isotrópicamente” [19]. Esta definición puede ser expresada de forma matemática como

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{in}} \quad (13)$$

donde,

$U$ : intensidad de radiación

$P_{in}$ : potencia total de entrada (aceptada)

#### 2.2.5. Ancho de banda

El ancho de banda se define como “el rango de frecuencias dentro de las cuales el rendimiento de la antena se ajusta a un estándar específico con respecto a alguna característica” [19]. Esto significa que toda antena se encuentra limitada a operar de manera óptima en una banda específica de frecuencias. Este límite puede delimitar el rango de operación de la antena para una característica específica (impedancia de entrada, ganancia, eficiencia de radiación, etc.) [39]. El ancho de banda se mide a partir del valor que adquiere la frecuencia central que, por lo general, es la frecuencia de resonancia de la antena [18].

---

## 2.3. Películas conductivas transparentes

El diseño de antenas transparentes trae consigo la necesidad de seleccionar materiales que cumplan con los requerimientos en términos de propiedades eléctricas y ópticas. Para obtener una buena película transparente conductiva, es necesario tener una baja resistividad (alta conductividad) y una excelente transmitancia óptica [40]. Mediante una adecuada selección de materiales, se puede lograr un desempeño óptimo de las antenas que se busca implementar.

### 2.3.1. Propiedades eléctricas

Existen propiedades fundamentales para una adecuada propagación de las señales; dichas propiedades son: resistencia de hoja, conductividad y, su recíproco, resistividad. Es importante mencionar que los valores que adoptan estas características están determinados por interacciones que ocurren a nivel atómico en los materiales [41]. A continuación, se hará una breve revisión de las tres propiedades eléctricas previamente mencionadas.

- **Conductividad ( $\sigma$ ) y resistividad eléctrica ( $\rho$ ):** la conductividad eléctrica se define como el factor de medición de la propiedad de los materiales para conducir electricidad [42], es decir, “cuantifica la facilidad con la que fluyen las cargas dentro del material a lo largo de un campo eléctrico o un gradiente de potencial eléctrico” [43]. Se considera que un conductor es mejor cuando su conductividad es mayor. Otra forma de medir la conductividad, es a través de su recíproco, la resistividad. Por ello, una menor resistividad es sinónimo de un mejor conductor [41, 42].

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{14}$$

- **Resistencia de hoja ( $R_s$ ):** cuando se intenta medir la resistencia de una lámina delgada, es conveniente medir la resistencia que existe en dicha película. Esta medida específica de resistencia es denominada como resistencia de hoja o sheet resistance ( $R_s$ ) y tiene unidades de ohms por cuadrado ( $\Omega/sqr$ ) [44]. Para comprender mejor este concepto, es necesario conocer la ecuación que relaciona el grosor de la película con sus propiedades eléctricas [41, 42, 45].

---

$$R_s = \frac{\rho}{t} = \frac{1}{\sigma t} \quad (15)$$

donde,

$R_s$ : resistencia de hoja

$\rho$ : resistividad

$t$ : grosor de la película

$\sigma$ : conductividad

Si se toman dos cuadrados de la misma película, sin importar sus dimensiones laterales, dichas muestras compartirán grosor y, al ser del mismo material, también compartirán la misma resistividad. Por lo tanto, se puede decir que la resistencia de hoja en un cuadrado de una película conductiva, sin importar cuales sean sus dimensiones, siempre será constante. Para obtener la medida de resistencia de hoja, el método más utilizado es el de la sonda de cuatro puntas [44]. Este método consiste en colocar cuatro sondas metálicas alineadas entre sí (Figura 2.3); las dos puntas interiores se encuentran conectadas a un voltímetro y las dos exteriores se encuentran conectadas a una fuente de voltaje. La resistencia de la hoja genera una caída de potencial, la cual es medida a través de las dos sondas interiores. A partir de dichas mediciones, se ha encontrado que la fórmula que relaciona la corriente y el voltaje con la resistencia de hoja se describe mediante la ecuación 16 [42, 46, 47].

$$R_s = 4,53 \frac{V}{I} \quad (16)$$

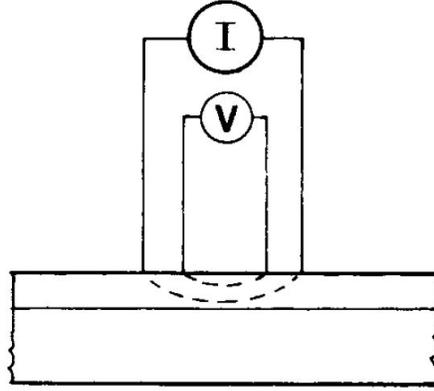


Figura 2.3: Método de la sonda de cuatro puntas [42].

### 2.3.2. Propiedades ópticas: transmitancia ( $T$ )

En el desarrollo de películas transparentes, como es de esperarse, las propiedades ópticas adquieren gran relevancia; específicamente, la transmitancia. Esta propiedad óptica se define como la fracción de intensidad de la luz, con una longitud de onda determinada, que atraviesa un medio. La transmitancia, al ser una relación, se expresa en porcentaje; por lo que, un material con una transmitancia en el rango visible (450 - 800  $nm$ ) [40], tiene una mayor transparencia óptica. La transmitancia se puede relacionar con la resistencia de hoja del material mediante la figura de mérito ( $\phi TC$ ) y, de esta manera, es posible comparar el rendimiento de diferentes películas transparentes. Se busca que la figura de mérito tenga el mayor valor posible, esto asegura una buena relación entre conductividad y transparencia [46, 47].

$$\phi TC = \frac{T}{R_s} \quad (17)$$

donde,

$T$ : transmitancia óptica @ 550 nm

$R_s$ : resistencia de hoja

De acuerdo con el trabajo realizado por Reza et al. [23], la transmitancia de un película de óxido conductor transparente (TCO) con grosor  $t$ , se puede calcular mediante

---


$$T \cong e^{-\frac{2t}{\delta}} \quad (18)$$

Donde  $t$  es el grosor de la película y  $\delta$  es la profundidad superficial (fracción efectiva de la película por la cual circula corriente), este último parámetro puede ser aproximado a través de

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}} \quad (19)$$

donde,

$\omega$ : frecuencia angular

$\mu_0$ : permeabilidad del vacío

$\sigma$ : conductividad eléctrica

A partir de una simple inspección de las ecuaciones 18 y 19 podemos observar que la transmitancia es una magnitud dependiente de la frecuencia de onda incidente.

### 2.3.3. Óxidos conductores transparentes (TCO)

Los TCOs cuentan con dos características que, usualmente, no se encuentran de manera conjunta en los materiales; son materiales que permiten el paso de la luz a través de ellos, lo cual los dota de transparencia y, por otra parte, tienen la capacidad de conducir carga eléctrica [48]. Estos materiales han recibido mucho atención en los últimos años, debido a su amplio rango de aplicaciones que va desde pantallas de dispositivos móviles hasta partes de sistemas fotovoltaicos [49]. Los TCOs más utilizados son el óxido de indio y estaño (ITO), y el óxido de zinc dopado con aluminio (AZO) [40]. A pesar de que existen otros óxidos, estos materiales exhiben propiedades que los vuelven atractivos para su investigación y desarrollo. A continuación, se describen los principales TCOs que han sido estudiados para su aplicación como películas conductoras transparentes debido a sus propiedades eléctricas y ópticas.

- **Óxido de indio y estaño (ITO):** este material se ha convertido en uno de los TCOs más utilizados [48], debido a que muestra una excelente conductividad eléctrica del orden de  $10^5$  [34] junto con una excelente transmitancia óptica ( $> 85\%$ ) [49,50]. Al ser

---

uno de los óxidos más ampliamente utilizados, el ITO se toma como referencia para la medición del rendimiento de otros TCOs [48].

- **Óxido de zinc dopado con aluminio (AZO):** este material, de la misma manera que el ITO, muestra buenas propiedades en términos de conductividad que es del orden de  $10^2$  y transmitancia del 85 % [51]. Además, es un material barato y no presenta toxicidad [52].
- **Película de poliéster recubierta de plata ( $Ag_{HT} - 8$ ):** este material presenta propiedades de conductividad del orden de  $10^5$  y transparencia superior al 80 % [24,53].
- **Películas multicapa:** con el objetivo de mejorar las propiedades eléctricas y ópticas de los materiales, se han utilizado películas multicapa que combinan TCOs con películas ultrafinas metálicas. Un ejemplo de estas películas es el IZTO/Ag/IZTO que muestra una conductividad del orden de  $10^6$  con una transmitancia en el rango visible del 81,1 % [26].

Como se puede notar, existen una gran cantidad de materiales TCOs que, por sus propiedades, son adecuados para usarse en la implementación de las antenas que se proponen en este trabajo. Sin embargo, se tiene una limitante que es la técnica de depósito para obtener estas películas en los laboratorios. Por lo que, en la siguiente sección, se realiza una descripción de las técnicas que permiten obtener estas películas con las mejores propiedades electro-ópticas.

#### 2.3.4. Técnicas de depósito de óxidos conductores

Existen un gran número de técnicas mediante las cuales se pueden depositar películas delgadas sobre sustratos. A pesar de que existe una gran variación entre los diferentes métodos de depósito, en general, las técnicas de fabricación más utilizadas tienen como principio la evaporación térmica del material a depositarse. En la Figura 2.4 se muestra dicho proceso donde, una fuente de calor, genera la evaporación del material a depositarse y este material se condensa en el sustrato donde se busca depositarlo para generar la película delgada [48,54]. Algunas de las técnicas de depósito más utilizadas se revisan a continuación.

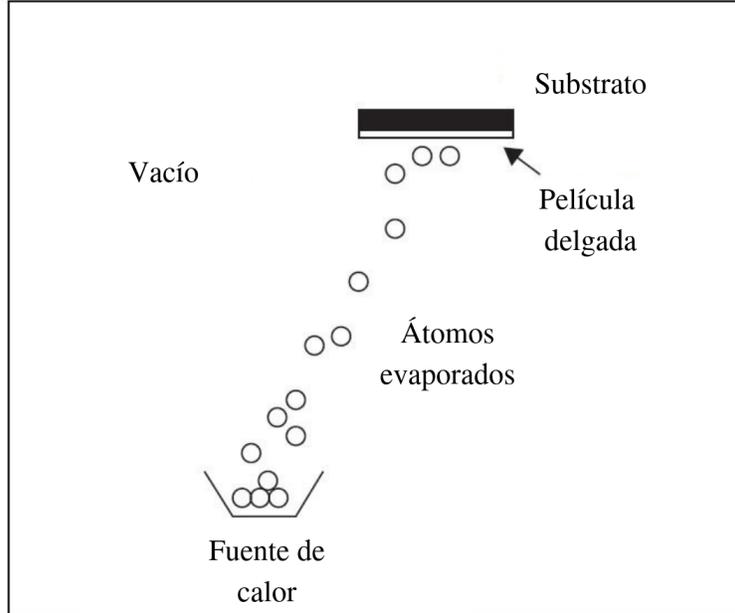


Figura 2.4: Sistema de depósito por evaporación [55].

- **Sputtering:** en este proceso, se involucra la adición de energía cinética al proceso de condensación del material a depositar; debido a esto, el proceso de sputtering se considera un proceso energético. En general, los procesos energéticos mejoran las propiedades adquiridas por la película depositada en el sustrato. Para este proceso, se requieren un par de electrodos planos; un ánodo, donde se coloca el sustrato, y un cátodo, donde se coloca el objetivo de material a depositar. Los electrodos se encuentran en una cámara de vacío donde se inyecta un gas de bombardeo, generalmente argón. Los iones  $Ar^+$ , son atraídos por el cátodo con una gran energía cinética e impactan el objetivo de material a depositar, generando su pulverización. Los átomos de la superficie del objetivo se dispersan hacia atrás con una energía cinética considerable, debido a la pulverización, tal como se muestra en la Figura 2.5. A este proceso de pulverización, se le llama “sputtering”, “sputtering de cátodo” o “evaporación de impacto” [48].

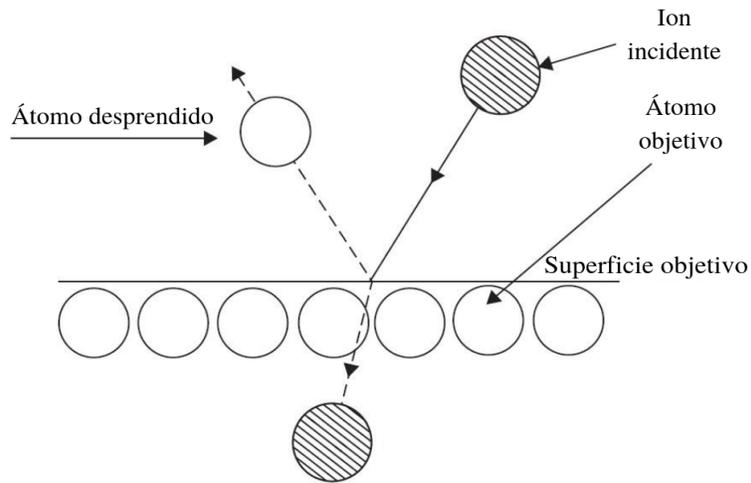


Figura 2.5: Proceso físico de pulverización [55].

Finalmente, las moléculas del material a depositar, previamente desprendidas del objetivo, son atraídas por el ánodo hasta chocar contra el substrato y, de esta manera, se forma en él la película delgada que se busca depositar, tal como se muestra en la Figura 2.6 [48, 55].

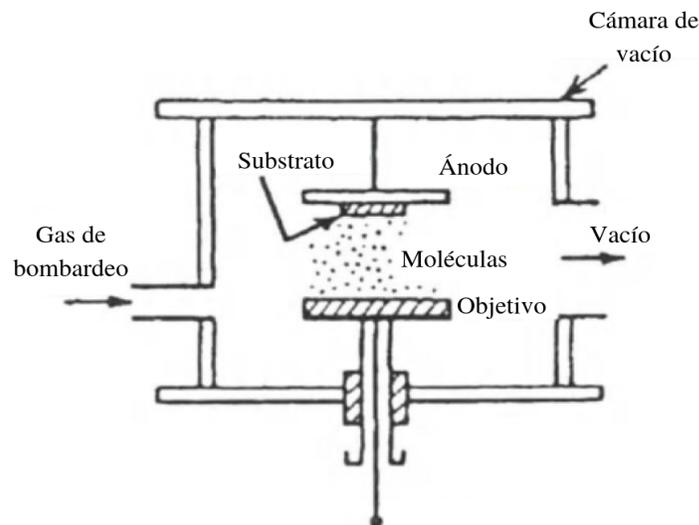


Figura 2.6: Sistema de depósito por sputtering [55].

- 
- **Evaporación por arco catódico:** en esta técnica se genera un arco de corriente alta y bajo voltaje entre un electrodo y un cátodo, que conduce dicha corriente, sobre el cual se coloca el material que se desea evaporar. Debido a que el área sobre la que se aplica la corriente es muy pequeña y, dicha corriente, es muy alta; se genera en el cátodo una temperatura muy elevada que puede alcanzar los  $15000^{\circ}C$ . El material evaporado abandona el cátodo con una energía muy alta y, además, se encuentra altamente ionizado. El material evaporado tiende a mostrar un movimiento imprevisible, lo que puede dificultar su depósito en el sustrato. Para evitar este movimiento aleatorio, en ocasiones se emplea un sistema magnético que permita que el material desprendido se dirija hacia el sustrato [48].
  - **Depósito por pulsos láser (PLD):** esta técnica tiene el mismo principio físico de depósito que la evaporación por arco catódico, la diferencia principal reside en la forma en la que se lleva a evaporación el material a depositar. Para esta técnica, la evaporación se realiza mediante pulsos entregados por un rayo láser de alta potencia. En el depósito por pulsos láser, el rayo láser debe colocarse fuera de la cámara de vacío y su transmisión al interior de la cámara debe realizarse a través de un sistema óptico cuyo elemento final, generalmente, es un espejo. En esta técnica pueden ser utilizados diferentes tipos de láser, desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. Este proceso se puede manipular para obtener o preservar las características químicas del material a depositar y, además, puede llegar a otorgar excelentes propiedades ópticas a la película delgada [48].

## 2.4. Tipos de antenas

Como se ha mencionado previamente, los diferentes requerimientos, en términos de las características de las antenas, han dado lugar al desarrollo de diferentes tipos de antenas; a continuación, se mencionan y describen, brevemente, los diferentes tipos de antenas que se han desarrollado.

- **Antenas alámbricas:** estas antenas son aquellas con las que, usualmente, se tiene una mayor familiaridad debido a que es fácil encontrarlas en la vida cotidiana. Estas antenas, están construidas con materiales conductores, a través de los cuales, fluye la corriente

---

que da paso a la generación de los campos radiados. Estas antenas pueden adoptar diferentes formas, como un alambre recto, un lazo cerrado (loop) o hélices [18], [19].

- **Antenas de apertura:** este tipo de antenas se han vuelto más comunes en años recientes debido a los requerimientos de nuevas geometrías, más sofisticadas, y la utilización de frecuencias más altas. Este tipo de antenas tienen una mayor utilidad y uso en la industria aeroespacial [18].
- **Antenas de parche:** estas antenas consisten de un parche de material conductor sobre un sustrato conectado a tierra. El parche de material conductor puede adoptar casi cualquier geometría, sin embargo, las geometrías más utilizadas son la rectangular y la circular, debido a la facilidad de análisis y fabricación que éstas presentan [18].
- **Arreglos de antenas:** en algunas aplicaciones es necesario contar con ciertas características de radiación que, posiblemente, no sean alcanzables con una sola antena. Por lo que, para cumplir con dichos requerimientos, es posible crear un arreglo de antenas que permita alcanzar los objetivos planteados. Dichos arreglos pueden ser construidos con cualquiera de las tecnologías previamente mencionadas, de acuerdo con las prestaciones que exige la aplicación en que serán utilizados [18], [39].
- **Antenas reflectoras:** la necesidad, cada vez mayor, de comunicarse a grandes distancias, trajo consigo el desarrollo de estas antenas, capaces de enviar y recibir información a cientos de kilómetros. La antena más común de este tipo es la antena parabólica cuyo diámetro de construcción ha llegado hasta los 305 *m*. A pesar de ser ésta la más conocida, existen otras geometrías adoptadas por las antenas reflectoras [18].

#### 2.4.1. Antenas coplanares

Las antenas coplanares son un caso específico de las antenas de parche, la diferencia principal entre ambas es que, las primeras, tienen el plano de tierra en la misma superficie que el parche encargado de generar la radiación. En estas antenas, la radiación se genera en las curvaturas de la película, así como en las discontinuidades que presenta. Existen diferentes geometrías que pueden ser adoptadas por dichos parches, sin embargo, las más utilizadas,

---

debido a su facilidad de análisis y fabricación, así como a sus características de radiación, son la geometría cuadrada, rectangular, dipolo y circulares [18]. En la Figura 2.7 se observan las geometrías antes mencionadas, así como algunas otras geometrías comunes.

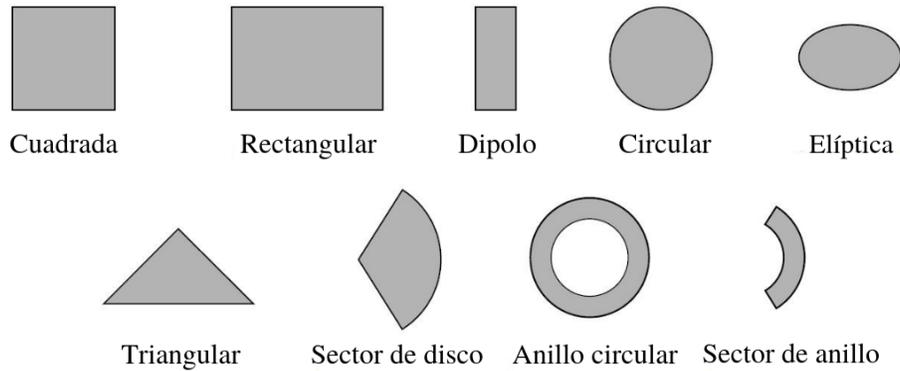


Figura 2.7: Geometrías comunes de antenas coplanares [18].

#### 2.4.2. Antenas transparentes

Comúnmente, las antenas de parche, tanto planares como coplanares, están hechas de metal sobre sustrato, en ambos casos, los materiales son opacos en el rango visible. La creciente necesidad de espacio y estética ha provocado una demanda de antenas que mantengan la funcionalidad de las antenas comunes, con la ventaja de poder ser incluidas en estructuras transparentes sin impedir la visibilidad. Para tener una antena que cumpla con las características previamente mencionadas, es relevante la selección de un óxido conductor transparente que cuente con una alta conductividad y, a su vez, con una alta transmitancia. De la misma forma, es de vital importancia, seleccionar una geometría de parche que permita que la antena cuente con las características electromagnéticas necesarias para la aplicación en que se requiere. La combinación de dichas características ha generado un incremento en la investigación y el uso de antenas transparentes ya que pueden integrarse a ventanas de edificios, lentes, parabrisas y, a partir de ello, se puede afirmar que las antenas transparentes tienen un rango de aplicaciones que van desde la industria médica hasta la implementación en ciudades inteligentes [23].

---

## 2.5. Conclusiones

A partir del análisis teórico de las diferentes definiciones que impactan en el desempeño de las antenas transparentes, podemos concluir que, en el diseño de las antenas de parche, es importante la geometría a utilizar ya que ésta determina la frecuencia de resonancia de la antena, cuya medida se da a partir de la obtención del coeficiente de reflexión. Por otra parte, es relevante la selección de un óxido conductor transparente que permita una óptima conductividad de la película conductiva transparente y, de la misma manera, dicha película debe contar con un transmitancia admisible en el rango visible.

---

## Capítulo 3. Desarrollo Práctico

Para asegurar el correcto funcionamiento de la antena a diseñar, es necesario realizar una serie de tareas que permitan la obtención de una antena con las características determinadas en el protocolo IEEE 802.11p y que, además, cumpla con el requerimiento de transmitancia para ser transparente en el rango visible. En términos de los parámetros de las antenas, la principal característica que se busca satisfacer es el coeficiente de reflexión; dicho coeficiente deberá mostrar una caída mayor a  $10\text{ dB}$  en la frecuencia de resonancia de la antena, definida en  $5,9\text{ GHz}$ . En este capítulo se muestra la metodología seguida para obtener la antena con las características previamente definidas.

### 3.1. Antena de cobre sobre substrato transparente

Como primer paso para el desarrollo de la antena que se busca desarrollar, se realizó el diseño, simulación, fabricación y medición de una antena de cobre sobre un substrato transparente (vidrio). Para el diseño y fabricación de la antena de cobre se utilizó el método de línea de transmisión descrito por Balanis [18]. Por otra parte, se seleccionó una geometría de parche rectangular con el objetivo de simplificar los cálculos, el modelado y la fabricación de la antena. Para el diseño de la antena, bajo la geometría escogida, es necesario calcular, como primer paso, las dimensiones del parche que determinarán la frecuencia de resonancia de la antena, dichas dimensiones se muestran en la Figura 3.1a. Posteriormente, es necesario calcular las dimensiones de la línea de transmisión que alimentará el parche (Figura 3.1b), dicha línea de transmisión deberá tener una impedancia acoplada a la impedancia del parche

previamente diseñado, esto permitirá que exista una adecuada transferencia de potencia entre ambos elementos. A continuación, se presenta la metodología aplicada para el diseño de la antena.

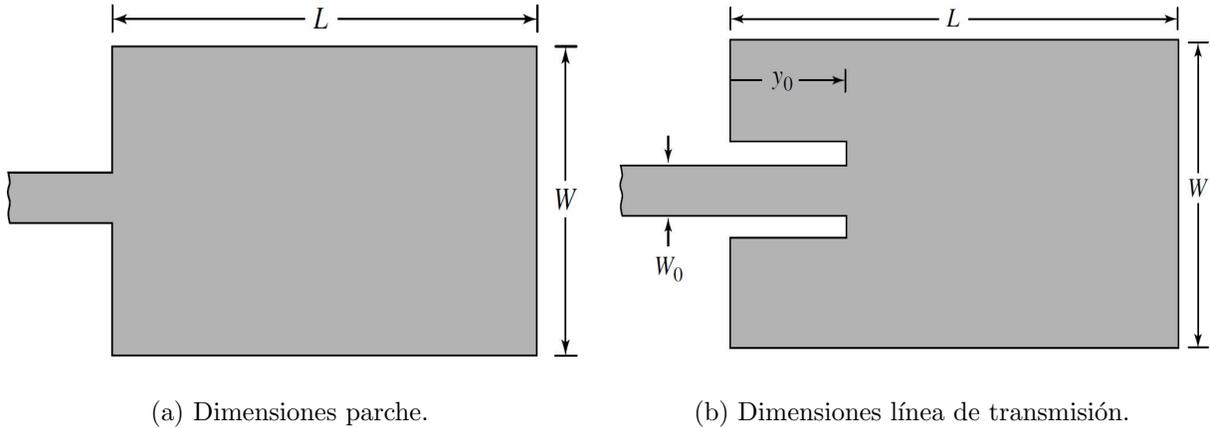


Figura 3.1: Dimensiones de la antena [18].

### 3.1.1. Diseño de antena

Las dos dimensiones que determinan la eficiencia de radiación de la antena son el ancho ( $W$ ) y la longitud ( $L$ ). Para encontrar los valores óptimos para dichas variables, se necesita tener una frecuencia de resonancia deseada ( $f_r$ ), además, se necesita conocer la constante dieléctrica del substrato a utilizar ( $\epsilon_r$ ), así como el grosor de dicho substrato ( $h$ ). Para el diseño de la antena se utilizaron los parámetros mostrados en la Tabla 3.1, dichos parámetros corresponden con los requerimientos y materiales a utilizar.

Tabla 3.1: Parámetros del substrato y frecuencia de resonancia.

Parámetro	Símbolo	Valor
Frecuencia de resonancia	$f_r$	5,9 GHz
Constante dieléctrica del substrato (vidrio)	$\epsilon_r$	5,5
Altura del substrato	h	1,1 mm

A partir de estos valores determinados, es posible utilizar la ecuación 20 para obtener el

---

ancho de la antena.

$$W = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (20)$$

donde,

$v_0$ : velocidad de la luz en el vacío

$f_R$ : frecuencia de resonancia

$\epsilon_r$ : constante dieléctrica del substrato

Después de determinar el ancho de la antena, es necesario obtener la constante dieléctrica efectiva de la antena ( $\epsilon_{reff}$ ) mediante la ecuación 21.

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W}\right]^{-\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Finalmente, para obtener la longitud del parche ( $L$ ), se utilizó la ecuación 22.

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 0,824 \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \quad (22)$$

A partir de este método, se obtuvo un ancho de parche ( $W$ ) de 14,3 mm y una longitud de parche ( $L$ ) de 10,7 mm.

Posterior al cálculo numérico de las dimensiones del parche, se obtuvieron las dimensiones  $y_0$  y  $W_0$  para el acople de impedancias entre la línea de transmisión y el parche. En primer lugar, se obtuvo  $W_0$  para funcionar a una impedancia de 50  $\Omega$ , a partir de la ecuación 23.

$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[ \frac{W_0}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left( \frac{W_0}{h} + 1,444 \right) \right]} \quad (23)$$

Después de la obtención de  $W_0$ , se calculó  $y_0$ . Para la obtención de esta dimensión, es necesario calcular, en primer lugar, la longitud de onda en el vacío ( $\lambda_0$ ) de la frecuencia de resonancia determinada, esto mediante la ecuación 24.

$$\lambda_0 = \frac{v_0}{f_r} \quad (24)$$

A continuación, se calculó la conductancia ( $G_1$ ) mediante la ecuación 25.

---


$$G_1 = \frac{-2 + \cos(k_0W) + k_0W S_i(k_0W) + \frac{\sin(k_0W)}{K_0W}}{120\pi^2} \quad (25)$$

A partir de dicha conductancia, se obtuvo la impedancia de entrada ( $Z_{in}$ ) a través de la ecuación 26.

$$Z_{in} = \frac{1}{2G_1} \quad (26)$$

Finalmente, después de obtener la impedancia de entrada, se calculó  $y_0$  mediante la ecuación 27.

$$y_0 = \frac{L}{\pi} \arccos\left(\sqrt{\frac{50}{Z_{in}}}\right) \quad (27)$$

Después de realizar todos los cálculos previamente descritos, se obtuvieron los resultados teóricos que se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Resultados teóricos dimensiones antena de cobre.

<b>Dimensión</b>	<b>Resultado</b>
$W$	14,3 <i>mm</i>
$L$	10,7 <i>mm</i>
$W_0$	1,8 <i>mm</i>
$Y_0$	4,3 <i>mm</i>

### 3.1.2. Simulación de la antena

A partir de las dimensiones previamente obtenidas, se realizó el modelado y simulación de la antena en un software de onda completa (HFSS). En la Figura 3.2 se muestra el modelo de la antena obtenido. Una vez obtenidos los resultados de la simulación, se procedió a realizar las correcciones de dimensiones pertinentes para alcanzar la frecuencia de resonancia deseada. Para ello, se recurrió a un análisis paramétrico que, a través de iteraciones en las dimensiones, permitió analizar el impacto de los diferentes parámetros de diseño sobre las características de la antena y, a partir de este análisis, se obtuvo el resultado deseado en términos del coeficiente de reflexión de la antena ( $S_{11}$ ), dicho resultado se muestra en la Figura 3.3.

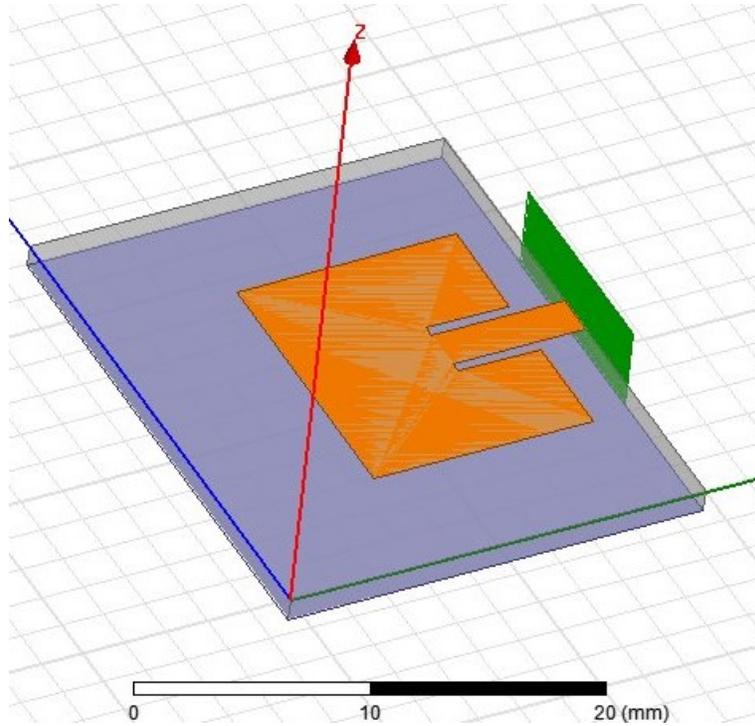


Figura 3.2: Simulación antena de cobre sobre sustrato transparente.

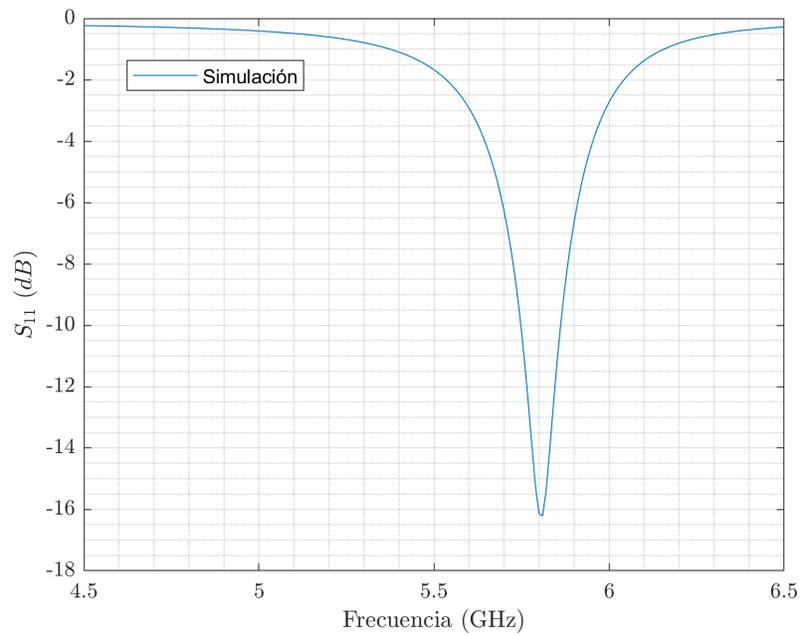


Figura 3.3: Coeficiente de reflexión simulado de la antena de cobre.

En la Tabla 3.3 se muestran las dimensiones obtenidas a partir del método iterativo

---

previamente descrito.

Tabla 3.3: Resultados teóricos y por análisis paramétrico de la antena de cobre.

Dimensión	Teórico	Valor final
$W$	14,3 mm	13,2 mm
$L$	10,7 mm	10,6 mm
$W_0$	1,8 mm	2 mm
$Y_0$	4,3 mm	4 mm

Como se puede observar en la Figura 3.4, se tiene una excitación en los bordes del parche diseñado, lo que muestra que la antena cumple con el principio de radiación. Otra cuestión importante, es la distribución de corriente, se observa la excitación en los bordes de la antena tal como se esperaba.

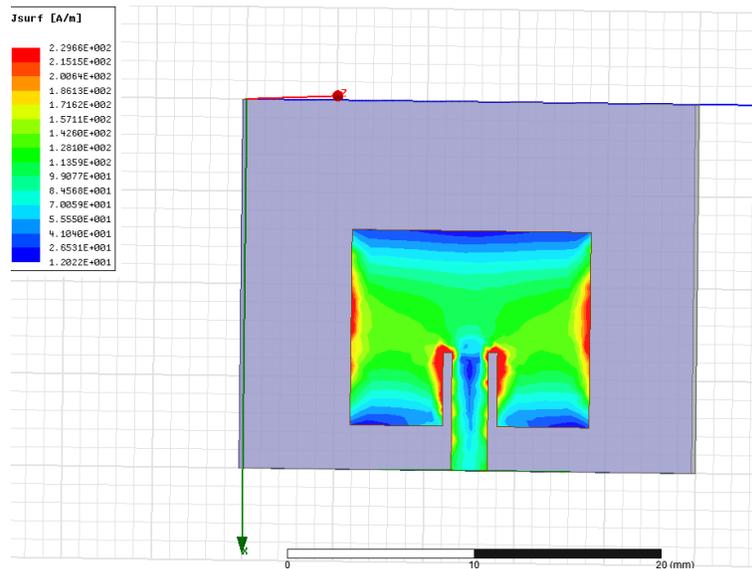


Figura 3.4: Diagrama de corriente de antena de cobre.

### 3.2. Antena de película conductiva transparente sobre sustrato transparente

Posterior al estudio de antenas de parche de cobre sobre sustratos transparentes, el siguiente paso es lograr que la antena sea transparente, multibanda y complanar. Para lograr

---

la característica de transmitancia en el rango visible, el material conductor deberá ser un óxido conductor transparente.

### 3.2.1. Caracterización del óxido conductor transparente

Para ello, se seleccionó ITO comercial depositado en sustrato de vidrio, provisto por la empresa Adafruit, debido a que dicho material cubre las necesidades en términos de transparencia y resistencia de hoja. La resistencia de hoja ( $R_s$ ) del óxido conductor transparente (TCO) fue obtenida mediante el método a cuatro puntas [44], realizado en 13 posiciones en una muestra del material a utilizar, como se puede ver en la Figura 3.5. La Tabla 3.4 presenta los resultados de dichas mediciones y el promedio final para la  $R_s$  de  $7,943 \text{ ohm/sqr}$ .

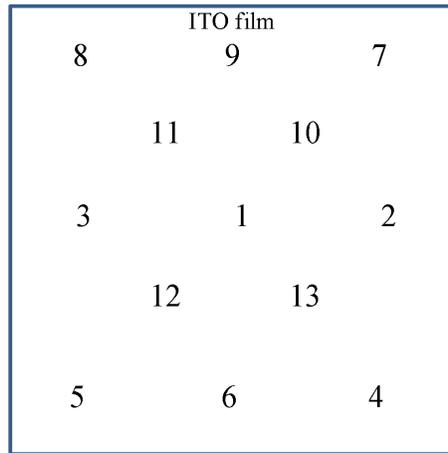


Figura 3.5: Esquemático de las posiciones, en la película de ITO, para la medición de la  $R_s$ .

Tabla 3.4: Mediciones resistencia de hoja ( $R_s/sqr$ ) de película de ITO.

Posición	Resistencia ( $\Omega$ )
1	7,831
2	7,909
3	7,970
4	8,008
5	8,035
6	7,997
7	7,914
8	7,954
9	7,914
10	7,900
11	7,922
12	7,958
13	7,950
<b>Promedio</b>	<b>7.943</b>

En la Tabla 3.5, se presentan las características, del sustrato y de la película conductiva, relevantes en el proceso de diseño y simulación. Es importante incluir dichas características en ambos procesos ya que tienen un impacto considerable en la respuesta en frecuencia y eficiencia de la antena [25].

Tabla 3.5: Variables de materiales a utilizar.

<b>TCO</b>	<b>ITO</b>
Grosor	1850 Å
$R_s$	7,943 $\Omega/sqr$
<b>Sustrato</b>	<b>vidrio</b>
Grosor	1,1 mm
$\epsilon_r$	5,5

---

### 3.2.2. Diseño y simulación de la antena

Por otra parte, se debe lograr que la antena opere en más de una frecuencia de resonancia (multibanda) y, además, que el plano de tierra y el parche resonador se encuentren en la misma superficie del sustrato (coplanar); ambas características están directamente relacionadas con la geometría de la antena. Para ello, se analizaron numerosos casos, en su mayoría con cobre como conductor, para la selección de la geometría a utilizar. Algunas de las geometrías reportadas parten del diseño de una antena de parche y, a través de métodos iterativos (análisis paramétrico), obtienen las frecuencias de operación deseadas [27, 56–58].

La línea de alimentación de la antena es una guía de onda coplanar (CPW) calculada con una impedancia característica de  $50 \Omega$ . La línea de alimentación se diseñó con la herramienta linecalc, mediante el software ADS. La geometría propuesta (Figura 3.6) corresponde a una antena con ranuras de dipolo y acoplamiento capacitivo, alimentada por una guía de onda coplanar [27]. Las ranuras son dos pares de rectángulos simétricos de longitud  $W_1$  y  $W_2$ , las frecuencias de resonancia corresponden con estas ranuras resonantes. Las dos frecuencias de resonancia para el diseño son  $1,9 \text{ GHz}$  y  $5,9 \text{ GHz}$ , las cuales son utilizadas en LTE y 802.11p, respectivamente. Para lograr que las ranuras sean determinantes para las frecuencias de resonancia establecidas, es necesario que exista proporcionalidad entre la longitud de onda y la longitud de las ranuras resonantes. Para ello, se debe calcular la longitud de onda para dichas frecuencias mediante la ecuación

$$\lambda = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (28)$$

donde,

$\lambda$ : longitud de onda

$c$ : velocidad de propagación

$f_r$ : frecuencia de resonancia

$\epsilon_r$ : permitividad relativa del sustrato

A partir del cálculo de la longitud de onda, tomando vidrio como sustrato ( $\epsilon_r = 5,5$ ), se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 3.6. En esta tabla se puede observar

que el valor de  $W_1$  y  $W_2$  corresponden a  $\lambda/4$  para 1,9 y 5,9  $GHz$ , respectivamente. Debido a la simetría en el diseño, se observa, en la Figura 3.6, que se forman dos dipolos; uno de  $\lambda/2$  para 1,9  $GHz$  ( $2W_1$ ) y uno de  $\lambda/2$  para 5,9  $GHz$  ( $W_2$ ). Estas dimensiones se tomaron como punto de inicio en el análisis paramétrico de la antena.

Tabla 3.6: Cálculo de dimensiones de ranuras resonantes

$f_r$	$\lambda$	Dimensión asociada	Valor teórico obtenido	Valor después de análisis paramétrico
5,9 $GHz$	21,7 mm	$W_2$	5,42 mm ( $\lambda/4$ )	8,5 mm
1,9 $GHz$	67,3 mm	$W_1$	16,83 mm ( $\lambda/4$ )	13,5 mm

Para obtener las frecuencias de resonancia deseadas, se variaron todas las dimensiones de la antena y se registraron los efectos de estas variaciones en la respuesta simulada de la misma (análisis paramétrico). Con la realización de dicho análisis, que involucró más de cien simulaciones, se encontró un impacto directo y relevante, en las frecuencias de resonancia obtenidas, a través de la variación de  $W_1$ ,  $W_2$  y  $W_{p1}$ . Esto debido, principalmente, al acople de impedancia. El diseño obtenido, a partir de este análisis, se muestra en la Figura 3.6. En la tabla 3.6, se observa que las dimensiones  $W_1$  y  $W_2$ , obtenidas mediante análisis paramétrico simulado, se acercan a las proporciones de longitud de onda calculadas de manera teórica.

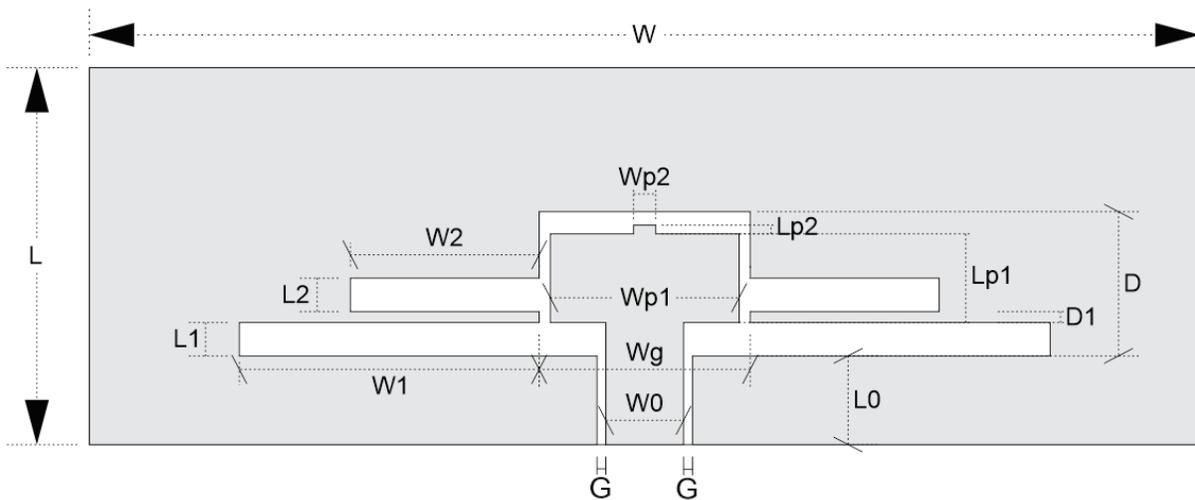


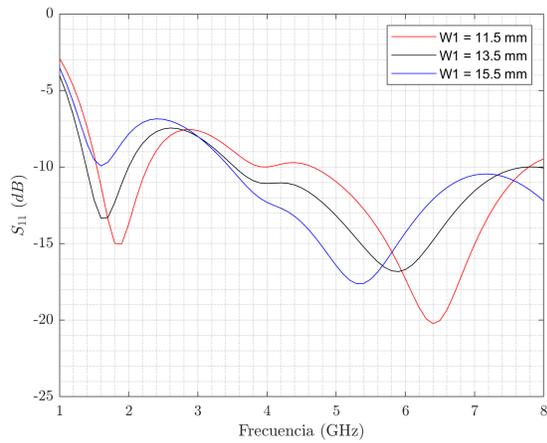
Figura 3.6: Geometría de la antena transparente.

Tabla 3.7: Dimensiones de la antena diseñada con ITO.

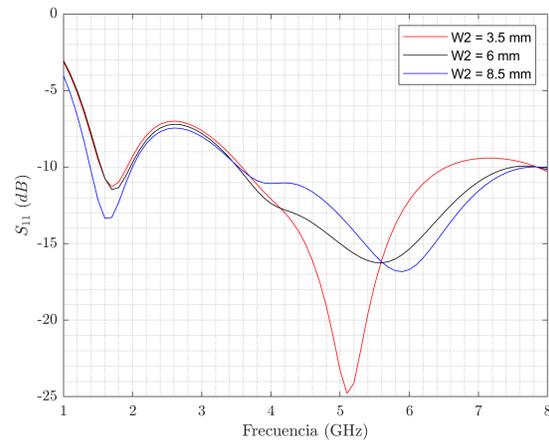
Parámetro	Dimensión (mm)	Parámetro	Dimensión (mm)
$W$	50	$L$	17
$Wg$	9,5	$L_{p1}$	4
$W_{p1}$	8,5	$L_{p2}$	0,4
$W_{p2}$	1	$L_0$	4
$W_0$	3,5	$L_1$	1,5
$W_1$	13,5	$L_2$	1,5
$W_2$	8,5	$D$	6,5
$G$	0,4	$D_1$	0,5

El análisis paramétrico permitió la obtención de las frecuencias de resonancia requeridas, en la Figura 3.7a se muestra el resultado de la variación de la dimensión  $W_1$  en términos del coeficiente de reflexión. En la gráfica mostrada se puede observar que, el coeficiente de reflexión, sufre desplazamientos a partir de la variación milimétrica del ancho de un par de ranuras del plano de tierra, esto se debe a que las variaciones en las ranuras del plano de tierra modifican el acople de impedancias para la transferencia de potencia en las frecuencias deseadas. En este caso, se eligió una dimensión de 13,5  $mm$  en el diseño final debido a que permite una transferencia de potencia adecuada ya que en 1,9  $GHz$  y en 5,9  $GHz$  el coeficiente de reflexión se encuentra por debajo de los  $-15 dB$ , de la misma forma, se observa que la curva regresa por arriba de los  $-10 dB$ , lo que garantiza la separación en la operación de ambas bandas y dota a la antena de la característica multibanda que se busca. En este caso, una dimensión de 9  $mm$  da a la antena un relación adecuada para su operación.

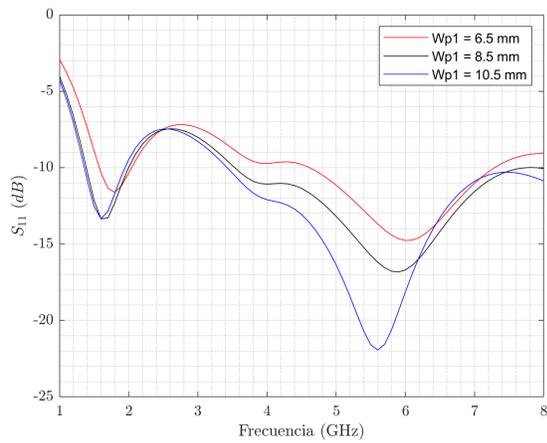
Por otra parte, la variación del ancho del parche de la antena  $W_2$  permite una mayor variación en la banda de frecuencias de los 5,9  $GHz$ , tal como se puede observar en la Figura 3.7b



(a)  $S_{11}$  para variaciones de  $W1$ .



(b)  $S_{11}$  para variaciones de  $W2$ .



(c)  $S_{11}$  para variaciones de  $Wp1$ .

Figura 3.7: Impacto de la variación de dimensiones de la antena en el coeficiente de reflexión.

A partir de los resultados obtenidos por el análisis paramétrico, previamente desarrollado, se obtuvieron las dimensiones que se muestran en la Tabla 3.7 y, a través de la simulación de la antena con dichas dimensiones, se obtuvo la gráfica de coeficiente de reflexión mostrada en la Figura 3.8. En la Figura 3.9 se puede observar el diseño final obtenido en 3D, a partir del cual, se debe realizar la fabricación de la antena.

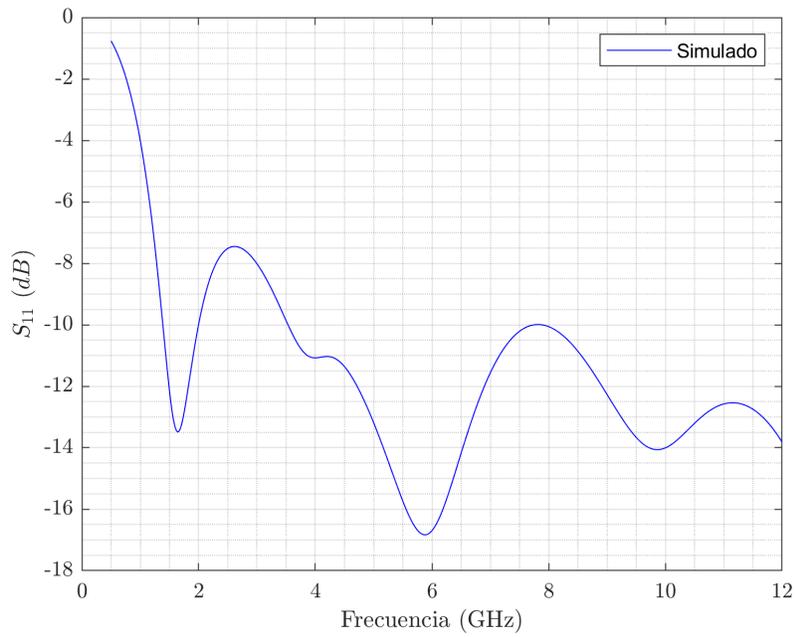


Figura 3.8: Coeficiente de reflexión simulado de la antena de ITO.

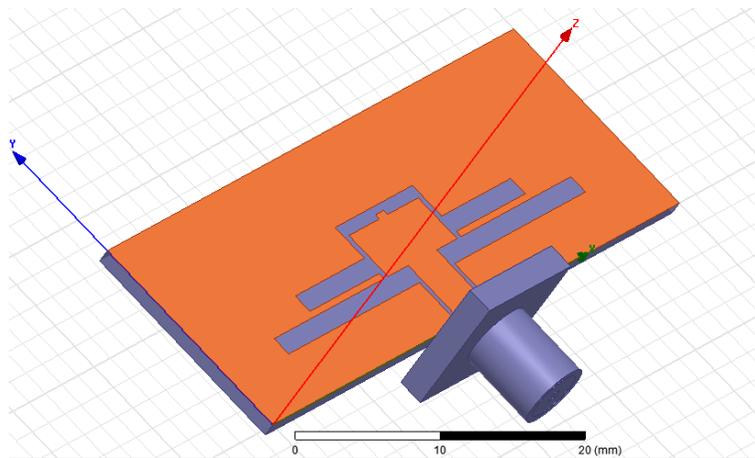


Figura 3.9: Simulación antena de ITO sobre vidrio.

A partir del diseño determinado, se pueden obtener los diagramas de corriente que permitan observar la radiación en función de la geometría seleccionada para la antena. En la Figura 3.10 se muestran los diagramas de distribución de corriente para las frecuencias de operación determinadas.

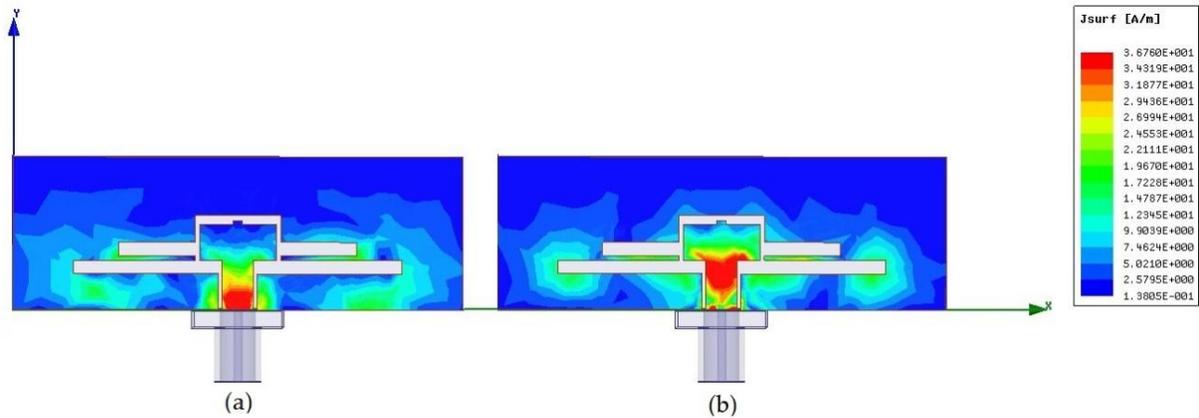


Figura 3.10: Simulación distribución de corriente a (a) 2,1  $GHz$  y (b) 5,9  $GHz$ .

La distribución de corriente, para la antena transparente, se obtuvo mediante simulación en 2,1 y 5,9  $GHz$ . En la Figura 3.10a se observa que la distribución de corriente, a 2,1  $GHz$ , es más intensa en la línea de alimentación y en la parte inferior del parche central. Además, la corriente se concentra de manera significativa alrededor de las ranuras en el plano de tierra. Por otra parte, a 5,9  $GHz$ , la distribución de corriente se concentra en la línea de alimentación y en el parche central. Sin embargo, también existe una considerable cantidad de corriente entre los resonadores y en los extremos de los resonadores de mayor longitud, como se observa en la Figura 3.10b. Esto se podría encontrar ligado con las longitudes de onda y el tamaño de los elementos que se mencionan. Los elementos con una longitud mayor, tienen la capacidad de resonar a una frecuencia más baja, por el contrario, los elementos con longitudes menores, tienen la capacidad de resonar a mayores frecuencias.

La directividad de la antena muestra la radiación que tendrá la misma en diferentes direcciones. La Figura 4.5 muestra, mediante diagramas de radiación 3D simulados, la directividad que tendrá la antena a fabricar.

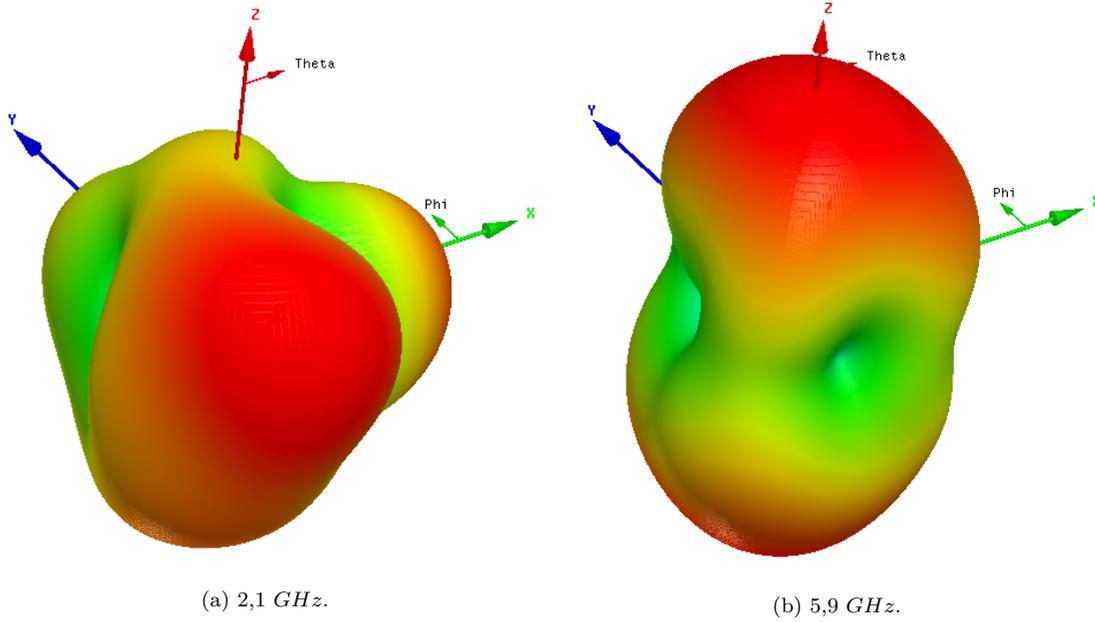


Figura 3.11: Diagrama de radiación 3D para antena transparente.

Otro factor importante a tener en cuenta dentro del diseño de la antena es su eficiencia en las bandas de frecuencia en que operará. Para el cálculo de la eficiencia se debe de tomar en cuenta el desacople de impedancia entre la antena y la línea de alimentación, además de las pérdidas debidas a la resistencia y permitividad de los materiales a utilizar [18]. La Figura 3.12 muestra la eficiencia de la antena diseñada. La eficiencia es de 3,41 % para 2,1 GHz y de 15,12 % para 5,9 GHz. La eficiencia en ambas bandas de frecuencia, aunque puede parecer baja, es consistente con la alta resistencia de hoja que presenta el óxido de indio y estaño, este comportamiento se ha observado en otros trabajos donde se usa este óxido conductor transparente (ITO) [59].

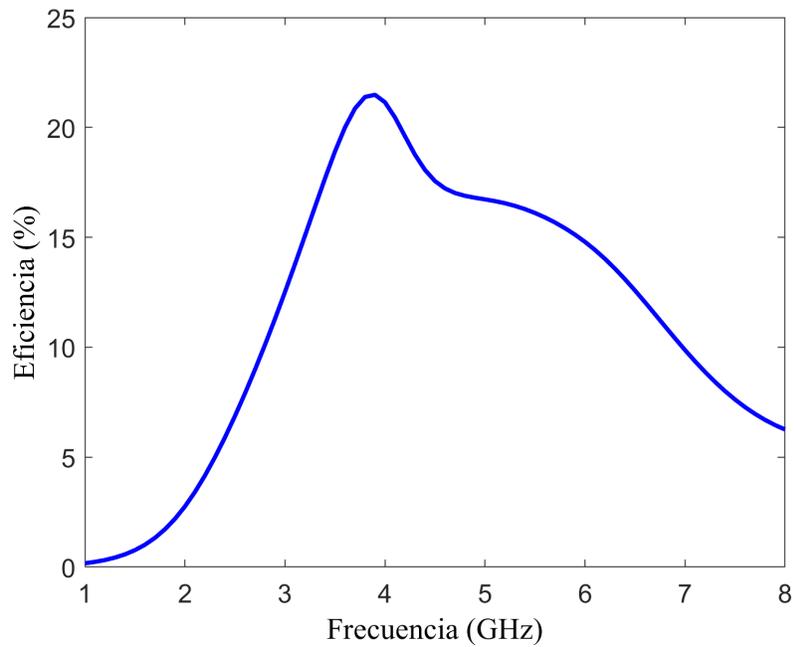


Figura 3.12: Simulación eficiencia de la antena de ITO.

### 3.3. Conclusiones

A partir del desarrollo práctico realizado es posible concluir que el proceso de simulación es de vital importancia para el proceso de fabricación de la antena, esto debido a que permite hacer las correcciones en términos de dimensiones con respecto a los cálculos numéricos previamente desarrollados. Dichas correcciones se realizan mediante un análisis paramétrico que permite observar qué dimensiones de la antena y en qué proporción impactan en el funcionamiento de la antena diseñada.

---

## Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos a partir del desarrollo práctico que se describe en el capítulo 3. Como primer paso, se muestran los resultados obtenidos a partir de la fabricación de una antena de cobre sobre substrato transparente (vidrio). A partir de dichos resultados, así como de la experiencia de diseño y fabricación de la antena de cobre, se presentan los resultados obtenidos mediante la fabricación y caracterización de la antena multibanda transparente.

### 4.1. Antena de cobre sobre substrato transparente

Para la fabricación de la antena de cobre sobre substrato transparente, se utilizaron las dimensiones obtenidas mediante el análisis paramétrico, a través del software de simulación de onda completa (HFSS). La fabricación consistió en un proceso de fotolitografía, en la Figura 4.1 se muestra la antena de cobre fabricada.

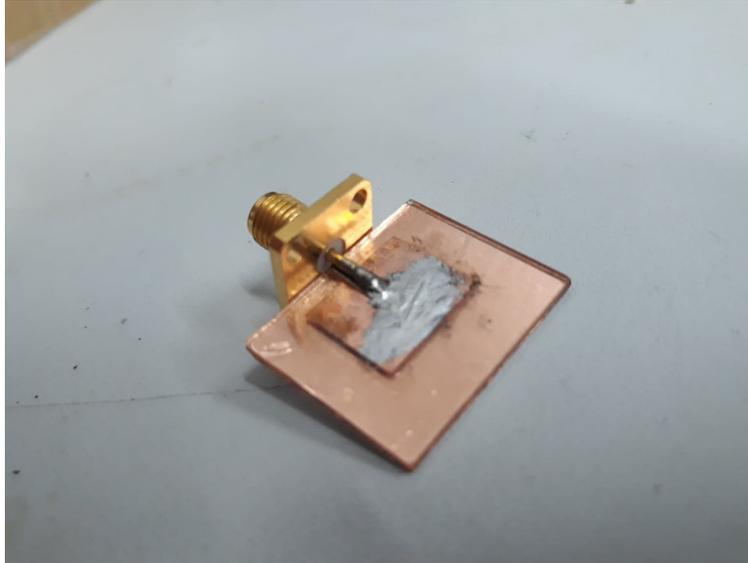


Figura 4.1: Antena de cobre.

Después de la fabricación de la antena de cobre, se procedió a la medición del coeficiente de reflexión. Para dicha medición se utilizó un analizador vectorial de redes (VectorStar, Anritsu). A partir de la medición de la antena de cobre sobre substrato transparente, se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 4.2.

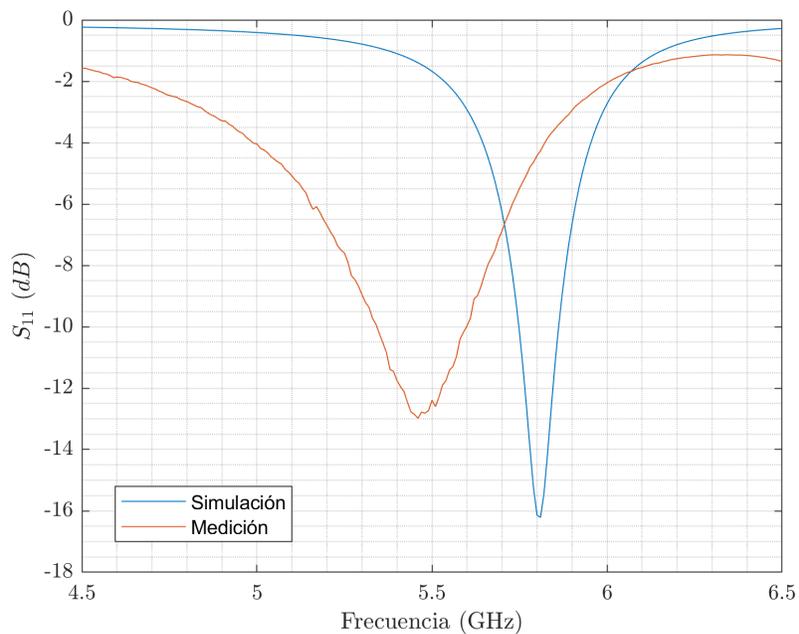


Figura 4.2:  $S_{11}$  simulación y medición.

---

Estos resultados muestran que la antena fabricada resuena en  $5,46 \text{ GHz}$ , la imprecisión respecto a los resultados arrojados por la simulación se debe a variaciones en la permitividad del vidrio, dicha permitividad oscila entre 4.5 y 6, para la simulación se utilizó un valor de referencia de 5.5.

Tabla 4.1: Comparativa resultados antena de cobre.

Parámetro	Simulación	Medición
$f_r$	$5,8 \text{ GHz}$	$5,46 \text{ GHz}$
$BW$	1,9%	4,1%
$S_{11}$	$-16,14 \text{ dB}$	$-12,98 \text{ dB}$

## 4.2. Antena de ITO sobre sustrato transparente

Después de haber diseñado, simulado y optimizado la antena transparente, se realizó la fabricación de la antena mediante un proceso de fotolitografía tomando como patrón el diseño obtenido a través de la simulación. El proceso de fabricación se describe a continuación.

- Se debe generar un negativo con el patrón final, obtenido del análisis paramétrico, que se muestra en la Figura 3.6.
- Sobre el sustrato con ITO, en la cara donde se encuentra depositado el ITO, debe adherirse una película fotosensible mediante el uso de calor.
- Posteriormente, sobre la película fotosensible, debe colocarse el negativo previamente impreso.
- Estos materiales deben someterse a una lámpara UV durante 1 min 50 s, esto con el objetivo de que la película fotosensible que no se encuentre cubierta por el negativo pueda ser removida.
- Se retira el negativo. El cristal con ITO se ataca con un químico revelador, esto remueve aquellas partes de la película que quedaron expuestas a la luz UV.

- 
- El sustrato se ataca durante 8 minutos, con ácido clorhídrico (HCL) en concentración 1:1 a  $40^{\circ}C$ , para remover el ITO que no se encuentra cubierto con película fotosensible.
  - El sustrato con ITO se enjuaga con agua destilada y se sumerge en removedor para retirar la película fotosensible.
  - Se revisa la continuidad de la antena en las zonas donde debe existir, así como en aquellas donde se debió retirar el ITO.
  - Se procede a soldar el conector a la antena con el uso de esferas de Indio.

En la Figura 4.3 se puede observar la antena fabricada con un conector de  $50 \Omega$ , la antena se encuentra sobre el logo de la BUAP con el objetivo de mostrar la transmitancia óptica con la que cuenta la película conductiva transparente y, por lo tanto, la antena fabricada.

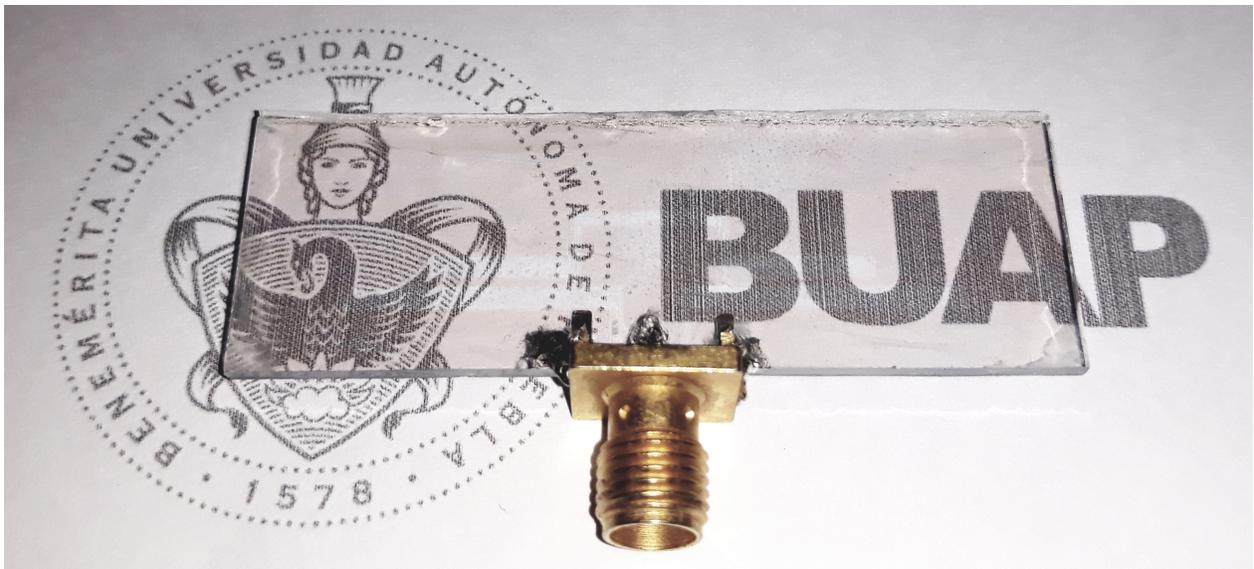


Figura 4.3: Transmitancia de antena fabricada en ITO.

Posterior a la fabricación de la antena, se procedió a la caracterización de la misma, en términos de coeficiente de reflexión, ganancia y diagramas de radiación.

#### 4.2.1. Coeficiente de reflexión y ancho de banda

Para la obtención del coeficiente de reflexión, se utilizó un analizador vectorial de redes (VNA) a partir del cual se obtiene la cantidad de potencia radiada por la antena. En la Figura

---

4.4, se muestra la diferencia existente entre el coeficiente de reflexión obtenido mediante la simulación y la medición de la antena. Como se puede observar, los resultados medidos muestran un comportamiento muy cercano a los resultados obtenidos mediante la simulación, lo que demuestra que el diseño cumple con las características requeridas inicialmente.

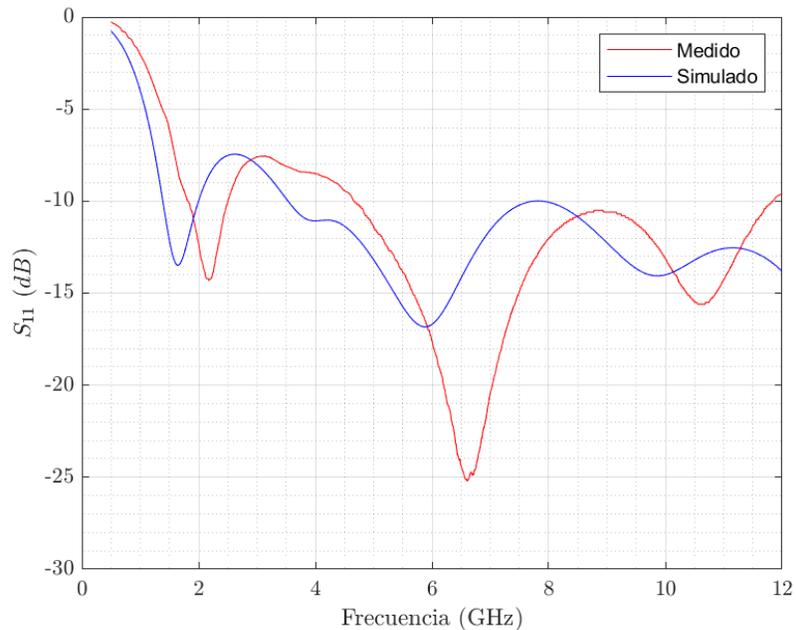


Figura 4.4: Coeficiente de reflexión simulado vs medido de la antena de ITO.

La Tabla 4.2 presenta una comparación entre la antena propuesta con otras antenas transparentes. En esta tabla, se puede observar que las antenas fabricadas con ITO [31–33] no reportan una buena coincidencia entre los valores simulados y los valores medidos en términos del coeficiente de reflexión, mientras que en la antena propuesta se puede apreciar una concordancia razonable entre dichos valores. El desplazamiento de la frecuencia puede deberse al proceso de fabricación y a las variaciones de permitividad del sustrato.

Tabla 4.2: Análisis comparativo con otras antenas transparentes.

Ref	Frecuencias (GHz)	Nivel mínimo $S_{11}$ (dB)	Sustrato// película	Dimensiones (mm)	Coincidencia $S_{11}$ M y S
[23]	2.19 - 2.58	-13.97	zafiro//GZO	60x10x0.375	no
[32]	2 - 6	-25	vidrio//ITO	25x25x1.1	no
[33]	1 - 7	<-15	vidrio//ITO	50x50x1.1	no reportado
[25]	4.5 - 7	-25	acetato//ITO	50x51x0.28	no
[26]	2.4 - 2.65	-15	C58// IZTO/Ag/IZTO	23.4x2	si
[29]	3.89 - 5.97	-24	PET//AgHT-8	58x78x0.9	si
este trabajo	1.8 - 2.5/ 4.66 - 11.84	-25	vidrio//ITO	50x17x1.1	si

\*(M) Medido, (S) Simulado

A partir del gráfico de coeficiente de reflexión, es posible obtener el ancho de banda fraccional para las dos bandas de operación en simulación y medición, dichos resultados se muestran en la Tabla 4.3. El ancho de banda fraccional medido para un  $S_{11}$  menor a  $-10$  dB en la banda más bajas es de 31,34% (1,82 a 2,5 GHz) y en la banda más alta, es de 87,03% (4,66 a 11,84 GHz), este último resultado demuestra que la banda cubre los 5,9 GHz requeridos por el protocolo IEEE 802.11p para comunicaciones vehiculares.

Tabla 4.3: Comparación del ancho de banda fraccional simulado y medido en antena de ITO.

Simulación		Medición	
$Cf$ (GHz)	FBW	$Cf$ (GHz)	FBW
1,65	36,36%	2,17	31,34%
5,9	71,35%	8,25	87,03%

---

### 4.2.2. Directividad

Para conocer la directividad de la antena, se debe recurrir a la obtención de los diagramas de radiación. Estos diagramas se pueden obtener mediante el método propuesto por Balanis [18], donde, se utiliza la antena a medir como emisora (Tx) y una antena de referencia como receptora (Rx). Las mediciones deben realizarse en una cámara anecoica para reducir posibles interferencias y reflexiones. El procedimiento se describe a continuación.

- Se posiciona la antena a medir (Tx) en un extremo de la cámara anecoica, conectada a un generador de funciones emitiendo la frecuencia a medir (2,1 o 5,9  $GHz$ ).
- Se posiciona la antena de referencia (Rx) en el otro extremo de la cámara, conectada a un analizador de redes (Figura 4.6).
- Se registra la medida de potencia recibida.
- Se gira la antena con un ángulo fijo, dicho ángulo determina la resolución que tendrá el diagrama de radiación.
- Se repiten todos los pasos hasta alcanzar los  $360^\circ$

Este procedimiento se realizó en la cámara anecoica del laboratorio de caracterización de sistemas basados en microondas de la Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE, BUAP), con material de medición y referencia del mismo laboratorio. La resolución de las mediciones, en términos del ángulo de giro, fue de  $10^\circ$  y se obtuvieron todas las mediciones para 2,1 y 5,9  $GHz$ . Posterior a la obtención de mediciones, los resultados se graficaron en MATLAB. Los resultados se muestran en la Figura 4.5, para el plano H y el plano E. Se puede observar que existe una buena aproximación entre los diagramas simulados en HFSS (Sim) y los resultados de las mediciones (Med). En el plano H se observa un patrón cercano a la omnidireccionalidad, por otra parte, en el plano E, se observan patrones bidireccionales para ambas frecuencias. Las variaciones existentes entre los resultados simulados y medidos pueden deberse a que, el espacio físico, no cuenta con las características ideales en términos de reflexión en superficies y rechazo de ondas electromagnéticas.

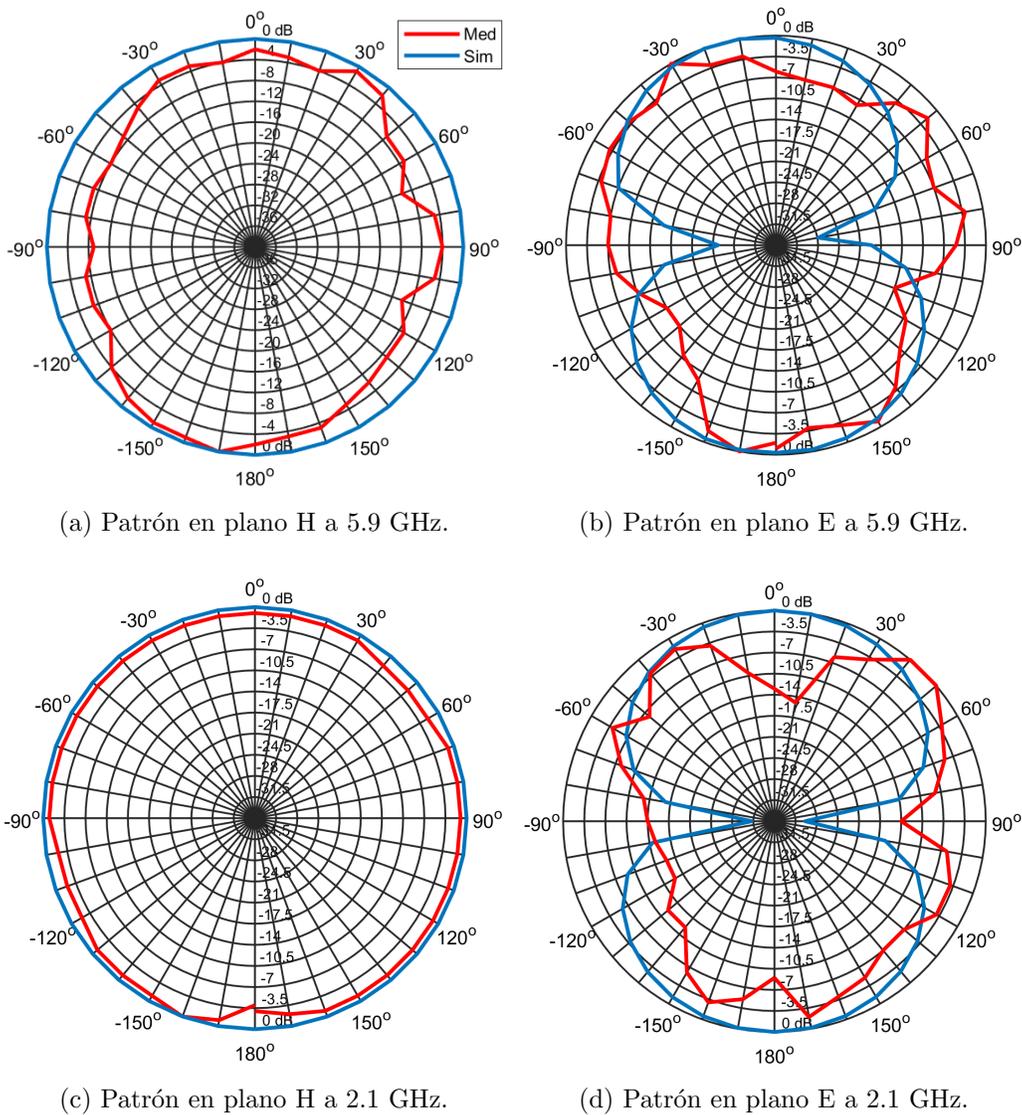


Figura 4.5: Patrones de radiación simulados y medidos.

### 4.2.3. Ganancia

Para la medición de la ganancia, se utiliza el método de las tres antenas, descrito por Balanis [18]. En dicho método, se utilizan tres antenas (a,b,c), la antena a medir y dos de referencia. Las antenas serán dispuestas en combinaciones de dos, como se muestra en la Figura 4.6, una como emisora (Tx) y otra como receptora (Rx). Después, se cambia la combinación, hasta que se hayan logrado las combinaciones a-b, a-c, b-c. En dichas combinaciones se deberán tomar en cuenta cuatro parámetros fundamentales a medir.

---

$P_t$ : potencia transmitida ( $W$ )

$P_r$ : potencia recibida ( $W$ )

$R$ : separación entre antenas ( $m$ )

$\lambda$ : longitud de onda ( $m$ )

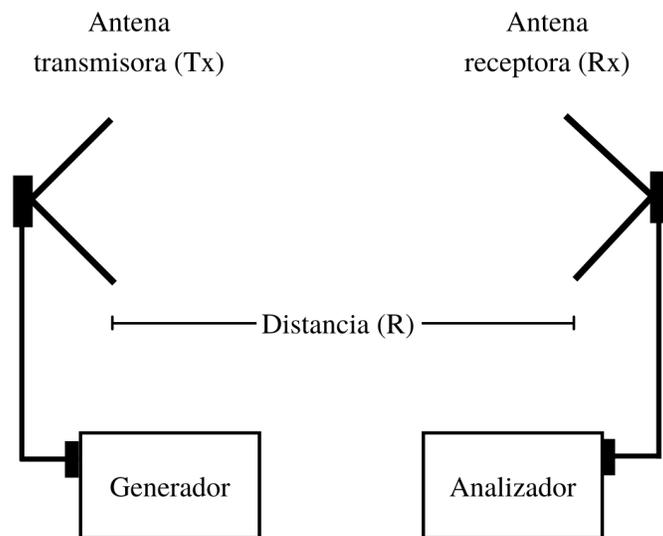


Figura 4.6: Posicionamiento de antenas para medición de ganancia y directividad.

Para la obtención de dichos resultados, se utilizó un analizador vectorial de redes dentro de una cámara anecoica, ambos pertenecientes al laboratorio de caracterización de sistemas basados en microondas de la FCE. Los resultados obtenidos, para 2,1 y 5,9  $GHz$ , se muestran en la Tabla 4.4. Es importante mencionar que la antena 'b' corresponde a la antena fabricada.

Tabla 4.4: Medición de potencia para combinaciones de antenas a 2,1 y 5,9  $GHz$ .

	2,1 $GHz$		5,9 $GHz$		
<b>Tx - Rx</b>	$P_t$ ( $W$ )	$P_r$ ( $W$ )	$P_t$ ( $W$ )	$P_r$ ( $W$ )	$R$ ( $m$ )
a - b	$10,25e - 3$	$6,99e - 7$	$18,83e - 3$	$2,78e - 8$	1,09
a - c	$10,25e - 3$	$1,11e - 9$	$18,83e - 3$	$2,78e - 9$	1,09
b - c	$10,25e - 3$	$1,10e - 9$	$18,83e - 3$	$2,78e - 9$	1,33

A partir de los datos obtenidos, se resolvió el sistema de ecuaciones, compuesto por las ecuaciones 29, 30 y 31, a partir de las cuales se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.5. Los resultados mostrados son comparados con los valores de ganancia obtenidos mediante simulación.

$$(G_a)_{dB} + (G_b)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4R\pi}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rb}}{P_{ta}}\right) \quad (29)$$

$$(G_a)_{dB} + (G_c)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4R\pi}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{ta}}\right) \quad (30)$$

$$(G_b)_{dB} + (G_c)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4R\pi}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{tb}}\right) \quad (31)$$

Tabla 4.5: Ganancia medida (M) y simulada (S) de la antena de ITO.

	<b>2.1 GHz</b>	<b>5.9 GHz</b>
S	-0,167 dB	-2,12 dB
M	-0,145 dB	-3,9dB

### 4.3. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, podemos observar un comportamiento, de la antena fabricada, que es consistente y, en algunas prestaciones, superior a los reportados en otros trabajos de investigación. La antena muestra una adecuada relación entre el coeficiente de reflexión ( $S_{11}$ ) simulado y medido, cumpliendo con las frecuencias de resonancia de 5,9 GHz para el estándar IEEE 802.11p y 2,1 GHz para LTE sub 6 GHz. En términos de directividad, cuenta con patrones polares que se aproximan a comportarse de manera omnidireccional y bidireccional para los planos H y E, respectivamente. Finalmente, la ganancia de la antena fabricada es de -3,9 dB para 5,9 GHz y de -0,145 dB para 2,1 GHz.

---

## Capítulo 5. Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo se diseñó, simuló, fabricó y caracterizó una antena multibanda transparente para comunicaciones vehiculares, alimentada por una guía de onda coplanar (CPW). Para el acople de impedancia, se utilizó la técnica de acople cruzado en conjunto con un exhaustivo análisis paramétrico a través de simulaciones en HFSS. La antena fue diseñada y fabricada usando óxido de indio y estaño (ITO) depositado sobre vidrio, con una resistencia de hoja, medida, ( $R_s$ ) de  $8 \Omega/sqr$ . La caracterización de la antena se realizó para obtener su coeficiente de reflexión ( $S_{11}$ ), ancho de banda fraccional ( $FBW$ ), ganancia y directividad. El coeficiente de reflexión se obtuvo a través de un analizador vectorial de redes (VectorStar, Anritsu), a partir de dichos datos, se obtuvo el ancho de banda fraccional. La ganancia se obtuvo mediante el método de las tres antenas. Finalmente, la directividad se obtuvo mediante el método propuesto por Balanis [18].

### 5.1. Diseño, simulación y fabricación

Para lograr diseñar una antena multibanda transparente, como primer paso, se realizó el diseño y simulación de una antena de cobre sobre vidrio con una sola banda de operación. Este diseño permitió conocer a profundidad las implicaciones del diseño de una antena de parche, la relevancia de las características de los materiales a utilizar (vidrio y cobre) y la importancia existente en conocer el impacto de la variación de las dimensiones de diseño.

Posteriormente, se realizó el diseño de la antena multibanda transparente, tomando como base la experiencia previa de diseño de la antena de cobre. En esta etapa de diseño se

---

presentaron dos características a tener en cuenta: la utilización de un material conductor con baja conductividad (ITO) y la necesidad de alcanzar dos bandas de operación. Para ello, fue de vital importancia la adecuada selección y caracterización de los materiales (ITO sobre vidrio) y geometría (antena con renuras de dipolo y acoplamiento capacitivo, alimentada por una guía de onda coplanar), así como el exhaustivo análisis paramétrico realizado en HFSS. A partir de este análisis paramétrico, fue posible determinar las dimensiones más relevantes en el desplazamiento de las frecuencias de operación:  $W1$ ,  $W2$  y  $Wp1$  (Figura 3.7).

El proceso de fabricación de la antena también debe ser tomado en cuenta para el diseño de la misma, esto debido a que los procesos de manufactura condicionan la precisión en la geometría y las características de la antena. Además, es importante tener en cuenta la disponibilidad de equipos en los laboratorios, así como la disponibilidad y costo de materiales en el mercado.

## 5.2. Caracterización

En contraste con otros trabajos, que también utilizan una película conductiva con una alta resistencia de hoja, los parámetros experimentales obtenidos mostraron un comportamiento muy cercano al simulado. A pesar de haber existido un desplazamiento de la frecuencia, en la medición del coeficiente de reflexión, la antena fabricada cubre los rangos de 1,82 - 2,5  $GHz$  en la banda baja y 4,66 - 11,84  $GHz$  en la banda alta para los requerimientos de 2,1  $GHz$  y 5,9  $GHz$ , respectivamente. Dichos rangos cumplen con los estándares LTE Sub 6  $GHz$  e IEEE 802.11p para comunicaciones vehiculares. La antena muestra una ganancia medida de  $-0,145$   $dB$  para 2,1  $GHz$  y  $-3,9$   $dB$  para 5,9  $GHz$ . La directividad de la antena se puede observar en los diagramas de radiación que se muestran en la Figura 4.5. Las características de la antena fabricada se resumen en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Características de la antena multibanda transparente.

STD	LTE Sub 6 $GHz$	IEEE 802.11p
$f_r$	2,1 $GHz$	5,9 $GHz$
$S_{11}$	-13,8 $dB$	-16,7 $dB$
FBW	31,34 %	87,03 %
Ganancia	-0,145 $dB$	-3,9 $dB$
Directividad	Figuras 4.5c y 4.5d	Figuras 4.5a y 4.5b

### 5.3. Trabajo futuro

Como parte del trabajo futuro se debe buscar mejorar el rendimiento de la antena. Para lograr este objetivo, es fundamental reducir la resistencia de hoja ( $R_s$ ) del óxido conductor utilizado, esto tendría un impacto directo en la conductividad de la antena. Para ello, existen diversos métodos propuestos. En [59], se propone depositar, sobre una película de ITO, una capa nanométrica de oro. Esto logra un aumento en la eficiencia de la antena diseñada, sin comprometer su transparencia. En [37], se presenta una mejora de la conductividad en la antena diseñada mediante el uso de líneas de plata en los bordes de la antena, usando como base AgHT-4. Este método logra disminuir la resistencia de hoja de 4,5 a 0,4  $\Omega/sqr$ , sin embargo, se compromete la transparencia de la antena. En [34], se presenta una comparativa del rendimiento de una antena monopolo con diversos materiales transparentes comenzando por el ITO ( $R_s = 8,6 \Omega/sqr$ ); posteriormente, presenta una película multicapa de ITO con una película ultradelgada de cobre en el medio ITO/Cu/ITO ( $R_s = 4,7 \Omega/sqr$ ); finalmente, presenta una malla de plata ultrafina ( $R_s = 0,054 \Omega/sqr$ ) que muestra una transmitancia equivalente a la del ITO.

Otro factor a tener en cuenta es la caracterización de la antena instalada en un vehículo. Para la integración de la antena a un sistema de transporte, es necesario simular la antena con las modificaciones pertinentes. Para obtener la ganancia y los diagramas de radiación de la antena, se requiere una antena montada en un goniómetro [60].

Se debe tener en cuenta que, tanto las variaciones de la resistencia de hoja para mejorar el rendimiento, como la variación de las características del sustrato (permitividad y dimen-

---

siones del vidrio) debido a su implementación en un vehículo, generarán modificaciones en la respuesta y rendimiento de la antena, por lo que se tendrá que simular la antena con estas nuevas variables y, a partir de los resultados obtenidos, ajustar las dimensiones del diseño.

---

# Anexo A. Publicaciones derivadas del trabajo



Article

## CPW-Fed Transparent Antenna for Vehicle Communications

Jorge Iván Trujillo-Flores <sup>1</sup>, Richard Torrealba-Meléndez <sup>1,\*</sup> , Jesús Manuel Muñoz-Pacheco <sup>1</sup> , Marco Antonio Vásquez-Agustín <sup>1</sup>, Edna Iliana Tamariz-Flores <sup>2</sup>, Edgar Colín-Beltrán <sup>3</sup> and Mario López-López <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Electronics Sciences, Autonomous University of Puebla, Puebla 72000, Mexico; jorge.trujillof@correo.buap.mx (J.I.T.-F.); jesusm.pacheco@correo.buap.mx (J.M.M.-P.); marco.vasqueza@correo.buap.mx (M.A.V.-A.); mario.lopezlop@correo.buap.mx (M.L.-L.)

<sup>2</sup> Faculty of Computer Sciences, Autonomous University of Puebla, Puebla 72000, Mexico; iliana.tamariz@correo.buap.mx

<sup>3</sup> CONACYT—Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Puebla 72840, Mexico; edgarcb@inaoep.mx

\* Correspondence: richard.torrealba@correo.buap.mx; Tel.: +52-(222)-229-5500 (ext. 7400)

Received: 22 July 2020; Accepted: 27 August 2020; Published: 29 August 2020



**Abstract:** In this paper, a fully transparent multiband antenna for vehicle communications is designed, fabricated, and analyzed. The antenna is coplanar waveguide-fed to facilitate its manufacture and increase its transmittance. An indium-tin-oxide film, a type of transparent conducting oxide, is selected as the conductive material for the radiation path and ground plane, with 8 ohms/square sheet resistance. The substrate is glass with a relative permittivity of 5.5, and the overall dimensions of the optimized design are 50 mm × 17 mm × 1.1 mm. The main antenna parameters, namely, sheet resistance, reflection coefficient, and radiation diagram, were measured and compared with simulations. The proposed antenna fulfills the frequency requirements for vehicular communications according to the IEEE 802.11p standard. Additionally, it covers the frequency bands from 1.82 to 2.5 GHz for possible LTE communications applied to vehicular networks.

**Keywords:** coplanar waveguides; vehicular networks; IEEE 802.11p; indium-tin oxide (ITO); transparent antenna

---

### 1. Introduction

Communications have acquired an important role in the development of concepts such as the internet of things (IoT) [1]. The IoT provides emerging and novel applications to transform cities in smart cities by improving the quality and performance of its public services [2,3]. Smart cities are capable of sensing, integrating, and analyzing critical information in city operation and evolution to ensure sustainability and quality of life through the advancement of urban electronic communications in interoperable systems [4–6]. One of the principal goals in smart cities is to count on smart mobility. Smart mobility consists of transport that defines an innovative infrastructure for traffic and transport that saves resources by using new technologies for maximum accessibility and efficiency for citizens [7]. In the IoT field, there exist specific networks that can improve and grow smart mobility; these are known as vehicular networks (VN) [8]. These networks carry out vehicle to vehicle (V2V), vehicle to infrastructure (V2I) [9], and vehicle to everything (V2X) communication [8]. The development and implementation of VN contribute to the integration of mobility with everything. That is, being reached by the concept of smart [1,10], which ranges from smart devices and homes to smart cities. Currently, several communications systems integrate with vehicles due to the growing demand for connectivity in

---

## Referencias

- [1] Y. Koga and M. Kai, “A transparent double folded loop antenna for iot applications,” in *2018 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, pp. 762–765, Sep. 2018.
- [2] B. Jain, G. Brar, J. Malhotra, and S. Rani, “A novel approach for smart cities in convergence to wireless sensor networks,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 35, pp. 440 – 448, 2017.
- [3] A. Kiritat, O. Krejcar, A. Kertesz, and M. F. Tasgetiren, “Future trends and current state of smart city concepts: A survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 86448–86467, 2020.
- [4] A. H. Alavi, P. Jiao, W. G. Buttler, and N. Lajnef, “Internet of things-enabled smart cities: State-of-the-art and future trends,” *Measurement*, vol. 129, pp. 589 – 606, 2018.
- [5] S. E. Bibri and J. Krogstie, “Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 31, pp. 183 – 212, 2017.
- [6] J. Wang, C. Jiang, K. Zhang, T. Q. S. Quek, Y. Ren, and L. Hanzo, “Vehicular sensing networks in a smart city: Principles, technologies and applications,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 25, no. 1, pp. 122–132, 2018.
- [7] M. Matyakubov and O. Rustamova, “Development of smart city model: Smart bus system,” in *2019 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT)*, pp. 1–5, 2019.
- [8] L. Yang, T. Mo, and H. Li, “Research on v2v communication based on peer to peer network,” in *2018 International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS)*, pp. 105–110, March 2018.
- [9] A. J. Alami, K. El-Sayed, A. Al-Horr, H. Artail, and J. Guo, “Improving the car gps accuracy using v2v and v2i communications,” in *2018 IEEE International Multidisciplinary Conference on Engineering Technology (IMCET)*, pp. 1–6, Nov 2018.

- 
- [10] S. Franzo, V. M. Latilla, M. Longo, and S. Bracco, "Towards the new concept of smart roads: Regulatory framework and emerging projects overview," in *2018 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive*, pp. 1–6, July 2018.
- [11] D. Jiang and L. Delgrossi, "Ieee 802.11p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments," in *VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 2036–2040, May 2008.
- [12] "Ieee standard for information technology– local and metropolitan area networks– specific requirements– part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications amendment 6: Wireless access in vehicular environments," *IEEE Std 802.11p-2010 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, IEEE Std 802.11n-2009, and IEEE Std 802.11w-2009)*, pp. 1–51, July 2010.
- [13] S. Ucar, S. C. Ergen, and O. Ozkasap, "Multihop-cluster-based ieee 802.11p and lte hybrid architecture for vanet safety message dissemination," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 4, pp. 2621–2636, 2016.
- [14] F. Arena, G. Pau, and a. Severino, "A review on ieee 802.11p for intelligent transportation systems," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 9, p. 22, 04 2020.
- [15] J.-Y. Choi, H.-S. Jo, C. Mun, and J.-G. Yook, "Preamble-based adaptive channel estimation for ieee 802.11p," *Sensors*, vol. 19, p. 2971, 07 2019.
- [16] M. Klapez, C. Grazia, and M. Casoni, "Minimization of ieee 802.11p packet collision interference through transmission time shifting," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 9, p. 17, 03 2020.
- [17] Y. Xie, I. W. Ho, and E. R. Magsino, "The modeling and cross-layer optimization of 802.11p vanet unicast," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 171–186, 2018.
- [18] C. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley-interscience, John Wiley & Sons, 2005.

- 
- [19] “Ieee standard for definitions of terms for antennas - redline,” *IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993) - Redline*, pp. 1–92, March 2014.
- [20] D. Duraj, M. Rzymowski, K. Nyka, and L. Kulas, “Espar antenna for v2x applications in 802.11p frequency band,” in *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–4, 2019.
- [21] E. Condo Neira, J. Carlsson, K. Karlsson, and E. G. Ström, “Combined lte and ieee 802.11p antenna for vehicular applications,” in *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–5, 2015.
- [22] B. Madhav, T. Anilkumar, and S. K. Kotamraju, “Transparent and conformal wheel-shaped fractal antenna for vehicular communication applications,” *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 91, pp. 1 – 10, 2018.
- [23] R. B. Green, M. Toporkov, M. Ullah, V. Avrutin, U. Ozgur, H. Morkoc, and E. Top-sakal, “An alternative material for transparent antennas for commercial and medical applications,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 59, no. 4, pp. 773–777.
- [24] S. Hakimi, S. K. A. Rahim, M. Abedian, S. M. Noghabaei, and M. Khalily, “Cpw-fed transparent antenna for extended ultrawideband applications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 1251–1254, 2014.
- [25] P. F. Silva Júnior, R. C. S. Freire, A. J. R. Serres, S. Y. Catunda, and P. H. d. F. Silva, “Bioinspired transparent antenna for wlan application in 5 ghz,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 59, no. 11, pp. 2879–2884.
- [26] S. Hong, S. H. Kang, Y. Kim, and C. W. Jung, “Transparent and flexible antenna for wearable glasses applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, pp. 2797–2804, July 2016.
- [27] T. Liu and W. Tu, “Cpw-fed tri-band slot antenna with impedance matching stub,” in *2016 IEEE/ACES International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics (ACES)*, pp. 1–2, March 2016.
-

- 
- [28] S. Chen, Y. Chen, and P. Hsu, "Cpw-fed aperture-coupled slot dipole antenna for tri-band operation," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, pp. 535–537, 2008.
- [29] A. Desai, T. Upadhyaya, J. Patel, R. Patel, and M. Palandoken, "Flexible cpw fed transparent antenna for wlan and sub-6 ghz 5g applications," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 62, no. 5, pp. 2090–2103, 2020.
- [30] A. Desai, T. Upadhyaya, M. Palandoken, J. Patel, and R. Patel, "Transparent conductive oxide-based multiband cpw fed antenna," *Wireless Personal Communications*, vol. 113, 04 2020.
- [31] S. Lee, M. Choo, S. Jung, and W. Hong, "Optically transparent nano-patterned antennas: A review and future directions," *Applied Sciences*, vol. 8, p. 901, 05 2018.
- [32] N. A. Eltresy, D. N. Elsheakh, E. A. Abdallah, and H. M. Elhennawy, "Rf energy harvesting using transparent antenna for iot application," in *2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, pp. 287–291, 2019.
- [33] L. Cai, "An on-glass optically transparent monopole antenna with ultrawide bandwidth for solar energy harvesting," *Electronics*, vol. 8, p. 916, 08 2019.
- [34] X. Castel, M. Himdi, and F. Colombel, "Comparison of the microwave performance of transparent monopole antennas made of different transparent conducting films," in *2018 IEEE Conference on Antenna Measurements Applications (CAMA)*, pp. 1–4, Sep. 2018.
- [35] C.-Y. Chiu, S. Shen, and R. Murch, "Transparent dual-band antenna for smart watch applications," pp. 191–192, 07 2017.
- [36] M. Stanley, Y. Huang, H. Wang, H. Zhou, A. Alieldin, and S. David Joseph, "A transparent dual-polarized antenna array for 5g smartphone applications," 07 2018.
- [37] H. J. Song, T. Y. Hsu, D. F. Sievenpiper, H. P. Hsu, J. Schaffner, and E. Yasan, "A method for improving the efficiency of transparent film antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, pp. 753–756, 2008.
-

- 
- [38] M. Á. Bolaños-Torres, R. Torrealba-Meléndez, J. M. Muñoz-Pacheco, L. d. C. Gómez-Pavón, and E. I. Tamariz-Flores, “Multiband flexible antenna for wearable personal communications,” *Wireless Personal Communications*, vol. 100, pp. 1753–1764, Jun 2018.
- [39] Á. C. Aznar, J. R. Robert, J. M. R. Casals, L. J. Roca, S. B. Boris, and M. F. Bataller, *Antenas*, vol. 3. Univ. Politèc. de Catalunya, 2004.
- [40] J. George, R. Haley, B. Pate, S. Rozeveld, M. Krafft, M. T. Bernius, and S. Yeung, “Optimization of electrical and optical properties in multilayer tco thin film structures,” in *2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pp. 000440–000444, June 2009.
- [41] B. C. Wadell, *Transmission line design handbook*. Artech House, 1991.
- [42] P. Van Zant and P. Chapman, *Microchip fabrication: a practical guide to semiconductor processing*, vol. 5. McGraw-Hill New York, 2000.
- [43] S. O. Kasap, *Principles of electronic materials and devices*. McGraw-Hill New York, 2018.
- [44] F. M. Smits, “Measurement of sheet resistivities with the four-point probe,” *The Bell System Technical Journal*, vol. 37, no. 3, pp. 711–718, 1958.
- [45] M. Ye, L. Wang, Y. He, and M. Daneshmand, “Sheet resistance evaluation of conductive thin films using microstrip antenna,” in *2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, pp. 1–3, Oct 2017.
- [46] M. Mazur, D. Kaczmarek, J. Domaradzki, D. Wojcieszak, S. Song, and F. Placido, “Influence of thickness on transparency and sheet resistance of ito thin films,” in *The Eighth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems*, pp. 65–68, Oct 2010.
- [47] M. Mazur, J. Domaradzki, D. Kaczmarek, S. Moh, and F. Placido, “Sheet resistance and optical properties of ito thin films deposited by magnetron sputtering with different o<sub>2</sub>/ar

- 
- flow ratio,” in *2010 International Students and Young Scientists Workshop "Photonics and Microsystems*, pp. 60–63, June 2010.
- [48] A. Piegari and F. Flory, *Optical thin films and coatings*. Elsevier, 2018.
- [49] G.-N. Lee, P. Machaiah M, W.-H. Park, and J. Kim, “Enhanced optical and electrical properties of ito/ag/azo transparent conductors for photoelectric applications,” *International Journal of Photoenergy*, vol. 2017, pp. 1–9, 10 2017.
- [50] M. S. Farhan, E. Zalnezhad, A. R. Bushroa, and A. A. D. Sarhan, “Electrical and optical properties of indium-tin oxide (ito) films by ion-assisted deposition (iad) at room temperature,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 14, pp. 1465–1469, Aug 2013.
- [51] Y. Wang, H. Yin, Y. Yang, Y. Jiang, Y. Guo, Y. Zhou, and F. Wu, “Tuning resistivity and transmittance of azo films through the electro-chemical treatment,” *Metalurgija*, vol. 58, pp. 67–70, 01 2019.
- [52] M. Awalludin, M. T. Ali, and M. H. Mamat, “Transparent antenna using aluminum doped zinc oxide for wireless application,” in *2015 IEEE Symposium on Computer Applications Industrial Electronics (ISCAIE)*, pp. 33–36, April 2015.
- [53] M. A. Malek, S. Hakimi, S. K. Abdul Rahim, and A. K. Evizal, “Dual-band cpw-fed transparent antenna for active rfid tags,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 919–922, 2015.
- [54] A. Donald and P. Pradeep, “Ciencia e ingeniería de materiales, 6ta,” *Edición, CENGAGE Learning*, 2011.
- [55] K. Wasa, I. Kanno, and H. Kotera, *Handbook of sputter deposition technology: fundamentals and applications for functional thin films, nano-materials and MEMS*. William Andrew, 2012.
-

- 
- [56] N. S. Jibhkate and P. L. Zade, "A compact multiband plus shape cpw fed fractal antenna for wireless application," in *2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*, pp. 1–5, Nov 2016.
- [57] E. S. Ahmed, "Multiband cpw-fed rectangular ring microstrip antenna design for wireless communications," in *2011 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)*, pp. 1–5, Dec 2011.
- [58] K. Prasanth, R. Saxena, D. Kumar, A. Gupta, and A. Kumar, "Performance analysis of enhancing of fringing field of cpw fed rectangular patch antenna for wireless communication," in *2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information Communication Technology (RTEICT)*, pp. 592–596, May 2017.
- [59] M. R. Haraty, M. Naser-Moghadasi, A. A. Lotfi-Neyestanak, and A. Nikfarjam, "Improving the efficiency of transparent antenna using gold nanolayer deposition," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 4–7, 2016.
- [60] J. P. Lombardi, R. E. Malay, J. H. Schaffner, H. J. Song, M. Huang, S. C. Pollard, M. D. Poliks, and T. Talty, "Copper transparent antennas on flexible glass by subtractive and semi-additive fabrication for automotive applications," in *2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, pp. 2107–2115, 2018.