



La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA CONFORMADA PARA
UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO UTILIZADO PARA
MONITOREO AGRÍCOLA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

ANDREA VERÓNICA DURÁN PARDO

DIRECTORA: DIANA VERÓNICA NAVARRO MÉNDEZ

Quito, Septiembre de 2020

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Andrea Verónica Durán Pardo, bajo mi supervisión.

Dra. Diana Verónica Navarro Méndez
DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Andrea Verónica Durán Pardo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

Andrea Verónica Durán Pardo

DEDICATORIA

A Dios,

A mis padres: Fanny y Luis,

A mis hermanos: Luis E. y Víctor,

Al abuelito, que ahora nos cuida desde el cielo.

Solo puedo decirles, gracias por su amor y apoyo incondicional. Son mi razón de ser y los adoro con toda mi alma.

AGRADECIMIENTO

En este breve espacio quiero extender mi más sincero agradecimiento a todos quienes hicieron posible la realización de este proyecto, empezando por mis padres que han sabido darme su ejemplo de trabajo y honradez, a mis hermanos que me han apoyado incondicionalmente y han sido los pilares que me motivan a salir adelante.

De manera especial a la Dra. Diana Navarro, directora de este proyecto que con mucha paciencia supo guiarme en cada una de sus etapas y llevarlo más lejos de lo que se tenía previsto, he aprendido mucho estos meses gracias a usted.

A los docentes de esta querida Institución, que supieron motivar y transmitir su cariño por esta profesión.

A los amigos con quienes compartí dentro y fuera de las aulas y han sido testigos del camino recorrido, ustedes también han sido mis maestros y sin duda siempre tendrán un lugar en mi corazón.

Y a todas esas personitas que de una u otra forma estuvieron conmigo brindándome una palabra de aliento cuando mis ánimos decaían, son importantes en la consecución de este logro.

Muchas gracias a todos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 ALCANCE	2
1.3 MARCO TEÓRICO	3
1.3.1 ANTENAS MICROSTRIP	3
1.3.1.1 Aplicaciones de las antenas microstrip.....	4
1.3.1.2 Técnicas de Alimentación	4
1.3.1.3 Propagación y radiación Onlines microstrip	6
1.3.2 PARCHE RECTANGULAR	7
1.3.2.1 Modelo de línea de transmisión.....	7
1.3.2.2 Diagrama de radiación	8
1.3.2.3 Directividad y Ganancia	9
1.3.2.4 Acoplamiento de impedancias	9
1.3.2.5 Ancho de banda	10
1.3.2.6 Elección del sustrato	11
1.3.2.7 Proceso de diseño	13
1.3.3 ANTENAS CONFORMADAS	14
1.3.3.1 Aplicaciones	16
1.3.3.2 Ventajas y desventajas	16
1.3.3.3 Antenas conformadas para vehículos aéreos	17
2. METODOLOGÍA.....	19
2.1 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	19
2.1.1 GENERALIDADES DEL UAV SKYWALKER X8.....	19
2.1.1.1 Ubicación de las antenas.....	20
2.1.2 FRECUENCIA DE OPERACIÓN	21

2.1.3	ANCHO DE BANDA	21
2.1.4	ELECCIÓN DEL SUSTRATO	23
2.2	DISEÑO DEL ELEMENTO BASE	24
2.3	SIMULACIÓN.....	27
2.3.1	SIMULACIÓN DEL ELEMENTO BASE	27
2.3.1.1	Influencia de la variación de las dimensiones de la antena sobre sus parámetros de funcionamiento.....	31
2.3.2	SIMULACIÓN DE LAS ANTENAS CONFORMADAS	33
2.3.2.1	Antena Frontal.....	33
2.3.2.2	Antena Lateral.....	40
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
3.1	IMPLEMENTACIÓN.....	42
3.2	MEDICIONES EN LA FIEE.....	43
3.2.1	MEDICIONES DE LA ANTENA PLANA	43
3.2.2	MEDICIONES DE LA ANTENA FRONTAL	44
3.2.3	MEDICIONES DE LA ANTENA LATERAL	45
3.3	MEDICIONES EN LA UPV	46
3.3.1	MEDICIONES DE LA ANTENA FRONTAL	47
3.3.2	MEDICIONES DE LA ANTENA LATERAL	48
3.4	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	49
3.5	EFFECTOS DEL TAMAÑO DEL DIELECTRICO.....	50
3.5.1	ANTENA FRONTAL	51
3.5.2	ANTENA LATERAL.....	52
3.6	EFFECTOS DEL TAMAÑO DEL PLANO DE MASA	53
3.6.1	ANTENA FRONTAL	54
3.6.2	ANTENA LATERAL.....	55
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
4.1	CONCLUSIONES	57
4.2	RECOMENDACIONES.....	58
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	ANEXOS.....	64

RESUMEN

El uso de vehículos aéreos no tripulados o UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) como herramientas de monitoreo, se está volviendo más común en el sector agrícola. Sin embargo, existe un gran desafío para estas pequeñas aeronaves debido a la limitada superficie de la que disponen, la cual debe ser utilizada eficientemente para acomodar los múltiples dispositivos que debe transportar, entre ellos las antenas.

El siguiente trabajo plantea el diseño, simulación y construcción de dos antenas conformadas para un UAV cuya forma ha sido acondicionada para formar parte integral del armazón de la plataforma aérea y de este modo no afectar sus propiedades aerodinámicas. Para efectuar el diseño de las mismas, se ha tomado como referencia un parche cuadrado que opera en la banda de 5.8 GHz, para ello su estructura plana se ha modificado para adaptarse a la superficie delantera del UAV.

En función del espacio disponible para el montaje de las antenas se presentan dos alternativas: una antena para la parte frontal del UAV y otra para el área cercana a las alas de la aeronave. Cada una de las antenas es modelada, simulada y optimizada hasta obtener los resultados requeridos empleando el software de simulación electromagnética HFSS. Luego, los prototipos son fabricados utilizando sustratos de impresión 3D y cobre adhesivo; en cada uno de ellos, se efectúan mediciones del campo eléctrico recibido y de los parámetros S. Finalmente se comparan y presentan los resultados obtenidos de las antenas simuladas y construidas.

PALABRAS CLAVE: microstrip, antenas conformadas, UAV, parche, parámetros S, diagrama de radiación.

ABSTRACT

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs), as a monitoring tool is becoming more common in the agricultural sector. However, there is a great challenge for these small aircraft due to the limited area they have, which must be used efficiently to accommodate the multiple devices that must be transported, including antennas.

The following work proposes the design, simulation and construction of two conformal antennas for a UAV, whose shape has been adequate to be an integral part of the frame of the aerial platform and thus not affect its aerodynamic properties. To design them, a square patch that will operate in the 5.8 GHz band has been taken as a reference, which has modified its structure to adapt to the front surface of the UAV.

Depending on the space available for mounting the antennas, two alternatives are presented: one for the front of the UAV and the other for the area near the wings of the aircraft. Each one of the antennas is modeled, simulated and optimized to obtain the required results using HFSS electromagnetic simulation software. Then, the prototypes are fabricated using 3D printing substrates and adhesive copper. In each of them, measurements of the received electric field and S parameters are made. Finally, the results obtained from the simulated and built antennas are compared.

KEYWORDS: microstrip, conformal antennas, UAV, patch, S parameters, radiation pattern.

1. INTRODUCCIÓN

La actividad agrícola en Ecuador es uno de los sectores con mayor impacto en la economía nacional ya que genera empleo al 25% de la población económicamente activa y después del petróleo es el más importante generador de divisas [1]. Entonces es menester aportar a la modernización del sector impulsando el uso de tecnologías emergentes, por este motivo la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional se encuentra al frente del proyecto (PIMI-18-01) que promueve el uso de vehículos aéreos no tripulados o UAV (Unmanned Aerial Vehicle) como herramientas que faciliten el monitoreo de zonas agrícolas a fin de lograr la máxima producción con la mínima cantidad de recursos.

Ahora bien, el elemento clave a potenciar dentro de este marco es el UAV, el cual alberga un sistema de comunicaciones que tradicionalmente es implementado mediante la instalación de equipos de transmisión de uso comercial situadas sobre la estructura de soporte de la plataforma aérea. Elementos como las antenas al ser de propósito general, no consideran el perfil aerodinámico de la plataforma y dependiendo del servicio y frecuencia de operación pueden llegar a ser más o menos invasivas [2]. La presencia de estructuras salientes en el fuselaje de un UAV contribuye al incremento en el arrastre o drag lo cual tiene como consecuencia una mayor demanda de potencia requerida para alimentar el motor, pues se deben compensar las fuerzas de sustentación a fin de garantizar estabilidad durante el vuelo, debido a ello, la cuidadosa colocación de la antena en el vehículo aéreo, podría lograr características óptimas de rendimiento aerodinámico y también contribuir a la mejora del rendimiento electromagnético de la antena.

Por las razones antes expuestas, el presente trabajo propone el diseño de una antena conformada que será utilizada para transmisión de video analógico en la banda 5.8 GHz, cuya forma se ajuste a la del fuselaje de un UAV utilizado para monitoreo agrícola con el propósito no afectar su diseño aerodinámico. Las antenas conformadas son candidatas idóneas para ser ubicadas sobre la superficie del UAV debido a su bajo perfil, además de que pueden ser fácilmente integradas sobre cualquier geometría preestablecida, favoreciendo a un correcto funcionamiento del sistema de propulsión de la aeronave lo cual se traduce en una mayor carga útil y autonomía de vuelo.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

- Presentar el prototipo simulado de una antena conformada que opere en la banda de 5.8 GHz para un UAV de monitoreo agrícola.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Desarrollar el diseño teórico de una antena microstrip plana que opere en la banda de 5.8 GHz.
- Presentar el resultado de los diseños simulados de las antenas microstrip: plana y conformada.
- Extraer información relevante de los parámetros obtenidos en la simulación, tales como: diagramas de radiación y nivel de adaptación.
- Elaborar un análisis comparativo entre antenas planas y conformadas en base a los resultados obtenidos por simulación.

1.2 ALCANCE

Se efectuará el diseño de una antena conformada y su réplica, que opere en la banda de 5.8 GHz alimentada por sonda coaxial, cuya forma será acondicionada para cubrir parte de la superficie delantera del fuselaje de un UAV modelo Skywalker X8. Se espera obtener el diagrama de radiación típico para una antena de este tipo, con una ganancia comprendida entre 4 y 7dB.

Se comprobará el diseño del elemento radiante mediante el software de simulación electromagnética HFSS (High Frequency Structure Simulator) que permita estimar entre otros parámetros, las pérdidas de retorno generadas al elegir el punto de alimentación, ancho de banda, ganancia y patrón de radiación.

Parte del trabajo incluirá la simulación de una antena microstrip plana en base a la cual se procederá a constituir la nueva forma de la antena que se amoldará a la superficie curva del UAV. Para modelar la antena en el paquete de simulación, se considerará como sustrato: materiales de impresión 3D comúnmente utilizados en la construcción del armazón de los UAVs.

En base a los resultados obtenidos en las simulaciones, se presentará un análisis comparativo entre antenas conformadas y sus contrapartes planas.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 ANTENAS MICROSTRIP

Una antena microstrip en su forma más elemental se compone de tres estructuras: un parche metálico, un sustrato dieléctrico y un plano de masa [3] como se muestra en la Figura 1.1.

Estas antenas presentan numerosas ventajas como su bajo peso, pequeño volumen y facilidad de fabricación, así como un bajo perfil el cual puede conformarse a superficies planas y curvas [4]. La mayor desventaja de este tipo de antenas es su baja eficiencia debido a las pérdidas en el dieléctrico y a la presencia de ondas superficiales las cuales degradan sus características de radiación [3]. Adicionalmente presentan poca tolerancia a aplicaciones de elevada potencia, y ancho de banda relativamente estrecho (típicamente entre el 1-5%).

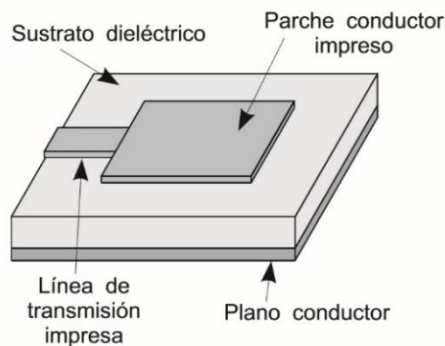


Figura 1.1. Estructura una antena tipo parche [5].

El parche puede tomar cualquier forma arbitraria, aunque son más comunes las formas: cuadradas, circulares, triangulares, semicirculares, sectoriales y anulares [6] como se muestra en la Figura 1.2.

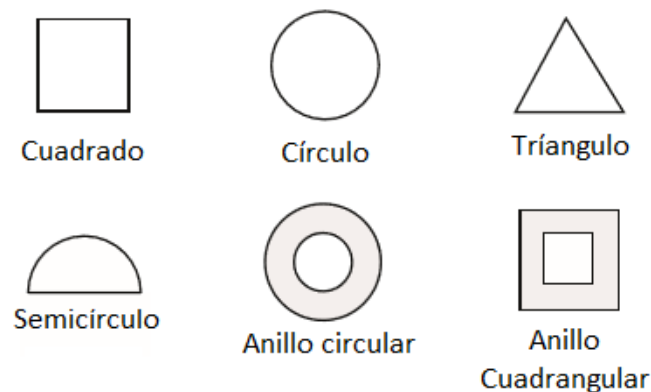


Figura 1.2. Diferentes formas que pueden tomar los parches [6].

1.3.1.1 Aplicaciones de las antenas microstrip

Las ventajas que presentan las antenas tipo parche las hacen atractivas para numerosas aplicaciones. Por ejemplo, las antenas para telemetría empleadas en los misiles deben ser delgadas y conformadas a la superficie. Así también, los altímetros de radar utilizan pequeños arreglos de radiadores microstrip. Otras aplicaciones relacionadas con aeronaves incluyen antenas para comunicaciones telefónicas y satelitales como es el caso del sistema de posicionamiento global (GPS) [6]. Algunas de las aplicaciones más comunes se enumeran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Aplicaciones típicas de las antenas Microstrip [6].

Sistema	Aplicación
Antenas de barcos y aviones	Comunicación y navegación, altímetros, sistemas de aterrizaje.
Misiles	Radar, fusibles de proximidad y telemetría.
Comunicaciones por Satélite	Televisión, antenas para comunicación entre vehículos.
Radio Móvil	Telefonía celular, vehículos en movimiento
Biomedicina	Aplicadores en hipertermia por microondas
Otros	Alarmas contra intrusos, comunicación personal, etc.

1.3.1.2 Técnicas de Alimentación

Las antenas microstrip pueden ser alimentadas por una variedad de métodos, entre los cuales se distinguen dos esquemas de alimentación: por contacto y sin contacto. En el primero la potencia es suministrada directamente al parche radiante usando un elemento de conexión tal como una línea microstrip o un conector coaxial. En el segundo esquema se requiere un acoplamiento del campo electromagnético para transferir la energía entre la línea de alimentación y el parche [7].

A continuación, se listan cuatro técnicas de alimentación comúnmente utilizadas:

- **Alimentación por línea microstrip:** Como se visualiza en la Figura 1.3 (a), en esta técnica de alimentación la energía es suministrada directamente al elemento radiante a través de una línea microstrip cuyo ancho es mucho menor al del parche. Tiene ventajas en cuanto a su sencillez de fabricación, sin embargo dependiendo de las dimensiones de la línea de alimentación podrían presentarse radiaciones espurias [8].

- **Alimentación por sonda coaxial:** La Figura 1.3 (b) muestra este tipo de alimentación, en donde el conductor interno del conector coaxial está unido al parche y el externo está conectado al plano de masa. Es fácil de fabricar y debido a que existe el recubrimiento necesario en el conector, disminuyen las radiaciones espurias, sin embargo el ancho de banda es menor respecto a los otros métodos de alimentación [8].
- **Alimentación de acoplamiento por proximidad:** Este método emplea dos capas de sustrato dieléctrico. Como se puede apreciar en la Figura 1.3 (c), una línea de alimentación microstrip se ubica entre las capas de sustrato y el parche se sitúa encima del sustrato 1. La principal ventaja del método es que se reducen las radiaciones espurias, así como también se produce un aumento en el ancho de banda (alrededor del 13%) debido al incremento en el espesor total del sustrato [8].
- **Alimentación de acoplamiento de apertura:** En esta forma de alimentación se tienen dos sustratos dieléctricos separados por un plano de tierra como se muestra en la Figura 1.3 (d). En el lado inferior del sustrato 1 hay una línea de alimentación microstrip que está acoplada al parche a través de una ranura situada en el plano de masa que separa los dos sustratos. Es un método complejo en términos de fabricación y el de menor ancho de banda, aunque presenta niveles moderados de radiación espuria [8].

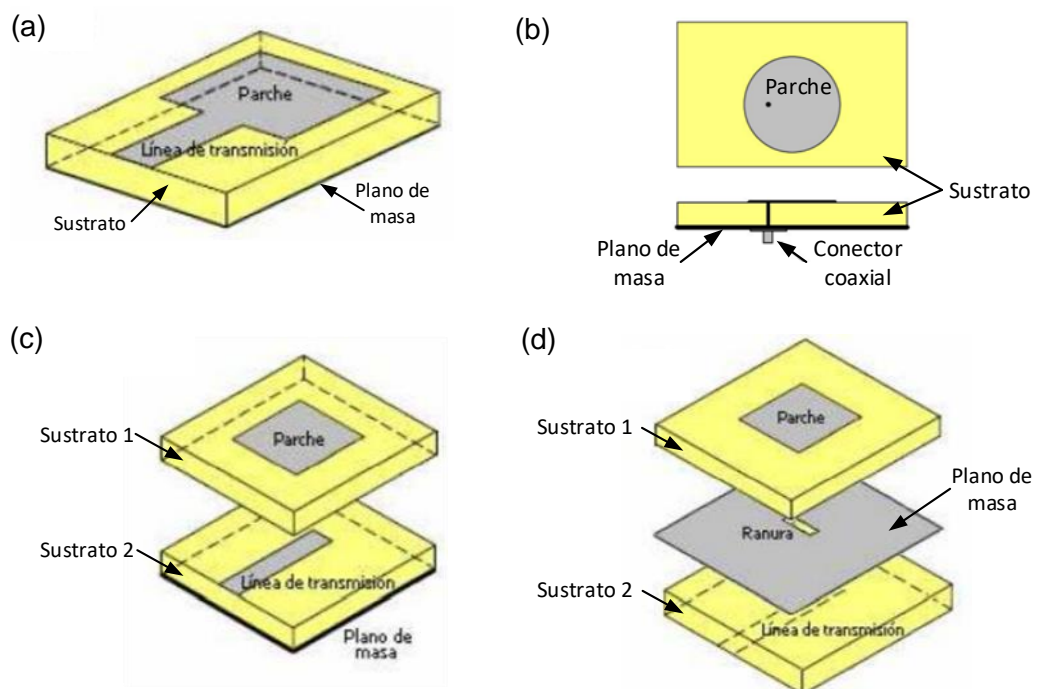


Figura 1.3. Métodos de alimentación de una antena microstrip: (a) Línea microstrip, (b) Sonda coaxial, (c) Acoplamiento por proximidad, (d) Acoplamiento por apertura [9].

1.3.1.3 Propagación y radiación Ondas microstrip

La radiación en una antena microstrip se encuentra determinada por la distribución del campo entre el parche metálico y el plano de masa. Para su análisis, se puede suponer que una fuente puntual ubicada debajo del parche se encuentra radiando ondas electromagnéticas.

Dependiendo de la dirección en la que se propaguen las ondas, se tienen cuatro tipos de ondas presentes en las líneas microstrip cada una de las cuales exhibe un comportamiento diferente[10], mismo que se describe en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Tipos de ondas presentes Ondas microstrip[10].

	Ondas radiadas		Ondas no radiadas	
	Ondas espaciales	Ondas de fuga	Ondas superficiales	Ondas guiadas
Ángulo de transmisión	$0 < \theta < \frac{\pi}{2}$	$\text{sen}^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}\right) < \theta < \pi$	$\frac{\pi}{2} < \theta < \text{sen}^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}\right)$	$\theta = \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$
Condiciones físicas en que se genera	Sustrato grueso de baja permitividad	Interface entre dieléctricos	Sustrato grueso de alta permitividad	Sustrato delgado de alta permitividad
Propagación	Radiación	Parcialmente radiada y reflejada	Reflexión	Modos discretos de propagación
Aplicaciones	Antenas	Pueden usarse para aumentar el tamaño	Arreglos acoplados y F.O.	Líneas y circuitos
Indeseable en	Líneas y circuitos	Líneas, circuitos y antenas	Líneas, circuitos y antenas	Antenas parche
Efectos	Fugas espurias	Radiación	Acoplamientos espurios	Conducción de la onda

En la Figura 1.4. pueden observarse los diferentes tipos de ondas presentes en una antena microstrip. Por ejemplo, las ondas guiadas (líneas en azul) se encuentran confinadas en la capa dieléctrica, donde el parche y el plano de masa actúan como una guía de onda. Por otro lado, se tienen también las ondas espaciales (líneas en rojo) las cuales antes de llegar a los bordes del parche sufren numerosas reflexiones debido al pequeño grosor del sustrato y después de llegar a los bordes son radiadas hacia el espacio [11].

Algunas ondas caen sobre el plano de masa en un ángulo menor al ángulo crítico del dieléctrico ($\theta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}\right)$) y se reflejan hacia atrás. Una parte se filtra hacia el espacio en un ángulo más pequeño que el ángulo crítico, generando las llamadas ondas de fuga (líneas en verde) y otra porción de las ondas (líneas en gris) se dirigen hacia abajo en un ángulo mayor que el ángulo crítico y, por lo tanto, se reflejan totalmente en la interfaz dieléctrico-

aire. Estas ondas se encuentran atrapadas en la capa dieléctrica y se denominan ondas superficiales. Sin embargo, su presencia no es deseable, ya que pueden causar la degradación del diagrama de radiación de la antena, así como también se ven afectadas sus características de polarización [11].

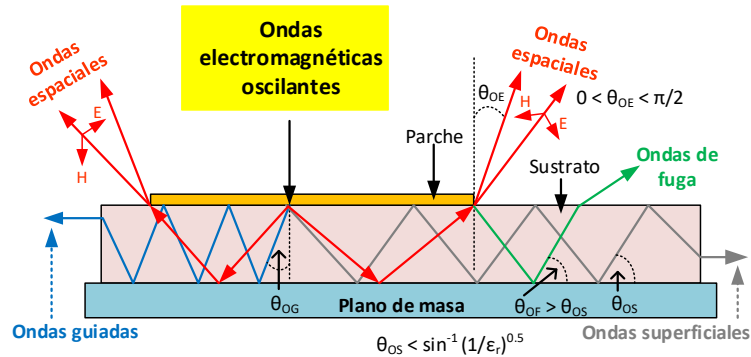


Figura 1.4. Tipos de ondas presentes en las líneas microstrip [12].

1.3.2 PARCHE RECTANGULAR

Como se ilustra en la Figura 1.5, un parche rectangular está definido por sus dimensiones: longitud L y ancho W . Generalmente, L se encuentra entre $\lambda_d/3$ y $\lambda_d/2$, donde λ_d es la longitud de onda en el medio dieléctrico y está definida por la expresión: $\lambda_d = \lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}$, donde λ_0 es la longitud de onda en el espacio libre y ϵ_r es la constante dieléctrica del sustrato. Para que se produzca radiación, el ancho W debe ser menor a λ_d aunque no demasiado (de otra forma, la antena se comporta como una línea microstrip si W es muy pequeño). Así también, se tiene una altura de sustrato h mucho menor a λ_d [4].

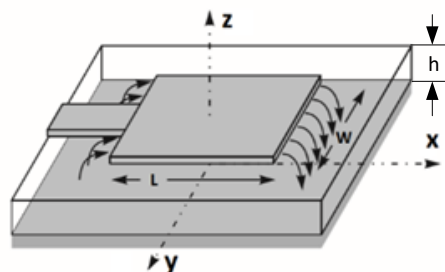


Figura 1.5. Dimensiones de una antena tipo parche rectangular [4].

1.3.2.1 Modelo de línea de transmisión

Una antena parche rectangular puede ser representado por dos ranuras radiantes, cada una con un ancho W y cuyas componentes de campo se encuentran separadas por una distancia $L = \lambda_d/2$, lo que significa que están desfasados 180 grados, pero tienen la misma magnitud como se muestra en la Figura 1.6 (a). Visto desde la parte superior de la antena,

en la Figura 1.6 (b) se observa que los campos presentes en las ranuras en realidad se encuentran en fase en la dirección del eje x, lo cual produce una radiación lateral con un máximo en la dirección del eje z [4].

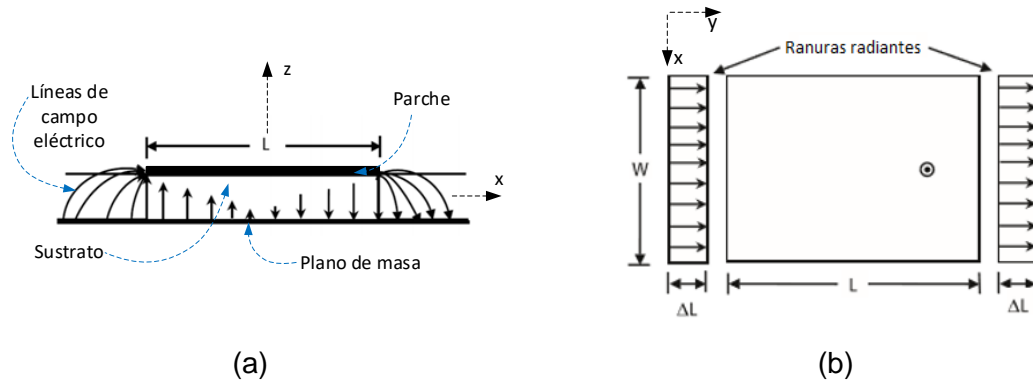


Figura 1.6. Distribución de las líneas de campo en un parche rectangular, vista: (a) Lateral, (b) Superior [6].

Así también, en la Figura 1.6 (b) se aprecia que debido a la presencia de las dos ranuras radiantes se produce un incremento ΔL en la longitud resonante del parche. Además, la radiación no solo se confina en el medio dieléctrico, sino que también parte del campo radiado se propaga en el aire, por tanto, se tienen dos constantes dieléctricas distintas. El modelo sugiere considerar una constante dieléctrica efectiva ϵ_{reff} , la cual permite suponer que la antena se encuentra inmersa en un medio homogéneo con permitividad constante. La constante dieléctrica efectiva ϵ_{reff} , tiene un valor ligeramente menor al de ϵ_r [10].

1.3.2.2 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación típico de una antena microstrip manifiesta mayor concentración de energía en dirección perpendicular al parche (Broadside) y ninguna o mínima radiación hacia la parte posterior [13].

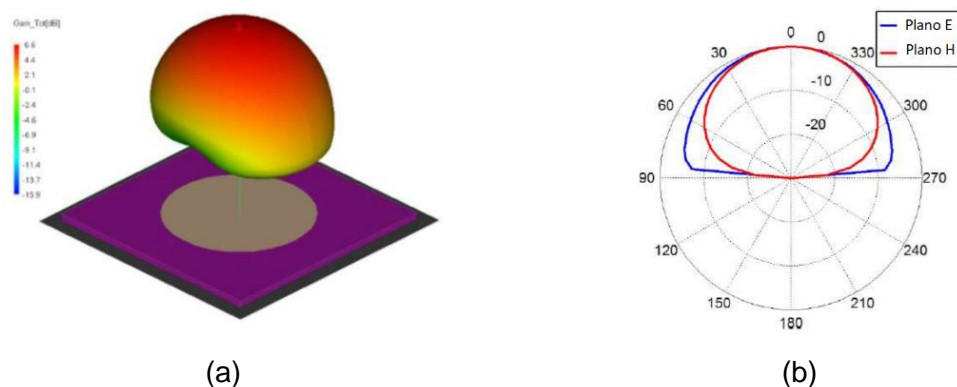


Figura 1.7. Diagrama de radiación típico de un parche rectangular: (a) Tridimensional, (b) Bidimensional [14].

Esta relación delante-atrás depende en gran medida del tamaño y forma del plano de masa, es decir si el plano de masa es finito, se producirá una fuga de radiación hacia la mitad inferior del espacio. Mientras que si se considera un plano infinito, no se producirá fuga de radiación hacia la parte posterior de la antena [13] tal y como se observa en la Figura 1.7.

1.3.2.3 Directividad y Ganancia

La directividad es un parámetro que muestra cuánto puede radiar la antena en una dirección determinada y para un parche rectangular puede tomar valores comprendidos entre 7 y 9 dB [15].

La ganancia (G) de una antena se define como la directividad (D) multiplicada por un factor (η) que representa la eficiencia de radiación y está dada por la Ecuación 1.1.

$$G = \eta \times D \quad (1.1)$$

$$\eta = \frac{P_r}{P_i} \quad (1.2)$$

Donde: P_r es la potencia radiada y P_i es la potencia de entrada.

Este factor siempre es inferior al 100% por lo que la ganancia de la antena siempre es inferior a la directividad. La eficiencia de radiación (η) cuantifica las pérdidas en la antena y se define como la relación entre la potencia radiada y la potencia de entrada (ver Ecuación 1.2). Típicamente, una antena de parche exhibe una ganancia entre 5 y 7 dB y presenta un ancho de haz (en -3dB) entre 70° y 90° [16].

1.3.2.4 Acoplamiento de impedancias

Dado que el voltaje es máximo y la corriente es mínima en los bordes del parche (ver Figura 1.8 (a)), la impedancia de entrada de la antena varía desde cero en su centro, hasta un valor máximo en los bordes tal y como se indica en la Figura 1.8 (b).

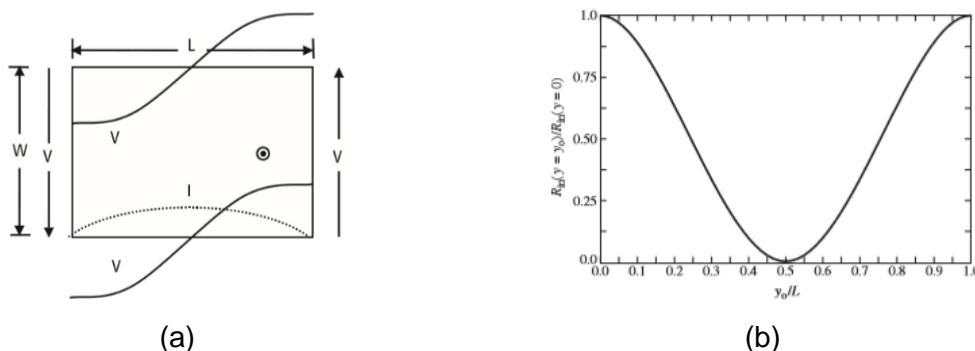


Figura 1.8. Variación de: (a) Voltaje y corriente, (b) Impedancia de entrada normalizada en un parche rectangular [6].

Para conseguir un nivel de adaptación apropiado, el punto de alimentación debe colocarse en un lugar donde la impedancia de entrada de la antena coincida con la impedancia característica de la línea de alimentación (50Ω o 75Ω) [6]. Usualmente este punto se localizará a la mitad del ancho W (eje x), y a una distancia y_0 en la dirección de la longitud de resonancia L (eje y) [13], tal y como se muestra en la Figura 1.9.

Para determinar y_0 , se empleará la Ecuación 1.3, la cual describe de forma aproximada la variación de la impedancia de entrada en función de la ubicación del punto de alimentación a lo largo del eje y :

$$R_{in}(y = y_0) = R_{in}(y = 0) \cos^2 \left(\frac{\pi}{L} y_0 \right) \quad (1.3)$$

Donde, $R_{in}(y = y_0)$ es la impedancia de entrada en y_0 y $R_{in}(y = 0)$ es la impedancia en el borde del parche, definida por la Ecuación 1.4:

$$R_{in}(y = 0) = \sqrt{z_0 * z_a} \quad (1.4)$$

Donde z_0 es la impedancia característica de la línea de alimentación y z_a es la impedancia de la antena determinada por la expresión 1.5:

$$z_a = 90 \frac{(\epsilon_r)^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W} \right) \quad (1.5)$$

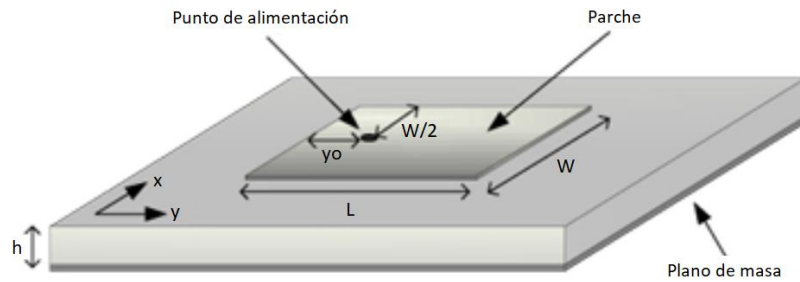


Figura 1.9. Posición del punto de alimentación de una antena parche rectangular [17].

1.3.2.5 Ancho de banda

Es el rango de frecuencia sobre el cual la estructura exhibe un buen nivel de adaptación respecto a una determinada impedancia de referencia. El ancho de banda depende de parámetros como el factor de calidad (Q) y el tipo de alimentación utilizada [13].

La gráfica en la Figura 1.10 muestra el ancho de banda considerando pérdidas de retorno (S_{11}) por debajo de -10 dB los cuales determinan que no existirá más allá del 10% de potencia reflejada [13].

En un parche rectangular el ancho de banda generalmente se limita del 2% al 5% lo que representa una desventaja importante para este tipo de antena [3].

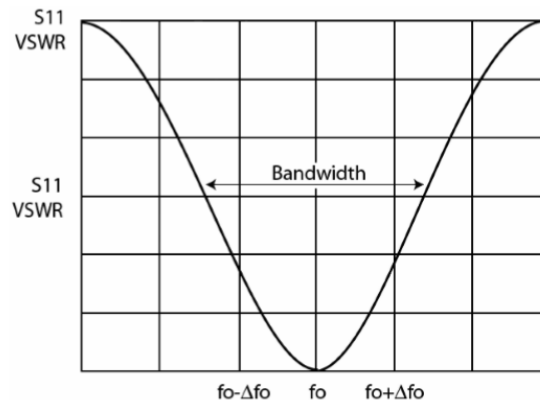


Figura 1.10. Ancho de banda de impedancia de una antena parche [13].

1.3.2.6 Elección del sustrato

Factores como el costo económico, pérdidas de potencia y rendimiento deben ser considerados al momento de elegir el sustrato para el diseño de antenas microstrip. Los sustratos pueden ser evaluados en torno a dos parámetros: la constante dieléctrica y la tangente de pérdidas, ya que dependiendo del valor que puedan adquirir estos parámetros se tendrán sustratos de calidad superior o inferior.

Constante Dieléctrica

Este parámetro define las propiedades dieléctricas de un material en relación con el espacio libre:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1.6)$$

Donde ϵ es la permitividad compleja dependiente de la frecuencia del material, y ϵ_0 es la constante dieléctrica en el espacio libre ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$). La constante dieléctrica relativa es positiva y mayor o igual a 1.

Existen numerosos sustratos que se pueden usar para el diseño de antenas de microstrip, y sus constantes dieléctricas generalmente se encuentran en el rango de $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Dependiendo del valor que tome la constante, se tienen los materiales dieléctricos que se indican en la Tabla 1.3. Así, por ejemplo, cuanto más baja es la constante dieléctrica, mejor funciona el material como aislante y presenta menos pérdidas [18].

Tabla 1.3. Clasificación de materiales de acuerdo a su constante dieléctrica [19].

Permitividad	Rango	Material
Baja	$1 < \epsilon_r < 2$	Aire, espuma de poliestireno
Media	$2 < \epsilon_r < 12$	Fibra de vidrio
Alta	$\epsilon_r > 12$	Cerámica, cuarzo

Es importante conocer que la constante dieléctrica varía tanto con la temperatura como con la frecuencia (generalmente disminuye a medida que aumenta la frecuencia) dependiendo del material [18].

Tangente de pérdidas

La tangente de pérdidas ($\tan \delta$) es una medida de cuánto del campo electromagnético que viaja a través de un dieléctrico es absorbido o perdido en el mismo, generalmente debido a la disipación de calor [18]. Este parámetro se define también como el ángulo de fase entre los componentes resistivo y reactivo de un sistema con permitividad como se indica en la Ecuación 1.7.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1.7)$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (1.8)$$

La tangente de pérdidas también varía con la frecuencia y la temperatura según el material que se utilice. Cuanto mayor sea $\tan \delta$, mayor será la pérdida que presentará el dieléctrico, lo que se traduce en una menor eficiencia de la antena [18].

Efecto de la altura del sustrato

El grosor o altura del sustrato tiene influencia sobre el ancho de banda y la eficiencia de la antena. Así por ejemplo, sustratos más gruesos con constantes dieléctricas bajas pueden lograr un aumento del ancho de banda, pero a expensas de un incremento en el tamaño del elemento radiante [3]. En cambio, sustratos delgados con constantes dieléctricas más altas son deseables en circuitos de microondas debido a que requieren campos estrechamente unidos para minimizar la radiación y el acoplamiento no deseados, sin embargo, debido a que presentan mayores pérdidas son menos eficientes y exhiben anchos de banda relativamente más pequeños.

1.3.2.7 Proceso de diseño

Al aplicar el modelo de línea de transmisión sugerido en [3] y [4], se utilizan los siguientes pasos de cálculo para determinar las dimensiones una antena parche rectangular.

- En primer lugar, se calcula el ancho W de la antena, determinado por la Ecuación 1.9:

$$W = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1.9)$$

Donde: $c = 3 \times 10^8$ m/s es la velocidad de la luz, f_0 es la frecuencia de operación y ϵ_r es la constante dieléctrica del sustrato.

- Luego, se calcula la constante dieléctrica efectiva ϵ_{reff} para un medio homogéneo aire-dieléctrico, definida por la Ecuación 1.10:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (1.10)$$

Donde: ϵ_r es la constante dieléctrica, h es el grosor del sustrato y W es el ancho del parche.

- A continuación, se calcula la longitud efectiva del parche L_{eff} que se encuentra determinada por la expresión 1.11:

$$L = \frac{\lambda_d}{2} = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (1.11)$$

Donde: λ_d es la longitud de onda en el dieléctrico y λ_0 es la longitud de onda en el espacio libre.

- Debido a los efectos de borde, las dimensiones del parche se extienden en magnitud ΔL que puede ser calculada mediante la Ecuación 1.12:

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (1.12)$$

- Finalmente, se determina la longitud L mediante la Ecuación 1.14, considerando los efectos de borde dados por la expresión 1.13:

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (1.13)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (1.14)$$

Longitud y ancho del plano de masa

De forma general se recomienda que el plano de masa se extienda una distancia seis veces mayor a la altura del sustrato ($6h$) a partir de los bordes del parche [15] como se indica en las ecuaciones 1.14 y 1.15:

$$L_g = L + 6h \quad (1.15)$$

$$W_g = W + 6h \quad (1.16)$$

Otra sugerencia es también realizar una extensión de $\lambda/4$ desde el borde del parche para dimensionar el tamaño del plano de masa (ver Ecuación 1.16 y 1.17) [4].

$$L_g = L + 2(\lambda/4) \quad (1.17)$$

$$W_g = W + 2(\lambda/4) \quad (1.18)$$

Idealmente el plano de masa debería ser infinito, sin embargo, en la práctica es deseable un plano de masa pequeño. Hacer que el plano de masa sea más grande logra un incremento en la ganancia, pero a medida que este aumenta, la difracción cerca de los bordes tiene un menor impacto y extender el tamaño de un plano de masa que ya es grande tiene muy poco efecto sobre la ganancia [13].

1.3.3 ANTENAS CONFORMADAS

Según la definición dada por el estándar 145 del año 1993 del IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), se dice que: "Es una antena (o arreglo) que se adapta a una superficie cuya forma está determinada por consideraciones distintas a la electromagnética; por ejemplo, aerodinámica o hidrodinámica" [20].

Una antena conformada, es aquella que sigue una forma preestablecida y cuya superficie puede ser incorporada a la estructura de soporte, sin causar drag adicional. Esta propiedad las hace atractivas para ser instaladas en aviones y barcos donde la aerodinámica puede mejorarse ajustando las antenas al contorno de los vehículos. La integración de la antena a una superficie puede efectuarse también con fines estéticos haciendo que estos dispositivos sean menos perceptibles a la vista [20]. Algunos ejemplos de antenas conformadas se ilustran en la Figura 1.11.

En los últimos años, la investigación en torno al desarrollo de antenas microstrip planas ha alcanzado cierta madurez, no siendo así el caso de las antenas conformadas cuyo estudio va muy por detrás respecto a las antenas planas. Esta situación ha ido mejorando puesto que últimamente se han reportado trabajos acerca de antenas que ajustan su estructura a

superficies no planas como: esferas, cilindros y con menor frecuencia en superficies cónicas [21].

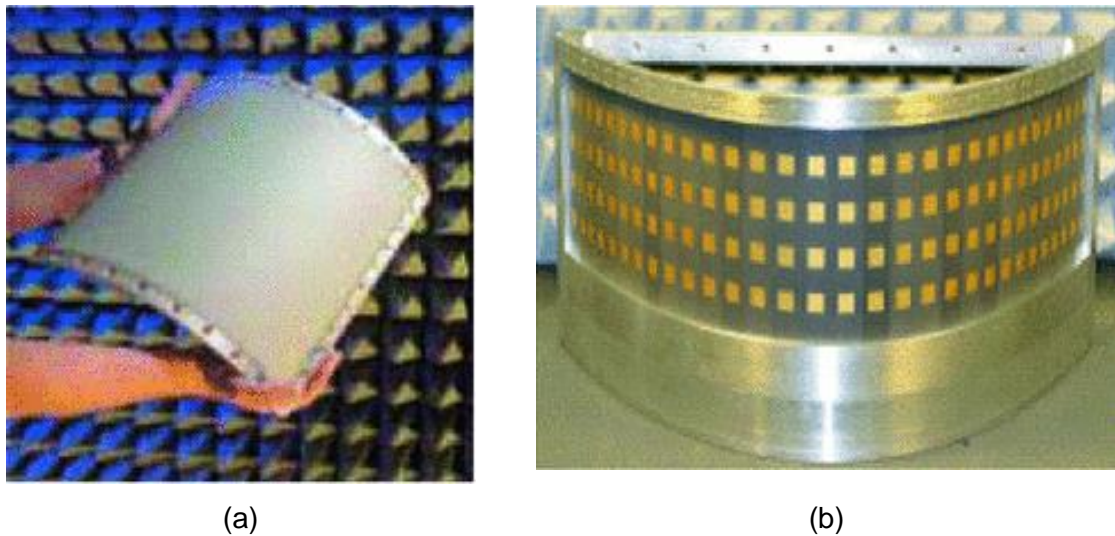


Figura 1.11. Antenas conformadas: (a) sobre superficie cilíndrica, (b) sobre superficie elíptica (arreglo).

Aunque en teoría las antenas conformadas podrían adoptar cualquier forma preestablecida, son limitados los casos de estudio para geometrías irregulares. Se ha encontrado únicamente en dos fuentes bibliográficas [20] - [21] relativamente antiguas siendo objeto de investigación únicamente geometrías convencionales como es el caso de cilindros, esferas y conos. No se aborda en demasía la conformación de antenas sobre estructuras no regulares y cómo se afectan los parámetros de las antenas en estos casos.

Existe diversidad de técnicas teóricas que podrían emplearse para analizar el comportamiento de este tipo de antenas dependiendo de la geometría, aunque en general, si la superficie es eléctricamente pequeña, se puede utilizar casi cualquier tipo de método de análisis (modelo de línea de transmisión, modelo de cavidad, método de los momentos MOM (Method of Moments), método de los elementos finitos FEM (Finite Element Method), etc). En muchos casos, el estudio de antenas conformadas puede basarse en modelos aproximados y cuando el radio de curvatura de la estructura de soporte es muy grande la antena se podría considerar una estructura plana [20]. Para el alcance de este proyecto, el estudio de estas técnicas no es indispensable ya que los diseños y análisis se llevan a cabo con simuladores electromagnéticos que emplean estos métodos.

La visión de una futura antena conformada consiste en un sistema de RF completo, que incluye divisores de potencia, red de alimentación, cambiadores de fase, etc. Todos estos componentes implementados sobre una misma estructura de soporte.

1.3.3.1 Aplicaciones

Las aplicaciones que requieren antenas conformadas son diversas, por mencionar algunas: se pueden usar en UAVs, aviones, misiles [22]-[23] u otro tipo de plataformas aéreas donde es necesario que no se alteren sus propiedades aerodinámicas. Además, se emplean para no afectar la estética de las estructuras de soporte [24]. Existen también antenas conformadas diseñadas para WBAN (Wireless Body Area Network) que se implementan en fibras derivadas de polímeros flexibles cuyo uso ha sido destinado en textiles [25]- [26]. Algunas aplicaciones de antenas conformadas para diferentes propósitos se muestran en la Figura 1.12.

A pesar de la definición dada por IEEE, se pueden encontrar también antenas conformadas cuyo diseño está optimizado para fines electromagnéticos: obteniéndose propiedades de alta cobertura como es el caso del seguimiento satelital referido en [27] o para el satélite de observación de la tierra descrito en [28].

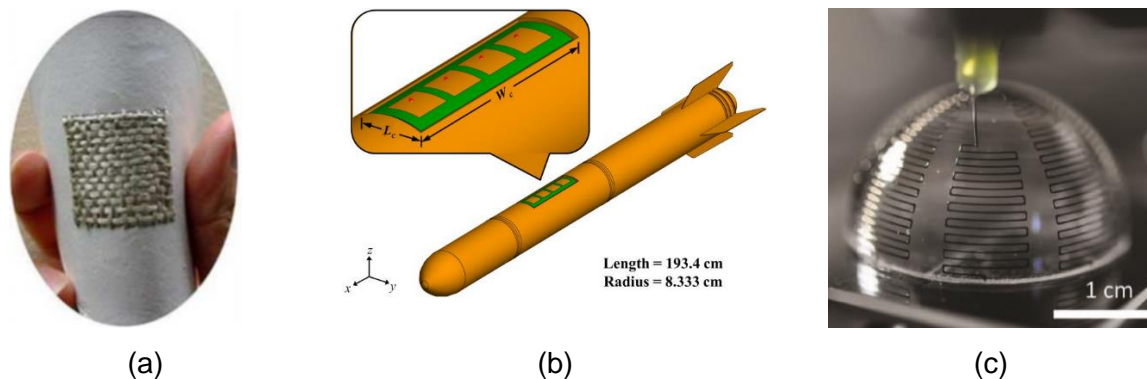


Figura 1.12. Aplicaciones: (a) Antena construida con fibras textiles [26], (b) Arreglo de antenas sobre un misil [29], (c) Antena diseñada con fines estéticos [30].

1.3.3.2 Ventajas y desventajas

Una de las propiedades más destacables de las antenas conformadas es la capacidad de variar su forma e integrarse estructuralmente al contorno de diferentes vehículos, lo que podría contribuir a la mejora de su rendimiento aerodinámico, mecánico e hidrodinámico, así como también del electromagnético dependiendo del caso de aplicación, puesto que con la adecuada combinación de parámetros (dimensiones del parche y forma de la estructura de soporte) se pueden obtener antenas conformadas que presentan un haz de radiación más amplio [31]. Otro aspecto a destacar es el bajo RCS (Radar Cross Section) respecto de las antenas microstrip planas, lo que representa una ventaja en aplicaciones donde se requiere que las antenas no sean objetivos observables por radar [3]. Así también

en algunos casos particulares, el tamaño físico de ciertas antenas conformadas podría ser más pequeño que en el caso de otro tipo de antenas (como dipolos o parches planos) [31].

Aunque se tiene la libertad para efectuar el diseño en cualquier área de la estructura de soporte y aprovechar al máximo los espacios disponibles, también se debe considerar que los prototipos pueden llegar a ser costosos y complejos de construir dependiendo del material con el que sean implementados y de la forma que adquieran las antenas. La tabla 1.4 enumera algunas de las ventajas y desventajas en el uso de antenas conformadas.

Tabla 1.4. Ventajas y desventajas de las antenas conformadas [31].

Ventajas	Desventajas
Haz de radiación amplio.	Tecnología en desarrollo.
Ganancia controlada con la forma.	Cálculos complicados en amplitud y fase.
Estructuralmente integrada. Mejora los perfiles aerodinámicos.	Mayor dificultad para controlar la pureza de polarización.
Bajo RCS (Radar Cross Section).	Dependiendo de la estructura de soporte complejo y costoso de fabricar.

1.3.3.3 Antenas conformadas para vehículos aéreos

El diseño de las antenas utilizadas en vehículos aéreos (ver Figura 1.13) difiere del de otras aplicaciones ya que debe prestarse especial atención al entorno al que está expuesta la antena y la interacción del vehículo aéreo con las características de radiación de la misma. Para este tipo de aplicaciones las antenas deben estar diseñadas para soportar tensiones estáticas y dinámicas severas [32].

El tamaño y la forma de la estructura de soporte juegan un papel importante en la determinación de las características de impedancia y diagrama de radiación de una antena. Por ejemplo, en el caso de aviones y helicópteros propulsados por hélice (ver Figura 1.13 (a)), el movimiento de las mismas puede dar lugar a la modulación de la señal radiada. Entonces, la colocación cuidadosa de la antena en el vehículo aerotransportado, permite lograr características óptimas de rendimiento eléctrico [33].

Las estructuras de los vehículos aéreos en la práctica no son compatibles con las antenas microstrip planas ya que, dependiendo del radio de curvatura de las estructuras de soporte, será más fácil o difícil el montaje de las mismas. Así, por ejemplo, la colocación de las antenas planas en plataformas aéreas con radio de curvatura pequeño, como el de los misiles, resulta extremadamente difícil [32]. Aunque es posible efectuar el montaje de

antenas planas, la aerodinámica de estas estructuras se ve afectada en mayor medida, por ello el empleo de antenas conformadas resulta una buena y práctica solución a este problema debido a su perfil delgado, peso ligero y bajo costo [33].

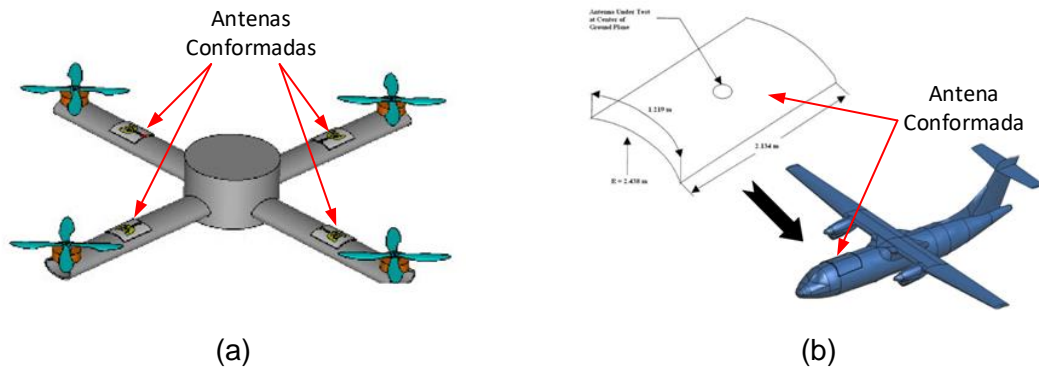


Figura 1.13. Antenas conformadas en UAVs de: (a) Ala rotatoria [34], (b) Ala fija [31].

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el proceso de diseño de dos antenas conformadas en la banda de 5.8 GHz para un UAV utilizado para monitoreo agrícola. Para tal efecto, se toma como referencia una antena parche cuadrada con alimentación coaxial cuya forma ha sido modificada para ajustarse al contorno del fuselaje del UAV.

Las antenas son modeladas y simuladas en el software de simulación electromagnética HFSS¹ (High Frequency Structure Simulator), el cual permitirá observar cómo se afectan sus parámetros (dimensiones, ancho de banda y diagrama de radiación) al ubicar las antenas en dos secciones con diferente curvatura en el armazón del UAV.

2.1 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

En función de las necesidades del proyecto, se definen las principales características que deben cumplir los prototipos. En primer lugar, se determinó el modelo de UAV sobre el cual se va a trabajar verificando el espacio disponible para efectuar el montaje de las antenas. En segundo lugar, se analizan las características de operación como frecuencia y ancho de banda. Adicionalmente, se investiga acerca de materiales que sean integrables a la estructura de soporte y que pueden ser empleados como sustrato dieléctrico.

2.1.1 GENERALIDADES DEL UAV SKYWALKER X8

El Skywalker X8 desarrollado por la empresa Skywalker Technology (HK) Co. Ltd es el UAV seleccionado por la Facultad de Ingeniería Mecánica para efectuar las labores de monitoreo (ver Figura 2.1), de modo que en el contorno de esta plataforma se ubicarán las antenas. Por este motivo resulta importante conocer algunas de las características de la aeronave, las cuales se presentan de forma resumida en la Tabla 2.1.

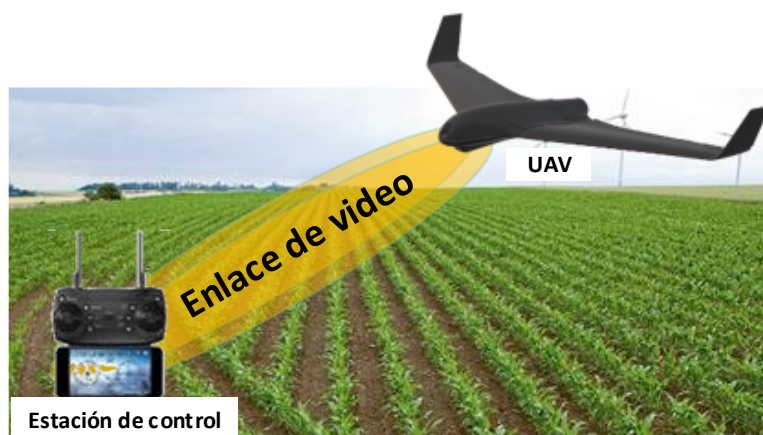


Figura 2.1. Enlace de transmisión de video del Skywalker X8 (para monitoreo agrícola).

¹ HFSS licencia temporal cortesía del Grupo de Radiación Electromagnética de la UPV.

Tabla 2.1. Especificaciones Técnicas Skywalker X8 [35].

Parámetro	Valor
Tipo	Ala fija
Material	Poliestireno Expandido
Envergadura	2120 [mm]
Superficie alar	80 [dm ²]
Peso Seco	880 [g]
Carga útil válida	1000 a 2000 [g]
Peso Máximo	3500 [g]
Tipo de Propulsión	Batería eléctrica

Este UAV presenta algunas ventajas como su bajo peso, una autonomía de vuelo de alrededor de 45 minutos, alcanzando un desplazamiento lineal de hasta 25 Km. Posee una cabina la cual puede albergar los dispositivos de transmisión, cámaras y otros componentes electrónicos [35]. La información proporcionada por la Tabla 2.1 muestra que el peso es un factor importante, por ello el elegir componentes que no excedan su capacidad de carga es de suma importancia, debido a que ello favorece también a un adecuado consumo energético.

2.1.1.1 Ubicación de las antenas

Considerando la geometría del espacio disponible y el tipo de diagrama que se espera obtener, se sugiere colocar las antenas en la superficie inferior de la aeronave (área de 509,11 cm² aproximadamente) de modo que el diagrama de radiación se proyecte hacia la estación de control localizada en tierra al momento de que el UAV se encuentre en vuelo tal y como se muestra en la Figura 2.1 y así garantizar el óptimo funcionamiento del enlace de transmisión de video a 5,8 GHz.

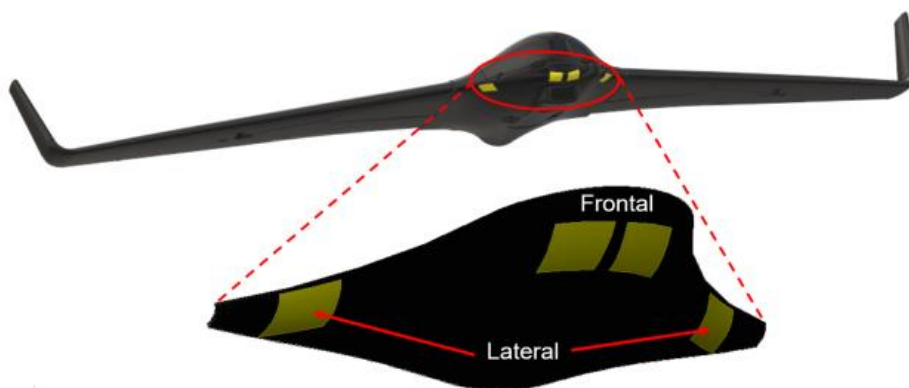


Figura 2.2. Posición de las antenas conformadas sobre el UAV Skywalker X8.

En la Figura 2.2, se visualiza el espacio considerado para la ubicación de las antenas, donde se plantean dos alternativas: la primera en la parte frontal (nariz del UAV) y la segunda en la parte lateral cercana a las alas de la plataforma aérea.

2.1.2 FRECUENCIA DE OPERACIÓN

Se ha previsto que la antena diseñada será utilizada para transmisión de video analógico en la banda de 5,8 GHz en la cual opera el módulo transmisor disponible (Hyperion TS832) y del que se proporciona una breve descripción en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas del módulo transmisor Hyperion TS832 [36].

Parámetro	Valor
Potencia de Alimentación	600 mW
Formato de Video	NTSC/PAL
Potencia de Salida	27,5 dBm
Rango de Operación	(5645 – 5945) MHz
Ancho de banda de Operación	300 MHz
Número de canales de transmisión	32

2.1.3 ANCHO DE BANDA

El ancho de banda puede ser descrito en forma porcentual respecto de la frecuencia central de la banda f_r [37], mediante la siguiente expresión:

$$\%AB = \frac{f_H - f_L}{f_r} \times 100\% \quad (2.1)$$

Donde: f_H es la frecuencia más alta de la banda y f_L es la frecuencia más baja de la banda.

En base a la información proporcionada en la ficha técnica del módulo transmisor (Tabla 2.2) y empleando la Ecuación 2.1, se determina que es necesario cubrir un ancho de banda de 300 MHz equivalente al 5,17% en un rango comprendido entre 5645 y 5945 MHz, tal y como se muestra en el siguiente cálculo:

$$\%AB = \frac{(5945 - 5645)MHz}{5800 MHz} \times 100\% = 5,17\%$$

Otra expresión que permite evaluar el ancho de banda en función de las dimensiones del parche y de los parámetros del sustrato [6] está dada por la Ecuación 2.2:

$$\%AB = \frac{A \times h}{\lambda_0 \sqrt{\epsilon_r}} \times \sqrt{\frac{W}{L}} \quad (2.2)$$

Donde: W y L representan el ancho y el largo del parche respectivamente, h es la altura del sustrato, ϵ_r es la constante dieléctrica, λ_0 es la longitud de onda en el espacio libre y A es una constante igual a 180, si se cumple que: $\frac{h}{\lambda_0 \sqrt{\epsilon_r}} \leq 0,045$ [6].

Considerando que se trabajará con un parche cuadrado tanto el ancho como el largo del parche son equivalentes ($W=L$), entonces la Ecuación 2.2 se reduce a:

$$\%AB = \frac{A \times h}{\lambda_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.3)$$

En la Ecuación 2.3 se evidencia que el ancho de banda es directamente proporcional al grosor del sustrato h e inversamente proporcional a la constante dieléctrica ϵ_r . De modo que para conseguir un ancho de banda más amplio se podría seleccionar un sustrato grueso y con una constante dieléctrica baja, o viceversa [6].

En este caso se ha seleccionado un sustrato con permitividad media ($\epsilon_r = 2,7$) y conociendo que la frecuencia de operación es 5,8 GHz, la Ecuación 2.3 puede ser reestructurada a modo de una desigualdad que permita encontrar un valor de h , el cual cumpla con el ancho de banda requerido (5,17%), así se tiene que:

$$AB \geq 5,17\%$$

$$\frac{A \times h}{\lambda_0 \sqrt{\epsilon_r}} \geq 5,17\%$$

$$h \geq \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon_r} \times 5,17\%}{A}$$

Finalmente, reemplazando los datos conocidos: $\lambda_0 = \frac{c}{f_r} = \frac{3 \times 10^8}{5,8 \times 10^9} = 51,72 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 2,7$ y $A = 180$ en la expresión anterior, se tiene que:

$$h \geq \frac{(51,72 \text{ mm}) \times \sqrt{2,7} \times 5,17\%}{180}$$

$$h \geq 2,44 \text{ mm}$$

En función del resultado obtenido en la expresión anterior y a fin de otorgar un margen que permita superar el ancho de banda planteado, se ha seleccionado $h = 3 \text{ mm}$ para efectuar el diseño de las antenas.

2.1.4 ELECCIÓN DEL SUSTRATO

Parte fundamental en el diseño de antenas parche es la elección del sustrato dieléctrico, ya que sus propiedades (constante dieléctrica y pérdidas intrínsecas) influyen en el dimensionamiento de la antena así por ejemplo, un incremento en la constante dieléctrica producirá una reducción en el tamaño del parche [3].

Examinando la literatura disponible en cuanto a la implementación de antenas conformadas, se observa que existe una amplia gama de materiales que presentan características de maleabilidad y que pueden ser utilizados como sustrato, algunos de ellos se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Especificaciones de algunos dieléctricos usados en antenas conformadas.

Material	ϵ_r	$\tan \delta$
ROGERS R/flex 3000 LCP	2,9	0,002
Polímeros Cerámicos	12,1	0,004
PLA	2,7	0,008
ABS	2,74	0,0054

Para la implementación de los prototipos se analizan dos opciones. La primera es emplear sustratos flexibles como: el ROGERS R/flex 3000 LCP[38], polímeros como la polimida [26], PEEK [39], películas de poliéster o grafeno transparente [40] (ver Figura 2.3 (a)), sin embargo hay que considerar que este tipo de sustratos tienen algunas desventajas puesto que son más caros que las placas de circuito impreso rígidas y presentan mayor riesgo de daños durante la manipulación o el uso [41]. Una segunda alternativa es emplear sustratos modelables de origen plástico como el PLA (ácido poliláctico) [42] y ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) [43] que son comúnmente utilizados en impresión 3D (ver Figura 2.3 (b)) los cuales presentan características de mayor resistencia a la manipulación respecto de los sustratos flexibles.

Las especificaciones de los sustratos dieléctricos, como su espesor generalmente son definidos por los fabricantes y, por lo tanto, los diseños de antenas parche están limitados por este factor. La implementación de prototipos en materiales dieléctricos utilizados en impresión 3D permite personalizar el sustrato en cuanto a las dimensiones deseadas, lo que puede resultar muy útil en aplicaciones de antenas conformadas. Además, la impresión 3D permite crear objetos con múltiples materiales en un solo proceso, lo que significa que no se requiere ensamblaje. Debido a las bondades descritas y evaluando el ambiente al

cual estará expuesto el dispositivo, la disponibilidad, la facilidad de fabricación y el costo; se ha seleccionado el PLA (ver ANEXO B) como el material dieléctrico a utilizarse para la simulación y construcción de los prototipos.

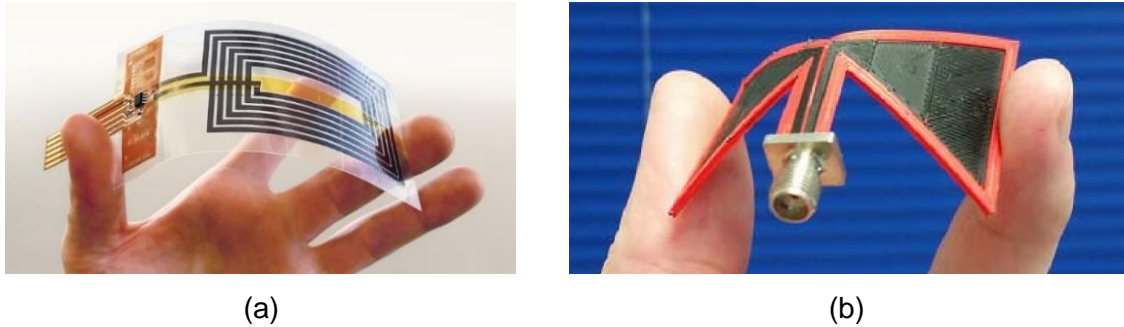


Figura 2.3. Antenas conformadas fabricadas en: (a) Grafeno flexible [40], (b) Material de impresión 3D (ABS)[44].

2.2 DISEÑO DEL ELEMENTO BASE

Por facilidad de diseño, se ha definido un parche cuadrado alimentado por sonda coaxial que se muestra en la Figura 2.4, como el elemento base que dará lugar a la creación de las antenas conformadas. Para efectuar el cálculo de las dimensiones de este elemento se ha tomado como referencia el modelo de línea de transmisión (descrito en la Sección 1.3.2.7) considerando las especificaciones proporcionadas en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Parámetros considerados para el diseño del elemento base.

Parámetro	Valor
f_r	5,8 GHz
ϵ_r	2,7
h	3 mm

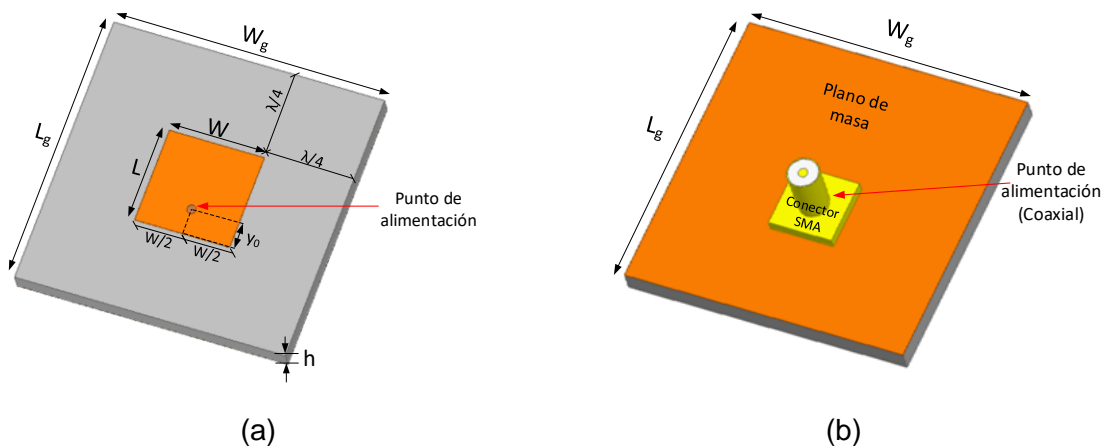


Figura 2.4. Dimensiones del elemento base, vistas: (a) Superior, (b) Posterior.

También debe tomarse en cuenta que se utilizará un conector tipo SMA (ver ANEXO C) para alimentar a la antena; las especificaciones del mismo se incluyen en la Tabla 2.5 y sus dimensiones físicas (en milímetros) se detallan en la Figura 2.5.

Tabla 2.5. Características del conector SMA.

Parámetro	Descripción
Impedancia	50Ω
Frecuencia	0-18 GHz
VSWR	1.04
Pérdidas de inserción	0.05 dB
Conductor interno	Cobre de Berilio
Dieléctrico	Teflón ($\epsilon_r = 2,1$)

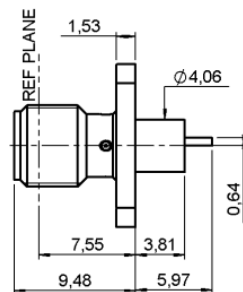


Figura 2.5. Dimensiones del conector SMA.

Dimensiones del parche (L y W)

A continuación, se presentan los cálculos efectuados para determinar las dimensiones del parche que se muestra en la Figura 2.4.

- En primer lugar, se calcula el ancho del parche, reemplazando la frecuencia de operación y permitividad del sustrato $\epsilon_r = 2,7$ en la Ecuación 1.9:

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2(5,8 \times 10^9)} \sqrt{\frac{2}{2,7 + 1}} = \mathbf{19,014 \text{ mm}}$$

- El siguiente parámetro a calcularse es la constante dieléctrica efectiva mediante la sustitución de los valores de $\epsilon_r = 2,7$, $h = 3 \text{ mm}$ y $W = 19,01 \text{ mm}$ en la Ecuación 1.10:

$$\epsilon_{reff} = \frac{2,7 + 1}{2} + \frac{2,7 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{3 \text{ mm}}{19,01 \text{ mm}} \right]^{-1/2} = \mathbf{2,35}$$

- Luego, se obtiene la longitud efectiva de la antena reemplazando los valores de longitud de onda del dieléctrico $\lambda_d = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{reff}}$ en la Ecuación 1.11.

$$L_{eff} = 0,5 \times \lambda_d = 0,5 \times \frac{51,72 \text{ mm}}{\sqrt{2,35}} = \mathbf{16,87 \text{ mm}}$$

- Sustituyendo los valores de W y ϵ_{reff} en la Ecuación 1.12 se tiene que la variación de la longitud del parche (ΔL) es:

$$\frac{\Delta L}{3 \text{ mm}} = 0,412 \frac{(2,35 + 0,3) \left(\frac{19,01 \text{ mm}}{3 \text{ mm}} + 0,264 \right)}{(2,35 - 0,258) \left(\frac{19,01 \text{ mm}}{3 \text{ mm}} + 0,8 \right)} \rightarrow \Delta L = \mathbf{1,448 \text{ mm}}$$

- Finalmente, se calcula la longitud L del parche reemplazando L_{eff} y ΔL en la Ecuación 1.13, así:

$$16,87 \text{ mm} = L + 2(1,448) \rightarrow \mathbf{L = 13,97 \text{ mm}}$$

Por facilidad en el modelado y parametrización se ha decidido trabajar con un parche cuadrado, es decir $W = L$. De acuerdo a la teoría de antenas revisada, se determina que el valor de L afecta directamente a la frecuencia de operación de la antena, mientras que W tiene influencia sobre su nivel de adaptación para una determinada impedancia de entrada. Por este motivo L mantendrá su valor calculado y W se reajusta a este valor, así tenemos que: $W = L = \mathbf{13,97 \text{ mm}}$.

Dimensiones del plano de masa (L_g y W_g)

En este caso se ha considerado que la longitud del plano de masa está dada por una extensión de $\lambda/4$ a partir del borde del parche (Ecuación 1.17), entonces:

$$L_g = 13,97 \text{ mm} + 2 \left(\frac{51,72 \text{ mm}}{4} \right) = \mathbf{39,83 \text{ mm}}$$

Tomando en cuenta que se trabaja con un parche cuadrado, las dimensiones W_g y L_g del plano de masa también serán equivalentes, así se tiene que: $W_g = L_g = \mathbf{39,83 \text{ mm}}$.

Posición del punto de alimentación (y_0)

El punto de alimentación de la antena se localizará justo a la mitad de W y a una distancia y_0 a lo largo de la dirección de L , tal y como se muestra en la Figura 2.4.

Para determinar el valor de y_0 se han efectuado los siguientes cálculos:

- En primer lugar, se determina la impedancia de la antena z_a , reemplazando los datos conocidos $W = L = 13,97 \text{ mm}$ y $\varepsilon_r = 2,7$ en la Ecuación 1.5:

$$z_a = 90 \frac{(\varepsilon_r)^2}{\varepsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W} \right) = 90 \frac{(2,7)^2}{2,7 - 1} \left(\frac{13,97 \text{ mm}}{13,97 \text{ mm}} \right) = \mathbf{385,94 \Omega}$$

- Luego, se calcula el valor de $R_{in}(y = 0)$ considerando una $z_0 = 50 \Omega$ (correspondiente a la impedancia del conector SMA utilizado), en la Ecuación 1.4.

$$R_{in}(y = 0) = \sqrt{z_0 * z_a} = \sqrt{50 * 385,94} = \mathbf{138,91 \Omega}$$

- Por último, se determina y_0 reemplazando valores de $R_{in}(y = 0)$, $R_{in}(y = y_0) = 50 \Omega$ y L , en la Ecuación 1.3.

$$50 \Omega = 138,81 \cos^2 \left(\frac{\pi}{13,97} y_0 \right)$$

$$\rightarrow y_0 = \frac{13,97}{\pi} \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{50}{138,97}} \right) = \mathbf{4,12 \text{ mm}}$$

2.3 SIMULACIÓN

Para validar el comportamiento de las antenas presentadas, se ha utilizado el software HFSS, el cual es un simulador electromagnético de onda completa que permite el estudio electromagnético de modelos tridimensionales empleando el método de elementos finitos (FEM) y mallas adaptativas [45]. A partir de los modelos creados, el software permite obtener: la frecuencia de resonancia, parámetros S, ganancia y campos presentes en un sólido [46].

En las siguientes secciones, se presentará el procedimiento de simulación de una antena parche cuadrada, la cual dará lugar a la creación de las antenas conformadas que se ubicarán en el fuselaje del UAV.

2.3.1 SIMULACIÓN DEL ELEMENTO BASE

A continuación se describe el proceso de simulación de una antena parche cuadrada con alimentación coaxial en HFSS:

- Utilizando cuerpos volumétricos predefinidos, se crean: el plano de masa, el sustrato y el parche, especificando las dimensiones calculadas en la Sección 2.2. Se modela también el tipo de alimentación (coaxial) considerando las dimensiones y características del conector SMA utilizado (ver Figura 2.5). El modelo tridimensional

resultante se presenta en Figura 2.6, el cual incluye un límite o frontera de radiación que contiene todos los elementos de la antenna.

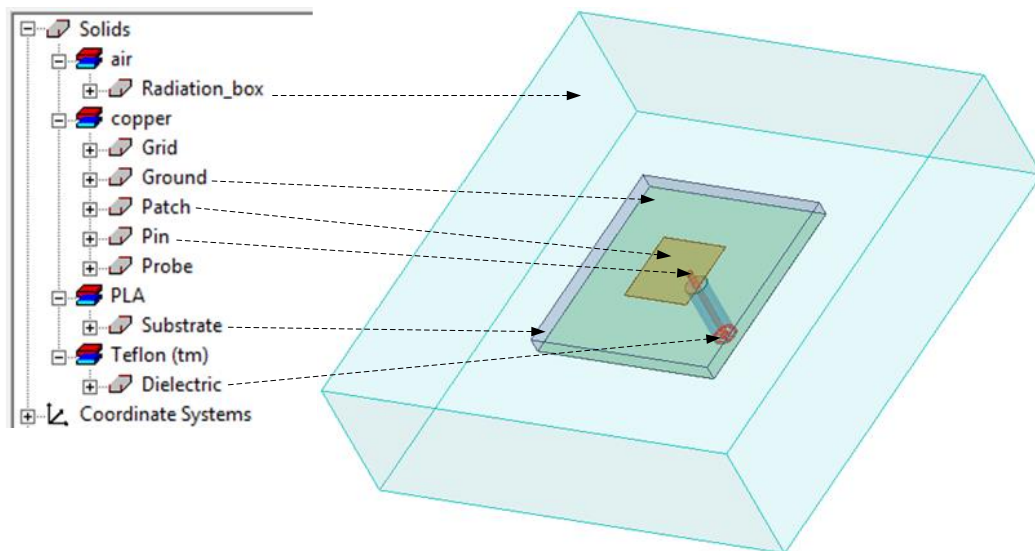


Figura 2.6. Modelado del parche cuadrado en HFSS (asignación de materiales).

- Luego, se asignan materiales a todos los componentes de la antenna, configurando: PLA como sustrato; cobre para el plano de masa y el parche; teflón para el dieléctrico que separa los conductores del conector SMA. La Figura 2.6 muestra la antenna modelada y la forma en que el software agrupa los componentes que han sido asignados con el mismo material.
- Finalmente, se configuran: el puerto de excitación, opciones de mallado, así como las frecuencias de barrido. Se ejecuta la simulación y se generan los reportes correspondientes a las pérdidas de retorno (S_{11}) y diagrama de radiación que se visualizan en la Figura 2.7 (a) y (b) respectivamente.

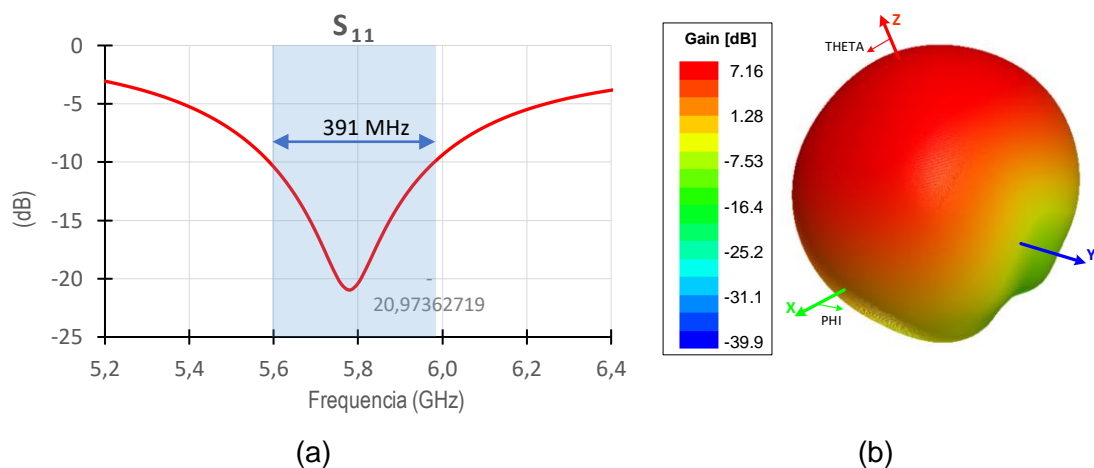


Figura 2.7. Parche plano: (a) Parámetro S_{11} , (b) Diagrama de radiación 3D.

La Figura 2.7(a) permite visualizar que la antena presenta un nivel de adaptación menor a -10 dB en el rango que va de 5,59 y 5,98 GHz, es decir, se ha logrado obtener un ancho de banda del 6,76%. La frecuencia de resonancia se localiza a 5,78 GHz, donde el parámetro S_{11} tiene un valor de -20,95 dB. Por otro lado, en el diagrama de la Figura 2.7(b) se observa que se tiene una ganancia de 7,16 dB.

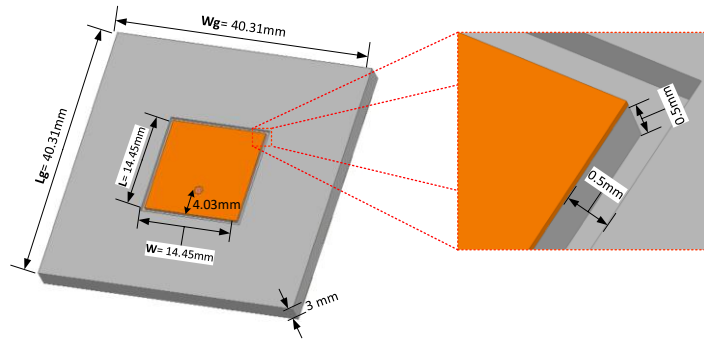


Figura 2.8. Dimensiones de la antena optimizada y del surco que limita la zona de ubicación del parche en el sustrato.

Debido a que se ha pensado en realizar la implementación de las antenas utilizando materiales de impresión 3D, es necesario hacer algunas adecuaciones al modelo simulado previamente, para emular las condiciones de fabricación en la realidad. Considerando que se utilizarán láminas de cobre adhesivo para crear el plano de masa y el parche, se requiere crear guías en el sustrato que indiquen la posición del parche en el mismo. Por este motivo, en la simulación se introduce un surco en el dieléctrico con un ancho y profundidad de 0,5 mm (correspondiente al mínimo valor con el cual la impresora 3D puede imprimir a detalle²) el cual delimitará la zona en donde debe ubicarse al parche (ver figura 2.8).

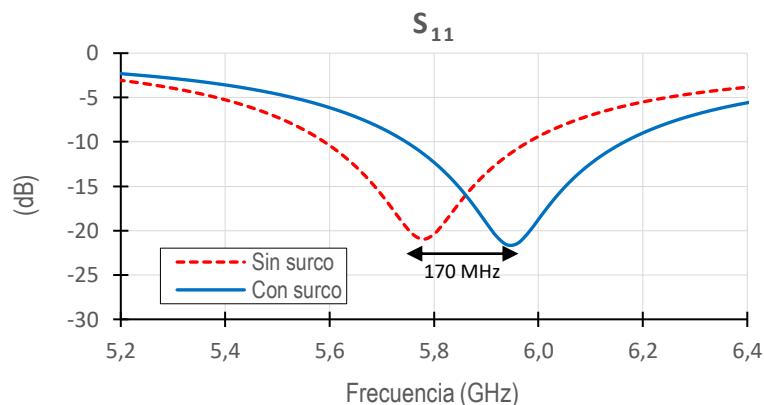


Figura 2.9. Desplazamiento de la frecuencia debido a la introducción de surco.

² Información proporcionada por el grupo ATA (Aerodynamics and Thermofluids Applied) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional acerca de la impresora 3D Delta.

Sin embargo, el incluir el surco en el sustrato tiene ciertas repercusiones en el comportamiento de la antena. Como se puede apreciar en la Figura 2.9, la frecuencia de trabajo sufre un corrimiento de aproximadamente 170 MHz, desplazando la banda fuera del rango de interés. Este efecto puede justificarse considerando la pérdida de las dimensiones efectivas del parche, lo cual hace que este luzca más pequeño y como se ha mostrado en el marco teórico, al reducirse las dimensiones (específicamente la longitud) se produce un incremento de la frecuencia de operación. Para corregir esta eventualidad, se han optimizado las dimensiones y la posición del punto de alimentación hasta sintonizar a la antena nuevamente a 5.8 GHz, dando lugar a los resultados que se muestra en la Figura 2.10.

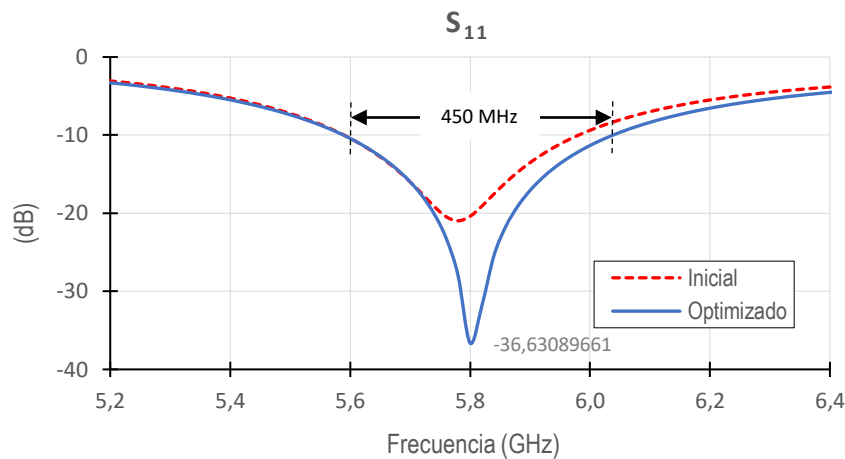


Figura 2.10. Parámetro S_{11} del modelo inicial y optimizado (parche plano).

La Figura 2.10, permite notar que luego de la optimización de las dimensiones del parche y la adecuada ubicación del punto de alimentación se ha conseguido cubrir un ancho de banda del 7,76% en un intervalo que va de 5,58 a 6,03 GHz y que a la frecuencia deseada (5.8 GHz) se tienen pérdidas de retorno de -36,63 dB.

La Tabla 2.6 contrasta las dimensiones obtenidas para el modelo inicial y el optimizado.

Tabla 2.6. Dimensiones iniciales y optimizadas (parche plano).

Variable	Dimensiones iniciales (mm)	Dimensiones optimizadas (mm)
$W_g = L_g$	39,83	40,31
$W = L$	13,97	14,45
h	3	3
y_0	4,12	4,03

A partir del modelo optimizado (ver Figura 2.8) se extrae la información correspondiente a los diagramas de radiación que han sido representados en la Figura 2.11 (a), donde se observa que el ancho del haz en -3dB es de $82,57^\circ$ y $66,89^\circ$ para los planos XZ y ZY respectivamente. Aunque el diagrama tridimensional conserva la forma observada en el diagrama de la Figura 2.7 (b), hay que rescatar que existe una ligera diferencia respecto del obtenido en la Figura 2.11 (b) donde se alcanza una ganancia de $7,31\text{ dB}$ y una directividad de $7,57\text{ dB}$ y se debe principalmente a que con el modelo inicial el parámetro S_{11} llega hasta -20 dB aproximadamente, mientras que en el caso de la antena optimizada el valor de S_{11} cae hasta un valor próximo a -37dB (ver Figura 2.10) logrando una mejor adaptación y por tanto, un mayor porcentaje de la potencia es radiada.

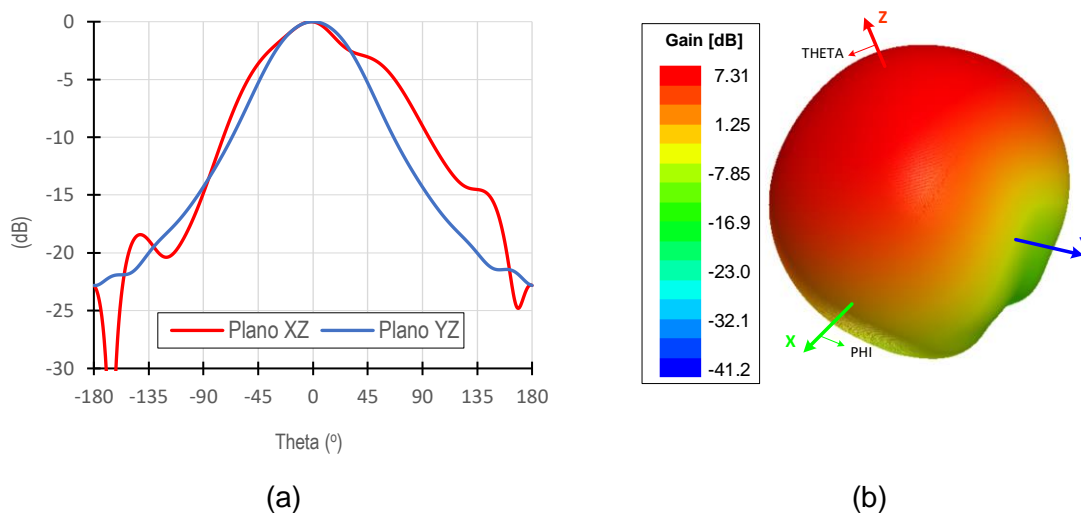


Figura 2.11. Diagrama de radiación: (a) Planos XY y ZY (b) Tridimensional.

2.3.1.1 Influencia de la variación de las dimensiones de la antena sobre sus parámetros de funcionamiento.

La siguiente sección tiene por objeto determinar la forma en que se ven afectados parámetros como: la frecuencia de resonancia, ancho de banda, impedancia de entrada, ganancia y diagrama de radiación característicos de una antena tipo parche, al ir modificando sus dimensiones.

Para efectuar este análisis, se realizarán varias simulaciones del modelo que se presenta en la Figura 2.4, considerando diferentes valores de longitud y ancho, tanto para el parche como para el plano de masa, mismas que han sido recopilados en el ANEXO A. Así también se realiza ajustes en torno a la ubicación del punto de alimentación y en función de los resultados obtenidos se presenta la siguiente tabla, en la cual se han marcado con una X los parámetros que son afectados al modificar las dimensiones de la antena.

Tabla 2.7. Variación de los parámetros de un parche cuadrado en función de la variación de sus dimensiones

		Fórmula	Parámetros de funcionamiento de una antena					
			Frecuencia de Resonancia	Ancho de banda	Impedancia de entrada	Diagrama de radiación	Ganancia	Parámetro S_{11}
Dimensiones de la antena	L	$L = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_{reff}}}$	×	×	×	×	×	×
	W	$W = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$		×	×		×	×
	L_g	$L_g = L + 2(\lambda_0/4)$					×	×
	W_g	$W_g = W + 2(\lambda_0/4)$				×	×	×
	y₀	$y_0 = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{R_{in}(y=y_0)}{R_{in}(y=0)}} \right)$	×	×	×		×	×
	h	$h = \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon_r}}{150} \times AB \times \sqrt{\frac{L}{W}}$	×	×	×	×	×	×

Gracias a los resultados que se detallan en la Tabla 2.7, que se basan en las simulaciones presentadas en el ANEXO A, es posible emitir las siguientes reflexiones:

- Al variar la longitud (L) del parche se produce un desplazamiento en la frecuencia de resonancia determinada por la siguiente relación: a un mayor valor de L menor será la frecuencia de resonancia y viceversa. Al desplazarse la frecuencia, cambian también el ancho de banda y cómo una consecuencia indirecta, se produce variación en la adaptación de la antena y producto de ello, son los cambios en la forma del diagrama de radiación, ganancia e impedancia.
- El ancho del parche (W) ejerce directa influencia sobre la adaptación de la antena, por este motivo los parámetros afectados son la impedancia y ancho de banda. Así también se observan cambios en la ganancia.
- Al variar la longitud del plano de masa (L_g) se observan cambios en la impedancia, sin embargo, estas variaciones son mínimas y por este motivo no han sido consideradas en la Tabla 2.7. Sin embargo, un parámetro sobre el cual se notan variaciones más significativas es en el caso de la ganancia.
- Por otro lado, al modificar el ancho del plano de masa (W_g), podemos notar que no se producen cambios drásticos sobre los parámetros de funcionamiento en antenas de este estilo, donde predomina la polarización lineal y por este motivo no se han registrado variaciones en la Tabla 2.7. También podemos destacar, que se observa una

mejora en torno a los niveles de adaptación, mismos que se encuentran determinados por el parámetro S_{11} .

- Además, al recorrer la posición del punto de alimentación, definido por la distancia y_0 , no se produce un cambio demasiado radical en torno a la frecuencia de resonancia. Considerando que esta dimensión permite localizar el punto donde la antena tiene una impedancia de 50Ω , ejerce directa influencia sobre los niveles de adaptación (parámetro S_{11}) y cómo consecuencia de ello se producen cambios en el ancho de banda y ganancia.
- Finalmente, al cambiar la altura (h) del sustrato, la frecuencia de resonancia sufre un ligero corrimiento, sin embargo, el cambio más representativo se da en el ancho de banda que está comandado por el siguiente criterio: a mayor h , se tiene un mayor ancho de banda y viceversa. También puede notarse que, debido al desplazamiento en frecuencia, se observa una desadaptación, misma que genera cambios en la impedancia y ganancia de la antena.

2.3.2 SIMULACIÓN DE LAS ANTENAS CONFORMADAS

El proceso de simulación de las antenas conformadas guarda cierta similitud con el de las antenas planas considerando que deben crearse los mismos componentes, sin embargo, en este caso no es posible utilizar estructuras predefinidas y dado que se trabajará sobre una geometría en particular, es indispensable disponer de un modelo tridimensional del objeto sobre el cual se desea efectuar la conformación de la antena en un formato compatible con el software.

2.3.2.1 Antena Frontal

A continuación, se explica la forma en que se efectuó la conformación de las estructuras planas de acuerdo al perfil del UAV, utilizando como ejemplo la antena ubicada en la parte delantera del fuselaje.

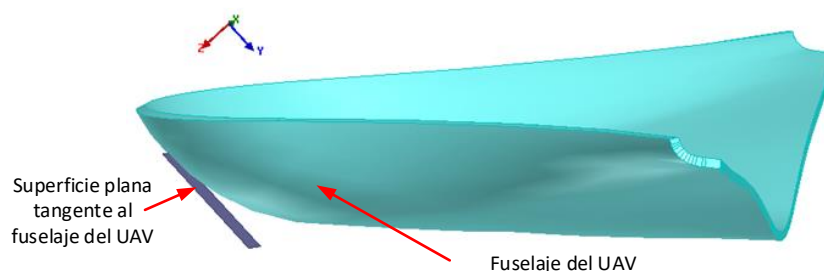


Figura 2.12. Plano tangente a superficie frontal de UAV.

- En primer lugar, se importa el modelo correspondiente a la región del fuselaje destinado a la ubicación de las antenas. Luego se traza una superficie cuadrada con dimensiones iguales a las del plano de masa de la antena plana, tal que esta superficie sea tangente al área del fuselaje en donde se desea colocar la antena (parte frontal) como se muestra en la Figura 2.12.
- A continuación, se seleccionan la superficie plana creada y el fuselaje importado. Después, se ejecuta la opción “Wrap Sheet” y la superficie plana tomará la forma del contorno del fuselaje, tal y como se visualiza en la Figura 2.13. Por último, se asigna un espesor a la superficie creada y así se generará el plano de masa para la antena conformada.

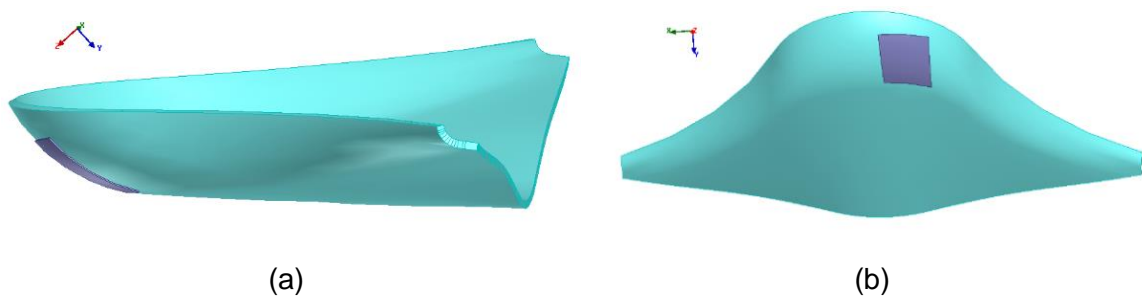


Figura 2.13. Plano de masa conformado visto desde: a) plano YZ, b) plano XY.

- Para la creación de las demás estructuras, se sigue un proceso análogo, es decir a partir de un plano conformado a la superficie del UAV se crean el sustrato y el parche, se asigna un espesor a cada uno de ellos, y se efectúan las perforaciones necesarias para insertar el conector coaxial. En la Figura 2.14 se muestra la estructura de la antena conformada resultante.

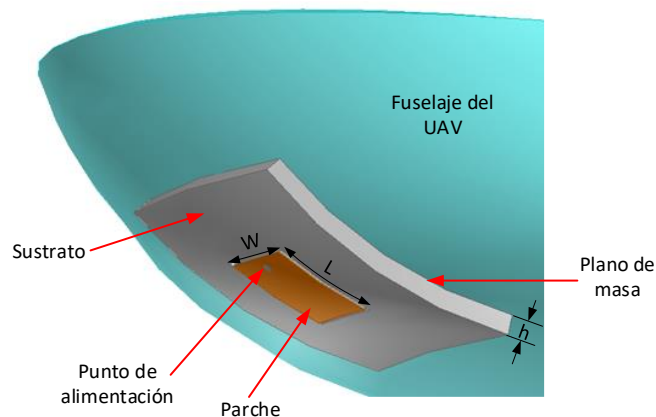


Figura 2.14. Antena conformada para la superficie delantera del fuselaje del UAV.

Previo a la simulación, debe tomarse en cuenta que el mecanismo empleado por el software para efectuar la conformación de la antena consiste en el uso de superficies

que envuelven a la estructura de soporte. Sin embargo, al asignar un espesor a estas superficies, se generan ciertas distorsiones en las dimensiones que se muestran en el modelo tridimensional.

La Figura 2.15 explica mediante un ejemplo, la razón de la discrepancia entre las dimensiones de un parche plano y las de un parche conformado sobre una superficie curva. En este caso podemos notar que el segmento L_{g1} es menor a L_{g2} , puesto que al asignar el espesor al sustrato se produce un incremento de 3mm en el radio de curvatura haciendo que L_{g2} sea un arco de mayor longitud, situación que ocasiona el aumento en el área de la cara superior del sustrato, mientras que la superficie inferior no sufre distorsiones.

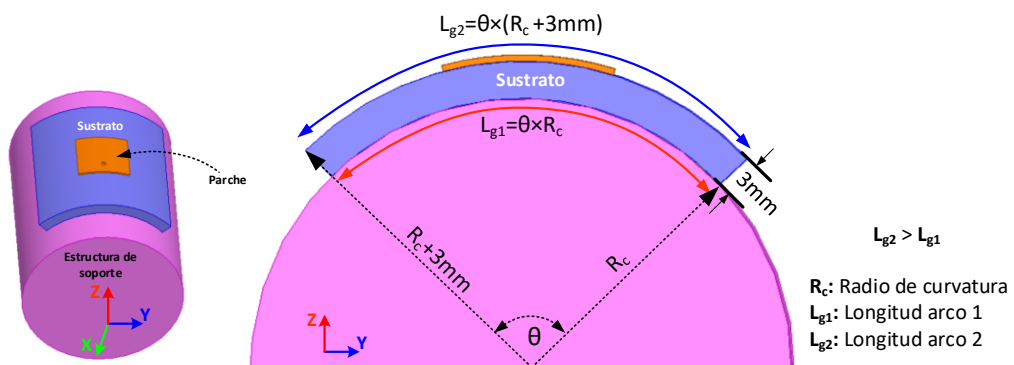


Figura 2.15. Antena conformada sobre superficie cilíndrica.

Ahora haciendo una analogía con nuestra antena (ver Figura 2.14) podemos decir que el plano de masa conserva las dimensiones obtenidas para el parche plano, mientras que la cara superior del sustrato y el parche han sufrido una expansión debido al incremento de los 3mm en el radio de curvatura.

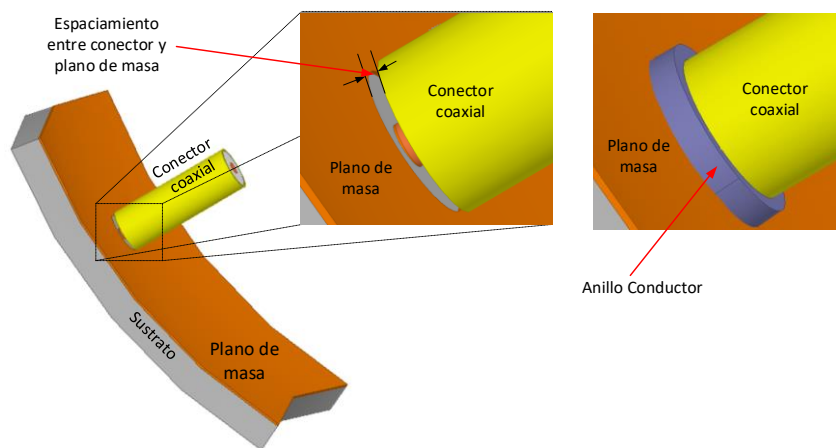


Figura 2.16. Espaciamento entre el conector y el plano de masa.

Otro aspecto a considerar es que, debido a la curvatura de la antena existe un espaciado entre el conductor externo del conector y el plano de masa, es decir ambas estructuras no se encuentran en contacto, como se puede apreciar en la Figura 2.16. Por este motivo, se crea una estructura adicional, denominada “anillo”, la cual se encarga de establecer este contacto.

- Una vez creados todos los componentes de la antena, se asignan los materiales de cada uno de ellos. Después, se definen: el límite de radiación, el puerto de excitación y se configuran los parámetros de mallado.
- Finalmente, se ejecuta la simulación y se generan los reportes correspondientes al parámetro S_{11} y diagrama de radiación, que se muestran en la Figura 2.17(a) y (b) respectivamente.

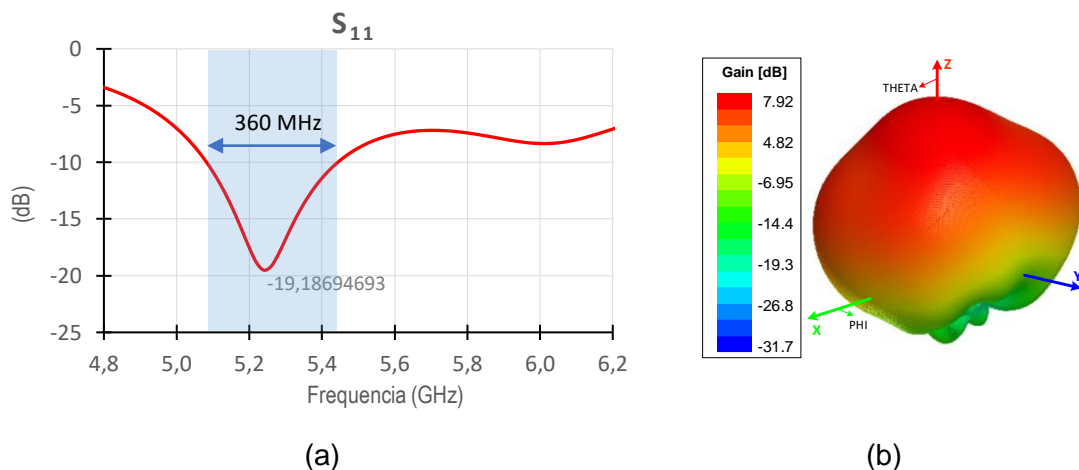


Figura 2.17. Antena frontal: (a) Parámetro S_{11} , (b) Diagrama de radiación 3D.

Como se puede apreciar en la Figura 2.17(a), la antena simulada exhibe un ancho de banda del 6,86% en un rango comprendido entre 5,08 y 5,44 GHz. En este intervalo, las pérdidas de retorno presentan su mínimo a 5,25 GHz con un valor de -19,19 dB. En lo que respecta al diagrama de radiación, en la Figura 2.17(b) se puede notar que la ganancia ha alcanzado un valor de 7,92 dB.

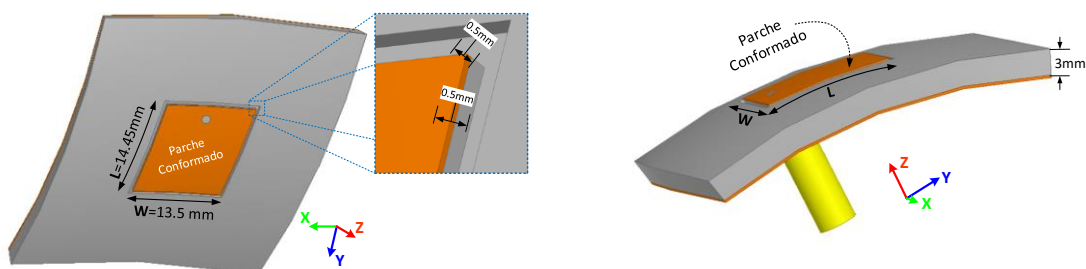


Figura 2.18. Dimensiones de la antena frontal y del surco (diferentes vistas).

En base a los resultados obtenidos, determinamos que estos no se ajustan a los requerimientos deseados, puesto que la frecuencia de trabajo se encuentra fuera de la banda de interés debido a la expansión que ha sufrido el parche luego de asignar su espesor. Entonces, para cumplir con los objetivos de diseño, se efectúan algunas adecuaciones al modelo inicial considerando también que el sustrato debe incluir el surco que sirve de guía para la ubicación del parche (ver Figura 2.18). Es así como siguiendo la mecánica aplicada para la antena plana, se procede a reducir paramétricamente las dimensiones del parche conformado y se recorre el punto de alimentación hasta conseguir un modelo que presente el ancho de banda y el nivel de adaptación requeridos, tal y como se muestra en la Figura 2.19, donde se obtienen pérdidas de retorno menores a -10 dB en un intervalo comprendido entre 5,50 y 6,87 GHz y un ancho de banda del 22,15%. También se observa la presencia de dos picos de frecuencia localizados en 5,81 GHz y 6,39 GHz, los cuales alcanzan un nivel de adaptación de -33,03 dB y -30,98 dB respectivamente.

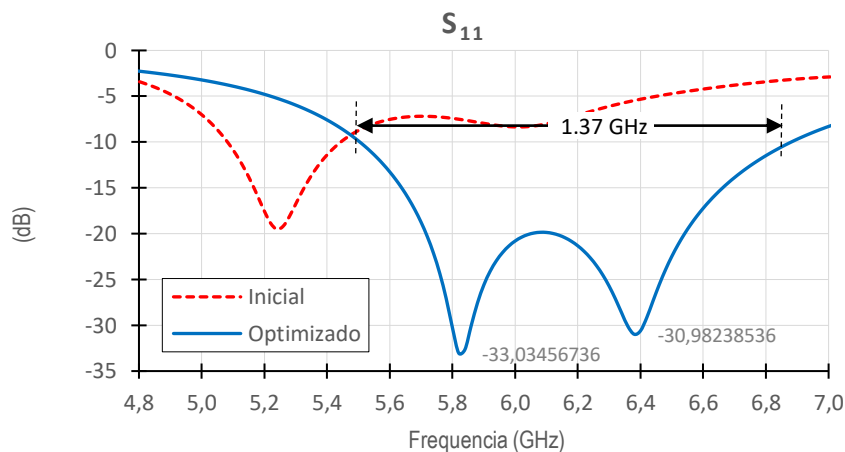


Figura 2.19. Optimización del parámetro S_{11} de la antena frontal.

Las dimensiones del modelo inicial y el optimizado se han recopilado en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Dimensiones iniciales y optimizadas (antena conformada frontal)

Variable	Dimensiones iniciales (mm)	Dimensiones optimizadas (mm)
W_g	40,51	39,02
L_g	41,59	41,49
W	14,03	13,52
L	14,70	14,45
h	3	3
y_0	3,99	2,01

Finalmente, se generan los diagramas que se muestran en la Figura 2.20, donde el ancho de haz a -3dB alcanza un valor de 52,63° en el plano XZ y 59,99° en el plano YZ. Además, en el diagrama tridimensional de la Figura 2.20 (b) se observa que la antena presenta una ganancia de 7,67 dB y una directividad de 7,80 dB.

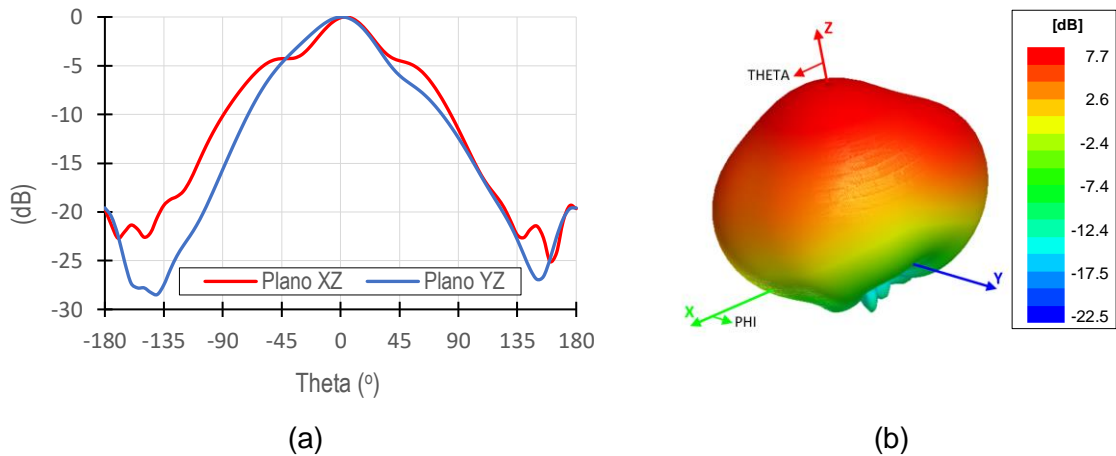


Figura 2.20. Diagrama de radiación: (a) Planos XY y ZY (b) Tridimensional.

2.3.2.1.1 Influencia de las dimensiones de la antena conformada sobre su frecuencia de resonancia

La posición de dos las frecuencias de resonancia: F1 y F2 presentes en la antena frontal está determinada por las dimensiones del parche, situación que se evidencia en la Figura 2.20 y 2.21, en donde se ha comprobado el comportamiento del parámetro S_{11} al variar el largo (L) y el ancho (W) del parche respectivamente.

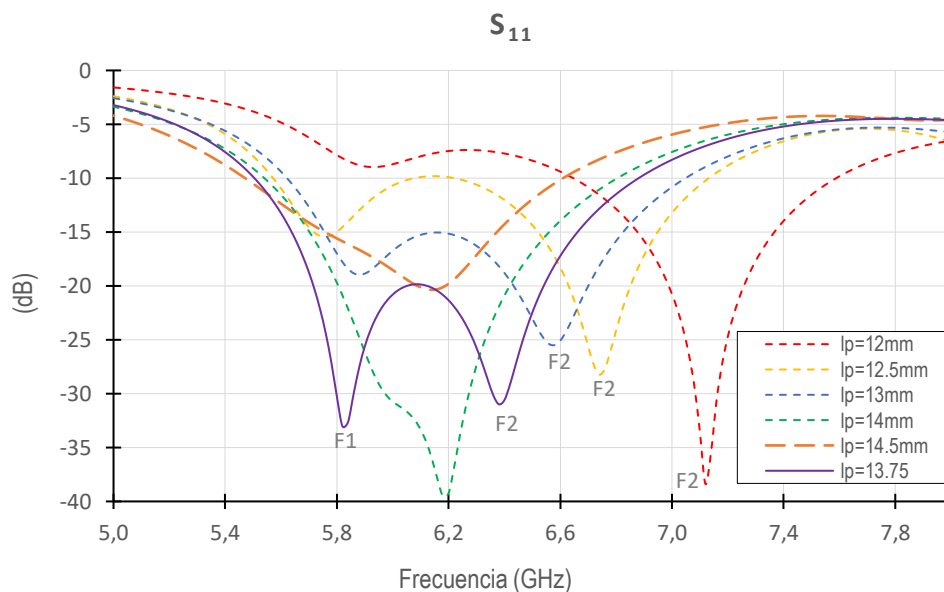


Figura 2.21. Influencia de la variación L en la localización de las frecuencias de resonancia de la antena frontal.

En la Figura 2.21 podemos determinar que al modificar la longitud L del parche se produce el corrimiento de los dos picos de resonancia ($F1$ y $F2$); es decir, al ir incrementando L , la posición de $F2$ va disminuyendo y la de $F1$ va aumentando progresivamente hasta que en determinado momento ambas frecuencias se superponen (línea entrecortada naranja). Si bien es cierto que la variación de L ejerce cierta influencia sobre $F1$, hay que destacar que no es al mismo grado que sobre $F2$.

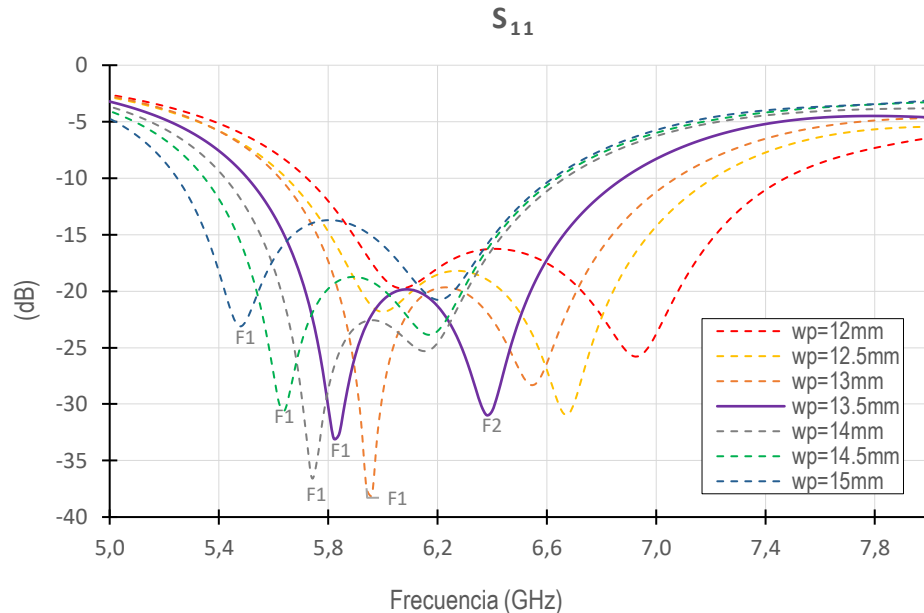


Figura 2.22. Influencia de la variación de W la localización de las frecuencias de resonancia de la antena frontal.

Por otro lado, de acuerdo con la Figura 2.22 se observa que al variar el ancho W del parche se advierte un desplazamiento de las dos frecuencias de resonancia, puesto que al incrementar el tamaño de W se produce un decremento en $F1$ y $F2$. Aunque ambas frecuencias tienden a acercarse, no logran superponerse, ya que la variación de W produce el corrimiento de $F2$ en una proporción similar a la que produce en $F1$.

En términos generales, las simulaciones efectuadas a la antena frontal, permitieron comprobar que la longitud del parche controla en mayor grado el corrimiento de la frecuencia $F2$, mientras que el ancho del parche comanda el desplazamiento de todo el conjunto de frecuencias es decir su ancho de banda. Entonces, en base al análisis presentado, se selecciona el conjunto de dimensiones ($L=14,45\text{mm}$ y $W=13,5\text{mm}$) que permitan obtener el máximo ancho de banda con el mejor nivel de adaptación posible el cual se muestra en la Figura 2.19 y que corresponde a la antena cuyas dimensiones se detallan en la Figura 2.18.

2.3.2.2 Antena Lateral

Otra de las áreas disponibles para el montaje de las antenas corresponde a la sección lateral cercana a las alas del UAV. Esta región presenta una geometría asimétrica, así como una mayor curvatura comparada con la parte frontal de la plataforma aérea.

De modo que para simular la antena lateral se replicará la metodología utilizada para el parche frontal, es decir, primero se efectúa el modelamiento de las estructuras tridimensionales empleando las dimensiones del parche plano. Luego, en función de los resultados obtenidos se efectúa la optimización de las dimensiones y ajuste en la ubicación del punto de alimentación del parche conformado. Es así como se obtiene el modelo optimizado que se puede apreciar en la Figura 2.23, donde se evidencia también que el parche cuadrado ha pasado de tener una forma romboidal.

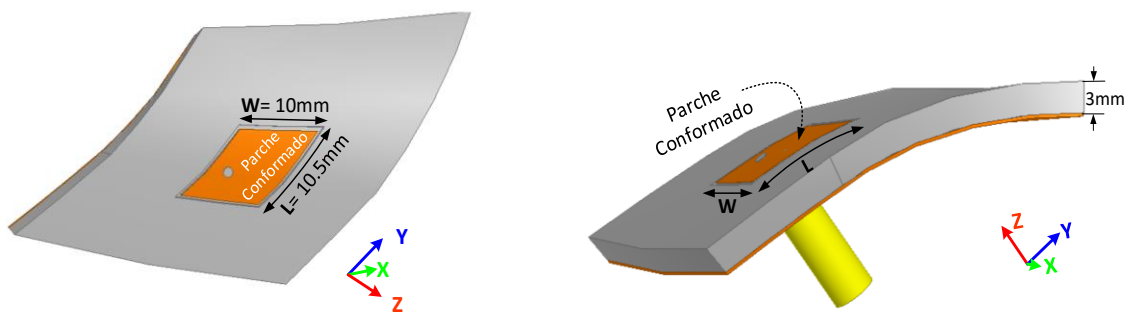


Figura 2.23. Antena conformada lateral optimizada.

Las pérdidas de retorno generadas a partir de la simulación del modelo inicial y el optimizado se visualizan en la Figura 2.24, donde el ancho de banda obtenido después de la optimización (curva en azul) es del 7%, en un rango que va desde 5,61 a 6,02 GHz considerando un S_{11} menor a -10 dB. De acuerdo con esta figura, el parámetro S_{11} alcanza un valor de -36,10 dB a una frecuencia de 5,79 GHz.

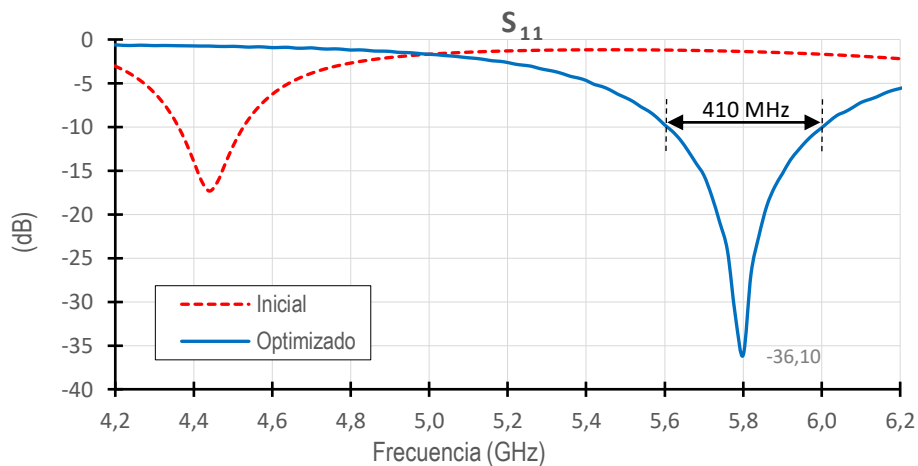


Figura 2.24. Parámetro S_{11} de la antena lateral.

Además se obtienen los diagramas de radiación que se presentan en la Figura 2.25, donde el ancho de lóbulo a -3 dB alcanza un valor de $127,56^\circ$ en el plano XZ y $85,88^\circ$ en el plano YZ. También es posible notar que existe cierta distorsión en el diagrama, puesto que se tiene un lóbulo de radiación ensanchado y asimétrico. Por otro lado, en la Figura 2.25 (b) se observa que el máximo de la radiación se ha trasladado hacia un costado del parche (en dirección $\text{Phi}=120^\circ$ y $\text{Theta}=45^\circ$), donde se tiene una ganancia de 7,82 dB y una directividad de 7,99 dB.

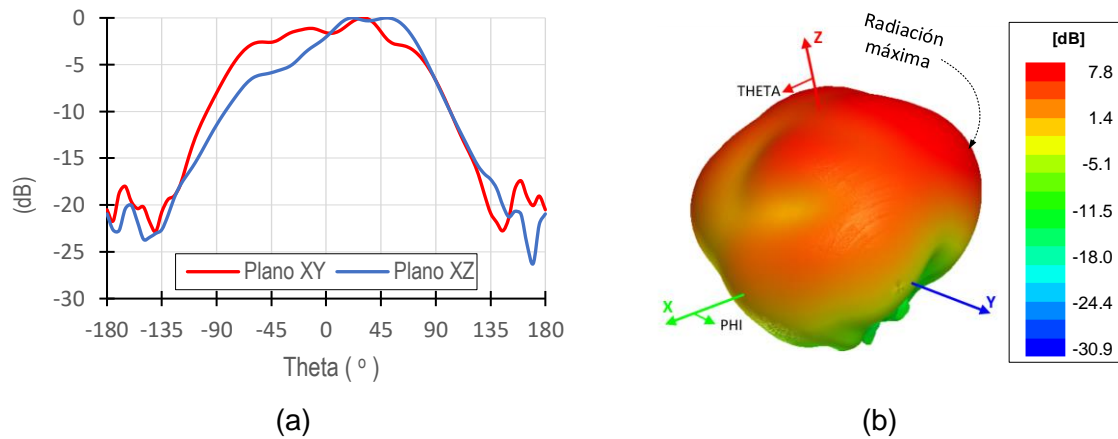


Figura 2.25. Diagrama de radiación: (a) Planos XY y ZY, (b) Tridimensional.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de las mediciones de las pérdidas de retorno y diagramas de radiación, que han sido efectuadas a los tres prototipos de las antenas propuestas en este proyecto. Las mediciones se llevaron a cabo en los laboratorios pertenecientes a la FIEE (Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica) y a la UPV (Universidad Politécnica de Valencia).

Luego, con los datos recabados a partir de las mediciones y simulaciones se estructura un análisis comparativo entre el parche plano y las antenas conformadas.

3.1 IMPLEMENTACIÓN

Considerando que las antenas simuladas satisfacen los objetivos de diseño planteados, se implementan utilizando un sustrato moldeable plástico y láminas de cobre adhesivo que recrean el parche y el plano de masa, mismos que estarán unidos a un conector SMA tal y como se muestra en la Figura 3.1 (a).

La construcción de los prototipos que se presenta en la Figura 3.1 fue factible gracias a la colaboración del grupo ATA (Aerodynamics and Thermofluids Applied) de la Facultad de Ingeniería Mecánica que contribuyó con la impresión 3D de los sustratos en PLA.

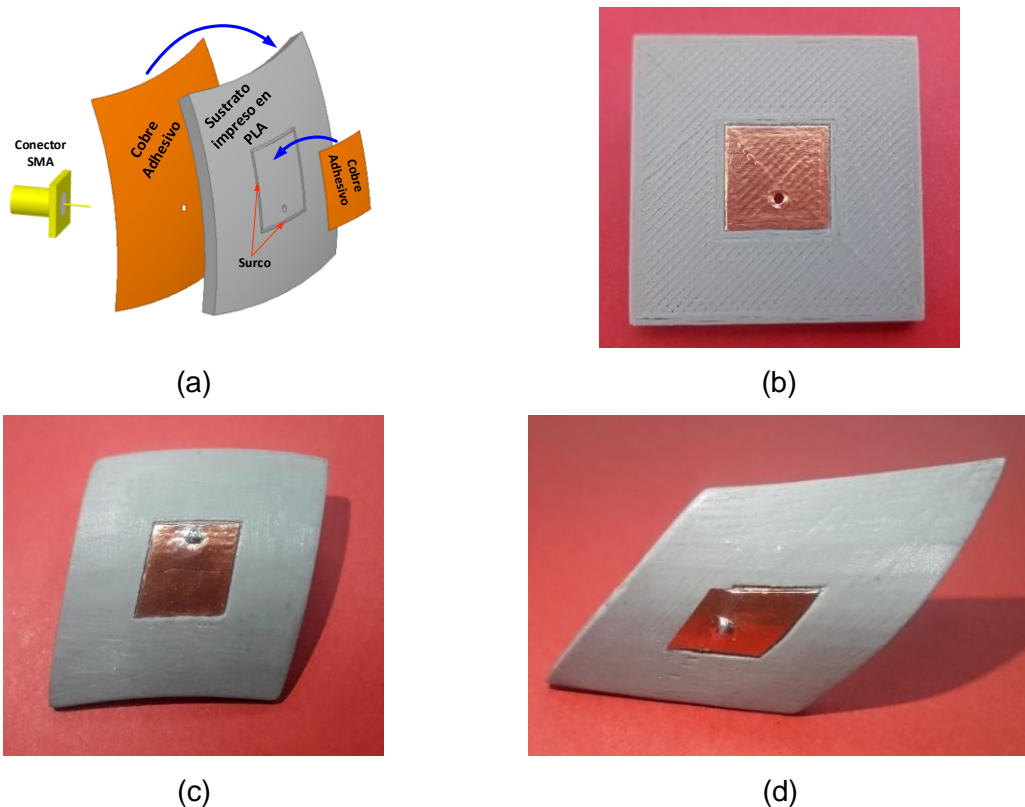


Figura 3.1. Prototipos: (a) Ensamblaje de componentes, (b) Plana, (c) Frontal, (d) Lateral.

3.2 MEDICIONES EN LA FIEE

En el laboratorio de investigación del DETRI se tomaron las mediciones de los parámetros S_{11} de cada uno de los prototipos utilizando el analizador vectorial de redes ENA KEYSIGHT E5071C. Así también, en la cámara semi-anecoica del Laboratorio de Antenas de la FIEE (ver Figura 3.2) se efectuaron las mediciones del campo eléctrico recibido en pasos de 5° para determinar la ganancia y estimar la forma del diagrama de radiación en los principales planos (XZ y ZY). Para tal efecto se ha tomado como referencia el protocolo de pruebas de antenas desarrollado por el Dr. Alfonso Zozaya [47] y que se describe en el ANEXO G.

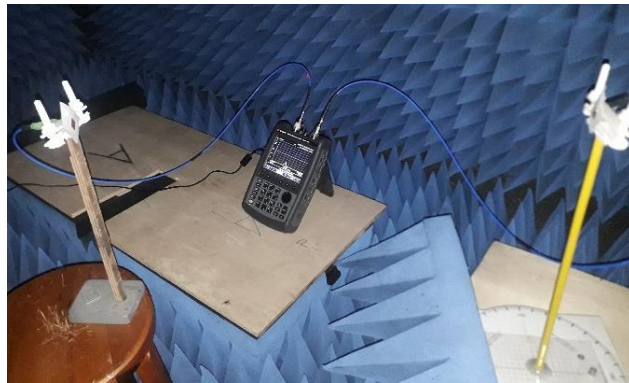


Figura 3.2. Mediciones en la cámara semi-anecoica de la FIEE

3.2.1 MEDICIONES DE LA ANTENA PLANA

En la Figura 3.3 se presentan las pérdidas de retorno medidas donde se puede observar que la antena fabricada presenta un ancho de banda del 8,06% ($S_{11} < -10\text{dB}$) cumpliendo así con las especificaciones requeridas ya que se consigue un ancho de banda ligeramente superior al simulado (7,76%).

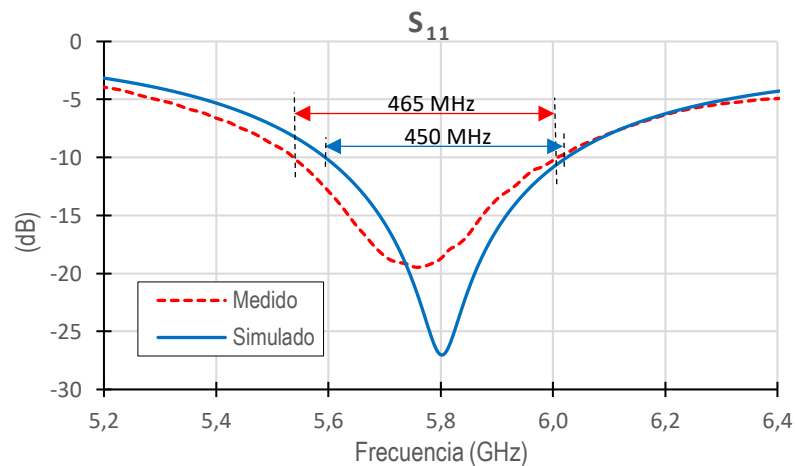


Figura 3.3. Parámetro S_{11} (antena plana)

El diagrama de radiación obtenido en función de las mediciones del campo recibido se presenta en la Figura 3.4; observándose que los datos medidos y simulados siguen una tendencia similar para los dos planos. La ganancia calculada a partir de los valores medidos es de 6,61 dB (ver ANEXO H).

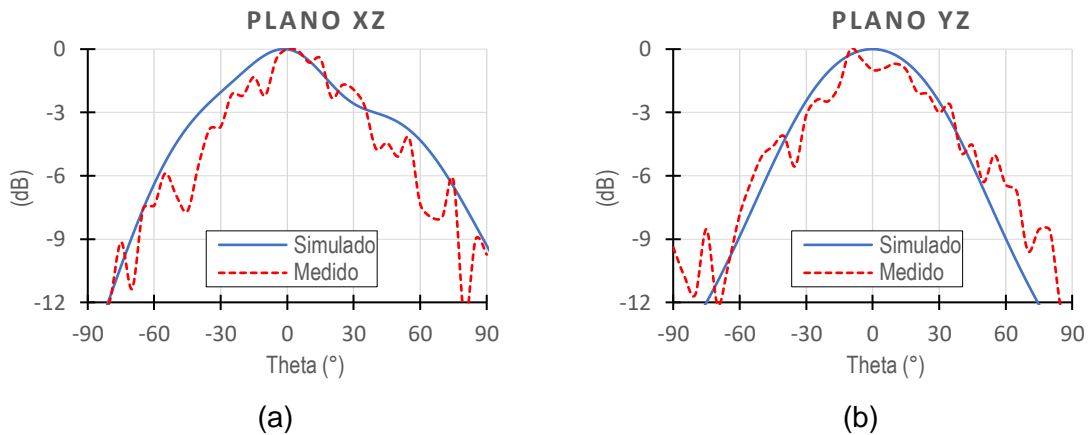


Figura 3.4. Diagrama de radiación en los planos: (a) XZ y (b) YZ (antena plana).

3.2.2 MEDICIONES DE LA ANTENA FRONTAL

En la Figura 3.5 se puede apreciar que los datos medidos y simulados del parámetro S_{11} exhiben un comportamiento semejante, es decir, en ambos casos se evidencia la presencia de dos frecuencias de resonancia (F1 y F2). En el primer punto mínimo de la gráfica, es posible notar que a la frecuencia de 5,8 GHz los valores medidos y simulados se encuentran muy próximos, sin embargo, en el segundo pico de resonancia se advierte un corrimiento de 6,4 a 6,6 GHz lo cual produce un incremento en el ancho de banda del 22,15% (simulado) al 24,24% (medido).

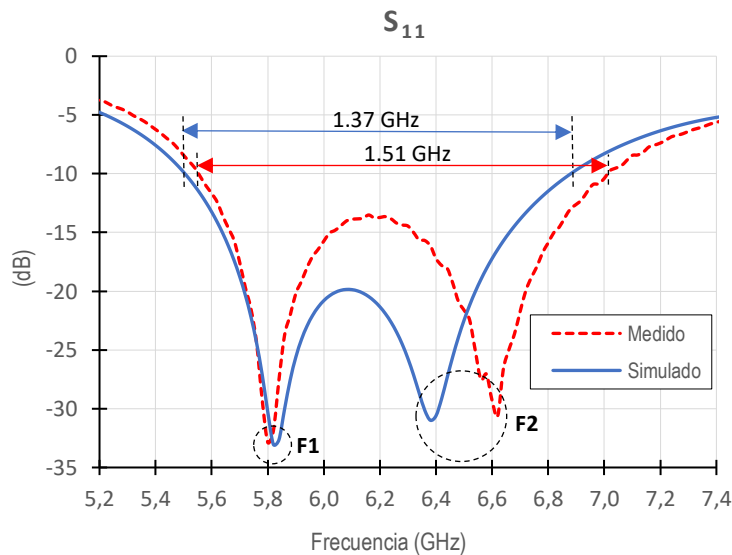


Figura 3.5. Parámetro S_{11} (antena frontal).

El diagrama de radiación estimado en base a las mediciones del campo efectuadas a la antena se muestra en la Figura 3.6, donde se puede destacar que los datos medidos y simulados presentan valores bastante cercanos. En este caso, la ganancia calculada es de 6,30 dB (ver ANEXO H).

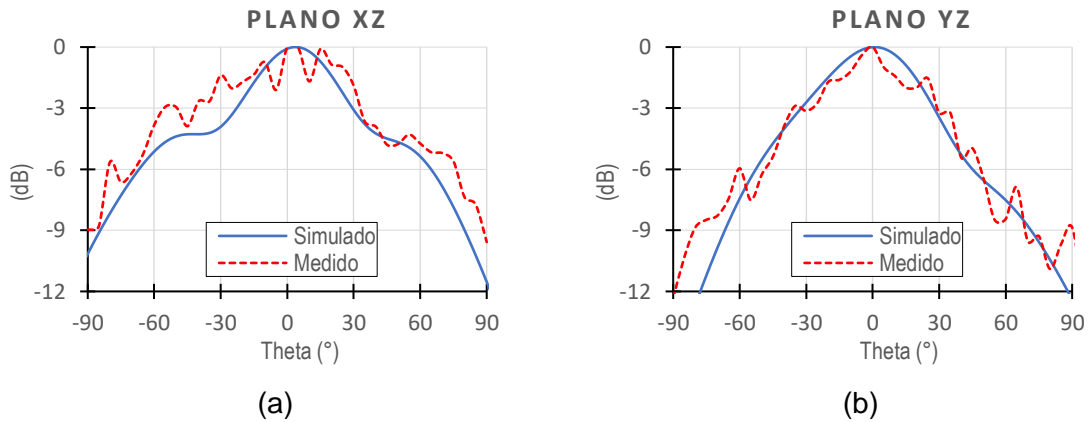


Figura 3.6. Diagrama de radiación en los planos: (a) XZ y (b) YZ (antena frontal)

3.2.3 MEDICIONES DE LA ANTENA LATERAL

La medición y simulación del parámetro S_{11} de la antena lateral ha sido representada en la Figura 3.7 donde se evidencia que los datos simulados y medidos son muy semejantes. Sin embargo, aunque existe una ligera reducción en el ancho de banda alcanzado por el prototipo (6,72%), este se encuentra dentro de la banda de operación del módulo transmisor.

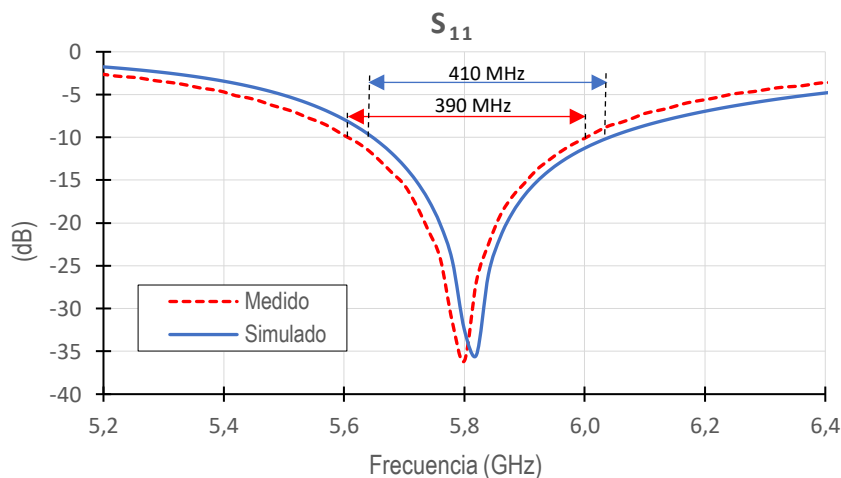


Figura 3.7. Parámetro S_{11} (antena lateral).

La ganancia estimada para este prototipo es de 4,09 dB (ver ANEXO H). No obstante, hay que recordar que la medición del parámetro S_{21} (necesario para determinar la ganancia y que se detalla en el ANEXO E) no se efectuó en la dirección de máxima radiación, sino que

se realizó en dirección perpendicular al parche, en donde la antena presenta una ganancia de 5 dB (ver Figura 3.8), debido a que para ubicar la región donde la ganancia es máxima se requiere disponer un sistema que permita mejorar la precisión en el apuntamiento y rotación de las antenas.

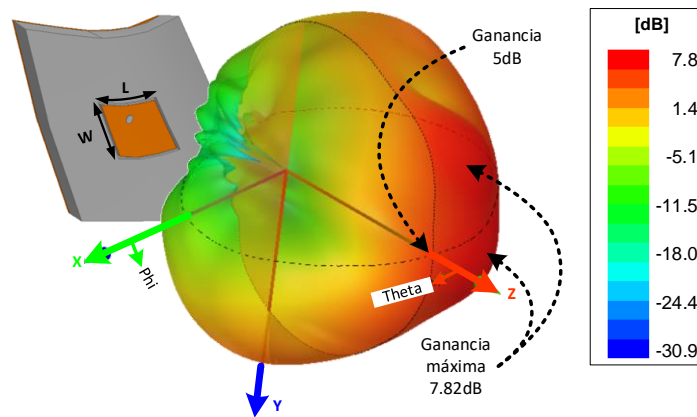


Figura 3.8. Diagrama de radiación tridimensional de la antena lateral.

En los diagramas de la Figura 3.9 se puede apreciar que, pese a las divergencias entre la simulación y las mediciones de campo recibido, estas siguen una tendencia similar.

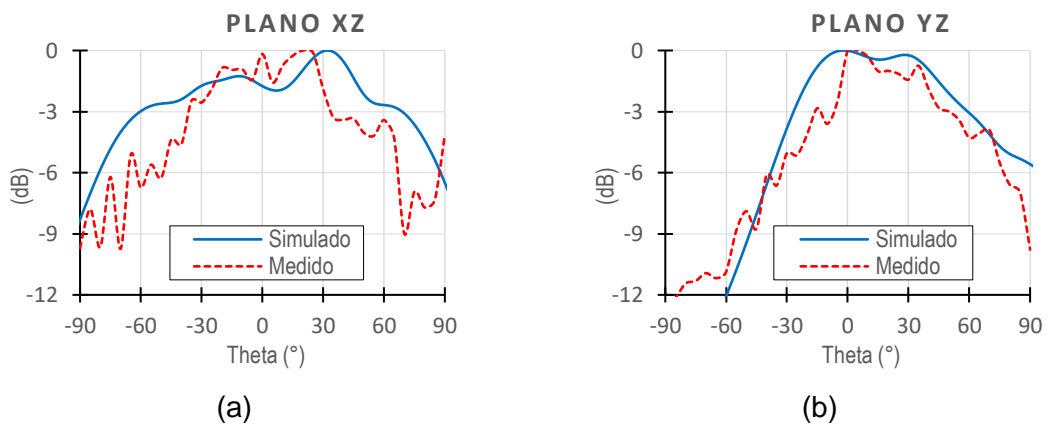


Figura 3.9. Diagrama de radiación en los planos: (a) XZ y (b) YZ (antena lateral).

3.3 MEDICIONES EN LA UPV

Con ayuda del Grupo de Radiación Electromagnética de la UPV se realizaron las medidas de los diagramas de radiación y parámetros S de las antenas conformadas utilizando los equipos que el grupo tiene a su disposición (Ver Figura 3.10).

Las mediciones de la intensidad del campo se realizaron considerando un desplazamiento angular de la antena en intervalos de $0,1^\circ$ obteniéndose un total 3600 puntos que han permitido construir el diagrama de radiación en los planos XZ y YZ.

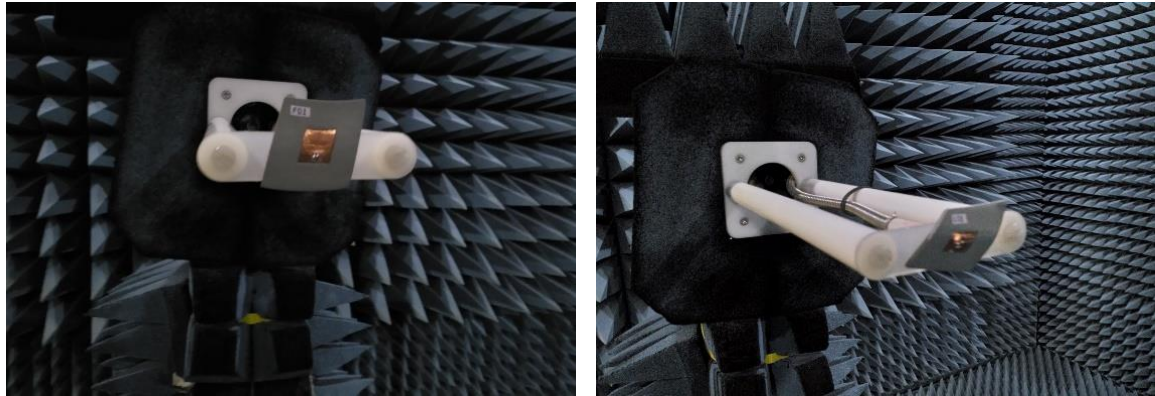


Figura 3.10. Mediciones en la cámara anecoica de la UPV

3.3.1 MEDICIONES DE LA ANTENA FRONTAL

En la Figura 3.11 han sido representadas las pérdidas de retorno obtenidas de las mediciones y simulación de la antena frontal. Las curvas resultantes advierten cierta similitud en su comportamiento, evidencia de ello es que su ancho de banda es muy cercano (22,36%) y se puede advertir la presencia de los dos picos de resonancia observados previamente.

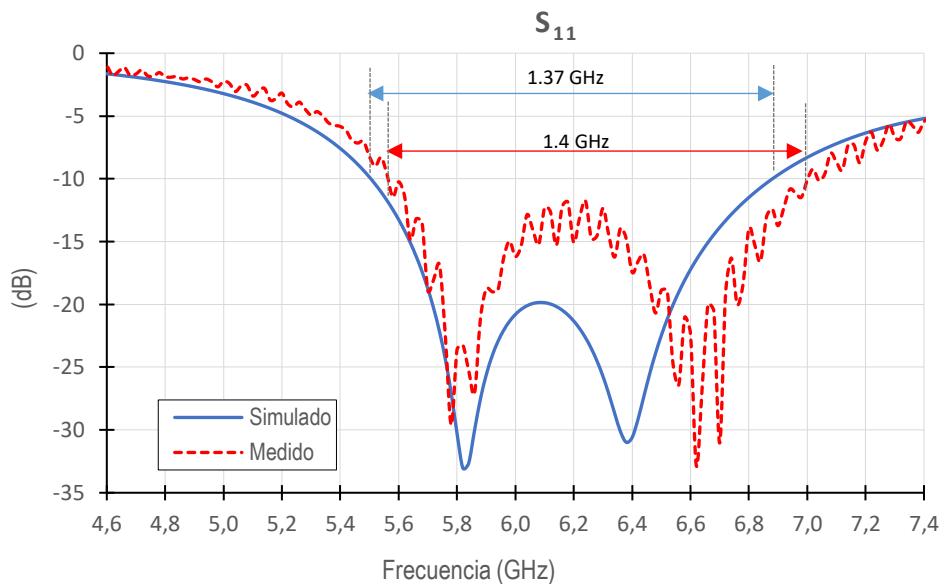


Figura 3.11. Mediciones del parámetro S_{11} (antena frontal)

Los diagramas de radiación medidos en los planos XZ y ZY se contrastan con los simulados en la Figura 3.12, donde es posible visualizar que las mediciones guardan mayor similitud con los datos simulados. Así también, para esta antena se ha determinado una directividad de 7,15 dB (ver ANEXO I).

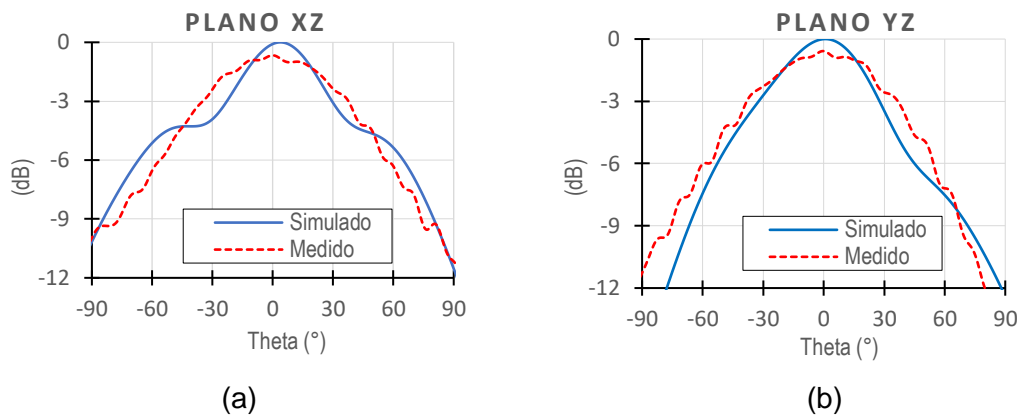


Figura 3.12. Diagrama de radiación en los planos: (a) XZ y (b) YZ (antena frontal).

3.3.2 MEDICIONES DE LA ANTENA LATERAL

Como se puede observar en la Figura 3.13 la curva del parámetro S_{11} medido presenta cierta semejanza con la obtenida en la simulación. Aunque el ancho de banda medido (6,37%) es menor, a pesar de esto, se encuentra dentro de la banda de interés y presenta un nivel de adaptación apropiado.

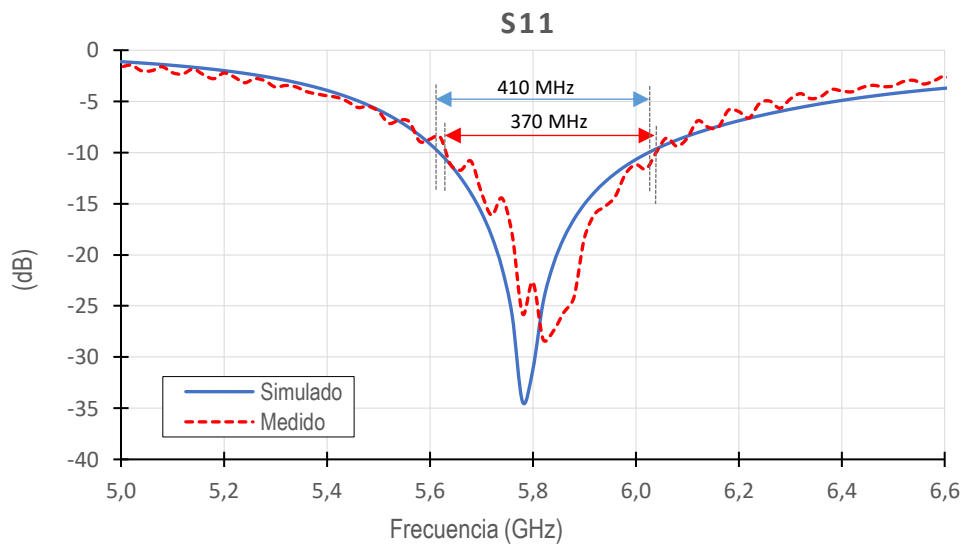


Figura 3.13. Mediciones del parámetro S_{11} (antena lateral).

En cuanto a las mediciones del campo recibido, la Figura 3.14 permite notar que para ambos planos (XZ y ZY), el diagrama construido a partir de estas, resulta bastante aproximado al simulado especialmente en el rango de $\text{Theta} = -90^\circ$ a $\text{Theta} = 90^\circ$, que es nuestro intervalo de interés puesto que esta porción representa la parte de la radiación que la antena emite hacia adelante. La directividad medida para esta antena es de 5,15 dB tal y cómo se indica en el ANEXO I.

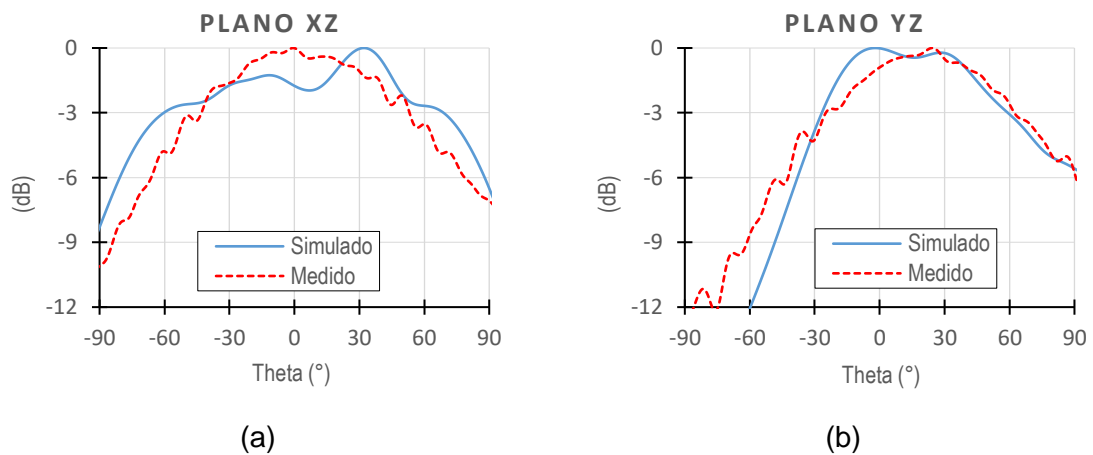


Figura 3.14. Diagrama de radiación en los planos: (a) XZ y (b) YZ (antena lateral).

3.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones y mediciones efectuadas del parámetro S_{11} y de los parámetros de radiación en los tres prototipos en los laboratorios de la FIEE y la UPV se recopilan de forma resumida en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros medidos y simulados de las antenas implementadas

Parámetro de Evaluación		Antena Plana	Antena Frontal	Antena Lateral
Ancho de Banda	Simulación	7,76%	22,15%	7,00%
	Medición EPN	8,02%	24,24 %	6,72%
	Medición UPV	-----	22,36%	6,37%
Ganancia	Simulación	7,29 dB	7,67 dB	7,82 dB
	Medición EPN	6,61 dB	6,30 dB	4,07 dB
Directividad	Simulación	7,57 dB	7,80 dB	7,99 dB
	Medición UPV	-----	7,15 dB	6,31 dB
Anchura de haz (plano XZ)	Simulación	82,57°	52,63°	127,56°
	Medición EPN	70°	75°	70°
	Medición UPV	-----	80°	97°
Anchura de haz (plano YZ)	Simulación	66,89°	59,99°	85,88°
	Medición EPN	60°	55°	50°
	Medición UPV	-----	74°	82°

De acuerdo con la tabla anterior, podemos notar que los datos medidos del parámetro S_{11} en los dos laboratorios son muy cercanos a los simulados, situación que valida el método aplicado en el presente trabajo de titulación, puesto que se logra un nivel de adaptación

adecuado dentro de un rango superior a los 300 MHz, cumpliendo satisfactoriamente con los objetivos de diseño plantados.

Si bien es cierto, la forma de la estructura de soporte ejerce cierta influencia sobre el ancho de banda de adaptación de la antena, este parámetro puede ser controlado mediante la adecuada selección de las dimensiones del parche y la ubicación del punto de alimentación.

Dado que se han generado dos antenas con geometría y curvatura distintas se advierten divergencias en los resultados obtenidos en ambos prototipos. Por un lado, se tiene la antena frontal que exhibe menor grado de alteración en cuanto a su geometría y dimensiones, ya que presenta una curvatura menos pronunciada y la superficie sobre la cual ha sido conformada guarda cierto grado de uniformidad y simetría. Por otro lado, se tiene una antena lateral que ha sido conformada sobre una superficie más irregular y asimétrica, condición que ha influido sobre su estructura, haciendo que el parche no luzca en forma cuadrada sino más bien romboidal.

La Tabla 3.1 evidencia también que la variación en la forma y curvatura de una antena produce principalmente repercusiones en sus características de radiación, prueba de ello es la variación en el ancho de haz el cual manifiesta un mayor ensanchamiento a menor radio de curvatura. Si bien es cierto que se produce un incremento en la ganancia en las simulaciones, cabe aclarar que, debido a las asimetrías y forma del parche, la radiación ya no presenta su máximo en dirección perpendicular al mismo. La ganancia y directividad son los parámetros que manifiestan mayores diferencias, especialmente en el caso de la antena lateral.

Los diagramas de radiación medidos en la UPV se asemejan en mayor grado a los simulados y esto depende en gran medida al método aplicado para realizar las mediciones, puesto que el proceso de obtención de las mismas fue más meticuloso ya que se disponía de un sistema adecuado apuntamiento y mejor control en la precisión en el barrido horizontal, situación favoreció la obtención de mediciones de campo que se ajustan en mayor grado a la realidad.

3.5 EFECTOS DEL TAMAÑO DEL DIELECTRICO

Con el fin de conocer cómo se afecta el rendimiento de las antenas conformadas una vez que estas son integradas al armazón del UAV se efectúan la simulaciones de las estructuras modeladas que se muestran en la Figura 3.15 y 3.16 (correspondientes al montaje de la antena frontal y lateral respectivamente) y se obtienen los reportes del parámetro S_{11} y del diagrama de radiación que permitirán evaluar a los prototipos desde

dos perspectivas: la primera como un elemento aislado que se presentó en la Sección 2.3.2 y la segunda, la antena como parte estructural de la aeronave.

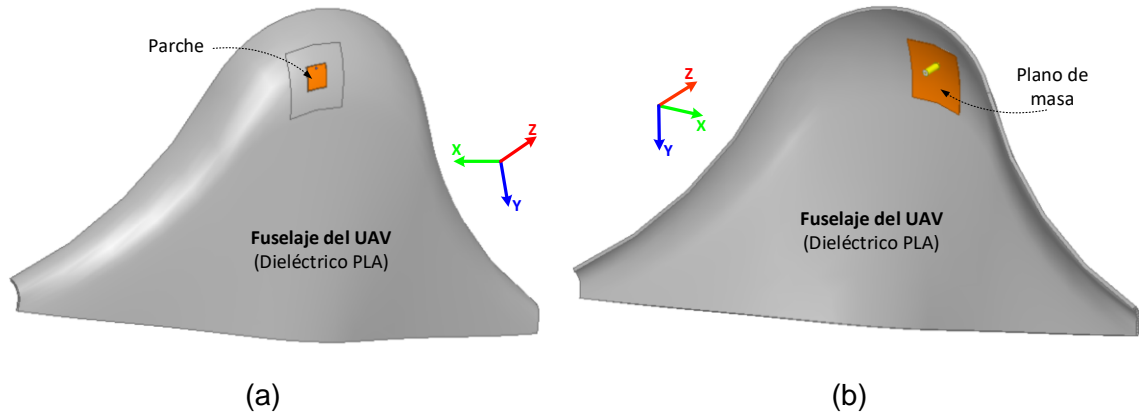


Figura 3.15. Antena frontal incorporada al fuselaje del UAV, vistas: (a) Superior, (b) Posterior

Puesto que todo el fuselaje del UAV está compuesto por PLA ($\epsilon_r = 2,7$) con un grosor de tres milímetros al igual que el sustrato de la antena, podría considerarse al conjunto de ambos elementos como una sola estructura, de este modo el tamaño del sustrato pasaría a ser mucho más grande comparado con el del plano de masa, situación que puede ser apreciada en la Figura 3.15 (b) y 3.16 (b).

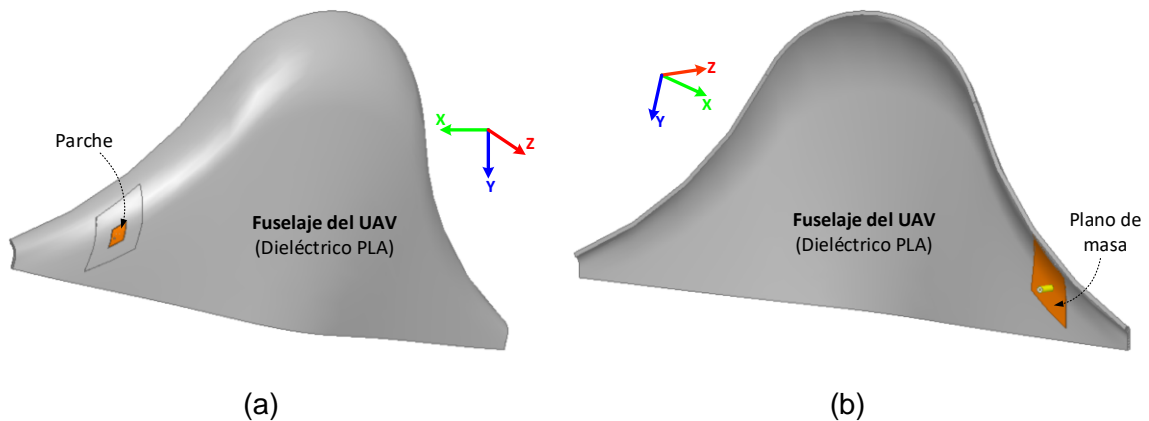


Figura 3.16. Antena lateral incorporada al fuselaje del UAV, vistas: (a) Superior, (b) Posterior.

3.5.1 ANTENA FRONTAL

Los resultados del parámetro S_{11} se presentan la Figura 3.17 donde se puede advertir que existe una pequeña desadaptación en el modelo integrado a la parte frontal del UAV, pese a ello la antena opera dentro de la banda de interés por lo que al momento de instalarla no será indispensable realizar ajustes en las dimensiones del parche.

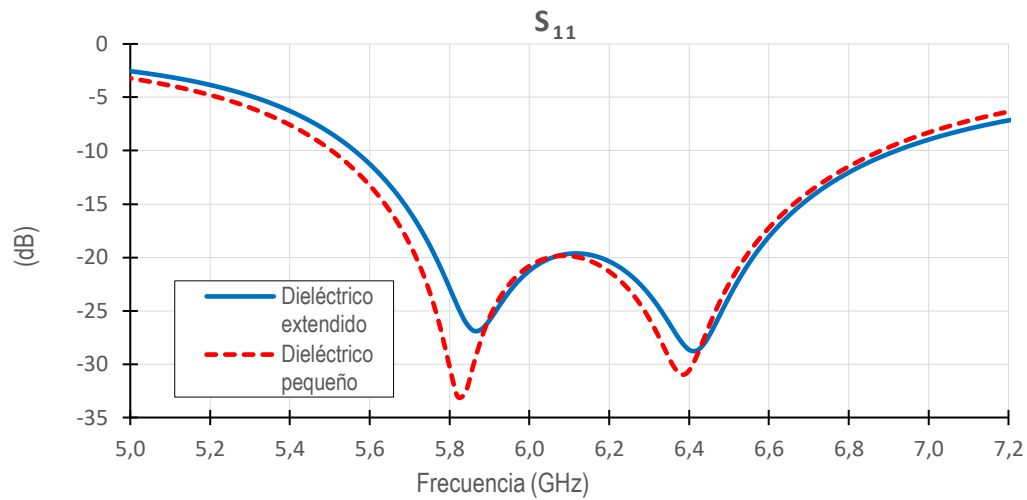


Figura 3.17. Parámetro S_{11} (antena frontal incrustada en el UAV).

Como se puede apreciar en la Figura 3.17, la ganancia simulada es de 6.43 dB, ligeramente menor a la obtenida considerando a la antena como un elemento aislado, situación que puede ser justificada por el aumento en los niveles de desadaptación observados previamente. Los diagramas de radiación muestran una forma simétrica y de características comparables a las de la antena aislada.

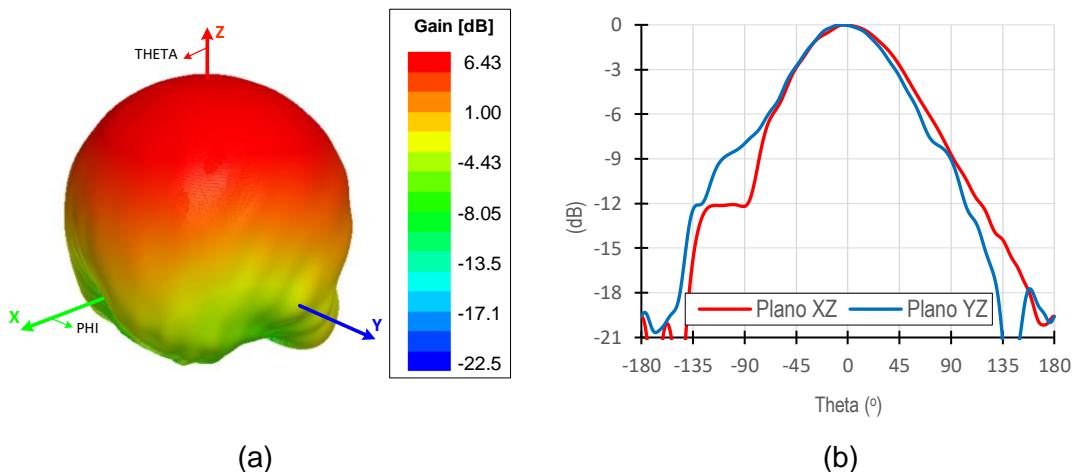


Figura 3.18. Diagrama de radiación: (a) Tridimensional, (b) Planos XY y ZY (antena frontal incrustada en el UAV).

3.5.2 ANTENA LATERAL

Al igual que en el caso anterior, en la Figura 3.19 se observa que al instalar la antena en el fuselaje del UAV, esta sufre una desadaptación de aproximadamente 14 dB (curva en azul) comparado con el modelo aislado (curva en rojo). Además, se advierte un corrimiento de la frecuencia de resonancia, de modo que al momento de instalar el prototipo deberá

considerarse realizar un ajuste en las dimensiones del parche para sintonizarlo nuevamente a 5,8 GHz.

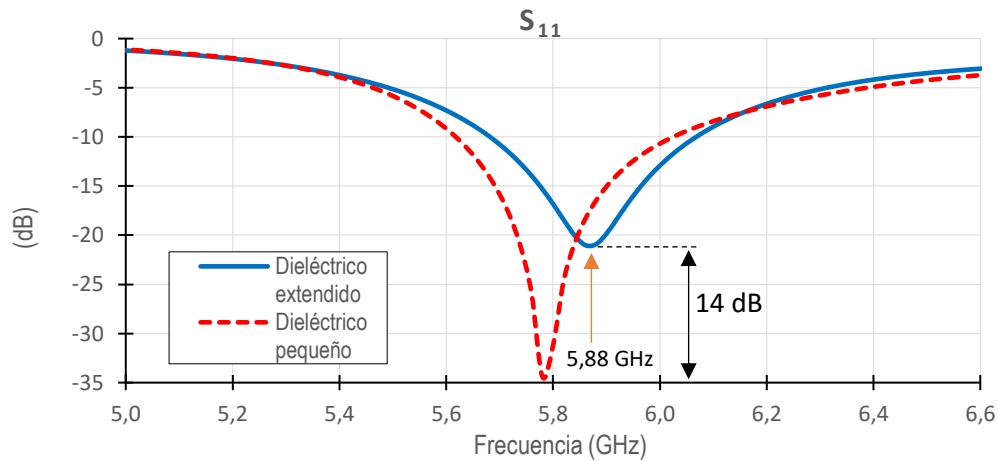


Figura 3.19. Parámetro S_{11} (antena lateral incrustada en el UAV).

Debido a que se tienen mayores pérdidas de retorno, se produce un decremento en la ganancia alcanzado un valor de 5,31 dB. Los diagramas de radiación se muestran en la Figura 3.20, en donde puede apreciarse que se tiene un ancho de haz mayor al de la antena incrustada en la parte frontal. También puede destacarse que el máximo de radiación se encuentra en dirección perpendicular al parche lo que no ocurriría al analizarse a la antena como un elemento aislado.

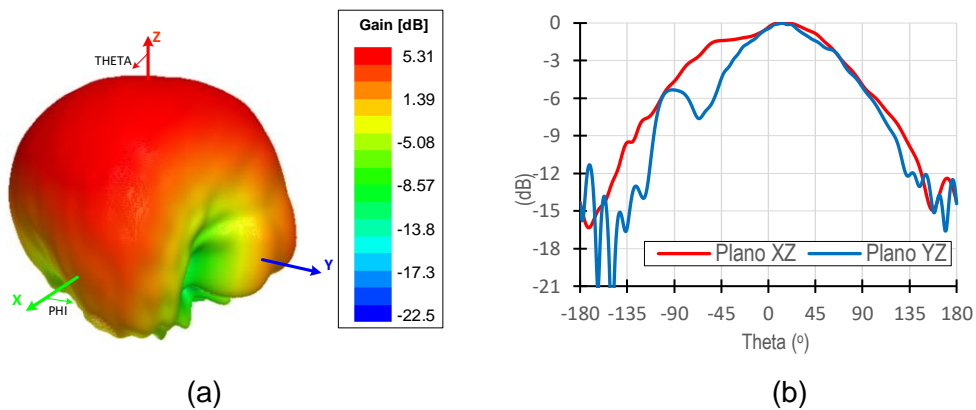


Figura 3.20. Diagrama de radiación: (a) Tridimensional, (b) Planos XY y ZY (antena lateral incrustada en el UAV).

3.6 EFECTOS DEL TAMAÑO DEL PLANO DE MASA

Se plantea una segunda opción para la implementación de la antena en la aeronave, la cual consiste en colocar el parche con la forma y dimensiones previamente simuladas en la posición frontal o lateral y cubrir toda la parte interior del fuselaje del UAV con cobre tal y cómo se muestra en las figuras 3.21 y la 3.22 respectivamente.

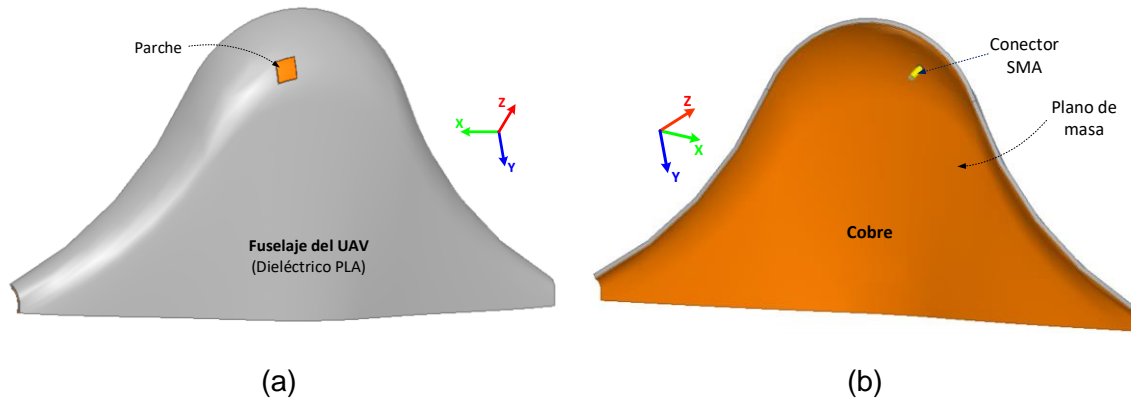


Figura 3.21. Antena frontal incorporada al fuselaje del UAV con plano de masa extendido, vistas: (a) Superior, (b) Posterior.

La cobertura con cobre se efectúa con el fin de simplificar el proceso de instalación de la antena, puesto que el plano de masa no estaría confinado a un pequeño espacio o debería seguir una forma predeterminada, además de que existen estudios [13] y [48] que sugieren que hacer el plano de masa más grande puede lograr mejores resultados en los niveles de adaptación y hasta cierto punto mejorar las características de radiación de los prototipos.

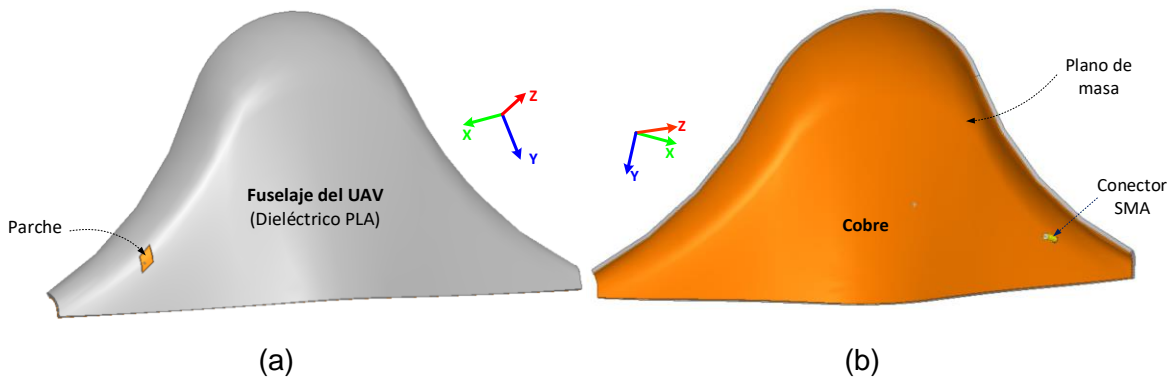


Figura 3.22. Antena lateral incorporada al fuselaje del UAV con plano de masa extendido, vistas: (a) Superior, (b) Posterior.

3.6.1 ANTENA FRONTAL

Analizando los resultados del parámetro S_{11} que se presentan la Figura 3.23, es posible observar que, al extender las dimensiones del plano de masa, se incrementan las pérdidas de retorno en las dos frecuencias de resonancia ($F1$ y $F2$) en un valor de 16 dB y 11dB respectivamente, pese a ello el rango de operación de la antena se mantiene, pero es necesario realizar la optimización de la ubicación del punto de alimentación para mejorar los niveles de adaptación de la misma.

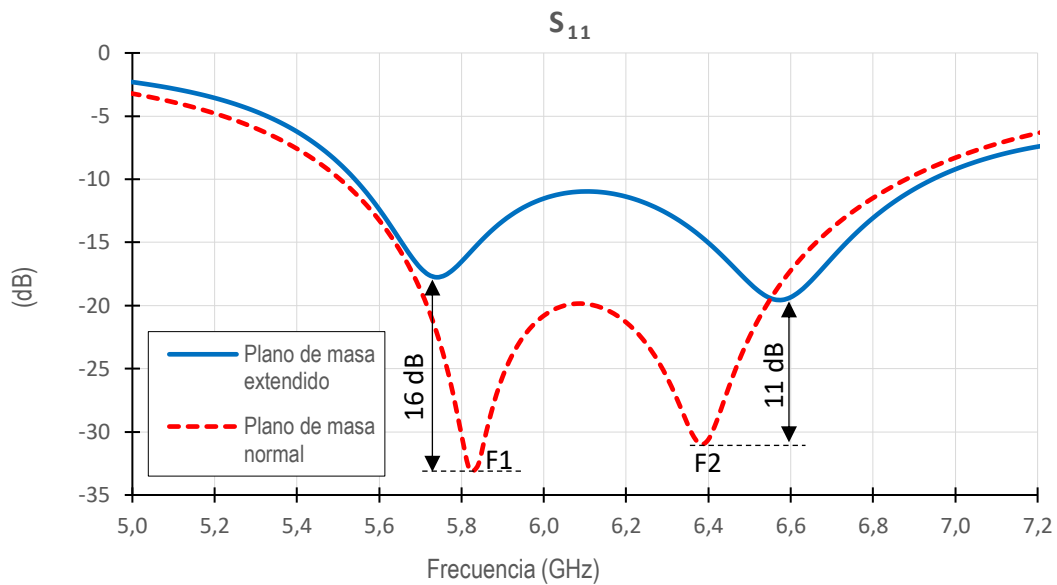


Figura 3.23. Parámetro S_{11} (antena frontal con plano de masa extendido).

Como se puede apreciar en la Figura 3.24, la ganancia simulada es de 6.03 dB. Los diagramas de radiación muestran una forma simétrica y de características comparables a las de la antena aislada, así también puede notarse que una pequeña parte de la radiación (menor a 3dB) está escapando hacia la parte de posterior de la antena.

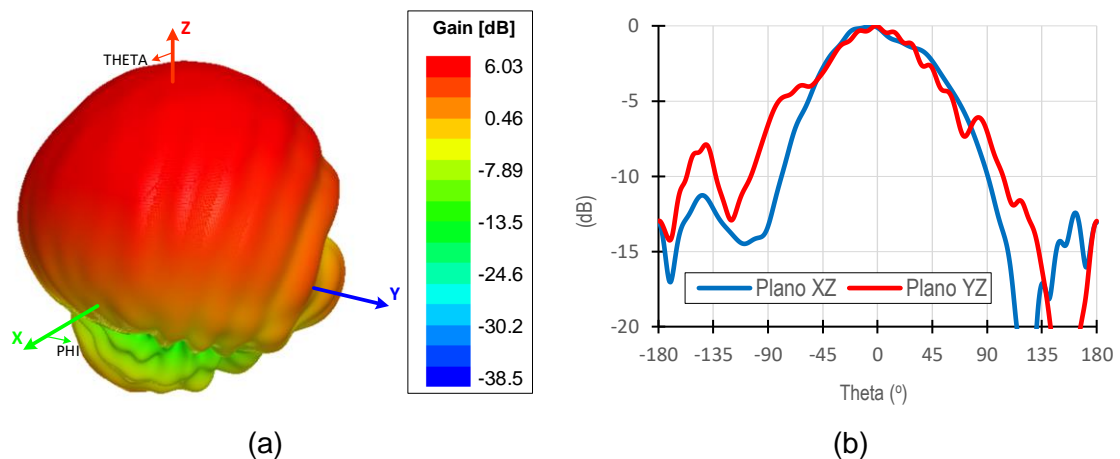


Figura 3.24. Diagrama de radiación: (a) Tridimensional, (b) Planos XY y ZY (incorporada en el UAV con plano de masa extendido).

3.6.2 ANTENA LATERAL

De acuerdo con la Figura 3.25, se puede apreciar que al ampliar las dimensiones del plano de masa produce una desadaptación de aproximadamente 20 dB en el parámetro S_{11} y se mantiene la frecuencia de resonancia, aunque el ancho de banda se ve ligeramente reducido si se lo compara con la antena frontal aislada.

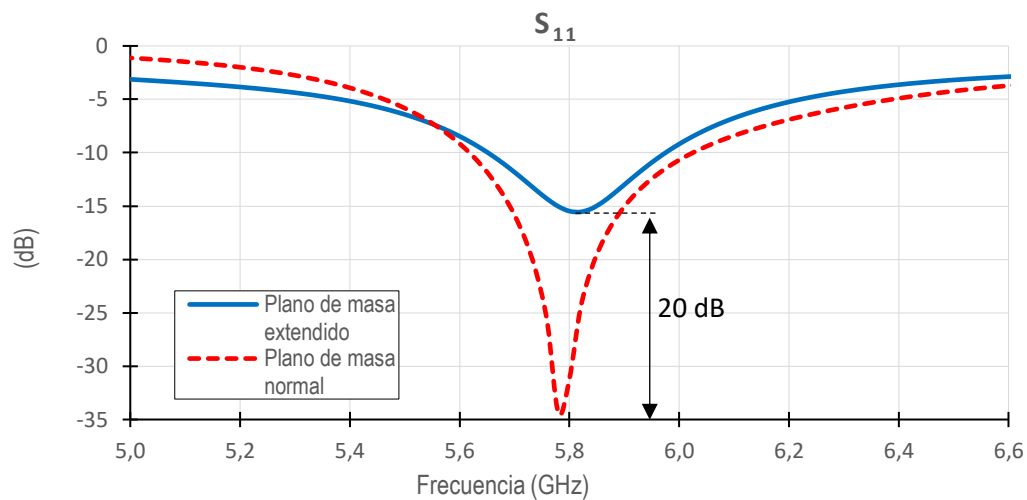


Figura 3.25. Parámetro S_{11} (antena lateral con plano de masa extendido).

En la Figura 3.26, podemos notar que la antena simulada ha alcanzado una ganancia de 5.26 dB. Así también puede notarse que el diagrama de radiación presenta ciertas distorsiones y asimetrías, siendo una característica relevante que parte de la radiación se está dispersando hacia la parte posterior de la antena.

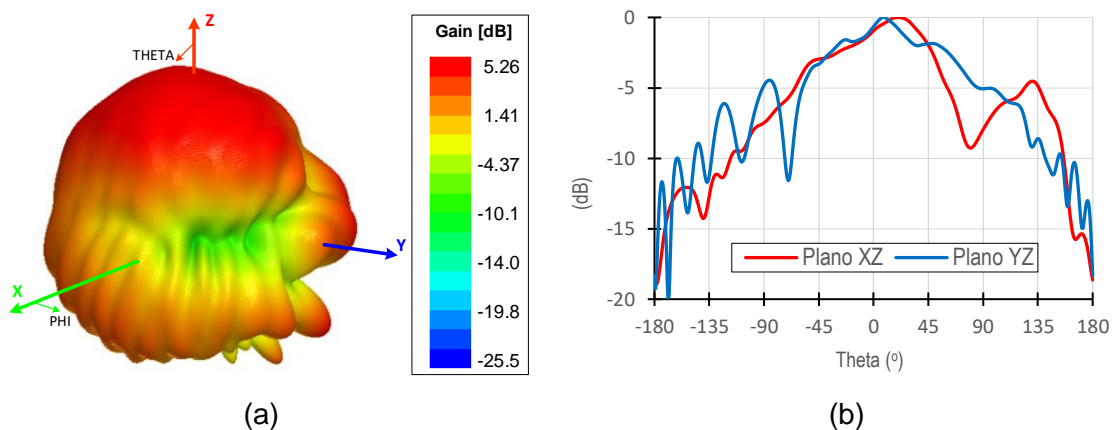


Figura 3.26. Diagrama de radiación: (a) Tridimensional, (b) Planos XY y ZY (antena lateral incorporada en el UAV con plano de masa extendido).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

En este proyecto se han presentado dos modelos de antenas conformadas concebidas a partir del diseño de un elemento base (parche cuadrado), el cual ha sido modificado para ajustar su geometría a la superficie de un UAV con el fin de no afectar sus propiedades aerodinámicas a la vez que se cumplen ciertos requerimientos de diseño como un ancho de banda superior al 5,17% así como una ganancia mayor a 4 dB.

El parche cuadrado es el elemento sobre el cual se trabaja a primera instancia, una vez que el modelo satisface las condiciones planteadas para este proyecto en la simulación, se efectúa su fabricación obteniéndose un ancho de banda de 8,02% y una ganancia estimada de 6,61 dB. Considerando que las mediciones de esta antena se asemejan a los datos simulados se prosigue con la implementación de los demás prototipos.

El primer modelo de antena conformada (frontal) manifiesta una respuesta algo singular puesto que debido a la forma del parche y la ubicación del punto de alimentación se observa la presencia de dos frecuencias de resonancia que han logrado el aumento del ancho de banda al 24,24% lo cual resulta inusual en los parches cuadrados convencionales. Las características de radiación de la misma presentan atributos comparables con los del elemento base.

El segundo modelo de antena conformada (lateral), en cambio exhibe una respuesta muy similar a la de la antena plana en torno a los niveles de adaptación puesto que se alcanza un ancho de banda de 6,4%; sin embargo, se observa una disminución en la ganancia, situación que puede explicarse considerando varios aspectos; el primero el tamaño del parche puesto que es más pequeño (mide alrededor de un centímetro) y su forma romboidal que manifiesta más modificaciones y asimetrías. Además, la forma del sustrato presenta una curvatura mayor a la del parche frontal lo cual ha producido la deformación del diagrama radiación mismo que ya no muestra su máximo en dirección perpendicular como es característico en las antenas tipo parche convencionales.

En base a la experimentación con los modelos presentados, puede determinarse que con la adecuada modificación de parámetros como las dimensiones del parche y ubicación del punto de alimentación se pueden alcanzar niveles de adaptación y ancho de banda apropiados independientemente de la forma de la estructura de soporte.

Las mediciones de los prototipos fabricados muestran ciertas divergencias respecto de los resultados obtenidos a través de las simulaciones, situación que puede ser explicado desde varias perspectivas como la inexactitud al momento de la construcción que está ligada a la precisión de la impresora 3D y a la adecuada ubicación del parche sobre el sustrato, además debe considerarse que debido a la manera en que la impresora va depositando el material para la impresión del sustrato puede existir una variación de la constante dieléctrica efectiva.

El grosor del sustrato es un factor que cobra relevancia, puesto que para la construcción de las antenas es necesario hacerle algunas adecuaciones como limado y pulido lo cual reduce las dimensiones efectivas de la altura y esto podría tener incidencia sobre el ancho de banda. Otro aspecto a considerar es que a frecuencias más altas la variación de las dimensiones del parche tiende a ser más significativa y los circuitos se vuelven más sensibles.

En términos de costo-beneficio se puede concluir que los prototipos fabricados utilizando impresión 3D son una alternativa viable económica y funcionalmente puesto que su implementación es de bajo costo y presentan una respuesta apropiada en torno a las necesidades del proyecto.

4.2 RECOMENDACIONES

En trabajos futuros sería importante considerar superficies curvas que puedan ser formuladas matemáticamente, puesto que ello nos permitirá obtener una aproximación más real en torno de la distribución de las líneas de campo, corrientes y la forma de los diagramas de radiación.

Solo se dio un primer paso en la implementación, puesto que los prototipos podrían mejorarse añadiendo una capa de protección contra la intemperie puesto que son antenas concebidas para trabajar en ambientes exteriores. Así también podrían incurrirse en el diseño multicapa con sustratos imprimibles de diferente permitividad eléctrica, a fin de obtener un dispositivo resistente y con mayor ancho de banda.

Un siguiente paso sería el diseño de arreglos de antenas conformadas incluyendo su red de alimentación. Además, sería importante realizar la instalación de las antenas en la estructura de soporte UAV para efectuar las respectivas pruebas de funcionamiento.

Un aspecto a considerar es que se pueden fabricar sustratos de mejor calidad empleando impresoras 3D de mayor precisión y que permitan un acabado más uniforme y resistente.

Así también, se podrían emplear resinas de impresión 3D para lograr acabados más profesionales en el sustrato, sin embargo, actualmente no se dispone de la caracterización eléctrica de estos materiales y su costo es relativamente elevado, si se compara con el del ABS o PLA.

Adicionalmente, se han analizado dos opciones para la implementación de las antenas en el UAV: la primera es hacer la antena desmontable con un dieléctrico extendido y un plano de masa pequeño (Sección 3.5) y la segunda es que la antena sea una estructura fija en el UAV con un plano de masa extendido (Sección 3.6). Evaluando las alternativas planteadas, se sugiere optar por la implementación de una antena desmontable que además de facilitar la medición de sus parámetros y es el modelo que exhibe una respuesta más favorable en torno a los niveles de adaptación y ganancia, así como menores pérdidas por radiaciones espurias en la parte posterior de la antena.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. L. P. Peralta y H. R. Aguilar, "Aporte del sector agropecuario a la economía del Ecuador. Análisis crítico de su evolución en el período de dolarización. Años 2000 – 2016", *Espacios*, vol. 39, p. 11.
- [2] P. Vrchota, S. Steeger, M. Martinez-Vazquez, M. Svetlik, y Z. Reznicek, "Aerodynamic and structural design of winglet with integrated VHF antenna", *MATEC Web Conf.*, p. 1, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201823300018.
- [3] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design", Second Edition. United States of America: John Wiley & Sons, 2012, pp.783-791.
- [4] Y. Huang y K. Boyle, "Antennas: From Theory to Practice", First ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2008, pp. 184-191.
- [5] Á. C. Aznar, J. R. Robert, J. M. R. Casals, L. J. Roca, S. B. Boris, y M. F. Bataller, "Antenas". Univ. Politèc. de Catalunya, 2004, pp. 270-271.
- [6] G. Kumar y K. P. Ray, "Broadband Microstrip Antennas", vol. 13. London: Artech House, 2002, pp. 1-4, 13, 29-32,
- [7] A. Sb, A. Rufai, y A. M., "Review of Feeding Techniques for Microstrip Patch Antenna", *IJCA*, vol. 178, n.º 27, pp. 39-43, jun. 2019, doi: 10.5120/ijca2019919010.
- [8] A. Kumar, J. Kaur, y S. Rajinder, "Performance Analysis of Different Feeding Techniques", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 3, n.º 3, p. 7.
- [9] A. Hernández, "Diseño, simulación y comparación de antenas microcintas a una frecuencia de 2.4 GHz", Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2015, pp. 20-22.
- [10] J. Hernández, "Teoría de líneas de transmisión e ingeniería de microondas". Mexicali, Baja California: Tomás Di Bella, 1999.
- [11] S. Bhunia, "Microstrip Patch Antenna Design, A Novel Approach". Deutschland, Germany: LAP LAMBERT, 2014.
- [12] D. S. Bhunia, "Microstrip Patch Antenna's Limitation and Some Remedies", p. 2.
- [13] D. Orban y G. J. K. Moernaut, "The Basics of Patch Antennas", p. 20, 2009.
- [14] johnatan giraldo chavarria, "Antenas parche expocion labo", 17:39:29 UTC, Accedido: mar. 08, 2020. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/johnatangiraldochavarria/antenas-parche-expocion-labo>.
- [15] A. Kumar y N. Kumar, "Design of Microstrip Patch Antenna for High Gain & Directivity at 3.5 GHz by Simulation studies using ADS", 2018, doi: 10.14445/22315381/ijett-v55p201.
- [16] U. A. de B. D. de T. i E. de Sistemas, "Antenas microstrip con polarización circular para sistemas de posicionamiento por satélite y aplicaciones RFID", p. 46.
- [17] D. C. Nascimento y J. C. da S. Lacava, "Probe-Fed linearly-polarized electrically-equivalent microstrip antennas on FR4 substrates", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 13, n.º 1, pp. 55-66, jun. 2014, doi: 10.1590/S2179-10742014000100005.
- [18] S. Jensen, "Microstrip Patch Antenna", Northern Arizona University, 2010.

- [19] K. F. Lee, K. M. Luk, y H. W. Lai, *Microstrip Patch Antennas*, Segunda. World Scientific, 2017.
- [20] L. Josefsson y P. Persson, "Conformal Array Antenna Theory and Design". Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [21] K.-L. Wong, "Design of nonplanar microstrip antennas and transmission lines", vol. 1. United States of America: John Wiley & Sons, 1999.
- [22] Z.-Q. Liu, Y.-S. Zhang, Z. Qian, Z. P. Han, y W. Ni, "A Novel Broad Beamwidth Conformal Antenna on Unmanned Aerial Vehicle", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 196-199, feb. 2012, doi: 10.1109/LAWP.2012.2187321.
- [23] M. Kanno, T. Hashimura, T. Katada, M. Sato, A. Suzuk, y K. Fukutani, "Digital beam forming for conformal active array antenna", *Proceedings of International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, oct. 1996, doi: 0-7803-3232-6.
- [24] J. de Mingo, C. Roncal, y P. L. Carro, "3-D Conformal Spiral Antenna on Elliptical Cylinder Surfaces for Automotive Applications", *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 148-151, 2012, doi: 10.1109/LAWP.2012.2184254.
- [25] Md. S. Mahmud y S. Dey, "Design and performance analysis of a compact and conformal super wide band textile antenna for wearable body area applications", en *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Prague, Czech Republic, mar. 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/EuCAP.2012.6206709.
- [26] Z. Wang, L. Zhang, Y. Bayram, y J. L. Volakis, "Embroidered Conductive Fibers on Polymer Composite for Conformal Antennas", *IEEE Transactions on Antennas And Propagation*, vol. 30, pp. 4141-4147, jul. 2012, doi: 10.1109/TAP.2012.2207055.
- [27] J.-P. Geng, J. Li, R.-H. Jin, S. Ye, X. Liang, y M. Li, "The development of curved microstrip antenna with defected ground structure", *PIER*, vol. 98, pp. 53-73, 2009, doi: 10.2528/PIER09081905.
- [28] G. Caille ; E. Vourch ; M.J. Martin ; J.R. Mosig ; M. Polegre, "Conformal array antenna for observation platforms in low Earth orbit", *EEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 4, pp. 103-104, jun. 2002, doi: 10.1109/MAP.2002.1037015.
- [29] S.-P. Gao, B. Wang, H. Zhao, W.-J. Zhao, y C. E. Png, "Installed Radiation Pattern of Patch Antennas: Prediction based on a novel equivalent model.", *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 57, n.º 3, pp. 81-94, jun. 2015, doi: 10.1109/MAP.2015.2437275.
- [30] J. J. Adams *et al.*, "Conformal Printing of Electrically Small Antennas on Three-Dimensional Surfaces", *Adv. Mater.*, vol. 23, n.º 11, pp. 1335-1340, mar. 2011, doi: 10.1002/adma.201003734.
- [31] M. del C. Redondo, "Analysis of Conformal Antennas for avionics Applications", Tesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2007, pp. 1-4, 25.
- [32] L. Fourtignon, "3D conformal antennas for radar applications", p. 239.
- [33] A. Subbiah, B. Ravi.K, G.S.Darwino, Harishankar.R, Jitha.R, y J. Kumar, *Design and Studies on Non-planar Conformal Patch Antennas for Air-borne Vehicles*. 2009.
- [34] L. I. Balderas, A. Reyna, M. A. Panduro, C. Del Río, y A. Gutiérrez, "Low-Profile Conformal UWB Antenna for UAV Applications", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127486-127494, sep. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2939511.

- [35] P. Castro, “Estudio paramétrico y simulación dinámica de fluidos computacionales (CFD) de los efectos de integración aerodinámicos entre el sistema de propulsión y fuselaje para un vehículo aéreo no tripulado (UAV) utilizado en agricultura”, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2018.
- [36] “HP-FP58TS832C-Manual.pdf”. Accedido: jul. 27, 2020. [Online]. Available: https://hyperion-world.com/download_files/manuals/HP-FP58TS832C-Manual.pdf?__cf_chl_jschl_tk__=d766eb06f52fc1783f27ce5d87b6dab952fce0-1595894285-0-Ab6NJ7pxPKm6vmoL5-dyky1RpL7I4aABZId2SkUJTnhC9ynPHH-pp8RIqcrReBoIXft6-28VHmb0h6ZwV2pD6ndpbU0GatEbvX7QL2cE4-gUpZOculsx6tnW-vqU3WO8f5UK33GQ6uecFLPCTkrgb04_JQAnNoYbnjFNV1xZdZvluDOPyZnJvAoAm1ONxZ134OQPqSGTRq0X_pGuflu6WDUsIEEVkRnZmmBaDVA5Fw5BZWWZAaOa8xvvv7MFXKTAusRAQGJ3g35GyMI3p0CIsqrBKD60Ysli6R230W18RmhGhZF-zXdfG1AFd-hTjY6jZ6cBbRndf2sdi4AnyXlk7I61qyURw7AwsF8KAIPM0qQzn6rDWOjZu2x71q6B6aZBybSDci3_LbnvnSujg8eT9nE.
- [37] A. M. C. Ñañañay, “Análisis y verificación técnica de la calidad de la radiodifusión en frecuencia modulada en la ciudad de Riobamba; recomendaciones para su mejoramiento”, Escuela Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2013.
- [38] “RogersULTRALAM.pdf”. Accedido: feb. 07, 2020. [Online]. Available: https://www.midwestpcb.com/data_sheets/RogersULTRALAM.pdf.
- [39] D. Filonov, S. Kolen, A. Shmidt, Y. Shacham-Diamand, A. Boag, y P. Ginzburg, “Volumetric 3D-Printed Antennas, Manufactured via Selective Polymer Metallization”, *Phys. Status Solidi RRL*, vol. 13, n.º 6, p. pssr.201800668, jun. 2019, doi: 10.1002/pssr.201800668.
- [40] “Graphene permite antenas NFC totalmente flexibles | Noticias de grafeno | Nave insignia de grafeno”. <https://graphene-flagship.eu:443/graphene-enables-fully-flexible-nfc-antennas> (accedido feb. 16, 2020).
- [41] admin, “The cons and pros of using Flexible PCBs design”, *Embedds*, mar. 05, 2020. <https://embedds.com/the-cons-and-pros-of-using-flexible-pcb-design/> (accedido jun. 22, 2020).
- [42] S. Zhang, C. C. Njoku, W. G. Whittow, y J. C. Vardaxoglou, “Novel 3D printed synthetic dielectric substrates”, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 57, n.º 10, pp. 2344-2346, oct. 2015, doi: 10.1002/mop.29324.
- [43] N. Abdul Malek, A. Mohd Ramly, A. Sidek, y S. Yasmin Mohamad, “Characterization of Acrylonitrile Butadiene Styrene for 3D Printed Patch Antenna”, *JEECS*, vol. 6, n.º 1, p. 116, abr. 2017, doi: 10.11591/ijeecs.v6.i1.pp116-123.
- [44] M. Mirzaee, S. Noghianian, L. Wiest, y I. Chang, “Developing Flexible 3D Printed Antenna Using Conductive ABS Materials”, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, pp. 1308-1309, jul. 2015, doi: 10.1109/APS.2015.7305043.
- [45] “HFSSv10UserGuide.pdf”. Accedido: feb. 07, 2020. [Online]. Available: <http://anlage.umd.edu/HFSSv10UserGuide.pdf>.
- [46] O. Mrabet, “High Frequency Structure Simulator (HFSS) Tutorial”, Accedido: mar. 09, 2020. [Online]. Available: https://www.academia.edu/3356546/High_Frequency_Structure_Simulator_HFSS_Tutorial.

- [47] A. Zozaya, *Protocolo de prueba de las antenas del radar LFM CW y resultados de las mediciones*. 2017.
- [48] Minh Tuan Nguyen, Byoungchul Kim, Hosung Choo, y I. Park, "Effects of ground plane size on a square microstrip patch antenna designed on a low-permittivity substrate with an air gap", en *2010 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, Lisbon, Portugal, mar. 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/IWAT.2010.5464869.

ANEXOS

ANEXO A. Simulaciones de la antena plana

ANEXO B. Datasheet sustrato PLA.

ANEXO C. Datasheet conector SMA.

ANEXO D. Mediciones parámetro S_{11} .

ANEXO E. Mediciones parámetro S_{21} .

ANEXO F. Mediciones de campo recibido.

ANEXO G. Protocolo para la estimación de la ganancia y del diagrama de radiación.

ANEXO H. Cálculo de la ganancia.

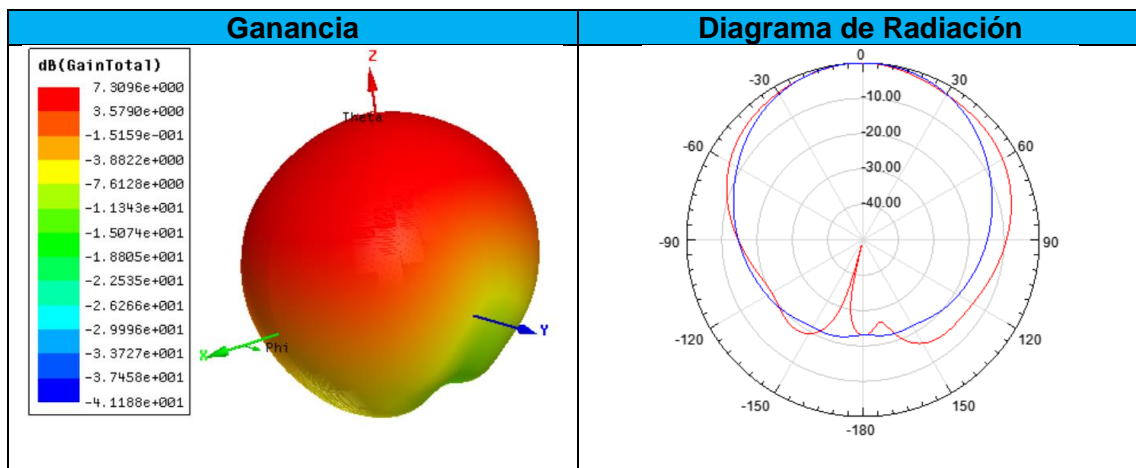
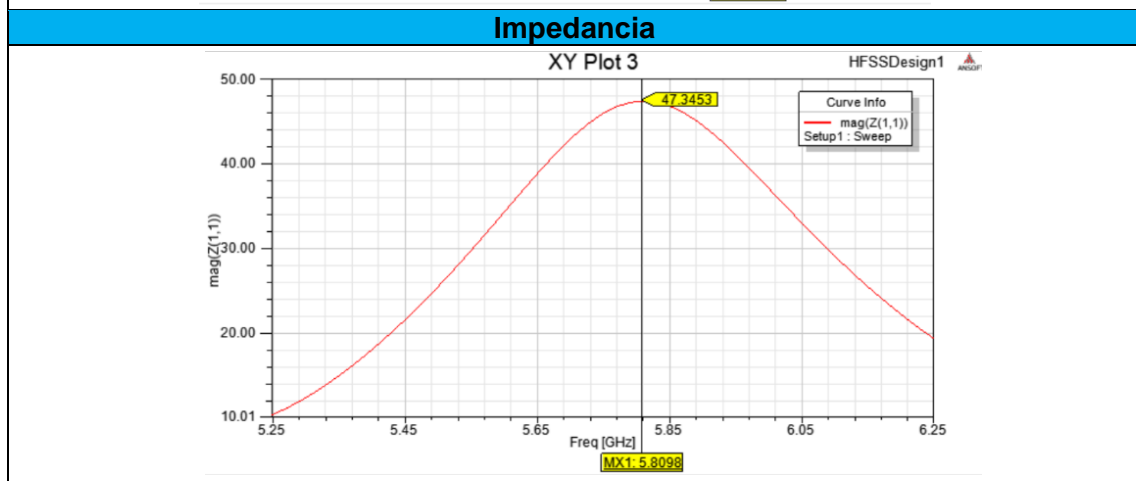
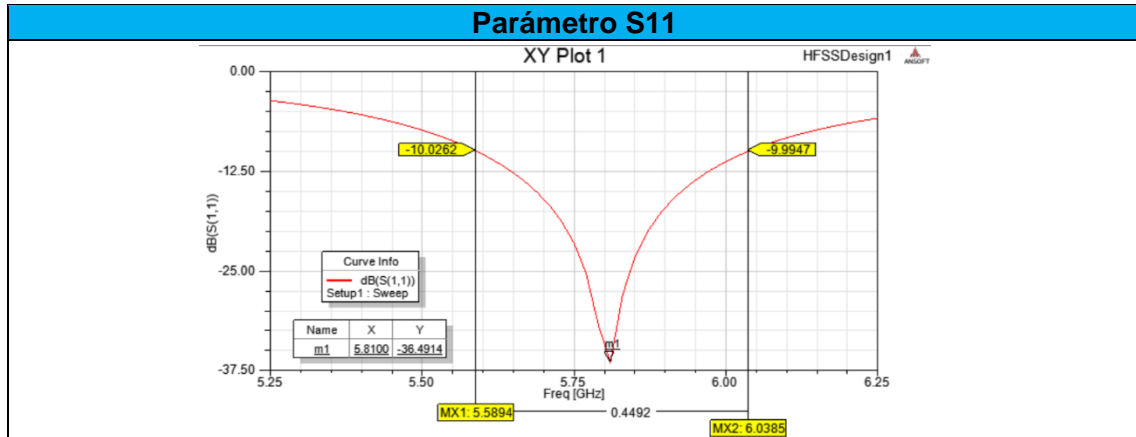
ANEXO I. Mediciones de parámetros de radiación UPV (Directividad).

ANEXO A

Simulaciones de la antena plana

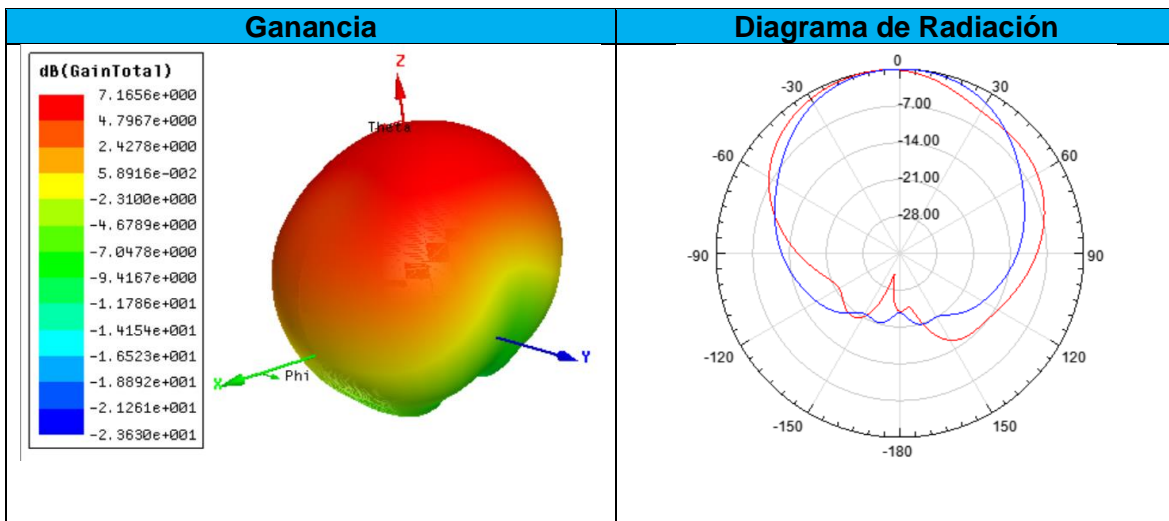
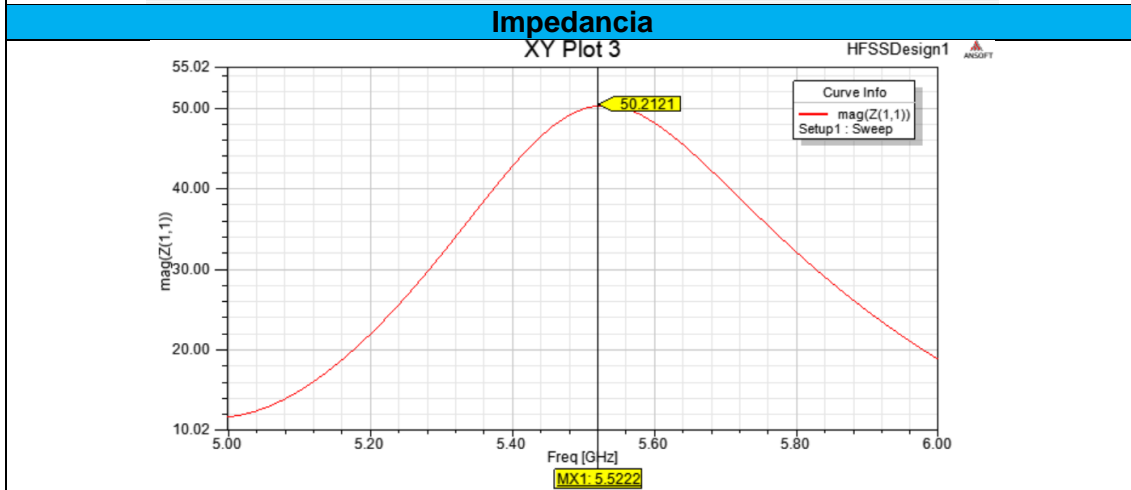
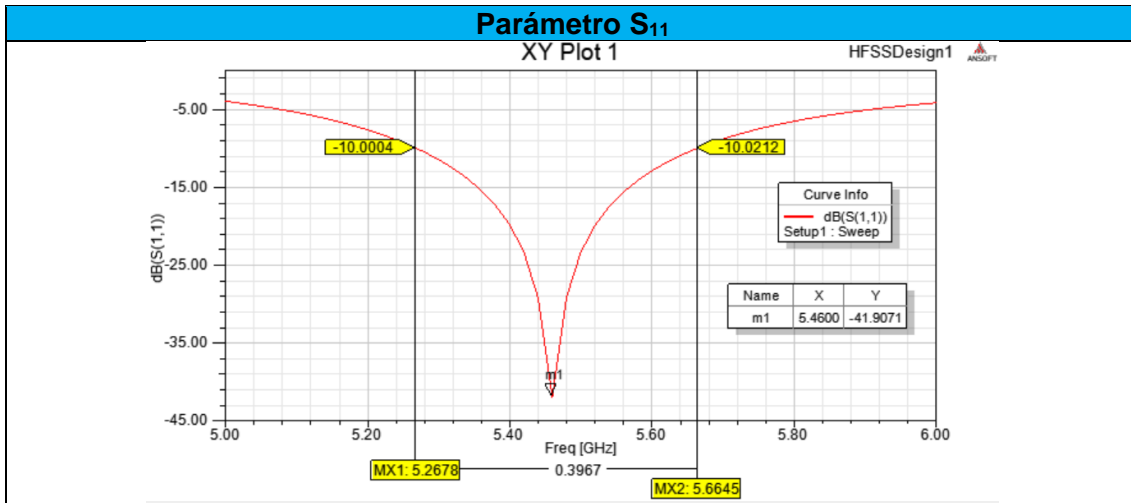
DATOS INICIALES

Frecuencia de Resonancia	Ancho de banda	Impedancia de entrada	Ganancia	Parámetro S ₁₁
5.81 GHz	449 MHz	47.32 Ω	7.31 dBi	-36.69 dB



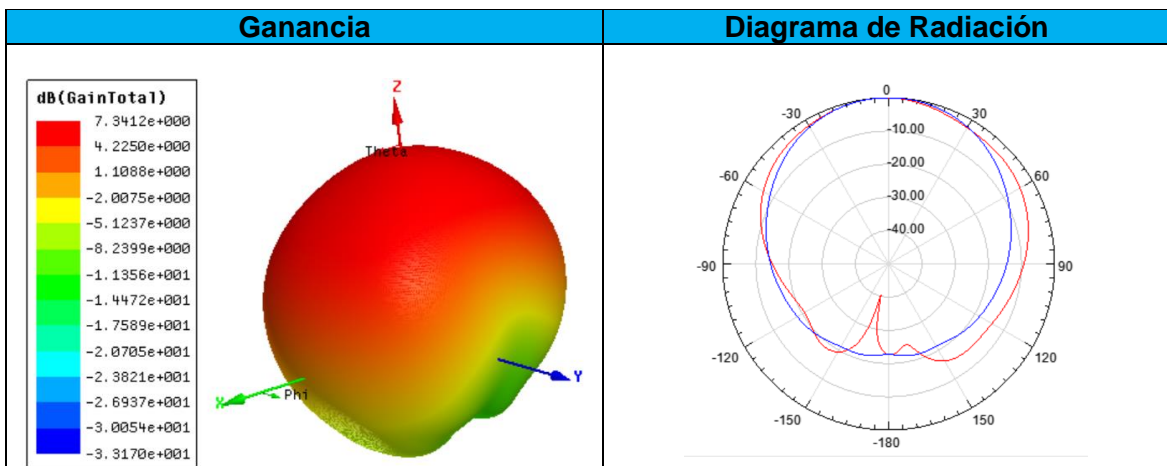
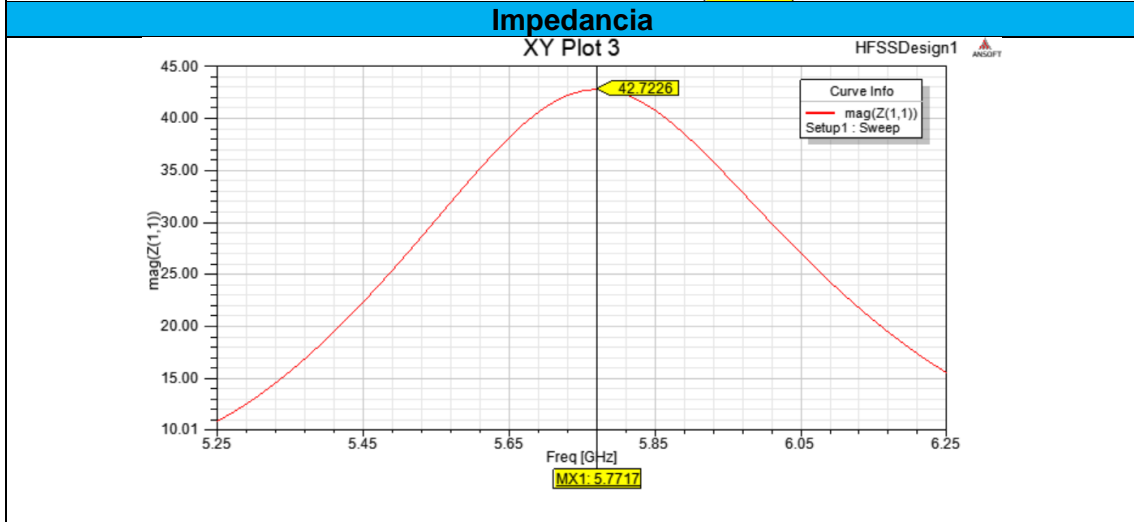
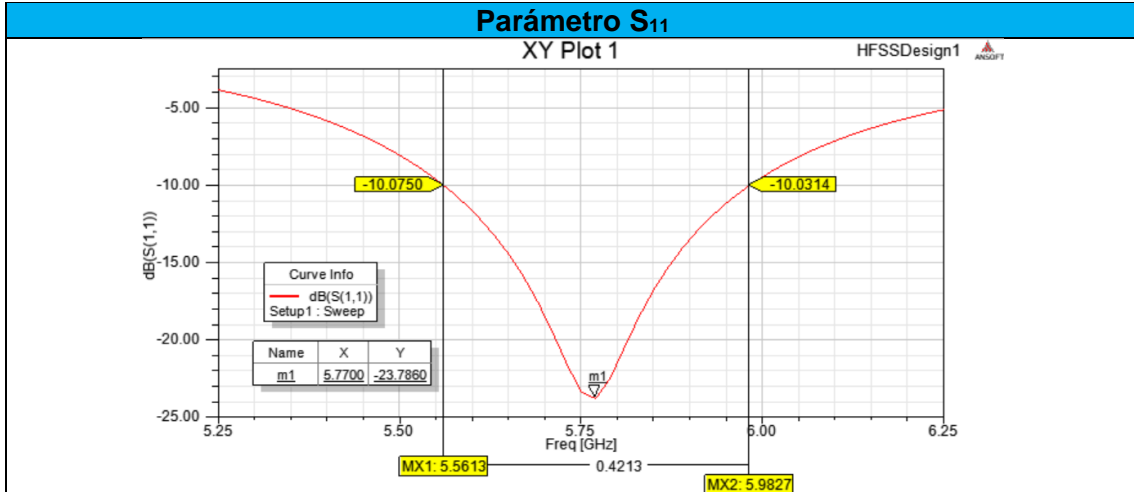
1. Variación de la longitud del parche L

Frecuencia de Resonancia	Ancho de banda	Impedancia de entrada	Ganancia	Parámetro S_{11}
5.46 GHz	397 MHz	50.21 Ω	7.17 dBi	-41.91 dB



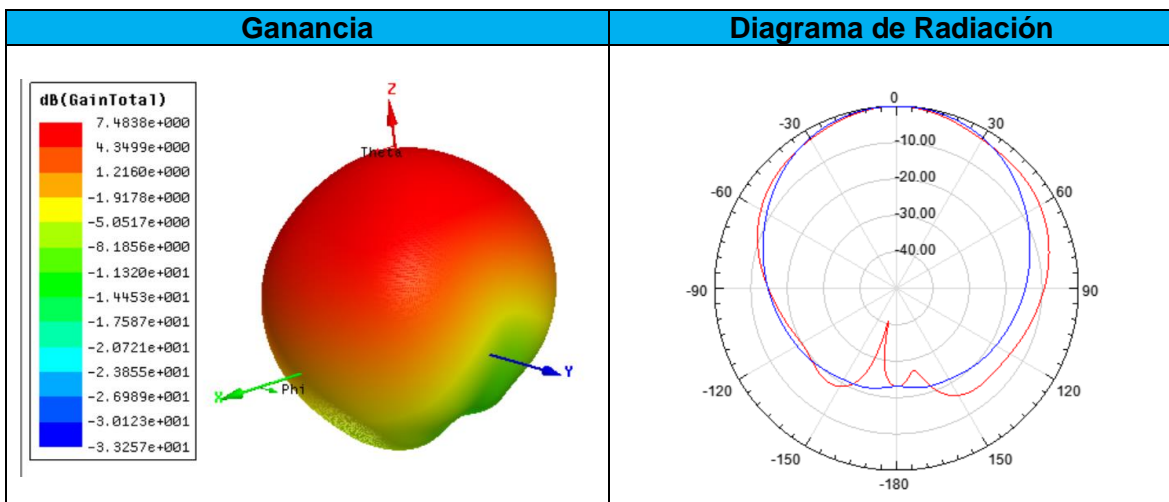
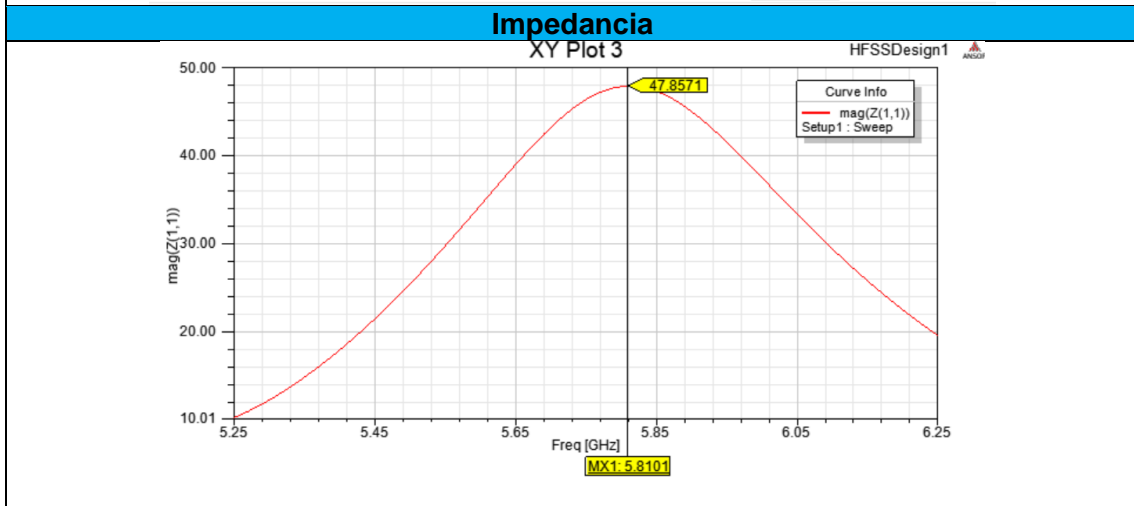
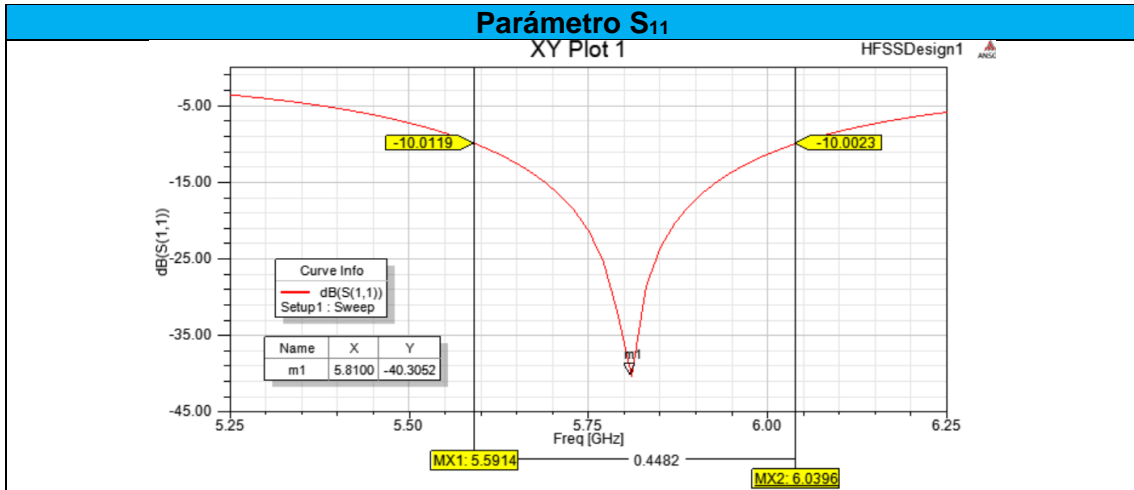
2. Variación del ancho del parche W

Frecuencia de Resonancia	Ancho de banda	Impedancia de entrada	Ganancia	Parámetro S ₁₁
5.77 GHz	421 MHz	42.72 Ω	7.34 dBi	-23.78 dB



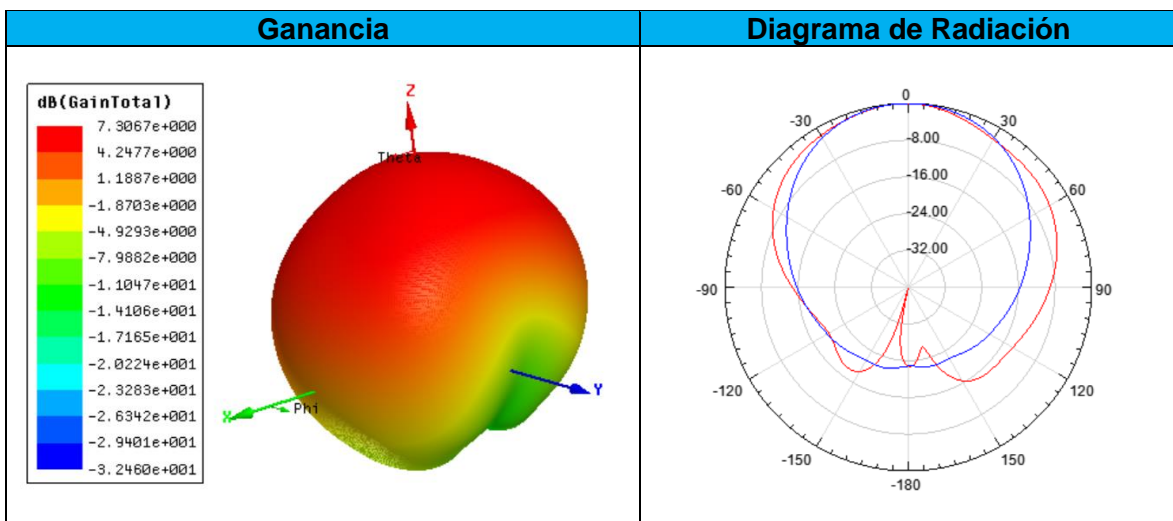
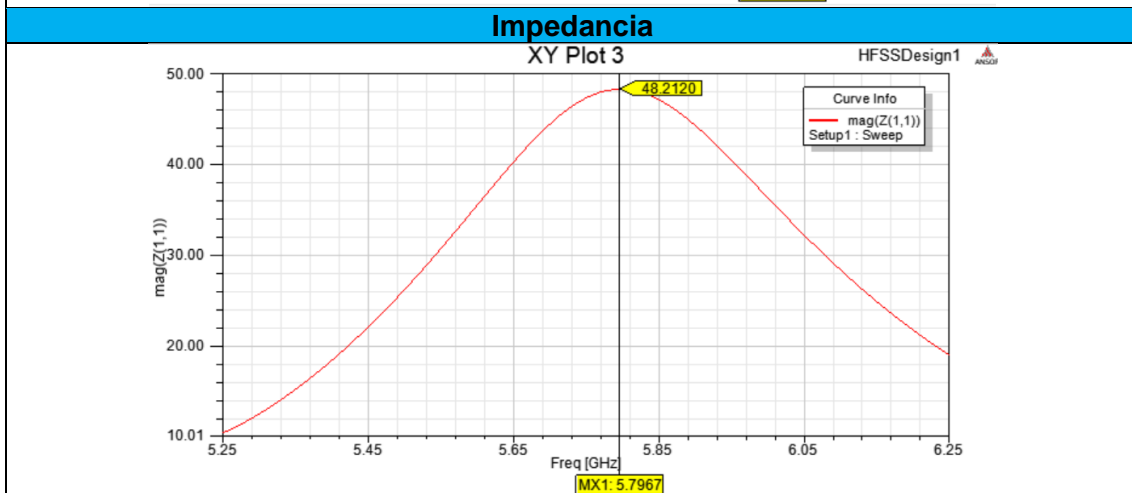
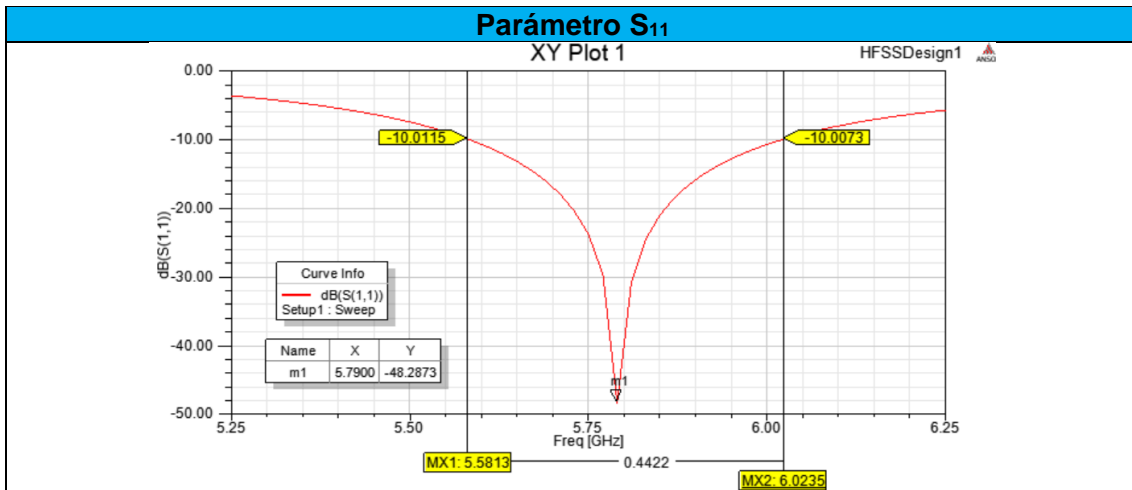
3. Variación de la longitud del plano de masa L_g

Frecuencia de Resonancia	Ancho de banda	Impedancia de entrada	Ganancia	Parámetro S_{11}
5.81 GHz	448 MHz	47.86 Ω	7.48 dBi	-40.31 dB



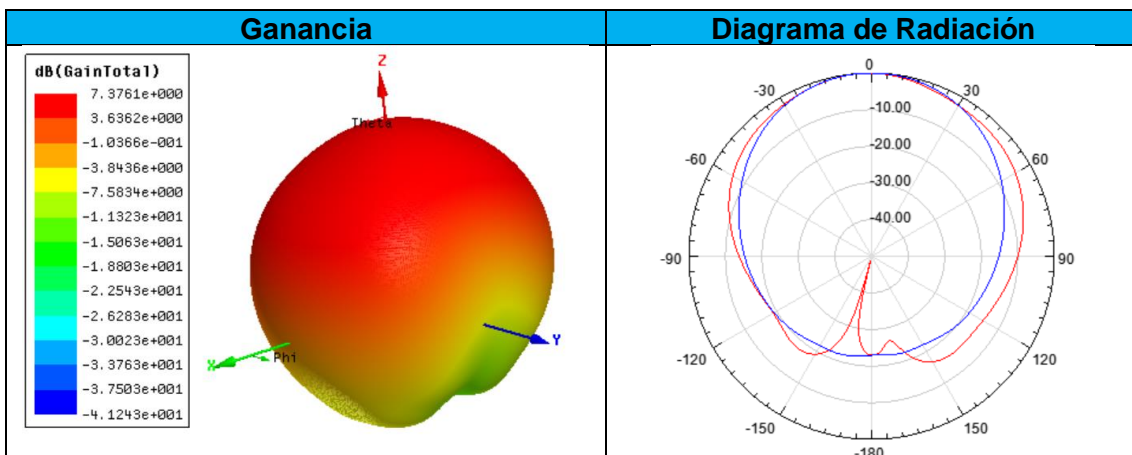
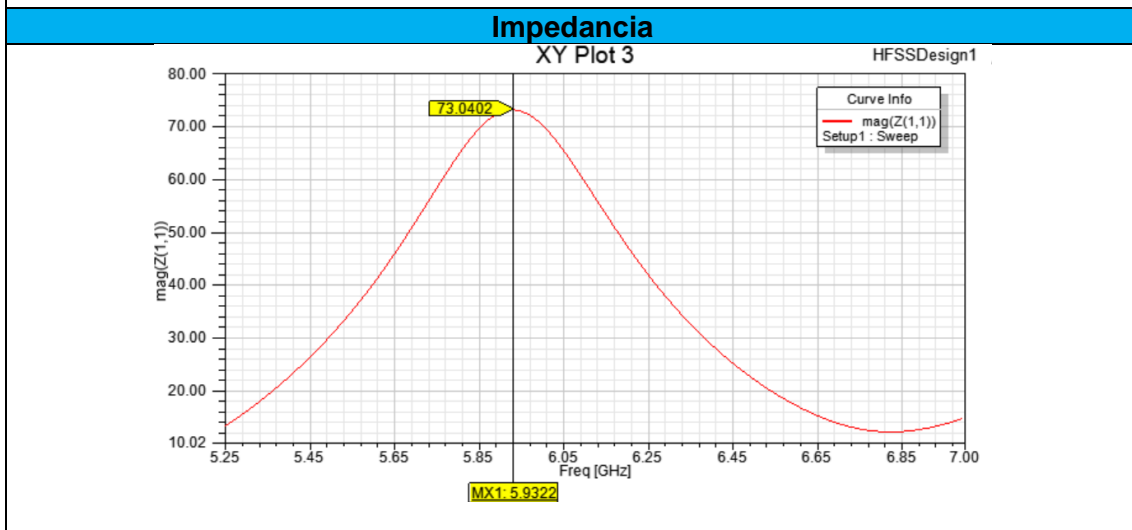
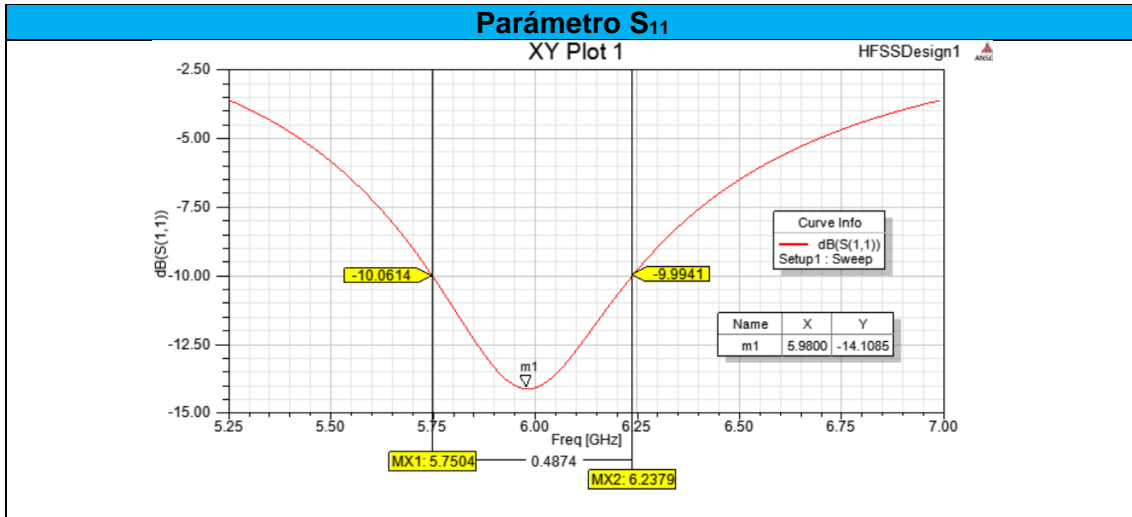
4. Variación de el ancho del plano de masa W_g

Frecuencia de Resonancia	Ancho de banda	Impedancia de entrada	Ganancia	Parámetro S_{11}
5.8 GHz	449 MHz	47.32 Ω	7.31 dBi	-36.69 dB



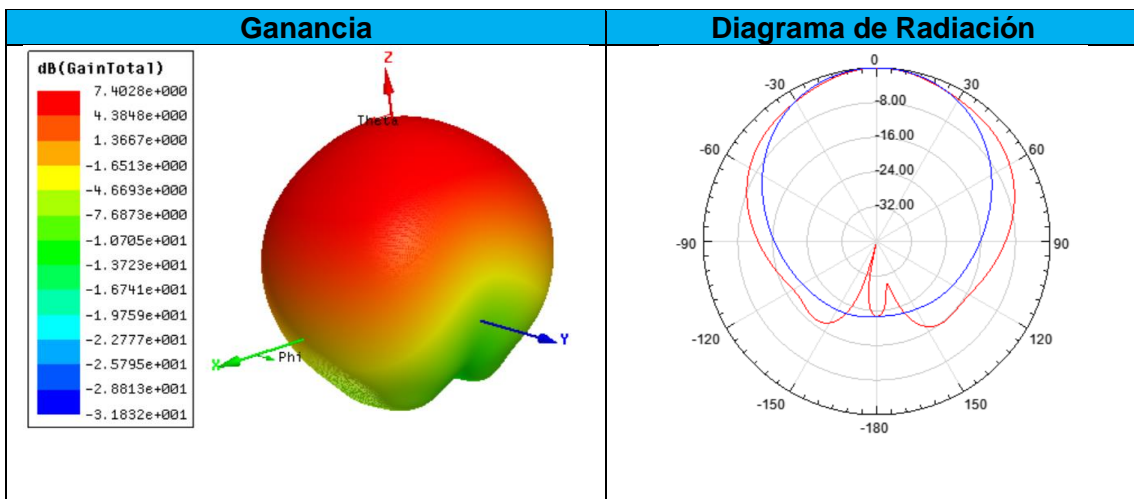
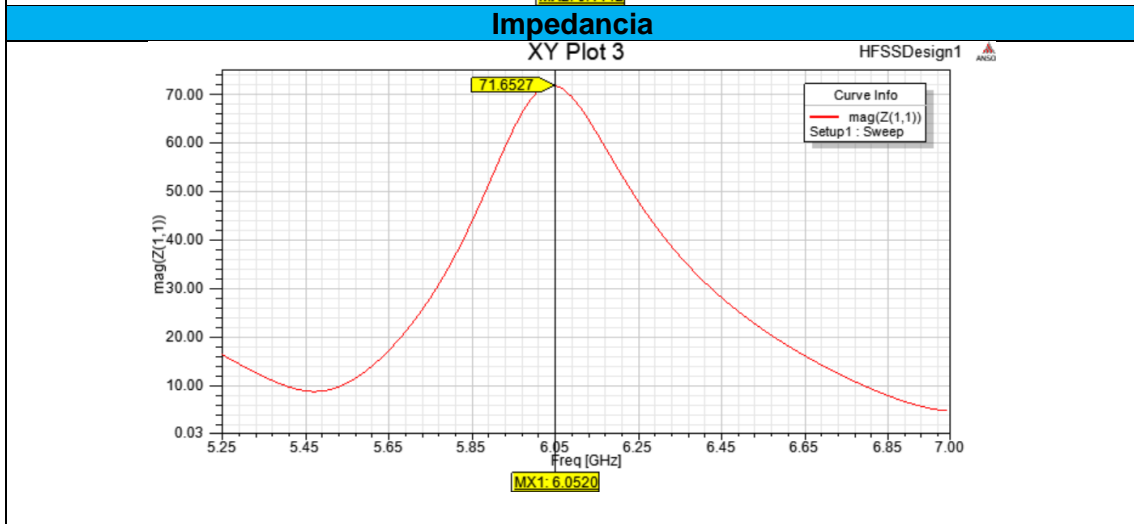
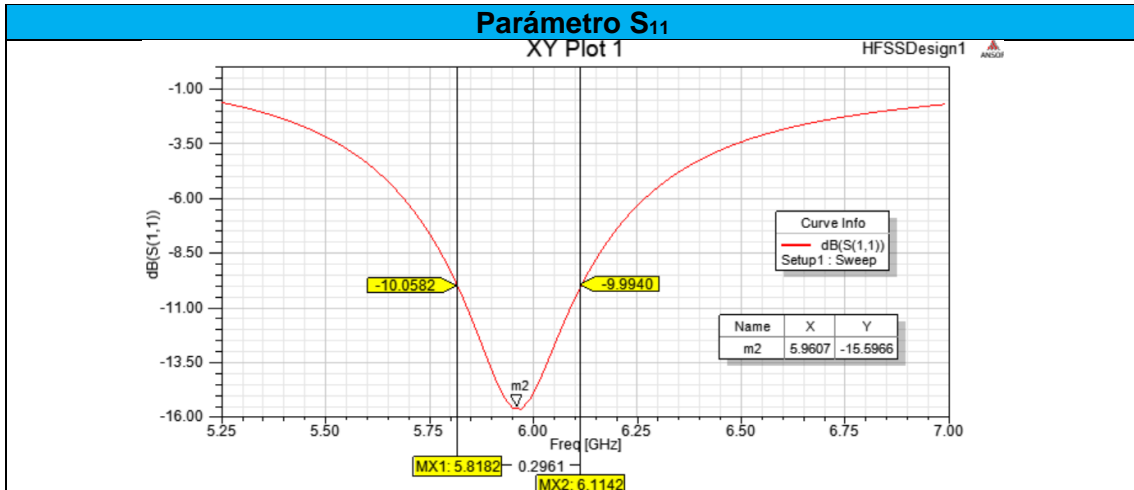
5. Variación del punto de ubicación y_0

Frecuencia de Resonancia	Ancho de banda	Impedancia de entrada	Ganancia	Parámetro S_{11}
5.98 GHz	487 MHz	73.04 Ω	7.38 dBi	-14.11 dB



6. Variación de la altura del sustrato h

Frecuencia de Resonancia	Ancho de banda	Impedancia de entrada	Ganancia	Parámetro S ₁₁
5.96 GHz	296 MHz	71.65 Ω	7.40 dBi	-15.60 dB



ANEXO B

Datasheet sustrato PLA.

Technical data sheet PLA

Ultimaker

Chemical composition

See PLA safety data sheet, section 3

Description

Ultimaker PLA filament provides a no-hassle 3D printing experience thanks to its reliability and good surface quality. Our PLA is made from organic and renewable sources. It's safe, easy to print with, and it serves a wide range of applications for both novice and advanced users

Mechanical properties*

	Injection molding		3D printing	
	Typical value	Test method	Typical value	Test method
Tensile modulus	-	-	2,346.5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Tensile stress at yield	-	-	49.5 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Tensile stress at break	-	-	45.6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at yield	-	-	3.3%	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at break	-	-	5.2%	ISO 527 (50 mm/min)
Flexural strength	-	-	103 MPa	ISO 178
Flexural modulus	-	-	3,150 MPa	ISO 178
Izod impact strength, notched (at 23 °C)	-	-	5.1 kJ/m ²	ISO 180
Charpy impact strength (at 23 °C)	-	-	-	-
Hardness	-	-	83 (Shore D)	Durometer

Electrical properties*

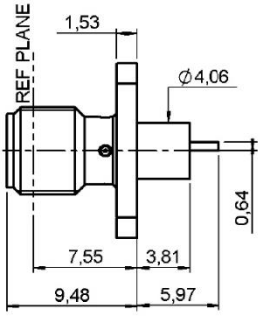
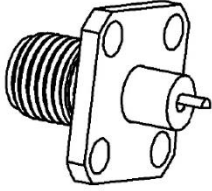

	Typical value	Test method	Typical value	Test method
Dissipation factor (at 1 MHz)	-	-	0.008	ASTM D150-11
Dielectric constant (at 1 MHz)	-	-	2.70	ASTM D150-11

Thermal properties

	Typical value	Test method
Melt mass-flow rate (MFR)	6.09 g/10 min	ISO 1133 (210 °C, 2.16 kg)
Heat detection (at 0.455 MPa)	-	-
Heat deflection (at 1.82 MPa)	-	-
Vicat softening temperature	-	-
Glass transition	~ 60 °C	ISO 11357
Coefficient of thermal expansion	-	-
Melting temperature	45 - 160 °C	ISO 11357
Thermal shrinkage	-	-

ANEXO C

Datasheet conector SMA.

TECHNICAL DATA SHEET		2 / 2	
SQUARE FLANGE JACK RECEPTACLE		R125.496.100 Series : SMA	
PACKAGING		SPECIFICATION	
Standard	Unit	Other	
100	'W' option	Contact us	
ELECTRICAL CHARACTERISTICS		ENVIRONMENTAL	
Impedance	50 Ω	Operating temperature	-65/+165 ° C
Frequency	0-18 GHz	Hermetic seal	NA Atm.cm3/s
VSWR	1.04 + 0.004 x F(GHz) Maxi	Panel leakage	NA
Insertion loss	0.05* √F(GHz) dB Maxi		
RF leakage	-(100 - F(GHz)) dB Maxi		
Voltage rating	500 Veff Maxi		
Dielectric withstanding voltage	1000 Veff mini		
Insulation resistance	5000 MΩ mini		
MECHANICAL CHARACTERISTICS		OTHERS CHARACTERISTICS	
Center contact retention		Assembly instruction	
Axial force – Mating end	27 N mini	Others :	
Axial force – Opposite end	27 N mini	* Coaxial Transmission Line Only	
Torque	2.8 N.cm mini		
Recommended torque			
Mating	NA N.cm		
Panel nut	NA N.cm		
Mating life	500 Cycles mini		
Weight	2.540 g		
			
			
COMPONENTS	MATERIALS	PLATINGS (µm)	
BODY	STAINLESS STEEL	GOLD 0.5 OVER NICKEL 2	
CENTER CONTACT	BERYLLIUM COPPER	GOLD 1.3 OVER NICKEL 2	
OUTER CONTACT	-	-	
INSULATOR	PTFE	-	
GASKET	-	-	
OTHERS PARTS	-	-	
-	-	-	
-	-	-	
Issue : 0212 B In the effort to improve our products, we reserve the right to make changes judged to be necessary.			

ANEXO D

Mediciones parámetro S11

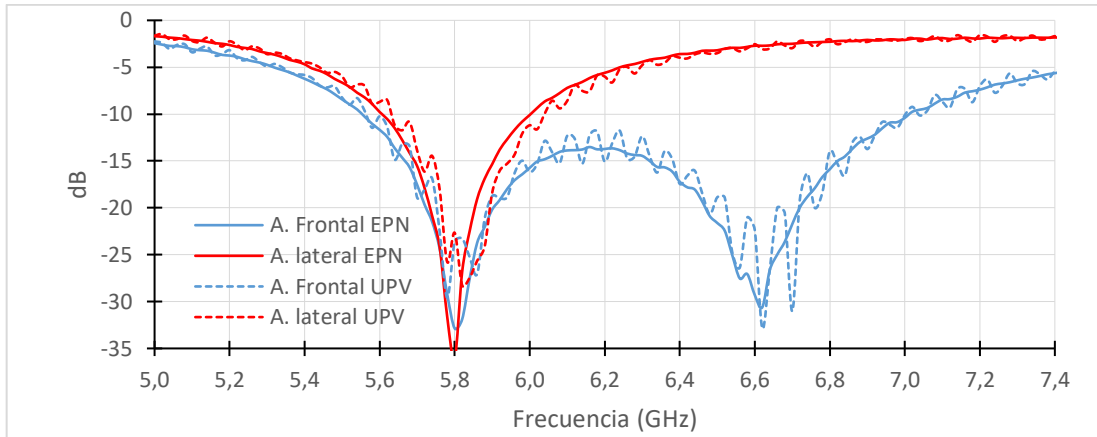


Figura D1. Mediciones parámetro S_{11} en la cámara anecoica (EPN y UPV)

Frecuencia (GHz)	Mediciones EPN		Mediciones UPV	
	A. Frontal S11 (dB)	A. Lateral S11 (dB)	A. Frontal S11 (dB)	A. Lateral S11 (dB)
5,00	-2,439003	-1,691699	-2,242445	-1,638647
5,02	-2,587982	-1,746828	-2,402702	-1,468108
5,04	-2,726501	-1,838407	-3,050883	-2,014477
5,06	-2,747617	-1,897284	-2,614907	-2,000643
5,08	-2,865194	-1,996611	-2,539598	-1,623664
5,10	-3,082926	-2,093785	-3,406820	-2,199454
5,12	-3,182769	-2,165332	-3,032756	-2,328120
5,14	-3,240000	-2,285969	-2,792686	-1,842449
5,16	-3,447073	-2,430492	-3,736274	-2,386302
5,18	-3,682756	-2,495859	-3,604484	-2,784035
5,20	-3,755416	-2,632151	-3,181610	-2,231985
5,22	-3,892480	-2,828033	-4,038042	-2,618537
5,24	-4,146706	-2,938286	-4,266201	-3,181253
5,26	-4,347478	-3,057788	-3,894331	-2,775687
5,28	-4,506910	-3,307844	-4,467042	-3,003936
5,30	-4,740072	-3,489776	-4,930942	-3,605040
5,32	-5,044486	-3,662209	-4,648570	-3,442383
5,34	-5,291494	-3,911524	-4,999110	-3,590308
5,36	-5,554157	-4,214362	-5,551046	-4,042645
5,38	-5,892343	-4,408235	-5,742795	-4,268601
5,40	-6,232633	-4,687234	-5,832389	-4,457147
5,42	-6,587642	-5,131852	-6,161126	-4,614942
5,44	-6,988673	-5,375835	-6,944844	-5,019261
5,46	-7,361304	-5,748459	-7,151835	-5,599695
5,48	-7,876382	-6,244446	-7,034291	-5,489052

5,50	-8,435417	-6,642963	-8,240209	-5,975882
5,52	-8,969909	-7,104959	-9,000492	-7,142854
5,54	-9,505982	-7,714498	-8,293106	-6,849162
5,56	-10,272746	-8,223595	-9,648363	-6,991033
5,58	-11,036952	-8,919325	-11,463409	-8,908645
5,60	-11,677765	-9,774197	-10,240951	-8,698168
5,62	-12,424977	-10,521218	-11,359218	-8,487717
5,64	-13,631378	-11,494216	-14,858360	-11,156355
5,66	-14,643439	-12,761799	-13,179433	-11,726493
5,68	-15,687946	-14,157676	-13,450714	-10,849545
5,70	-17,545293	-15,544800	-18,903474	-13,889009
5,72	-19,682201	-17,918338	-18,016209	-16,143834
5,74	-21,494688	-20,874367	-16,866516	-14,460766
5,76	-24,366929	-24,183087	-22,545388	-18,043289
5,78	-29,188335	-31,568771	-29,589917	-25,759870
5,80	-32,866638	-36,104453	-23,602422	-22,666268
5,82	-31,890997	-26,816533	-23,250044	-28,273735
5,84	-27,537636	-22,481607	-25,262226	-27,440949
5,86	-23,729463	-19,058405	-27,059011	-25,646960
5,88	-22,045677	-16,887823	-21,152799	-24,139736
5,90	-20,187025	-15,349138	-18,752604	-18,407596
5,92	-19,172673	-13,796973	-18,990393	-16,046163
5,94	-17,987133	-12,683105	-18,866024	-15,279130
5,96	-17,041522	-11,665672	-16,264439	-14,300048
5,98	-16,428141	-10,807474	-14,969560	-12,091475
6,00	-15,731423	-10,098938	-16,191462	-11,192157
6,02	-15,053081	-9,346678	-15,308081	-11,613403
6,04	-14,817516	-8,655523	-12,859626	-9,957383
6,06	-14,451083	-8,261881	-14,084674	-8,574647
6,08	-14,031271	-7,754618	-15,222581	-9,394559
6,10	-13,877017	-7,205381	-12,312159	-8,591772
6,12	-13,845060	-6,886360	-12,623933	-6,902020
6,14	-13,778025	-6,571190	-15,300192	-7,514427
6,16	-13,516114	-6,151264	-12,239931	-7,553532
6,18	-13,761180	-5,828629	-11,877784	-5,857222
6,20	-13,720663	-5,597110	-15,072383	-5,995883
6,22	-13,652832	-5,336013	-13,092500	-6,622932
6,24	-13,846146	-5,014079	-11,761582	-5,218134
6,26	-14,211321	-4,801129	-14,730138	-4,971096
6,28	-14,366140	-4,653504	-14,518956	-5,673623
6,30	-14,455439	-4,429319	-12,357328	-4,772253
6,32	-15,001444	-4,206709	-14,488074	-4,242683
6,34	-15,645766	-4,077880	-16,233076	-4,737325
6,36	-15,685835	-3,982766	-13,944734	-4,515632
6,38	-16,136603	-3,758502	-14,794335	-3,834185

6,40	-17,215997	-3,595803	-17,438579	-3,980084
6,42	-17,803495	-3,582125	-16,590212	-4,063416
6,44	-18,048922	-3,457467	-16,035200	-3,635420
6,46	-19,329712	-3,248162	-18,457998	-3,430196
6,48	-20,877725	-3,228873	-20,686546	-3,564958
6,50	-21,612412	-3,194207	-18,876517	-3,499791
6,52	-22,446721	-3,021200	-18,906853	-3,057697
6,54	-25,039877	-2,926416	-24,732691	-2,945714
6,56	-27,528548	-2,936843	-26,384824	-3,304409
6,58	-27,064617	-2,825995	-21,028575	-2,971702
6,60	-29,295925	-2,704027	-22,361269	-2,541532
6,62	-30,616106	-2,712216	-32,844129	-3,073098
6,64	-26,649399	-2,676165	-26,614288	-2,997051
6,66	-24,984149	-2,552668	-19,985386	-2,250381
6,68	-23,628440	-2,513426	-20,563194	-2,681523
6,70	-21,736525	-2,500594	-31,040095	-2,961838
6,72	-19,976028	-2,418481	-19,180863	-2,202359
6,74	-18,830245	-2,362106	-16,309692	-2,311392
6,76	-17,904416	-2,335478	-19,999607	-2,824801
6,78	-16,719101	-2,305110	-18,391221	-2,277661
6,80	-15,888270	-2,282436	-13,976941	-2,025913
6,82	-15,022960	-2,211137	-15,256002	-2,540351
6,84	-14,531136	-2,184786	-16,562073	-2,321245
6,86	-13,719379	-2,214845	-13,068250	-2,023587
6,88	-12,978562	-2,159626	-12,400428	-2,242288
6,90	-12,611712	-2,082918	-13,730160	-2,298245
6,92	-12,204632	-2,146434	-12,282169	-2,051584
6,94	-11,507649	-2,127622	-10,841810	-2,037954
6,96	-10,919140	-2,022312	-11,140932	-2,129459
6,98	-10,856947	-2,057872	-11,465691	-2,165014
7,00	-10,401109	-2,088950	-10,112464	-1,971712
7,02	-9,749530	-1,961116	-9,228548	-1,889125
7,04	-9,531210	-1,946949	-10,145979	-2,205627
7,06	-9,349740	-2,054602	-9,621294	-2,021404
7,08	-8,876945	-1,935311	-7,962992	-1,682669
7,10	-8,442708	-1,885638	-8,668334	-2,173800
7,12	-8,401819	-1,985916	-9,313203	-2,130358
7,14	-8,143916	-1,947036	-7,321359	-1,583704
7,16	-7,713537	-1,847137	-7,301562	-1,962605
7,18	-7,562972	-1,925504	-8,731326	-2,287526
7,20	-7,393001	-1,943277	-7,012303	-1,578713
7,22	-7,145759	-1,852215	-6,308729	-1,725501
7,24	-6,852355	-1,883647	-7,718778	-2,288865
7,26	-6,732517	-1,911575	-6,980928	-1,701622
7,28	-6,600529	-1,860263	-5,654206	-1,637413

ANEXO E

Mediciones parámetro S_{21}

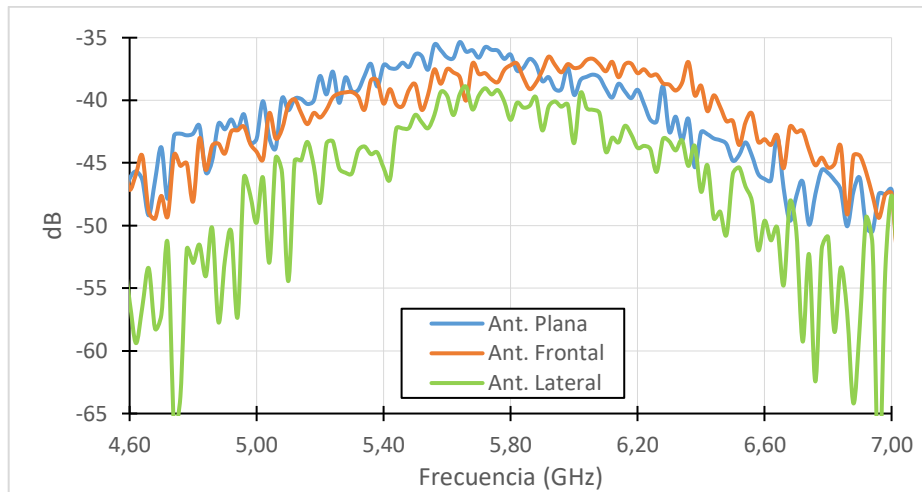


Figura E1. Mediciones parámetro S_{21} en la cámara anecoica (EPN)

	Ant. Plana	Ant. Frontal	Ant. Lateral
Frecuencia (GHz)	S_{21} (dB)	S_{21} (dB)	S_{21} (dB)
5	-43,075827	-44,099368	-49,763917
5,02	-40,066358	-44,718159	-46,165646
5,04	-42,9973	-41,018583	-52,958789
5,06	-43,824268	-43,048358	-44,609119
5,08	-39,84899	-42,294569	-45,777051
5,1	-40,792585	-40,366965	-54,429406
5,12	-39,870167	-39,917669	-44,809955
5,14	-39,887422	-40,998503	-44,799612
5,16	-40,290729	-41,899494	-43,319643
5,18	-40,026222	-41,006149	-45,223149
5,2	-38,053126	-41,370982	-48,177256
5,22	-39,524856	-40,745764	-43,454843
5,24	-37,70791	-39,766856	-43,264265
5,26	-40,20247	-39,463172	-45,418497
5,28	-38,166995	-39,365027	-45,77537
5,3	-39,254118	-39,341955	-45,833638
5,32	-39,171331	-39,715295	-44,015002
5,34	-38,04162	-40,746511	-43,684608
5,36	-37,09103	-38,416218	-44,292579
5,38	-38,894712	-38,430671	-44,159949
5,4	-37,188104	-40,264516	-45,382278
5,42	-37,425693	-39,103355	-46,302024
5,44	-37,452512	-40,331258	-42,245947
5,46	-36,997666	-40,445187	-42,247792

5,48	-37,332058	-39,158281	-42,203085
5,5	-36,332355	-38,733665	-41,155304
5,52	-36,464638	-40,761413	-41,746984
5,54	-37,54918	-39,55334	-42,22556
5,56	-35,558911	-37,527285	-41,159014
5,58	-36,000671	-38,676489	-39,340615
5,6	-36,567765	-37,506211	-39,633213
5,62	-36,618558	-37,780582	-41,179146
5,64	-35,346695	-38,149262	-39,504205
5,66	-36,113274	-40,016919	-38,914231
5,68	-36,003782	-37,059603	-40,729692
5,7	-36,591989	-37,892837	-39,615742
5,72	-35,74893	-37,835051	-39,03452
5,74	-35,970469	-38,33091	-39,525313
5,76	-36,041223	-38,542047	-39,185167
5,78	-36,691742	-37,574193	-41,563203
5,8	-36,344062	-37,198005	-39,525313
5,82	-37,621724	-37,056449	-40,200297
5,84	-37,407723	-38,193012	-40,57477
5,86	-36,69452	-39,100428	-40,436352
5,88	-37,146169	-38,59968	-39,76131
5,9	-38,46683	-37,621476	-42,400325
5,92	-38,147073	-36,511543	-40,497663
5,94	-39,106646	-37,179098	-40,091906
5,96	-39,10587	-37,763314	-40,514677
5,98	-37,384933	-37,111408	-40,336626
6	-39,567375	-37,419122	-43,417015
6,02	-38,383527	-37,313972	-39,433508
6,04	-38,117093	-36,774077	-40,630474
6,06	-37,949091	-36,69495	-40,759968
6,08	-38,182852	-37,132339	-41,022599
6,1	-39,105576	-37,676815	-44,105706
6,12	-39,779996	-36,926308	-42,986662
6,14	-38,678708	-38,154226	-43,35066
6,16	-39,291083	-37,136053	-42,037999
6,18	-39,825186	-37,071703	-42,7242
6,2	-39,155836	-37,831346	-43,790062
6,22	-40,284727	-37,521525	-43,63514
6,24	-41,549949	-38,035744	-43,893001
6,26	-41,681424	-37,946294	-45,710599
6,28	-38,862159	-38,640724	-43,082547
6,3	-42,518118	-38,74953	-43,278698
6,32	-41,307528	-39,218081	-43,996538
6,34	-43,202084	-38,609753	-43,193114
6,36	-41,47777	-36,940033	-45,237326

6,38	-45,33687	-39,594595	-43,632944
6,4	-42,544536	-38,83197	-47,298974
6,42	-42,704215	-40,867171	-45,177403
6,44	-43,041507	-39,602324	-49,40416
6,46	-43,186452	-40,519112	-48,879986
6,48	-43,493373	-41,669507	-50,739539
6,5	-44,815434	-41,647493	-45,895153
6,52	-44,358345	-43,569243	-45,354853
6,54	-43,358289	-41,749438	-46,888731
6,56	-44,407426	-41,04269	-48,026869
6,58	-45,882189	-43,319311	-51,967002
6,6	-46,2725	-43,101523	-49,61007
6,62	-46,379763	-43,560968	-51,17471
6,64	-42,910007	-42,796763	-50,171014
6,66	-47,012284	-45,418974	-54,772805
6,68	-49,608678	-42,113389	-48,056531
6,7	-47,650822	-42,546502	-50,466016
6,72	-46,491284	-42,44566	-59,250978
6,74	-49,920504	-43,94195	-52,281473
6,76	-47,490513	-45,184398	-62,438579
6,78	-45,568796	-44,573125	-51,874529
6,8	-45,804328	-45,365813	-50,917657
6,82	-46,370484	-45,081766	-58,474394
6,84	-47,169225	-43,677375	-53,347694
6,86	-50,056449	-49,11366	-56,906426
6,88	-47,272434	-44,420749	-64,1927
6,9	-46,216895	-44,409666	-57,919673
6,92	-50,081811	-45,744615	-49,323597
6,94	-50,451407	-47,59413	-51,601005
6,96	-47,479499	-49,388217	-70,411155
6,98	-47,496651	-47,522211	-53,73857
7	-47,127443	-47,423768	-47,603051

ANEXO F

Mediciones de campo recibido

Theta (deg)	Antena Plana		Antena Frontal		Antena Lateral	
	Plano XZ PRX. (dB)	Plano YZ PRX. (dB)	Plano XZ PRX. (dB)	Plano YZ PRX. (dB)	Plano XZ PRX. (dB)	Plano YZ PRX. (dB)
-90	-57,61019	-54,72449	-53,62959	-55,35803	-48,16147	-51,91098
-85	-58,03379	-56,08609	-53,46885	-53,35803	-46,25686	-51,52430
-80	-57,24379	-56,96159	-50,31873	-51,88220	-48,11753	-50,82328
-75	-54,48329	-53,86989	-51,30337	-51,51080	-44,67635	-50,70291
-70	-56,69119	-57,44699	-50,83131	-51,30266	-48,20400	-50,31301
-65	-52,89289	-55,49619	-49,91858	-50,47868	-43,58318	-50,56114
-60	-52,74479	-53,17579	-48,48907	-48,98434	-45,19980	-50,25384
-55	-51,21779	-51,65889	-47,60307	-50,54541	-44,07305	-48,23403
-50	-52,28919	-50,41139	-47,62876	-49,28151	-44,73324	-47,27380
-45	-53,00839	-49,93549	-48,55233	-48,40920	-42,83769	-48,12731
-40	-50,82569	-49,45779	-47,33191	-46,92086	-43,06844	-45,49424
-35	-49,12089	-50,88789	-47,32052	-45,92188	-40,92418	-46,00562
-30	-49,00769	-48,47299	-46,05721	-46,15837	-41,01844	-44,42773
-25	-47,47909	-47,72879	-46,69456	-45,78816	-40,35166	-44,51985
-20	-47,53459	-47,79709	-46,36715	-44,73825	-39,33077	-43,49936
-15	-46,65539	-47,03189	-46,01192	-44,63422	-39,41879	-42,21749
-10	-47,53999	-45,33439	-45,40675	-44,23352	-39,38958	-42,98009
-5	-45,82129	-45,81439	-46,77042	-43,44321	-39,90537	-41,85638
0	-45,33439	-46,32299	-44,66810	-43,02789	-38,63685	-39,38049
5	-45,42329	-46,24479	-44,71732	-44,02142	-40,04084	-39,39466
10	-45,97379	-46,02809	-46,35451	-44,44464	-39,20077	-39,68901
15	-45,77719	-46,29489	-44,75952	-45,01800	-38,71814	-40,39544
20	-47,63249	-47,36419	-45,52894	-45,00121	-38,46400	-40,38147
25	-47,02459	-47,48209	-45,65481	-44,57214	-38,57924	-40,52415
30	-47,25749	-48,34109	-46,56620	-46,27066	-40,37331	-40,81137
35	-48,05549	-47,97849	-48,33158	-46,24902	-41,75165	-40,13274
40	-50,04929	-50,25319	-48,57640	-48,46390	-41,87105	-41,29190
45	-49,77489	-49,88219	-49,46098	-47,99679	-41,81398	-42,20363
50	-50,42489	-51,63359	-49,42941	-49,47355	-42,50134	-42,37968
55	-49,55399	-50,35349	-48,96644	-51,50948	-42,65046	-42,79949
60	-52,67599	-51,75539	-49,40510	-51,47318	-41,87905	-43,66743
65	-53,29889	-52,08119	-49,83507	-49,90832	-42,77088	-43,44439
70	-53,28069	-54,89279	-49,87600	-52,58118	-47,45474	-43,28515
75	-51,57159	-53,88019	-50,27126	-52,31176	-45,39846	-44,89219
80	-58,12929	-53,92919	-52,03802	-53,92473	-46,17263	-45,97831
85	-54,34449	-57,60559	-52,39263	-52,71068	-45,82036	-46,33352
90	-55,06909	-57,85439	-54,24179	-51,89066	-42,59182	-49,15958

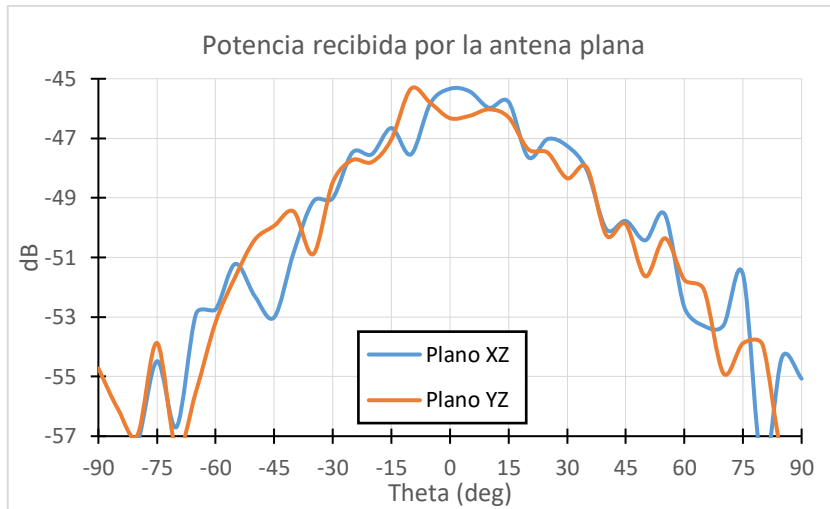


Figura F1. Diagrama de radiación medido de la antena plana (cámara anecoica EPN)

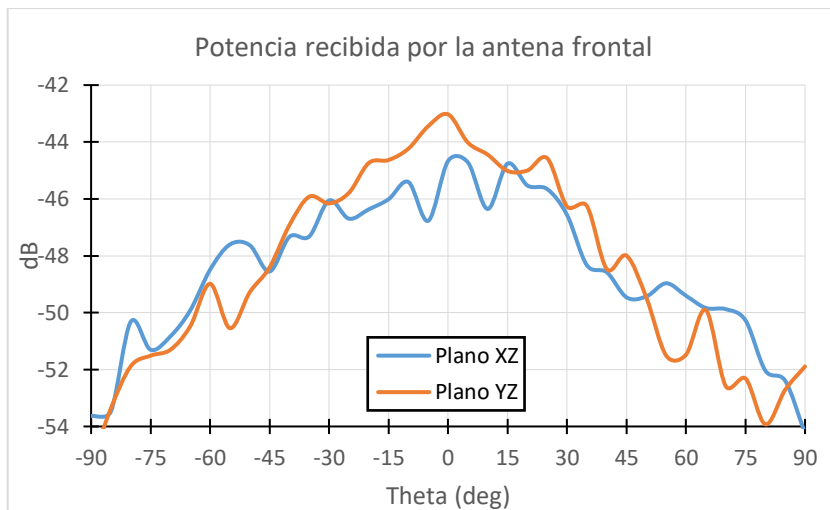


Figura F2. Diagrama de radiación medido de la antena frontal (cámara anecoica EPN)

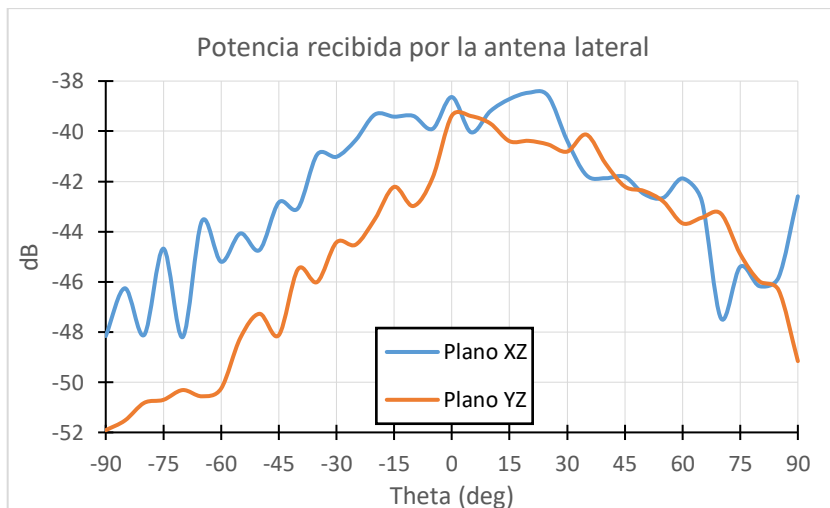


Figura F3. Diagrama de radiación medido de la antena lateral (cámara anecoica EPN)

ANEXO G

Protocolo para la estimación de la ganancia y del diagrama de radiación

A continuación, se describe brevemente el proceso seguido para efectuar las mediciones de ganancia y diagrama de radiación correspondientes a las antenas conformadas: lateral y frontal.

Para la medición de la ganancia:

- Considerando un sistema de dos antenas: transmisora y receptora de la Figura G1 se calcula la distancia mínima de separación entre ellas, para cumplir con la condición de campo lejano dado por la siguiente expresión:

$$r_{zl} > \frac{2D^2}{\lambda_0}$$

Donde D es la máxima dimensión de las antenas, λ_0 es la longitud de onda en el espacio libre. Conociendo los valores $D = 4cm$ y $\lambda_0 = 5,17cm$ y reemplazándolos en la anterior, se obtiene un valor de $r_{zl} > 6.186 cm$.

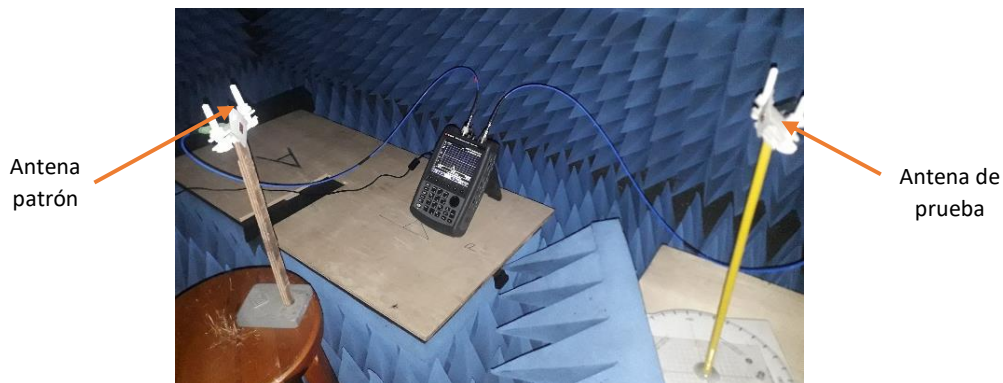


Figura G1. Mediciones parámetro S_{21} en la cámara anecoica (EPN)

- Luego, en la cámara semi-anecoica del laboratorio se mide el parámetro S_{21} con el analizador vectorial de redes KEYSIGHT FieldFox N9916A, constituyendo una red de antenas transmisora-receptora. Para tal efecto se han fabricado dos antenas idénticas (patrón y de prueba) como se muestra en la figura anterior, que se conectarán a los puertos de entrada y salida de RF del analizador vectorial. Es importante señalar que ambas antenas deben estar apuntando una hacia otra, considerando la dirección de máxima radiación y separándolas a una distancia mayor a r_{zl} .

- Finalmente, con los datos medidos del parámetro S_{21} , se determina la ganancia de la antena mediante la Ecuación de Friiss:

$$G[dB] = \frac{1}{2} [S_{21}[dB] - 20 \log(\lambda_0) + 20 \log(4\pi) + 20 \log(r_{z1})]$$

Donde S_{21} representa la ganancia de tensión directa, λ_0 es la longitud de onda en el espacio libre y r_{z1} es la distancia de separación entre las antenas.

Para la estimación del diagrama de radiación

Se efectúa el siguiente proceso:

- Se conecta la antena patrón (antena 1) al generador de señales ANRITSU MG3691C 10 GHz, y la de prueba (antena 2) al analizador de redes KEYSIGHT FieldFox N9916A, tal como se indica en el esquema de la Figura G2. La antena 1 se mantiene apuntando en la dirección de máxima radiación hacia la antena 2. Esta última va a efectuar un barrido sobre el plano horizontal desde $\Phi = -90^\circ$ a $\Phi = 90^\circ$ en intervalos de 5° . A medida que la antena va ejecutando el desplazamiento angular, se van capturando los valores de la intensidad del campo recibido.
- Finalmente, las mediciones registradas por el analizador en cada desplazamiento son normalizados respecto del máximo captado y se procede a esbozar el diagrama de radiación.

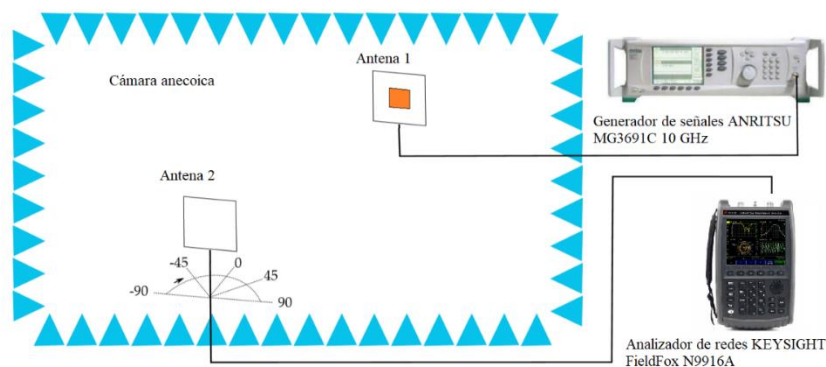


Figura G2. Configuración de las antenas y de los equipos para la medición del patrón de radiación

ANEXO H

Cálculo de la ganancia

A continuación, se presentan los cálculos efectuados para obtener la ganancia (en dirección perpendicular al parche) de las antenas fabricadas, para lo cual se ha empleado la ecuación de Friss, dada por:

$$G[dB] = \frac{1}{2} [S_{21}[dB] - 20 \log(\lambda_0) + 20 \log(4\pi) + 20 \log(r_{zl})]$$

$$\text{Sea } \lambda_0 = \frac{c}{f_r} = \frac{3 \times 10^8}{5,8 \times 10^9} = 0,05172 \text{ m}$$

Antena Plana

-Se consideran los siguientes parámetros:

Parámetro	Valor
S_{21}	-36,344062 dB
r_{zl}	1,27 m

-Remplazando los valores de la tabla anterior en la ecuación de Friss, tenemos:

$$G[dB] = \frac{1}{2} [-36,344 - 20 \log(0,05172) + 20 \log(4\pi) + 20 \log(1,27)]$$

$$G[dB] = 6,72 \text{ dB}$$

Antena Frontal

-Se consideran los siguientes parámetros:

Parámetro	Valor
S_{21}	-37,198005 dB
r_{zl}	1,27 m

-Remplazando los valores de la tabla en la Ecuación de Friss, tenemos:

$$G[dB] = \frac{1}{2} [-37,198 - 20 \log(0,05172) + 20 \log(4\pi) + 20 \log(1,27)]$$

$$G[dB] = 6,29 \text{ dB}$$

Antena Lateral

-Se consideran los siguientes parámetros:

Parámetro	Valor
S_{21}	-39,525313dB
r_{zl}	1 m

-Remplazando los valores de la tabla en la Ecuación de Friss, tenemos:

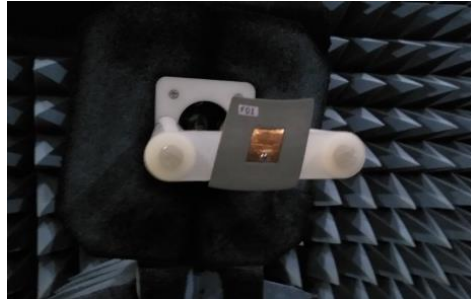
$$G[dB] = \frac{1}{2}[-39,525 - 20 \log(0,05172) + 20 \log(4\pi) + 20 \log(1)]$$

$$G[dB] = 4,09 \text{ dB}$$

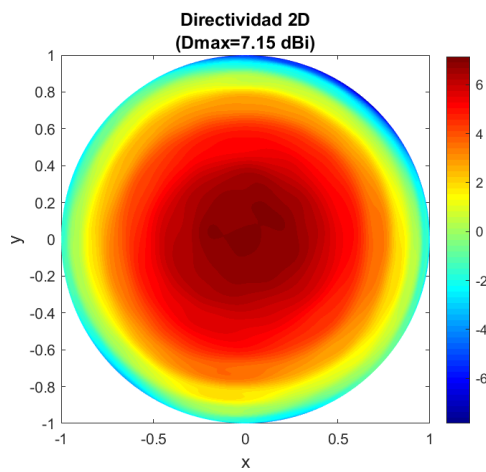
ANEXO I

Mediciones de parámetros de radiación UPV (Directividad)

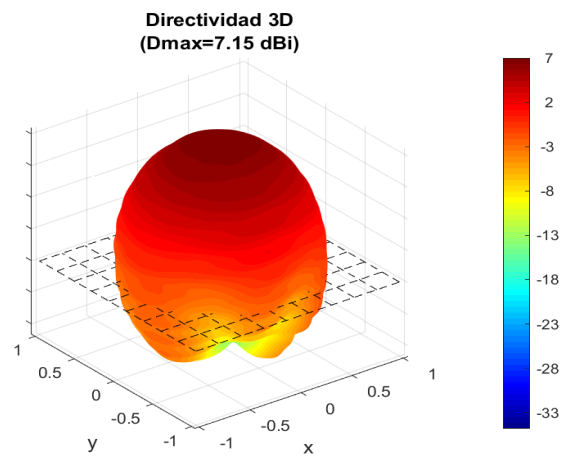
Antena Frontal



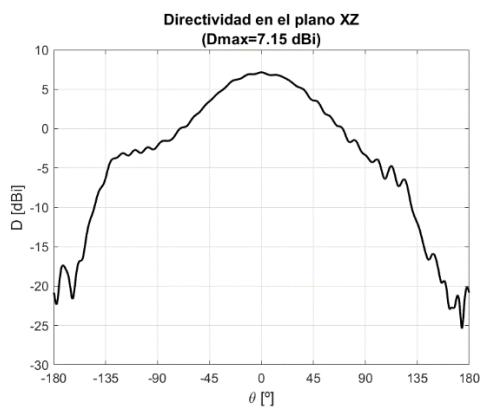
(a)



(b)



(c)



(d)



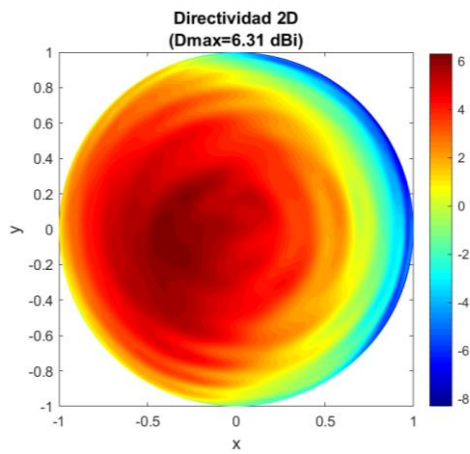
(e)

Figura I1. Medición de la directividad de la antena frontal: (a) Cámara anecoica UPV, (b) Directividad 2D, (c) Directividad 3D, (d) Plano XZ (e) Plano YZ

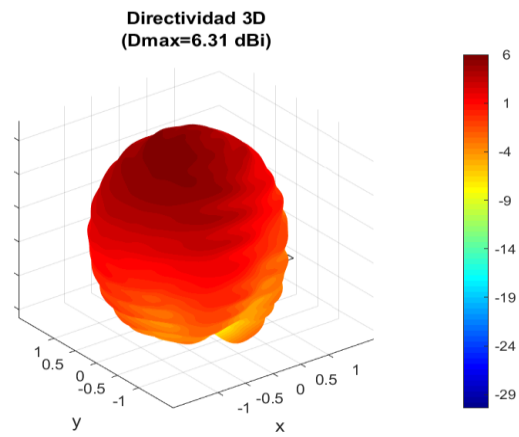
Antena Lateral



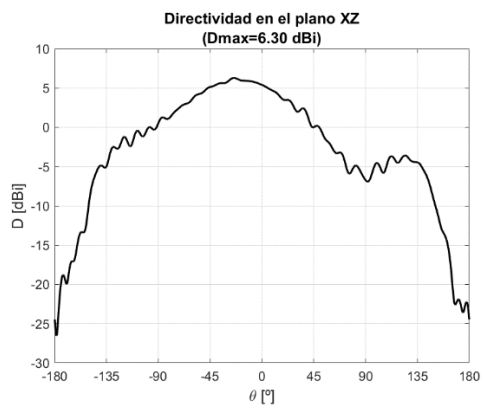
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura I2. Medición de la directividad de la antena lateral: (a) Cámara anecoica UPV, (b) Directividad 2D, (c) Directividad 3D, (d) Plano XZ (e) Plano YZ

ORDEN DE EMPASTADO