

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PUCP**

**MEJORA DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN MEDIANTE EL USO  
DE UNA ANTENA MICROSTRIP APLICADO A LOS SISTEMAS  
AÉREOS NO TRIPULADOS**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Electrónico

**AUTOR:**

JOSÉ AUGUSTO GÁLVEZ SÁNCHEZ

**ASESORES:**

Ing. Donato Andrés Flores Espinoza

Dr. Manuel Augusto Yarlequé Medina

Lima, Setiembre del 2019

# Resumen

El presente proyecto de tesis consiste en el desarrollo de un sistema de comunicación mediante el uso de una antena microstrip en los sistemas aéreos no tripulados.

En el primer capítulo trata sobre la situación actual de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) y sus aplicaciones. Además, se presentarán la justificación y las tecnologías existentes de los sistemas de comunicaciones y telemetría que son importantes para la comprensión del presente trabajo.

En el segundo capítulo se describe teóricamente las partes del sistema de comunicación y los conceptos necesarios para entender el diseño del presente sistema enfocado en la antena a usar.

En el tercer capítulo se describe el diseño del sistema completo de comunicación a partir de diagramas de bloques, elección de componentes y se muestra la forma y los métodos a partir de los cuales se obtiene el diseño funcional de la antena. Haciendo uso de software de simulación CST Studio se realiza la comprobación de los resultados teóricos de los dispositivos. Por último, se detalla el método usado en el presente proyecto para la fabricación de este tipo de antenas.

En el último capítulo se caracteriza la antena a través de la medición del parámetro que la define; en este proyecto se realiza la medición del coeficiente de reflexión (parámetro  $S_{11}$ ), a su vez que se hace el correspondiente análisis en comparación con los resultados obtenidos mediante simulación en el capítulo 3. También se muestra las pruebas y los resultados obtenidos por el UAV con el sistema de comunicación integrado tanto en tierra como en aire.

Por último, se muestran las conclusiones del análisis de los resultados obtenidos y recomendaciones a seguir.

A mis padres, por su apoyo incondicional en el logro de mis metas.

A mis asesores, por la constante paciencia que tuvieron con el desarrollo de la tesis.

Al grupo de tecnologías inalámbricas (GTI) encabezado por el profesor Manuel Yarlequé y el grupo de investigación de sistemas aéreos no tripulados (GI – SANT – PUCP) liderado por el profesor Andrés Flores, por encaminar mi interés académico y ayudarme a superar los obstáculos en este proyecto ambicioso.

A todas las demás personas que me ayudaron a realizar este trabajo.

# Índice General

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                     | <b>1</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1: Vehículos aéreos no tripulados (UAV) .....</b> | <b>2</b>  |
| 1.1 Entorno general.....                                      | 2         |
| 1.2 Estado del arte.....                                      | 4         |
| 1.3 Problemática.....   | 15        |
| 1.4 Objetivos.....  | 16        |
| <b>CAPÍTULO 2: Subsistemas de comunicación.....</b>           | <b>17</b> |
| 2.1 Conceptualización.....                                    | 17        |
| 2.2 Esquema de la comunicación.....                           | 18        |
| 2.3 Antenas.....  | 19        |
| <b>CAPÍTULO 3: Diseño de la propuesta.....</b>                | <b>25</b> |
| 3.1 Consideraciones preliminares.....                         | 25        |
| 3.2 Selección del radio módem.....                            | 27        |
| 3.3 Proceso de obtención de las antenas.....                  | 30        |
| 3.3.1 Antena en estación a tierra.....                        | 30        |
| 3.3.1.1 Diseño.....   | 31        |
| 3.3.1.2 Simulación.....                                       | 35        |
| 3.3.1.3 Fabricación.....                                      | 40        |
| 3.4 Elección del UAV.....                                     | 44        |
| <b>CAPÍTULO 4: Pruebas y resultados.....</b>                  | <b>45</b> |
| 4.1 Medición real del coeficiente de reflexión.....           | 45        |
| 4.2 Pruebas en tierra en campo abierto.....                   | 47        |
| 4.3 Pruebas en vuelo.....                                     | 51        |
| <b>Conclusiones</b>   | <b>58</b> |
| <b>Recomendaciones</b>  | <b>59</b> |
| <b>Bibliografía</b>   | <b>60</b> |

# Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| 1.1: Despliegue del UAV y sus escenarios de uso [1] .....                                | 4  |
| 1.2: RSSI vs. Distancia a la estación en tierra (RF) .....                               | 8  |
| 1.3: Circuito de un nodo .....   | 9  |
| 1.4 Valores de RSS capturados en una distancia de 1.1km con transmisión de 1mW a 1W ..10 |    |
| 1.5. Módulo de comunicación y de control del cabezal de la antena.....                   | 14 |
| 2.1. Espectro de radiofrecuencia y sus usos [13].....                                    | 19 |
| 3.1. Arquitectura del sistema de hardware de un sistema aéreo no tripulado.....          | 26 |
| 3.2 Diagrama de bloques del sistema.....   | 27 |
| 3.3. RFD900x.....  | 27 |
| 3.4 Antena parche microstrip con alimentación lateral.....                               | 30 |
| 3.5. Longitud física y efectiva del microstrip.....                                      | 24 |
| 3.6 Modelado de la patch con alimentación por inserción.....                             | 33 |
| 3.7 Resultados de los valores necesarios en mm para la simulación de un solo patch.....  | 36 |
| 3.8 Mejor acoplamiento logrado con el monopolo.....                                      | 36 |
| 3.9. Geometría y parámetros mejorados finales para la simulación de un patch 2x1.....    | 38 |
| 3.10 S11 de la antena final.....   | 39 |
| 3.11 VSWR de la antena final.....  | 39 |
| 3.12. Diagramas de radiación en azimut y elevación para 915Mhz.....                      | 40 |
| 3.13. Patrón de radiación de elevación en 3D para 915MHz.....                            | 40 |
| 3.14 Fibra de vidrio cortada para su trazado en la máquina CNC. ....                     | 41 |
| 3.15 Parte frontal del diseño de la pista bajo el método de máquinas CNC. ....           | 42 |
| 3.16 Cubrimiento de la parte de cobre.....   | 42 |
| 3.17 Vista frontal de la antena procesada por completo.....                              | 43 |
| 3.18. Skywalker Black X8.....  | 44 |
| 4.1: Medición del S11 de la antena usando el analizador de redes.....                    | 46 |
| 4.2. Estación a Tierra en prueba en tierra.....  | 48 |
| 4.3. Cálculo de la distancia recorrida.....  | 49 |
| 4.4a Punto inicial para la prueba en Tierra mostrado en el Mission Planner.....          | 50 |
| 4.4b Punto final para la prueba en Tierra mostrado en el Mission Planner.....            | 50 |
| 4.5 Estado del avión en el Mission Planner.....  | 51 |

|  |    |
|--|----|
| 4.6 Punto de pérdida de conexión mostrado en el Mission Planner sin el sistema de comunicación desarrollado..... | 52 |
| 4.7 Gráfica % de señal con tiempo en minutos sin el sistema de comunicación.....                                 | 52 |
| 4.8 Grafica distancia recorrida en metros con sin el sistema de comunicación desarrollado.....                   | 53 |
| 4.9 UAV con la estación a tierra lista para que el UAV pueda hacer el vuelo por el Volcán Sabancaya .....        | 54 |
| 4.10 Punto final para la prueba en vuelo mostrado en el Mission Planner.....                                     | 54 |
| 4.11 Gráfica % de señal con tiempo en minutos con el sistema de comunicación.....                                | 55 |
| 4.12 Grafica distancia recorrida en metros con tiempo en minutos con el sistema desarrollado.....                | 55 |



# Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| 1.1: Comportamiento de la salida del servo en función de la distancia.....                  | 12 |
| 1.2. Performance comunicación.....  | 14 |
| 3.1 Comparación de equipos radio modem.....   | 28 |
| 3.2 Comparación del equipo bajo la primera simulación teórica.....                          | 29 |
| 3.3 Comparación del equipo bajo la segunda simulación teórica.....                          | 29 |
| 3.4. Resultados teóricos de los valores necesarios para la simulación de un solo patch..... | 35 |
| 3.5. Dimensiones correspondientes a los anchos y largos de los elementos de la antena.....  | 37 |
| 4.1 Acoplamiento obtenido en medición y simulación .....                                    | 47 |
| 4.2 Análisis económico de la fabricación de la antena patch.....                            | 56 |



# Introducción

Se entiende por vehículo aéreo no tripulado (UAV) aquel que es capaz de volar sin necesidad de contar con un piloto humano a bordo. Fueron creados en un principio con fines militares, sin embargo, actualmente existen una gran variedad de aplicaciones civiles. La ingeniería ha mejorado de manera exponencial los sistemas aéreos no tripulados a lo largo de años gracias a la microelectrónica, las telecomunicaciones y la ciencia de los materiales.

Uno de los elementos esenciales de los UAV es la telemetría, Actualmente, los UAV presentan un subsistema de comunicación el cual permite transmitir datos de telemetría a una estación a tierra. La mencionada subetapa supone un problema cuando se requiere lograr largos alcances y con buena recepción de datos en comparación con sistemas previos. En los últimos años, el precio de los dispositivos electrónicos se redujo y la comunicación inalámbrica se convirtió abierta al público; por consiguiente, un sistema de comunicación mejorado para UAV surge como una necesidad. Por otra parte, se requiere trabajar con antenas para la comunicación debido a sus ventajas: bajo peso, facilidad de integración, bajo costo entre otras.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un sistema de comunicación que optimice los alcances de los sistemas aéreos no tripulados actuales y tenga se observa datos de telemetría en tiempo real.

# Capítulo 1

## Vehículos aéreos no tripulados (UAV)

El presente capítulo trata sobre la situación actual de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) y sus aplicaciones. Además, se presentarán la justificación y las tecnologías existentes de los sistemas de comunicaciones y telemetría que son importantes para la comprensión del presente trabajo.

### 1.1. Entorno general

Los vehículos aéreos no tripulados tienen sus orígenes durante la Primera Guerra Mundial (1917), esta tecnología es ampliamente utilizada por los militares estadounidenses quienes han contribuido al desarrollo de los UAV. Si bien es cierto su principal uso es militar, existen también aplicaciones civiles. En forma general, el modelo está constituido por la estación de control en tierra, el controlador, los sensores, el GPS, los servos, el control remoto (RC) y muchos elementos más. [2]

A medida que la tecnología mejoró y bajó considerablemente de precio, los aficionados y otras personas interesadas y capacitadas han estado encontrando todo tipo de usos creativos para vehículos aéreos no tripulados como se muestra en la figura 1.1. Hasta ahora los drones han encontrado aplicaciones en:

- Agricultura: Los agricultores tienen un trabajo importante pero difícil y los vehículos aéreos no tripulados (UAV) son una excelente forma de realizar levantamientos aéreos de cultivos para que los agricultores puedan ver si sus sistemas de riego están funcionando, cómo están creciendo sus plantaciones o incluso ver si alguna plantación se ve afectada por plagas y enfermedades mediante el uso de sensores infrarrojos.
- Cobertura deportiva: los vehículos aéreos no tripulados son una excelente forma de cubrir un evento deportivo desde arriba; no solo es entretenido, sino que también brinda a los entrenadores una perspectiva única y valiosa sobre el desempeño de sus jugadores;
- Aplicación de la ley: los departamentos de policía usan vehículos aéreos no tripulados para vigilancia y actividades relacionadas y patrulla fronteriza;
- Medio ambiente: todo tipo de científicos están utilizando UAV para realizar un seguimiento del medio ambiente, por ejemplo, a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) que prueba la calidad del aire. La NASA está utilizando vehículos aéreos no tripulados para investigar la pérdida de ozono y, en Italia, los vehículos aéreos no tripulados han estado monitoreando el vertido ilegal durante años.
- Control de incendios forestales: los vehículos aéreos no tripulados se están convirtiendo en una herramienta increíblemente útil para los bomberos, especialmente aquellos que tienen la tarea aparentemente imposible de apagar los incendios forestales. Las aeronaves se usan no solo para detectar y medir su movimiento, sino también para combatir incendios, mientras mantienen a los bomberos alejados del peligro
- Transporte: en una situación en la que una organización sin fines de lucro se las arregla para almacenar medicinas para personas en remotas aldeas africanas, pero no puede llegar a las áreas remotas lo suficientemente rápido como para salvar vidas, los vehículos aéreos no tripulados

pueden marcar la diferencia. Un ejemplo es Matternet, una compañía que está construyendo una red para entregas basadas en drones a áreas remotas [9].

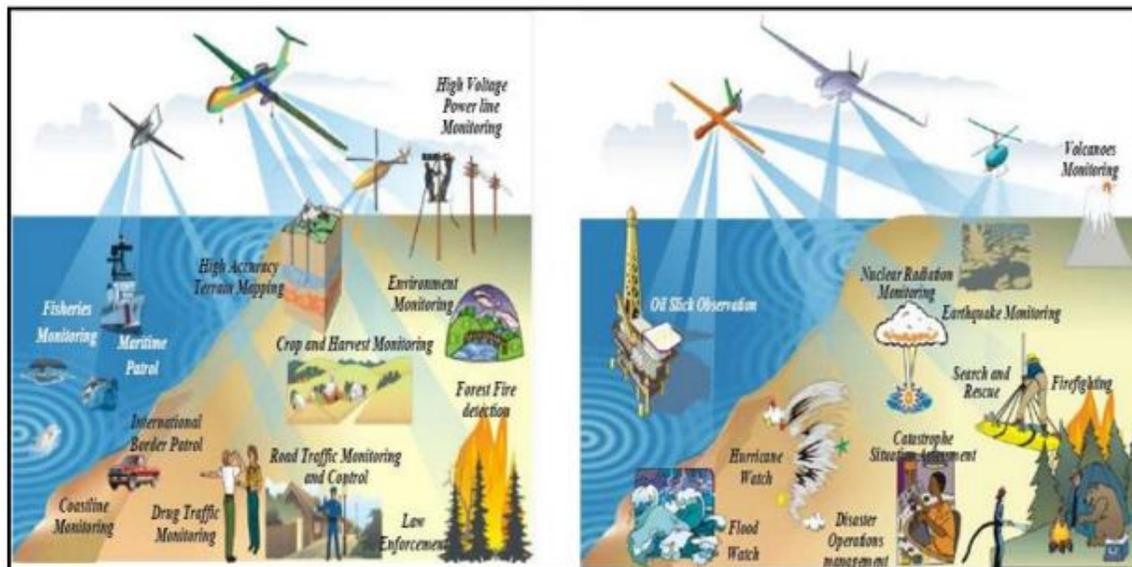


Figura 1.1: Despliegue del UAV y sus escenarios de uso [1]

## 1.2 Estado del arte

Si bien existen trabajos de investigación sobre sistemas de comunicación en UAVs con distintas características. Se ha determinado que existen muy pocos trabajos dedicados a la mejora en la comunicación con el uso de antenas de mayor ganancia, esto en principio porque la mayoría usa antenas comerciales. Acerca del diseño de antenas no comerciales para UAVs, la información de los trabajos de investigación es muy escasa. Básicamente en los sistemas encontrados se priorizó los valores del rango de frecuencias de trabajo, velocidad de transmisión de datos, ganancia y tipos de las antenas, alcance, RSSI (indicador de la fuerza de la señal recibida), enlace inalámbrico, tipo de red, etc. Se mostrarán a continuación lo mencionado:

Cuatro estudiantes de la universidad de Qatar [3] desarrollaron un UAV equipado con sensores, con el fin de monitorear y recopilar datos de calidad del aire (como temperatura, la humedad, el polvo, el CO, el CO<sub>2</sub> y el O<sub>3</sub>) en tiempo real en áreas designadas y enviarlas a la base. Los datos recopilados se transmiten a un servidor a través de una conexión inalámbrica a Internet y el servidor los almacena, y proporciona estos datos a cualquier parte que tenga permiso para acceder a ellos a través del teléfono Android o del sitio web en tiempo real. Su estación de tierra fue operada por un controlador humano, y el quadcopter se comunicó de forma inalámbrica a través del enlace de 433 MHz. En vuelos de prueba, el UAV pasó con éxito por todas las áreas en Qatar designadas sin perder el contacto con la estación de tierra, como mínimo de 20 km.

Investigadores de la Universidad de North Texas [15] desarrollaron una infraestructura de comunicación Wi-Fi de larga distancia con un UAV para aplicaciones de ciudades inteligentes, como la respuesta a emergencias. Desarrollado un prototipo de UAV para transmitir señales de Wi-Fi de más de 1 kilómetro con un tiempo de vuelo de 25 minutos y una transmisión de 7,9 Mbps. Los UAV se instalan con antenas direccionales de ganancia de 8 dBi y consumo de energía de 4 vatios. Existe una gran variación en la transmisión se debe al retraso en la alineación del rumbo debido a la movilidad.

Farhan Mohammed [4] estudió las redes móviles ad hoc (MANET) que son una colección de nodos autónomos con una topología dinámica. Concluyó que un grupo de UAV se puede considerar un MANET donde los UAV individuales se modelan como nodos.

Ingenieros de la Universidad Politécnica de Hong Kong [5] diseñaron y probaron un sistema de retransmisión de comunicación mejorando el rendimiento de la comunicación UAV y las operaciones con obstáculos. En este estudio se usó un quadcopter y se creó el hardware y se desarrolló un conjunto de programas de software y protocolos. Se seleccionó el radio de telemetría 3DR 915 MHz como el hardware y el procesador incorporado del cual corre el firmware SiK de fuente abierta. Los resultados de la prueba demostraron la capacidad de este sistema para extender el rango de comunicación y construir comunicación sobre obstáculos. En particular, cuando la potencia de transmisión del módulo de telemetría se establece en el valor máximo, que es de 20 dBm (100 mW), el rango típico alcanzado mediante la configuración estándar y la antena es de 600m.

iRobot, AeroVironment y Carnegie Mellon University [6] trabajaron en conjunto para desarrollar capacidades mejoradas para la vigilancia y las comunicaciones basadas en las plataformas UAV, UGV (vehículo de tierra no tripulado) y Raven UAV. Realizaron la integración del sistema con el enlace digital de datos (DDL) de AeroVironment en plataformas aéreas y terrestres lo cual amplió las capacidades en el rango de comunicaciones para operar el PackBot UGV desarrollado por iRobot. Se utiliza un AeroVironment Raven B y el nuevo enlace de datos digitales (DDL), el cual proporciona un enlace digital de baja latencia, bidireccional y de alto rendimiento ( $> 4$  Mbps). El uso del DDL para retransmitir un enlace de comando UGV a través de un UAV permite que el UGV funcione más allá de la línea de visión y en distancias que exceden significativamente el rendimiento actual del sistema integrado de comunicaciones 802.11 (Wifi) del PackBot. Usando el DDL un PackBot teóricamente puede operar hasta 10 km desde la OCU (Unidad de control del operador), o detrás de edificios, colinas u otras

obstrucciones que de lo contrario causarían interferencia significativa y la eventual pérdida de comunicaciones.

Kubica [7] en su tesis ofrece una visión general de las soluciones de comunicación que se pueden usar en plataformas aéreas. En esta tesis se investigó tres tecnologías de comunicación: módem de RF XBee-PRO, módulo de RF de banda ancha Microhard nVIP2400 y módulo para la conexión a la red de telecomunicaciones móviles. Los módems utilizan antenas Ducky, que son antenas omnidireccionales monopolo y sus ganancias son de 2 dBi.

El dispositivo móvil que se eligió es BenQ F5, que admite la conexión 4G LTE. En este caso, se midió las tasas de datos y la latencia en lugar de RSSI. El módem que se considera en la estación de tierra tiene la potencia de transmisión establecida en 25 dBm y el módem de a bordo se ha configurado a la potencia de 11 dBm. La velocidad de descarga en el nivel del suelo era estable con un promedio de 7-9 Mbps, la carga no tiene una velocidad tan estable con un valor promedio es un poco más de 2 Mbps. En los módems (Figura 1.2) muestra la dependencia de RSSI en la distancia a la estación de tierra, y también podemos ver el efecto de la interferencia del motor.

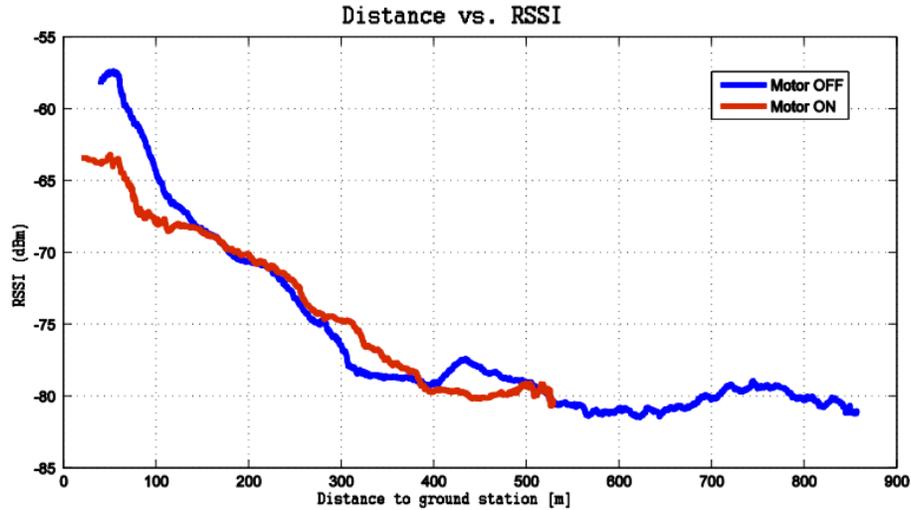


Figura 1.2: RSSI vs. Distancia a la estación en tierra (RF)

La velocidad de carga proporcionada por las telecomunicaciones móviles permite al operador transmitir datos de texto, imágenes o videos de baja calidad directamente a Internet. Por otro lado, la comunicación de RF proporciona un muy buen enlace de línea de visión en distancias de hasta aproximadamente 1 km de otro nodo con su fiabilidad y pequeñas latencias, es una solución adecuada para misiones multi-UAV que necesitan frecuentes intercambios de mensajes entre UAV para fines de coordinación.

La aplicación de múltiples UAV en operaciones de búsqueda y rescate exige una comunicación entre UAV fiable y de largo alcance. Por ello una flota de UAV dirigibles autónomos llamados plataforma de sensores para observación y Seguimiento (SPOT) desarrollada en la Universidad de Ottawa [8] introdujo e implementó un nuevo marco de comunicación para ampliar el rango de comunicación mediante el uso de una técnica de enrutamiento descentralizado en la red. Actualmente, usando radios con antenas dipolo de media longitud podemos alcanzar un alcance de comunicación de un salto de hasta 5 km con la línea de visión de radiofrecuencia (RF LOS).

La tarea principal es ampliar el control de radio de un UAV civil al transmitir los comandos en una red ad hoc usando un nuevo protocolo de enrutamiento de malla llamado DigiMesh. Cuando un transmisor y un receptor están separados lo suficiente, y en el caso en que el enlace de comunicación directa no funciona, se usa un patrón de saltos múltiples para retransmitir los datos. Las pruebas iniciales han demostrado que el motor causó interferencia electromagnética que afecta las lecturas digitales. Por esta razón, se tomó la decisión de colocar la antena omnidireccional en la aleta superior, apuntando hacia arriba.

La radio junto con DigiMesh se eligió una antena dipolo de media onda, la radio 9XTend que puede proporcionar un rango de comunicación máximo de hasta 10 km por salto con la velocidad de transmisión de 115000 bps. En comparación con radios Xbee que ofrecen solo 100 bytes de carga útil por paquete, 9XTend ofrece 256 bytes de carga útil por paquete.

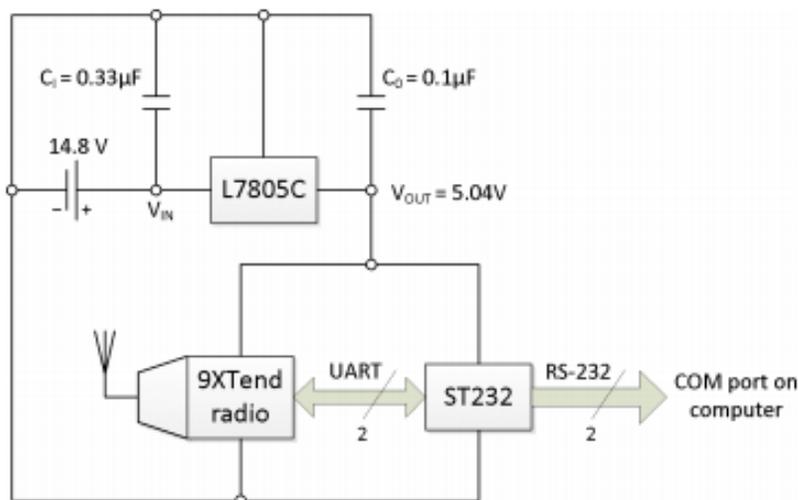


Figura 1.3: Circuito de un nodo

El circuito final de la Figura 1.3 muestra la distribución de potencia y la comunicación de datos de uno de los nodos. El suministro para los niveles de potencia de transmisión de 1-100 mW se proporcionó desde el puerto USB de una computadora portátil. Para una potencia de transmisión de 500 mW - 1 W, se utilizaron fuentes de alimentación externas, como una batería de polímero de litio de 6 celdas.

Las pruebas se realizaron ajustando la potencia de transmisión en ambos radios mientras se intercambiaban imágenes entre las dos ubicaciones. Se registró los valores de RSS de cada paquete con el fin de conocer la potencia de transmisión mínima requerida sobre la distancia de 1,1 km. Cambiar la potencia de transmisión de 1 W a 1 mW en nuestro experimento de comunicación de largo alcance resulta en un cambio de -30 dB como en la Figura 1.4. A partir de este experimento, la primera conclusión que podemos extraer es que el funcionamiento de radios cercanas a su sensibilidad de -100 dBm puede aumentar el retardo de transmisión, que se resuelve aumentando la potencia de transmisión o utilizando una antena dipolo de media onda con mayor ganancia en el receptor.

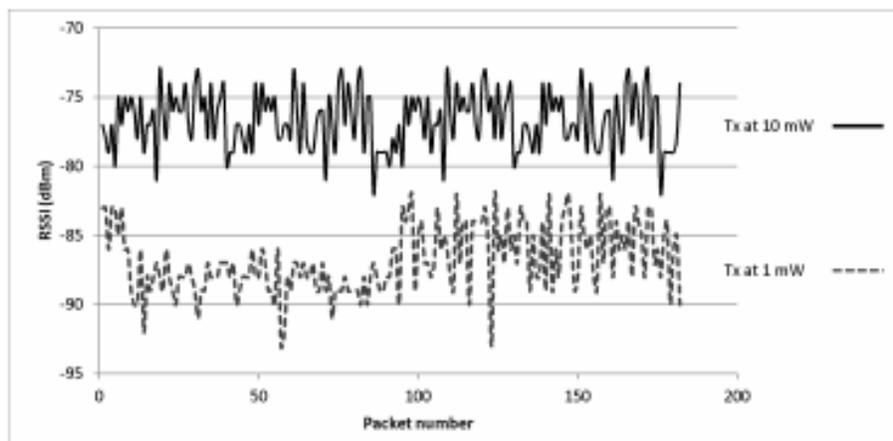


Figura 1.4. Valores de RSS capturados en una distancia de 1.1km con transmisión de 1mW a 1W

Utilizando potencia de transmisión entre 1 mW y 1 W, el alcance de comunicación de un salto posible, con antenas dipolo de media onda, es de 1-6 km. El sistema mantiene una velocidad de datos promedio de 31-34 Kbps, siempre que el RSS se mantenga por encima de la sensibilidad de la radio.

Un diseño de un RPV con equipo comercial estándar (COTS) fue propuesto por un ingeniero del Técnico de Lisboa [9] y evaluado a través de pruebas de vuelo. La plataforma en cuestión es un planeador y está compuesta por tres sistemas principales: el control de radio, la alimentación de video y la radio de telemetría que conectan el UAV a la estación terrestre. El sistema Scherrer RC fue seleccionado porque se ha demostrado que tiene un alcance de más de 100 km. Al mismo tiempo, este sistema usa un salto de frecuencia múltiple (FHSS) que lo hace más inmune al atasco. Esta radio permitirá datos en tiempo real del UAV y un rango de voltaje de 3.7 a 6 V permite una conexión directa al UAV que no requiere un regulador de voltaje. Las antenas de alta ganancia para los enlaces de comunicación punto a punto y la recepción de UHF suelen ser Yagi-Udas. Se eligió el A430S10 de Diamond Antenas porque proporciona un ancho de banda de 430-440 MHz con 13 dBi de ganancia. El tipo de antena, que viene de serie con el receptor Thomas Scherrer, está polarizado linealmente. Por esta razón, se construyeron dos nuevas antenas. De esta forma, se colocó una antena en el ala izquierda (lo que hace que esté polarizada horizontalmente) y la otra en la cola vertical (lo que la polariza verticalmente). En total, seis configuraciones se evalúan variando la potencia de salida del transmisor (0.5, 1 y 2 W) y conmutando las antenas (Monopolo y Yagi).

Tabla 1.1: Comportamiento de la salida del servo en función de la distancia

| Distance (km) |      | 3.95    |                 | 6.97    |                 | 8.32    |                 |
|---------------|------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|
| Monopole      | 0.5W | ✓       | ✓               | x       | x               | x       | x               |
|               | 1W   | ✓       | ✓               | x       | x               | x       | x               |
|               | 2W   | ✓       | ✓               | x       | x               | x       | x               |
| Yagi          | 0.5W | ✓       | ✓               | ✓       | ✓               | x       | x               |
|               | 1W   | ✓       | ✓               | ✓       | ✓               | ✓       | x               |
|               | 2W   | ✓       | ✓               | ✓       | ✓               | ✓       | ✓               |
|               |      | Margins | Contin.<br>Mov. | Margins | Contin.<br>Mov. | Margins | Contin.<br>Mov. |

La Tabla 1.1 muestra cómo se comportó el servo en términos de continuidad de movimiento (Mov. Continua) y alcanzando sus posiciones finales (Márgenes) en cada punto de control para las seis configuraciones posibles de antena. Mientras que el monopolo maneja 4 km, la antena Yagi duplica el alcance de la conexión. En conclusión, aunque el uso de una antena direccional (el Yagi) dará el doble del rango de un omnidireccional (monopolo), emerge un nuevo factor: la antena tiene que estar orientada manualmente. Aunque el RSSI está influenciado por la pérdida de propagación, el parámetro que más afectó a este vuelo fue la directividad de la antena. Además, al comparar el rendimiento de este enlace con el rendimiento sobre el terreno, se puede decir que este sistema puede superar un rango de, al menos, 7 km.

El UAV viajó un total de 8.7 km y el factor más limitante fue no tener la radio de telemetría diciéndole al piloto dónde estaba el UAV, ya que tiene un alcance máximo de 500 m con la configuración actual. Por lo tanto, el uso de un rastreador de antena y el uso de una antena diferente (direccional con mayor ganancia) en la radio de telemetría 3DR dará más alcance al rastreador de antena, sin embargo, la radio solo puede emitir a una potencia de salida de 100 mW.

Jienan Chen y su grupo de colaboradores [16] diseñaron e implementaron un sistema de comunicación aérea de banda ancha y largo alcance utilizando antenas direccionales (ACDA). El sistema integra dispositivos Wi-Fi con redes aéreas para establecer rápidamente una infraestructura de Wi-Fi en el aire, que proporciona capacidad de comunicación en tiempo real para desastres donde no existe una infraestructura de comunicación fija. ACDA utiliza antenas direccionales con vehículo aéreo no tripulado (UAV) para ampliar el rango de comunicación, aumentar el rendimiento y reducir la interferencia. El sistema prototipo ACDA alcanza 2 Mbps a 5000 m, y demuestra el uso prometedor de las antenas direccionales para la comunicación aérea por wifi de larga distancia.

Para proporcionar capacidad de comunicación de banda ancha, el diseño admite tres tipos de enlaces inalámbricos: A2G (Aire y Tierra), G2A (Tierra y aire) y A2A (Aire y Aire). El módulo de comunicación consta de dos unidades: un punto de acceso Wi-Fi (AP) para comunicaciones A2G y G2A, y un enrutador inalámbrico con antena direccional para comunicaciones A2A como muestra la figura 5. Este enrutador inalámbrico contiene una antena direccional de 8dBi y admite el acceso estándar a Wi-Fi. Este módulo consta de una unidad GPS, un E-compás, una unidad XBee Pro y un microprocesador. El E-compás mide el rumbo actual de la antena direccional. La unidad XBee se usa para transmitir datos de baja velocidad para fines de control, como la ubicación de un UAV periódicamente. El microprocesador toma la información de ubicación del UAV local de la unidad GPS, la información de ubicación del UAV remoto de la unidad XBee y los datos RSSI del enrutador inalámbrico.

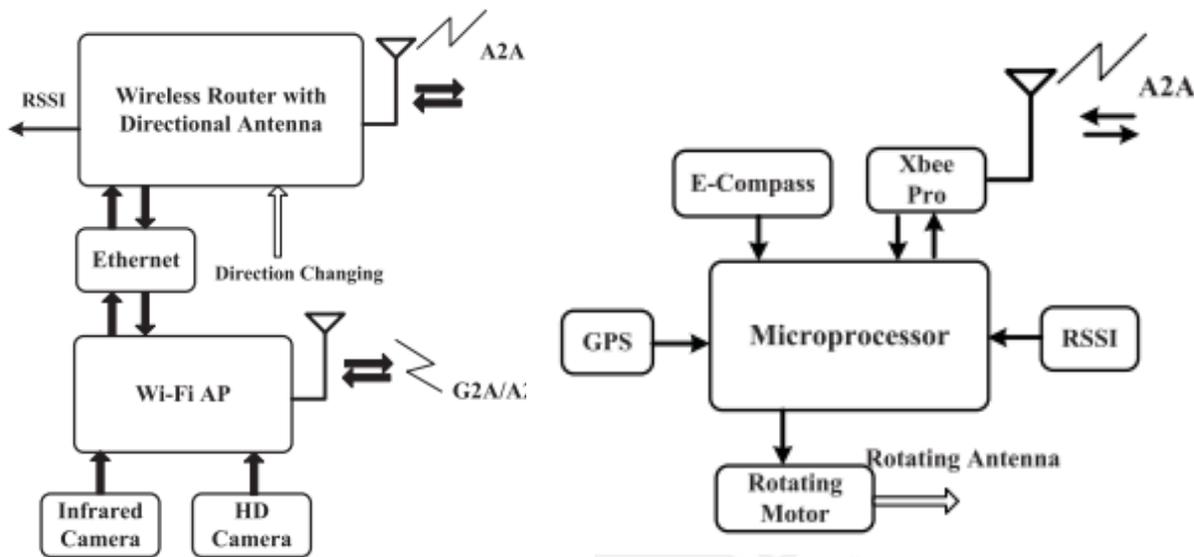


Figura 1.5. Módulo de comunicación y de control del cabezal de la antena

Se configuró la red de cuatro nodos con dos estaciones terrestres y dos UAV ACDA, en la que cada estación terrestre (una computadora portátil estándar) está conectada a un prototipo ACDA. El ACDA logra un rendimiento de 2 Mbps para una distancia de comunicación de 5 km como se muestra en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Performance comunicación

| A2A Link |            |         |        |        |         |
|----------|------------|---------|--------|--------|---------|
| Distance | Throughput |         | Delay  |        | RSSI    |
|          | [14]       | ACDA    | [14]   | ACDA   | ACDA    |
| 300 m    | 19 Mbps    | 48 Mbps | 230 ms | 41 ms  | -57 dBm |
| 1000 m   | N/A        | 16 Mbps | N/A    | 67 ms  | -63 dBm |
| 3000 m   | N/A        | 6 Mbps  | N/A    | 87 ms  | -76 dBm |
| 5000 m   | N/A        | 2 Mbps  | N/A    | 101 ms | -81 dBm |

### 1.3. Problemática

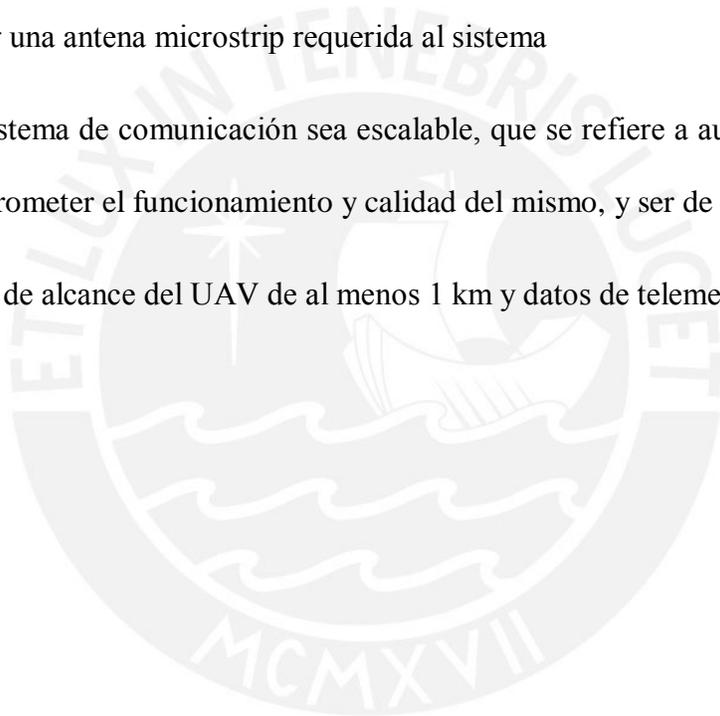
Actualmente, los UAV presentan un subsistema de comunicación el cual permite transmitir datos de telemetría y datos multimedia a una estación a tierra. La mencionada subetapa supone un problema cuando se requiere lograr largos alcances y con buena recepción de datos en comparación con sistemas previos, ya que estos presentan problemas con la telemetría cuando superan el primer kilómetro. En los últimos años, el precio de los dispositivos electrónicos se redujo y la comunicación inalámbrica se convirtió abierta al público, por consiguiente, un sistema de comunicación mejorado para UAVs surge como una necesidad. Además, la fabricación de antenas de tipo microstrip es muy útil en la actualidad debido a su bajo peso y alta ganancia para la integración a dichos sistemas. En base a ello, la presente propuesta plantea el desarrollo de un sistema de comunicación mediante el uso de una antena microstrip en los sistemas aéreos no tripulados que pueda lograr alcances de más de 1km y datos de telemetría en tiempo real.

## 1.4. Objetivos

General: Diseñar el sistema de comunicación aplicado a los sistemas aéreos no tripulados.

Específicos:

- Realizar un estudio de los requerimientos de los sistemas de comunicación
- Plantear una nueva estructura del sistema de comunicación
- Diseñar y fabricar una antena microstrip requerida al sistema
- Permitir que el sistema de comunicación sea escalable, que se refiere a aumentar la capacidad de trabajo sin comprometer el funcionamiento y calidad del mismo, y ser de bajo costo
- Obtener un rango de alcance del UAV de al menos 1 km y datos de telemetría en tiempo real.



# Capítulo 2

## Marco teórico

En este capítulo se describe teóricamente las partes del sistema de comunicación y los conceptos necesarios para entender el diseño del presente sistema enfocado en la antena a usar.

### 2.1 Conceptualización

A pesar del número de opciones, la mayoría de las aplicaciones de telemetría se transmiten en la banda de radio del espectro electromagnético debido a la escalabilidad y la naturaleza generalmente robusta del enlace que se puede establecer. Los módems RF se utilizan para las operaciones de línea de visión (LOS), ya que proporcionan un canal estable y confiable. Estos módems usan antenas para mejorar la transmisión y recepción de la señal. Las principales ventajas de este tipo de comunicación son su pequeña latencia o retardo (de milisegundos a decenas de milisegundos), bajo precio y tamaño pequeño. La única desventaja es el rango de transmisión relativamente pequeño, que comúnmente es de varios kilómetros dependiendo de la antena utilizada. [10]

Los vehículos aéreos no tripulados más comúnmente utilizados en la investigación son los modelos de radiocontrol comerciales fuera de la plataforma (COTS). El objetivo principal de

estos UAV es la operación autónoma para la recolección de la telemetría y los datos multimedia desde ubicaciones remotas.

## **2.2 Esquema de la comunicación**

Cuando los datos se transmiten por aire, las técnicas de procesamiento de señal digital proporcionan más inmunidad al ruido y la interferencia en comparación con los métodos de procesamiento de señales analógicas. Además, los circuitos electrónicos para el procesamiento de señales digitales son una solución más económica en comparación con las variantes analógicas.

La frecuencia de radio de 72Mhz está dedicada específicamente para controlar vehículos aéreos no tripulados civiles. La ventaja del enlace es la rápida respuesta del UAV a los comandos de control de movimiento. La desventaja del enlace que está diseñado para transmitir señales de control a través de un pequeño ancho de banda. No es posible transmitir múltiples comandos en una sola transmisión o imágenes. Específicamente, el avance de la tecnología inalámbrica operando en bandas de frecuencia libres de licencia llamadas ISM, tales como 433 MHz, 900 MHz, 2.4 GHz y 5 GHz. Las bandas de ISM permiten el diseño, prueba e investigación de enlaces de comunicación con UAV en el espacio aéreo civil, sin ningún requisito de licencia y proporcionan más ancho de banda que 72 Mhz. En la figura 2.1 se muestra el espectro y sus usos en UAVs.

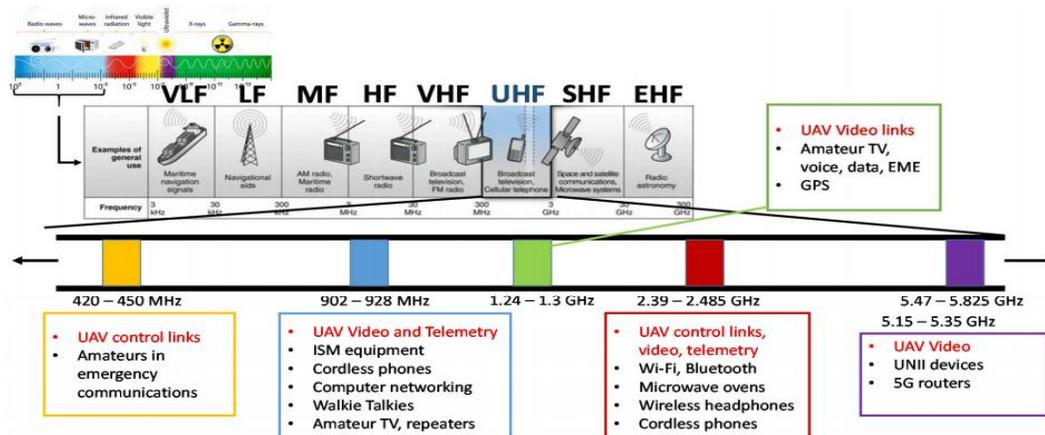


Figura 2.1. Espectro de radiofrecuencia y sus usos [13]

Para la comunicación inalámbrica con los UAV, los operadores a menudo usan dispositivos compatibles con IEEE 802.11x (Wi-Fi). Se ha demostrado que otra solución, que utiliza tecnología celular, funciona a altitudes de hasta 500 metros, pero depende de la existencia de una infraestructura celular.

Es posible predecir el rango de una transmisión con las antenas en línea de visión, sin ningún obstáculo con la ecuación de transmisión Friis que se relaciona la potencia recibida con la potencia transmitida entre dos antenas separadas por una distancia  $R > 2d / \lambda$  en metros. La ecuación de Friis es la siguiente:

$$P_r = G_r \times G_t \times P_t \times \left(\frac{\lambda}{4\pi D}\right)^2 \quad (2.1)$$

en donde  $P_r$  es la potencia recibida en W,  $G_t P_t$  la potencia irradiada efectiva (ERP) en W,  $\lambda$  la longitud de onda en m y  $G_r$ , la ganancia de la antena. Con esta ecuación se puede decir que el

enlace inalámbrico de 900 MHz tiene hasta un rango siete veces mayor que el enlace de 2.4 GHz; y es independientemente del tipo de antena y de la potencia de transmisión; sin embargo, las velocidades de datos son mucho más bajas en comparación con 2.4 GHz. Se especifica que las velocidades de datos sean menores a 11500 bps para las radios de 900 MHz a la distancia máxima. Esta velocidad de datos es suficiente para transmitir telemetría o controlar el UAV.

Hay dos tipos de antenas utilizadas en la comunicación inalámbrica; omnidireccional y direccional. Las antenas direccionales se usan en el GCS y las antenas omnidireccionales se usan a bordo del UAV. El desafío al diseñar un sistema con una antena direccional es que el GCS debe rastrear con precisión el UAV en el aire para mantener un enlace confiable. Por lo tanto, el haz de señal de la antena debe seguir el movimiento del UAV en el espacio. Una de las técnicas de rastreo más comunes y sencillas es apuntando a la antena en las coordenadas del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) reportadas por el UAV. [10]

Las bandas de frecuencia de radio son medios compartidos limitados por lo que surge la necesidad de regulación. La cantidad de energía permitida para la transmisión inalámbrica de datos dentro de las bandas ISM es limitada por las regulaciones gubernamentales. La autoridad que regula las frecuencias de radio en Perú es el MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones). Existe un documento públicamente disponible que define el ancho de banda de las frecuencias disponibles para el control de radioaficionados y las transmisiones de video. Se presenta que la Resolución Ministerial N 324-2011-MTC/03 dispuso la realización del Concurso Público de Ofertas para otorgar concesión única para la prestación de servicios públicos de telecomunicaciones y asignar las bandas 899-915 Mhz en la provincia de Lima y

Callao. El 14 de agosto de 2012, el Comité adjudicó la buena Pro de la licitación a postor VIETTEL PERU S.A.C. [11].

## 2.3 Antenas

La IEEE define la antena como "un medio para radiar o recibir ondas de radio". En otras palabras, la antena es la estructura de transición entre el espacio libre y un dispositivo de guía. El dispositivo de guía o línea de transmisión puede tomar la forma de una línea coaxial o una tubería hueca (guía de ondas), y se usa para transportar energía electromagnética desde la fuente de transmisión a la antena, o desde la antena al receptor.

Los tipos más comunes de antenas para adoptar para UAV son:

Antenas de alambre: son familiares porque se ven prácticamente en todas partes: en automóviles, edificios, barcos, aviones, naves espaciales, etc. Existen varias formas como un cable recto (dipolo), bucle y hélice.

Microstrip: se hizo muy popular en la década de 1970 principalmente para aplicaciones espaciales. Estas antenas consisten en un parche metálico sobre un sustrato conectado a tierra. Son los más populares debido a la facilidad de análisis y fabricación, y sus atractivas características de radiación, especialmente baja radiación de polarización cruzada. Las antenas microstrip son de bajo perfil, compatibles con superficies planas y no planas, simples y baratas de fabricar utilizando tecnología moderna de circuito impreso, mecánicamente robustas cuando

se montan en superficies rígidas y muy versátiles en términos de frecuencia resonante, polarización, patrón e impedancia.

Antenas reflectoras: Debido a la necesidad de comunicarse a grandes distancias, se utilizaron formas sofisticadas de antenas para transmitir y recibir señales que tenían que viajar millones de millas. Una forma de antena muy común para tal aplicación es un reflector parabólico. Tales dimensiones grandes son necesarias para lograr la alta ganancia requerida para transmitir o recibir señales después de millones de millas de viaje.

Antenas arreglo: Muchas aplicaciones requieren características de radiación que pueden no ser alcanzables por un elemento único. Sin embargo, es posible que un agregado de elementos radiantes en una disposición eléctrica y geométrica dará como resultado las características de radiación deseadas. Ejemplo típico es el Yagi-Uda.

Para describir el rendimiento de una antena, se necesitan definiciones de varios parámetros:

Patrón de radiación: se define como "una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas espaciales". En la mayoría de los casos, el patrón de radiación se determina en la región del campo lejano y se representa como una función de las coordenadas direccionales.

Intensidad de radiación: se define como "la potencia radiada desde una antena por unidad de ángulo sólido. Habitualmente se utiliza el sistema de coordenadas esféricas.

Directividad: Es la capacidad que presenta una antena para concentrar la energía que radia en una dirección en particular, por lo que se define como la relación existente entre la intensidad de radiación en una dirección dada a una distancia dada y la intensidad de radiación promedia en todas las direcciones del espacio.

Ganancia: se define como la relación de la intensidad, en una dirección dada, y la intensidad de la radiación que se obtendría si la potencia a la entrada de la antena se irradiará por una antena isotrópica. Para aumentar la distancia de vuelo, se necesita más ganancia.

Eficiencia: Se define como la relación de potencia radiada y potencia entregada a la antena, está puede ser también definida a partir de la relación entre ganancia y directividad. Se utiliza para tener en cuenta las pérdidas en los terminales de entrada y dentro de la estructura de la antena.

Habitualmente las antenas se conectan a través de una línea de transmisión y en la adaptación la red de dos puertos se define el parámetro  $S_{11}$  como la relación entre la onda reflejada respecto a la onda incidente. Tal parámetro, denominado como coeficiente de reflexión, nos da una referencia de la medida de potencia transferida hacia la antena.

Se define la relación de onda estacionaria SWR (Standing Wave Ratio) como la relación existente entre el mínimo y el máximo de la onda estacionaria de tensión o corriente formada a la salida del generador. En el caso específico de la relación de tensión, se suelen usar las siglas

VSWR (Voltage Standing Wave Ratio). La SWR da una referencia de la potencia que se transmite hacia la carga, o la reflexión que se produce (por mala adaptación) en la misma. Un valor de VSWR = 1 nos dice que la antena tiene una adaptación perfecta, es decir,  $S_{11} = 0$ .

Ancho de banda: se define como el rango de frecuencias en el cual el rendimiento de la antena, respecto a algunas características, se ajusta a un estándar especificado. [17]



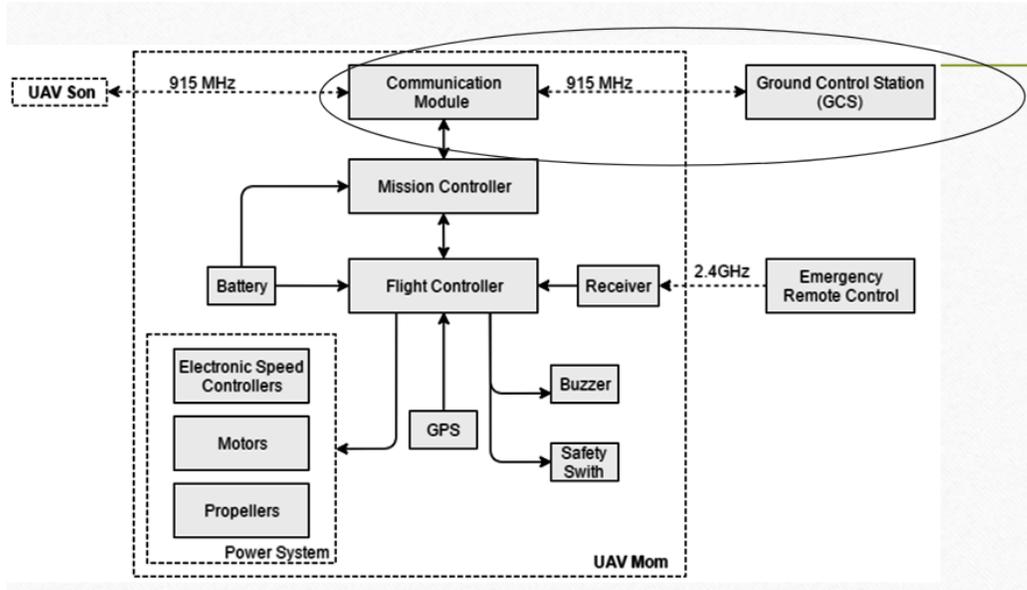
# Capítulo 3

## Diseño de la propuesta

En el presente capítulo se describe el diseño del sistema completo de comunicación a partir de diagramas de bloques, elección de componentes y se muestra la forma y los métodos a partir de los cuales se obtiene el diseño funcional de la antena. Haciendo uso de software de simulación se realiza la comprobación del funcionamiento del dispositivo. Haciendo uso de software de simulación CST Studio se realiza la comprobación de los resultados teóricos de los dispositivos. Por último, se detalla el método usado en el presente proyecto para la fabricación de este tipo de antenas.

### 3.1. Consideraciones preliminares

El diseño del sistema de comunicación consta de 2 módulos: el de comunicación del UAV (Tx) y la estación a Tierra (Rx) como se muestra en la figura 3.1.



[5] Figura 3.1. Arquitectura del sistema de hardware de un sistema aéreo no tripulado

Para propósitos de diseño se ha definido que cada módulo trabaje con 3 etapas en una frecuencia de 915 Mhz debido a su común uso en telemetría y mayor alcance teórico de acuerdo a la ecuación de Friis (ecuación 2.1). En el UAV que use un par de antenas monopolo de cuarto de onda y un radio módem para la transferencia de información conectado a un controlador de vuelo. En la estación a tierra que use un arreglo de antenas microstrip patch 2x1 y un radio módem para la transferencia de información conectado a una laptop. Se definieron en cada parte las etapas como se muestra en la figura 3.2.



Tabla 3.1 Comparación de equipos radio modem

|                                 | Frecuencia (Mhz) | G Rx (dBi) | G Tx (dBi) | Lambda (m) | Pt max (dBm) | Ls (dBm)   | Pr (dBm)     | Precio   | Peso (g) | Rec Sens (dBm) | Alcance max (Km) | Data Rate (Kbps) |
|---------------------------------|------------------|------------|------------|------------|--------------|------------|--------------|----------|----------|----------------|------------------|------------------|
| XTEND® -PKG RF MODEMS           | 915              | 2          | 2          | 0.3278689  | 30           | -91.670194 | -57.67019407 | \$278.00 | 200      | -110           | 64               | 125              |
| RFD 900+ Modem                  | 915              | 2          | 2          | 0.3278689  | 30           | -91.670194 | -57.67019407 | \$110.00 | 14.5     | -121           | 40               | 250              |
| Digi XBee-PRO® SX Module        | 915              | 2          | 2          | 0.3278689  | 30           | -91.670194 | -57.67019407 | \$100.00 | 3        | -103           |                  | 120              |
| Digi XBee-PRO® XSC (S3B)        | 915              | 2          | 2          | 0.3278689  | 24           | -91.670194 | -63.67019407 | \$42.00  | 5u8      | -109           |                  | 20               |
| DIGI XLR PRO® MODULE            | 915              | 2          | 2          | 0.3278689  | 30           | -91.670194 | -57.67019407 | \$249.00 | 11       | -98            |                  | 3200             |
| Digi XBee-PRO® 900HP            | 915              | 2          | 2          | 0.3278689  | 24           | -91.670194 | -63.67019407 | \$39.00  | <10      | -110           |                  | 10               |
| DIGI XBEE-PRO® 900 HP RF MODEMS | 915              | 2          | 2          | 0.3278689  | 24           | -91.670194 | -63.67019407 | \$154.00 | 150      | -110           |                  | 200              |
| Digi XBee SX RF Modems          | 915              | 2          | 2          | 0.3278689  | 30           | -91.670194 | -57.67019407 | \$200.00 | 142      | -113           |                  | 10               |
| XTEND® OEM RF MODULES           | 915              | 2          | 2          | 0.3278689  | 30           | -91.670194 | -57.67019407 | \$179.00 | --       | -110           |                  | 125              |
| DIGI XBEE® S2C DIGIMESH® 2.4    | 2400             | 2          | 2          | 0.125      | 18           | -100.046   | -78.04599702 | \$30.00  | --       | -101           |                  | 250              |

Se menciona los parámetros a analizar a continuación:

Ganancia de la antena: El RFD900x tiene dos puertos de antena y firmware que admite la operación de diversidad de antenas. Durante la secuencia de recepción, el módem verificará ambas antenas y seleccionará la antena con la mejor señal de recepción.

Frecuencia: Se trabaja en la banda ISM de 902 a 928 MHz. Por motivos de la regulación del MTC solo se trabajaría de 915 a 928 MHz.

Potencia de transmisión y sensibilidad del receptor: Potencia de 0 a 30 dBm (1W) en pasos de 1 dBm y sensibilidad mayor a 121 dBm a bajas tasas de datos.

Peso y dimensiones: 14 gramos y 30x57.7x12.8 mm respectivamente. Cómodo para su uso en el UAV.

Tasa de datos: de 4, 64, 125, 250 y 500 kbps. Para telemetría se necesita un mínimo de 60 kbps

Alcance: Línea de visión de 40 km o más dependiendo de las antenas. Las estimaciones de estas cifras se basan en terrenos de aire libre con fuentes limitadas de interferencia. El rango real

variará según la potencia de transmisión, la orientación del transmisor y el receptor, las condiciones climáticas, las fuentes de interferencia en el área y el terreno entre el receptor y el transmisor, incluidas las estructuras interiores y exteriores, como las paredes, árboles, edificios, colinas y montañas.

Se realizó una primera simulación teórica usando la ecuación de Friis (2.1), añadiendo las posibles pérdidas en el cable, para hallar los valores aproximados. Se usó una antena monopolo de cuarto de onda de 2.1dBi en Tx y Rx. Se obtiene una potencia de recepción de aproximadamente - 57.6dBm para un rango de 1km como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Comparación del equipo bajo la primera simulación teórica

|                | 300000000        |            |            |             | 0.5                                 | 0          | R(m)         | 1000     |              |                |
|----------------|------------------|------------|------------|-------------|-------------------------------------|------------|--------------|----------|--------------|----------------|
|                | Frecuencia (Mhz) | G Rx (dBi) | G Tx (dBi) | Lambda (m)  | Ltx (dBm)                           | Lrx(dBm)   | Pt max (dBm) | Ls (dBm) | Pr (dBm)     | Rec Sens (dBm) |
| RFD 900+ Modem | 915              | 2.1        | 2.1        | 0.327868852 | 0.125                               | 0          | 30           | 91.67019 | -57.59519407 | -121           |
|                |                  |            |            |             | 25dB per 100m<br>(0.25dB per meter) | Inside UAV |              |          |              |                |

En la segunda simulación teórica se cambia la antena de recepción por una antena microstrip patch de 2x1 el cual se estima una ganancia de 3 dBi. Se obtuvo una potencia de recepción similar -57.6dBm para un rango de 1.109km como se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Comparación del equipo bajo la segunda simulación teórica

|                | 300000000        |            |            |             | 0.5                                 | 0          | R(m)         | 1109     |              |                |
|----------------|------------------|------------|------------|-------------|-------------------------------------|------------|--------------|----------|--------------|----------------|
|                | Frecuencia (Mhz) | G Rx (dBi) | G Tx (dBi) | Lambda (m)  | Ltx (dBm)                           | Lrx(dBm)   | Pt max (dBm) | Ls (dBm) | Pr (dBm)     | Rec Sens (dBm) |
| RFD 900+ Modem | 915              | 3          | 2.1        | 0.327868852 | 0.125                               | 0          | 30           | 92.56882 | -57.59382499 | -121           |
|                |                  |            |            |             | 25dB per 100m<br>(0.25dB per meter) | Inside UAV |              |          |              |                |

En resumen, esto justifica que el cambio de las antenas en la estación a tierra mejora el alcance de la comunicación (como en el ejemplo teórico una mejora en un 10.9%). Se debe

tomar en cuenta también que el valor de sensibilidad debe ser siempre mayor a la potencia de transmisión para evitar la pérdida de la telemetría.

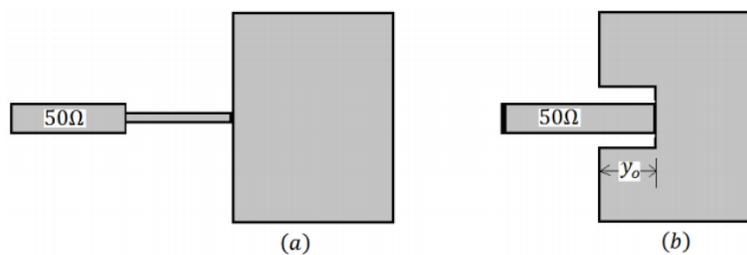
### 3.3 Proceso de obtención y selección de las antenas

#### 3.3.1. Antena en estación a tierra

Se eligió la antena microstrip por las razones mencionadas en el capítulo anterior. Hay un gran número de formas de antenas de parche. Los tipos más comunes son los parches rectangulares, cuadrados y circulares.

La elección del sustrato también es importante. El espesor del sustrato tiene un gran efecto sobre la frecuencia de resonancia y el ancho de banda de la antena.

Hay muchos métodos para alimentar una antena microstrip. Los métodos más populares son la línea microstrip, la sonda coaxial, el acoplamiento de proximidad y el acoplamiento de apertura. La línea microstrip es un método ampliamente utilizado debido a su simplicidad al diseñar y analizar, y fabricar. La figura 3.4 muestra los parches con alimentación de línea de microstrip desde el lado del parche.



[19] Figura 3.4. Antena parche microstrip con alimentación lateral.

El proceso para saber los parámetros reales de la antena antes de integrarlo al UAV comienza con el diseño, simulación y fabricación.

### 3.1.1.1 Diseño

Para el diseño se considerará el material del sustrato la fibra de vidrio (FR4), esto debido a que es uno de los materiales más usados en este tipo de antenas, además porque tiene un costo más bajo que otros posibles materiales y así también debido a que es más fácil de obtener en el mercado nacional. Las características que presenta este material se listan a continuación. [14]

Permitividad relativa del sustrato:  $\epsilon_r = 4.3$

Espesor del sustrato (FR4):  $h = 1.5 \text{ mm}$

Espesor del metalizado de cobre:  $h_c = 20 \mu\text{m}$

Tangente de pérdida de la fibra de vidrio:  $\tan D = 0.003$

Hay muchos métodos de análisis de antenas microstrip; los más populares son la línea de transmisión (en la que asumimos que el parche es una línea de transmisión o una parte de una línea de transmisión). La primera aproximación que hacemos es suponer que el grosor del conductor  $t$  que forma la línea no tiene efecto en nuestros cálculos, porque es muy delgada en comparación con el sustrato  $h$ , ( $h \gg T$ ); así que aquí se usa fórmulas empíricas que dependen solo de las dimensiones de la línea. El método es el siguiente:

1. Para un radiador eficiente, un ancho práctico que conduce a buenas eficiencias de radiación es:

$$W = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.1)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz en el espacio vacío y  $f_r$  la frecuencia de resonancia que es la central en este caso 915Mhz

2. Determine la constante dieléctrica efectiva de la antena microstrip usando ( $W/h > 1$ ):

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} * \left[ 1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-0.5} \quad (3.2)$$

3. Determinar la extensión de la longitud efectiva Delta L usando:

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.3)$$

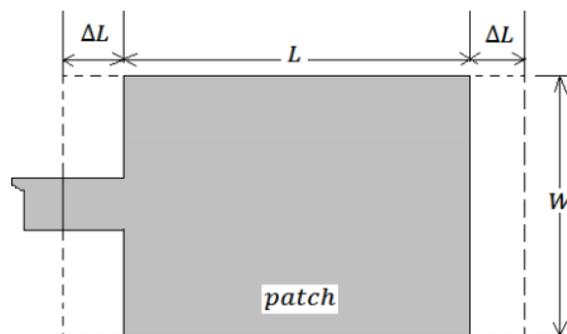


Figura 3.5. Longitud física y efectiva del microstrip

4. La longitud real del parche ahora se puede determinar:

$$L = \frac{1}{2fr\sqrt{e_{reff} * \epsilon_r}} - 2\Delta L \quad (3.4)$$

Por lo tanto, el parche diseñado debe tener  $L = 78.88 \text{ mm}$  y  $W = 100.7 \text{ mm}$  [19]

Bajo lo mencionado se realizó simulaciones para el modelo de alimentación por inserción de la figura 3.4b y la figura 3.6 para los valores necesarios teóricos.

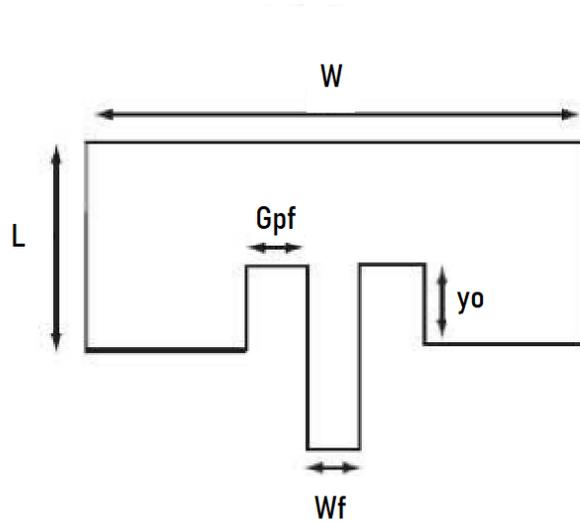


Figura 3.6. Modelado de la patch con alimentación por inserción. Fuente: elaboración propia

Queremos un valor de 50 ohmios para el match de la antena:  $R_{in} = 50 \Omega$  y las siguientes ecuaciones:

$$Rin = \frac{1}{2(G1+G12)}$$

$$Rin = \frac{1}{2(G1+G12)} \cos^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right)$$

$$G1 = \frac{I1}{120\pi^2}$$

$$I1 = \int \left[ \sin\left(\frac{koW}{2} \cos\theta\right) \right]^2 \sin^3\theta d\theta$$

$$G12 = \frac{1}{120\pi^2} \int \left[ \sin\left(\frac{koW}{2} \cos\theta\right) \right]^2 J_0(koL \sin\theta) \sin^3\theta d\theta$$

$$\text{Length of ground plane} \geq \left(\frac{\lambda_{eff}}{4}\right) \times 2 + L$$

$$\text{Width of ground plane} \geq \left(\frac{\lambda_{eff}}{4}\right) \times 2 + W$$

Con ello se obtiene un valor de  $y_0$  ( $X_0$ )=29,22mm.

Además con las ecuaciones siguientes y  $Z_c$  ( $Rin$ )=50  $\Omega$  se obtendrá el  $W_0$  ( $W_f$ ) = 2,941 mm

$$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \ln \left[ \frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right], & \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff}} \left[ \frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]}, & \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases}$$

Luego de tener los valores calculados se mostrarán en la tabla 3.4 y se procede a la simulación.

Tabla 3.4. Resultados teóricos de los valores necesarios para la simulación de un solo patch

| c        | 300000000   |          |     |       |       |       |           |         |         |
|----------|-------------|----------|-----|-------|-------|-------|-----------|---------|---------|
| Fr (Mhz) | Lambda (mm) | Material | Er  | h(mm) | L(mm) | W(mm) | Rin (ohm) | Xo (mm) | Wf (mm) |
| 915      | 327.8688525 | FR4      | 4.3 | 1.5   | 78.88 | 100.7 | 50        | 29.22   | 2.941   |

### 3.1.1.2 Simulación

Las simulaciones computacionales permiten obtener resultados de manera relativamente rápida y confiable para el diseño y desarrollo de dispositivos electrónicos. Para la obtención de resultados preliminares se hace indispensable el uso de software de simulación computacional. En este trabajo de tesis se ha decidido usar el software CST 2018, parte de la marca francesa Dassault Systèmes [20] que desarrolla software de diseño en 3D. Este usa como métodos computacionales de solución FDTD (método de diferencias finitas en el dominio de tiempo) y FEM (Método de Elementos Finitos), dichos métodos abarcan una amplia gama de frecuencias y formas geométricas en 3D.

Para dichas simulaciones se usaron los equipos del laboratorio de óptica (V106) de la Facultad de Telecomunicaciones de la PUCP.

Un primer intento de simulación con las medidas calculadas en la tabla 3.3 ajustadas para obtener los mejores resultados se presentan en la figura 3.7.

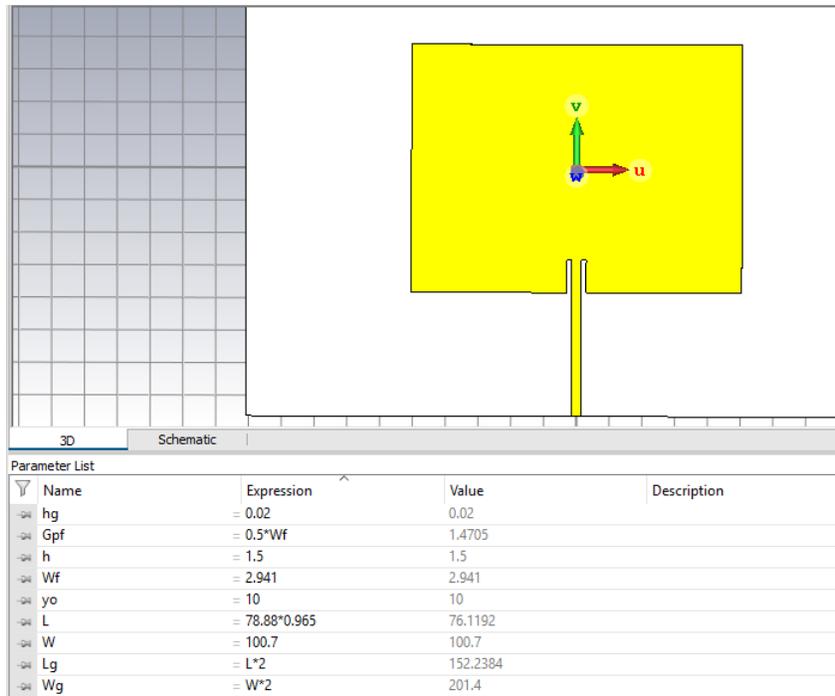


Figura 3.7. Resultados de los valores necesarios en mm para la simulación de un solo patch. Fuente: elaboración propia

El mejor acoplamiento se da en la figura 3.8, correspondiente a la frecuencia de 915 Mhz con un S11 de -31.98 dB (figura 3.8). Además de un ancho de banda de 20,67 Mhz

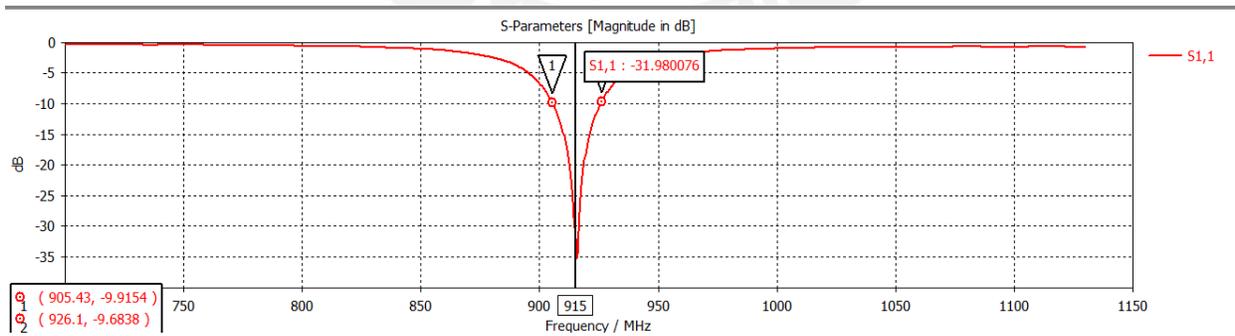


Figura 3.8 Mejor acoplamiento logrado con el monopolo. Fuente: elaboración propia

Es apropiado mencionar que el patrón de radiación obtenido es el correspondiente a un monopolo, es decir, omnidireccional.

Por último, se muestran los resultados obtenidos de la simulación del diseño final de la antena que es de un microstrip patch 2x1, resultados que serán contrastados a continuación:

En este caso se especificó mejorar el acoplamiento de la antena para tener mejores resultados, mediante este procedimiento se obtuvieron los valores finales de la tabla 3.4. En ella se incluyó las dimensiones del divisor de potencia y los transformadores de impedancia de cuarto de onda. [17] (L25, W25, L35, W35, L50, W50)

Tabla 3.5. Dimensiones correspondientes a los anchos y largos de los elementos de la antena

| $\lambda_f$ (mm) | E <sub>eff</sub> | D(mm) | L25 (mm) | W25 (mm) | L35(mm)     | W35(mm) | E <sub>eff</sub> | L50 (mm) | W50(mm) |
|------------------|------------------|-------|----------|----------|-------------|---------|------------------|----------|---------|
| 3                | 4,17             | 80    | 19,72    | 7,98     | 44,29689561 | 5,07    | 3,424            | 19,72    | 2,941   |

El diseño completo del patch 2x1 se muestra en la figura 3.9.

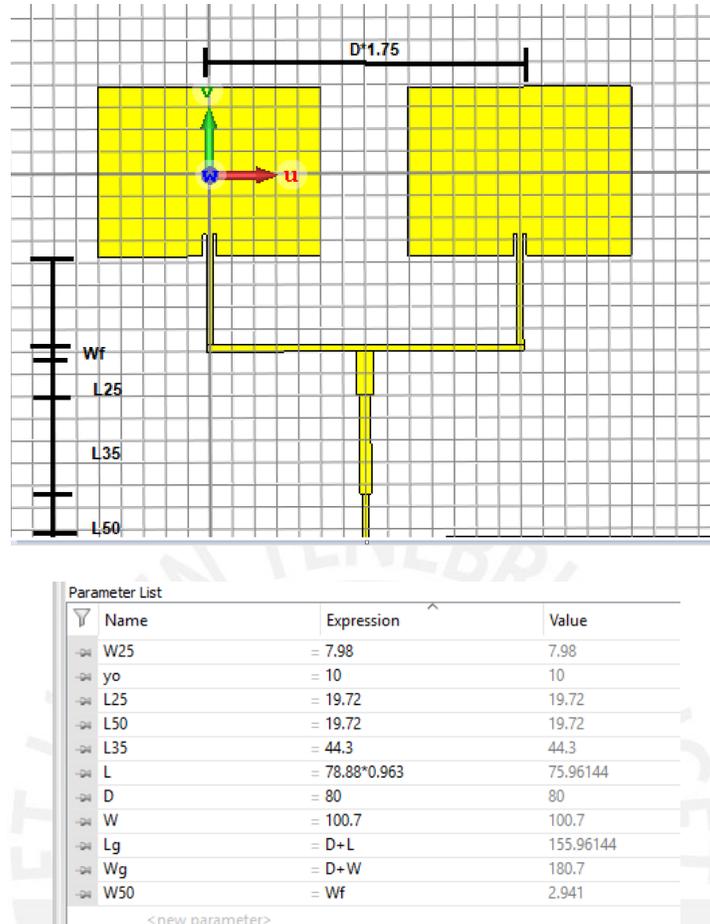
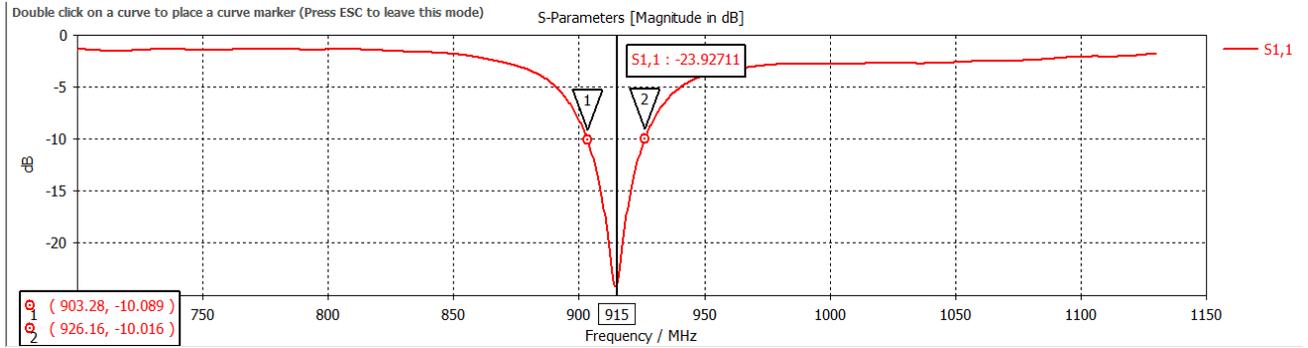


Figura 3.9. Geometría y parámetros ajustados finales para la simulación de un patch 2x1. Fuente: elaboración propia

El coeficiente de reflexión ( $S_{11}$ ) obtenido muestra el correcto acoplamiento de la antena (por debajo de -10 dB), desde 903.28 MHz hasta 926.16 MHz. Teniendo como valor de mejor acoplamiento -23.9 dB a 915 MHz en la figura 3.10



Figurs 3.10. S11 de la antena final

Tal como se observa en las figuras 3.11; correspondiente a la simulación realizada, el valor de VSWR se acerca a 1, siendo este valor el ideal.

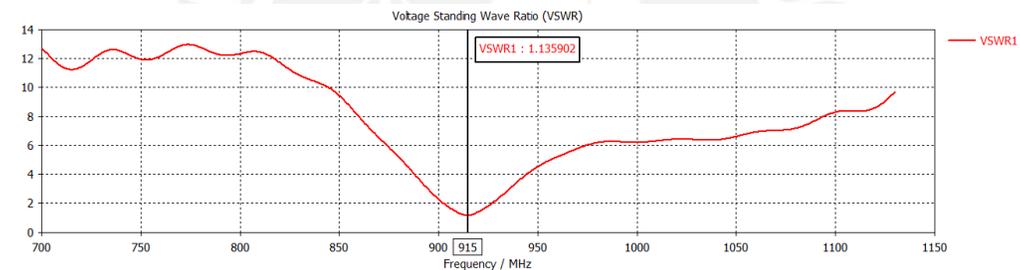


Figura 3.11: VSWR de la antena final

La ganancia obtenida en la banda está en un promedio de 1.82 dB según la figura 3.12 y 3.13.

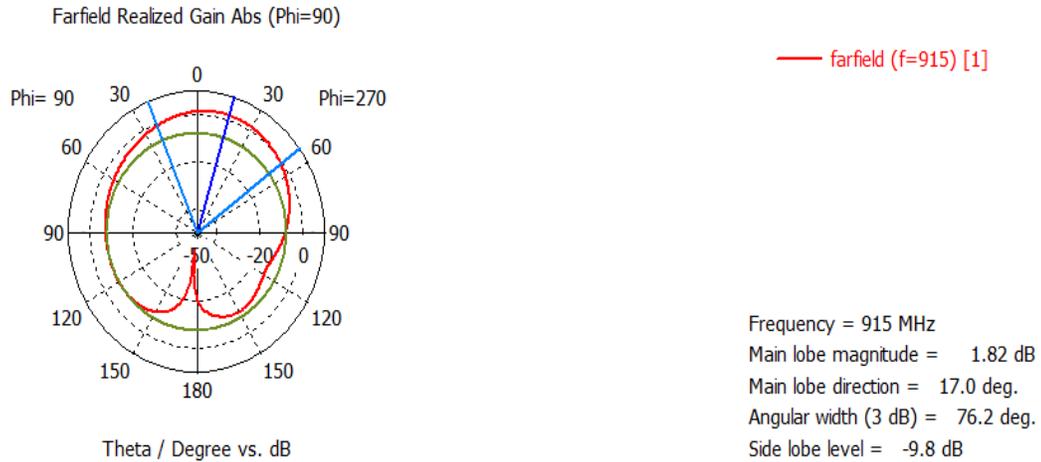


Figura 3.12. Diagramas de radiación en azimut y elevación para 915 Mhz. Fuente: elaboración propia

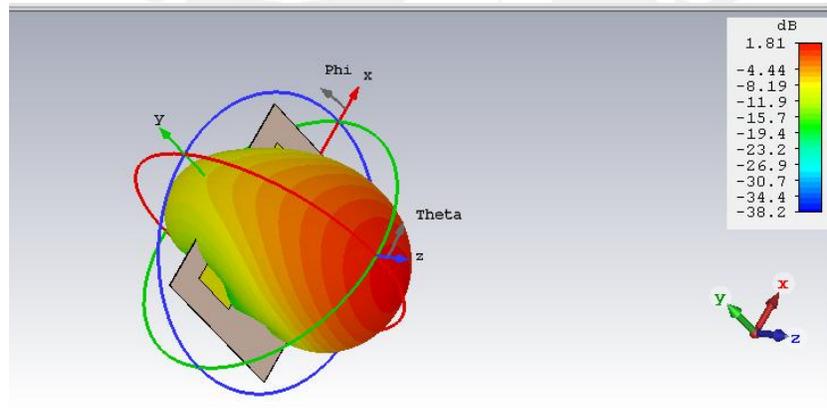


Figura 3.13. Patrón de radiación de elevación en 3D para 915MHz Fuente: elaboración propia

### 3.3.1.3 Fabricación

Una vez establecido, mediante simulación, el diseño final de la antena, se procede a su fabricación. Esto se realizó con los equipos del Laboratorio de comunicaciones ópticas de la Sección Ingeniería de las Telecomunicaciones de la PUCP.

Tal como se indicó anteriormente el sustrato a usar es fibra de vidrio (FR4). El método usado es diferente al comúnmente usado que es por transferencia térmica. Se usó máquinas CNC para el proceso. Primero se exportó el archivo de CST a DXF (Autocad), y luego se convirtió a un formato Gerber. Dicho formato permitía el uso de dichas máquinas CNC para el trazado de la pista y dimensiones del diseño como se muestra en la figura 3.13

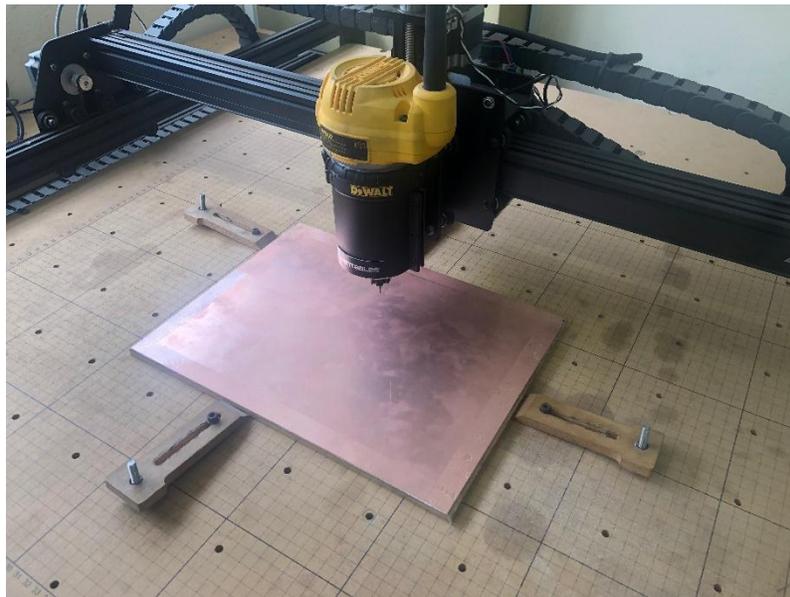


Figura 3.14 Fibra de vidrio cortada para su trazado en la máquina CNC. Fuente: elaboración propia

Luego de tener el trazado como en la figura 3.14 se procede al cubrimiento de las partes que quedarían con cobre: área de los parches, las alimentaciones y el plano a tierra (parte trasera a la figura 3.14)

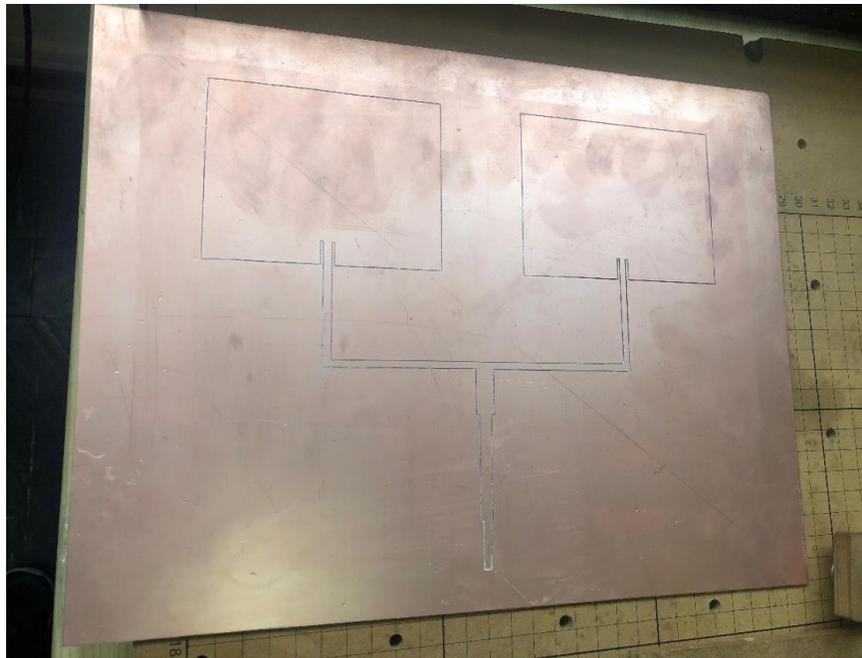


Figura 3.15 Parte frontal del diseño de la pista bajo el método de máquinas CNC. Fuente: elaboración propia



Figura 3.16 Cubrimiento de la parte de cobre

Dicho cubrimiento se realiza bajo el pintado de negro (plumón indeleble) y con cinta adhesiva encima para evitar el decapamiento de dicha parte como se muestra en la figura 3.15. Al igual se realiza con el plano a tierra. Por último, se realiza el proceso de decapado con el ácido férrico. Además, se suelda un conector SMA, teniendo cuidado en el proceso de soldadura, ya que un exceso del estaño empleado, una mala colocación del conector, un calentamiento excesivo del mismo o una superficie rugosa en la soldadura, pueden repercutir negativamente en el funcionamiento de la antena; el resultado final de la fabricación es el mostrado en la figura 3.16.

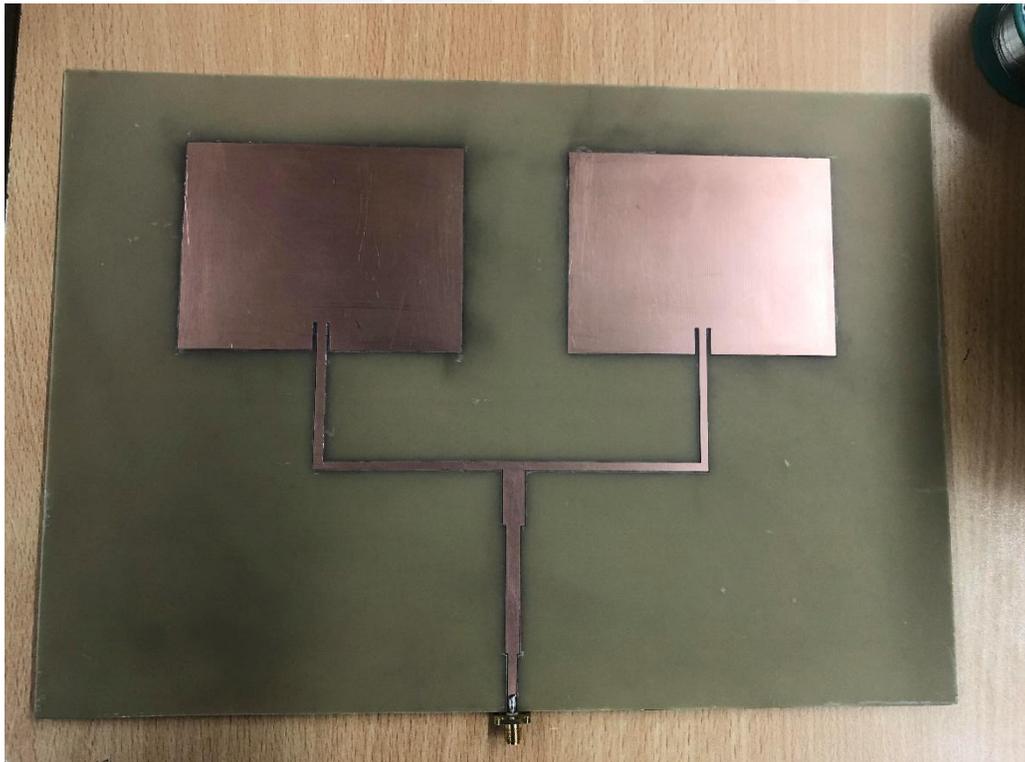


Figura 3.17 Vista frontal de la antena procesada por completo. Fuente: elaboración propia

### 3.4 Elección del UAV

Para simular un sistema de comunicación de largo alcance, el UAV más utilizado para estas pruebas se contó con un Skywalker Black X8 como se muestra en la figura 3.18 de parte del Grupo de Investigación de Sistemas Aéreos No Tripulados (GI - SANT-PUCP)



Figura 3.18. Skywalker Black X8

# Capítulo 4

## Pruebas y resultados

En el presente capítulo se caracteriza la antena a través de la medición del parámetro que la define; en este proyecto se realiza la medición del coeficiente de reflexión (parámetro S11), a su vez que se hace el correspondiente análisis en comparación con los resultados obtenidos mediante simulación en el capítulo 3. También se muestra las pruebas y los resultados obtenidos por el UAV con el sistema de comunicación integrado tanto en tierra como en aire. Se realizará la validación del sistema desarrollado mediante un simulador de estación de control para determinar su alcance obtenido.

### 4.1 Medición del coeficiente de reflexión

Esto se realizó con los equipos del Laboratorio de Tecnologías Inalámbricas de la Sección Ingeniería de las Telecomunicaciones de la PUCP. con el apoyo del profesor Manuel Yarlequé.

Para obtener el coeficiente de reflexión de la antena se usó el analizador de redes (VNA - Vector Network Analyzer), de la marca Agilent, cuyo rango de frecuencias abarca desde los 50 MHz hasta los 40 GHz. Una vez calibrado el VNA, se procede a conectar la antena y posicionarla de manera tal que esté lo más alejada posible de los elementos metálicos existentes

en las cercanías, esto para evitar posibles reflexiones que afecten la medición. Esto fue garantizado por los ingenieros que laboran en dicho laboratorio debido a la complejidad de este proceso.

El resultado de la medición del S11 (Coeficiente de Reflexión) de la antena se muestra en la figura 4.1, en donde se observa el correcto acoplamiento de la antena (menor a -10 dB) para la banda de frecuencias requerida.

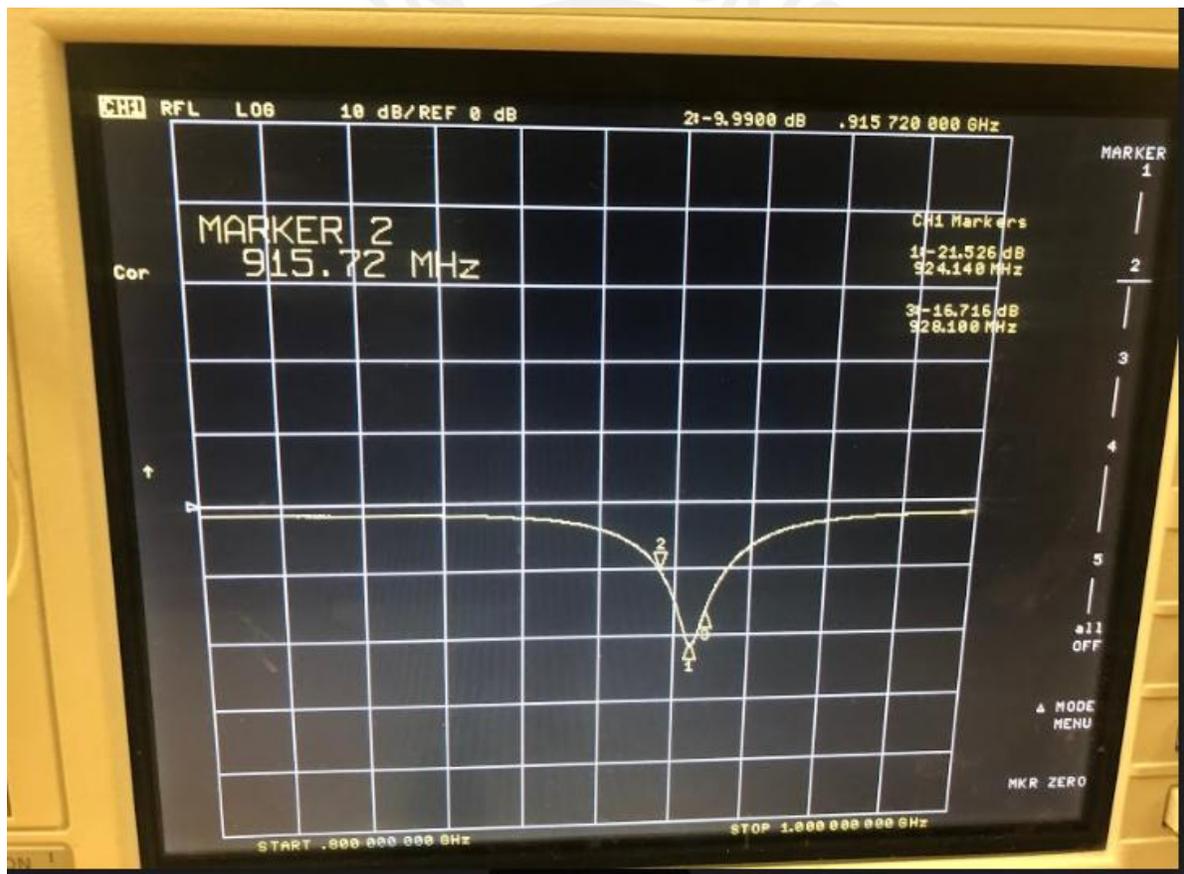


Figura 4.1: Medición del S11 de la antena usando el analizador de redes. Fuente: elaboración propia

El punto de mejor acoplamiento se da en la frecuencia de 924 MHz a - 21.526dB, y el ancho de banda resultante se obtiene de la diferencia de los valores límites de frecuencia entre el rango de 915 y 928 MHz, es decir 13 MHz. Finalmente, la tabla 4.1 muestra la comparación de la medición frente a la simulación (CST), cuyos valores son los más cercanos a los medidos.

Tabla 4.1: Acoplamiento obtenido en medición y simulación

|          | Medición         |          | Simulación       |          |
|----------|------------------|----------|------------------|----------|
|          | Frecuencia (MHz) | S11 (dB) | Frecuencia (MHz) | S11 (dB) |
| f1       | 915.72           | -10      | 903.28           | -10.089  |
| fc       | 924.14           | -21.526  | 915              | -23.9    |
| f2       | 928.1            | -16.7    | 926.16           | -10.06   |
| BW (MHz) | 16.84            |          | 23.44            |          |

## 4.2 Pruebas en tierra en campo abierto

La antena se ubicó en una posición fija ubicada en el laboratorio del Grupo de investigación de sistemas aéreos no tripulados, como se muestra en la figura 4.2 mientras que el avión se iba desplazando a lo largo del campus de la PUCP hasta la cancha de rugby.



Figura 4.2. Estación a Tierra en prueba en tierra (Fuente: Elaboración propia)

Para esta prueba, la distancia de ida y vuelta era la misma y su valor llegó a 1km (0.66 millas) como se muestra en la figura 4.3 en el que mediante un aplicativo móvil que usa Google Maps se mapeó el recorrido.



## Evening Walk

|              |                |
|--------------|----------------|
| Distance     | Elevation Gain |
| 0.6 mi       | 30 ft          |
| Elapsed Time | Calories       |
| 12:42        | 0 cal          |

Figura 4.3. Cálculo de la distancia recorrida (Fuente: Elaboración propia)

Además, en las figuras 4.4a y 4.4b se muestran el punto inicial y final respectivamente en el simulador de estación de control que en este caso se usa el programa Mission Planner, que es usado para programar vuelos y para registrar telemetría en el GISANT.



Figura 4.4a Punto inicial para la prueba en Tierra mostrado en el Mission Planner  
y figura 4.4 b Punto final para la prueba en Tierra mostrado en el Mission Planner

Con esta prueba se validó el funcionamiento del sistema sin vuelo y se procedió a realizarlo con el dominio del vuelo en el ítem 4.3.

Por último, en la figura 4.5 se muestra la calidad de la señal en un 57% en el punto final medido.

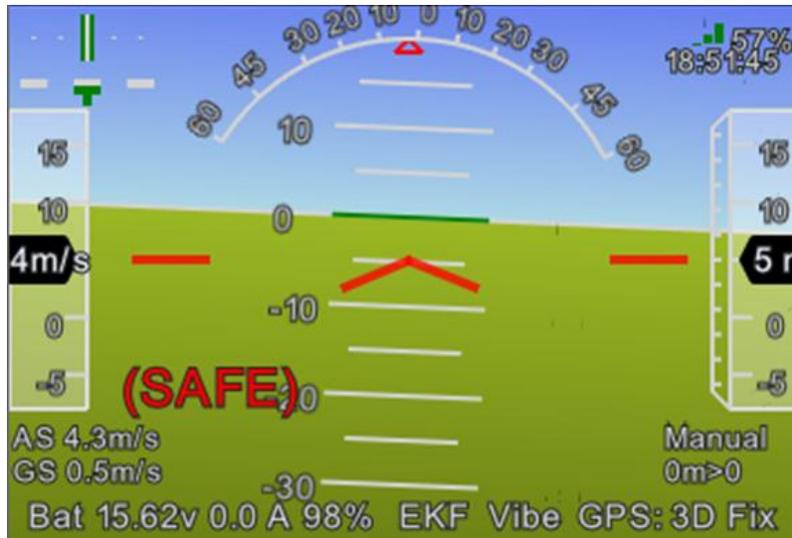


Figura 4.5 Estado del avión en el Mission Planner

### 4.3 Pruebas en vuelo

Se realizaron 2 pruebas en vuelo con el avión de modelo Skywalker Black X8 proporcionado por el Grupo de investigación de sistemas aéreos no tripulados de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Este avión se llevó al volcán Sabancaya en Arequipa como parte de un proyecto del IGP (Instituto Geofísico del Perú). El primero se realizó sin contar con el sistema desarrollado en esta tesis el 17 de Setiembre del 2018 y los resultados presentaron intermitencias con la señal de telemetría como se muestra en la figura 4.6



Figura 4.6 Punto de pérdida de conexión mostrado en el Mission Planner sin el sistema de comunicación desarrollado



Figura 4.7. Grafica % de la señal con tiempo en minutos sin el sistema de comunicación desarrollado

Según los resultados se visualizamos que entre los minutos 6 y 10 no se presenta señal debido al decaimiento de la señal como se muestra en la figura 4.7. Además, con respecto a la distancia no se tiene data también durante esos tiempos como se muestra en la figura 4.8.



Figura 4.8. Grafica distancia recorrida en metros sin el sistema de comunicación desarrollado

Para el segundo vuelo se procede a realizar mejoras con la estación a tierra mediante un soporte mejorado con una plancha de acrílico y un trípode como se muestra en la figura 4.9 al incluir la antena. Se realizó la observación de resultados el 21 de noviembre del 2018.



Figura 4.9 UAV con la estación a tierra lista para que el UAV pueda hacer el vuelo por el Volcán Sabancaya

Finalmente, el avión se mantuvo en el vuelo y logró darse una vuelta sobre el cráter del volcán y llegando a unos 7.35km de alcance y a una señal de 72% como se muestra en la figura 4.10.



Figura 4.10 Punto final para la prueba en vuelo mostrado en el Mission Planner

Además, se calculó en varios tiempos del vuelo los parámetros de alcance y porcentaje de la señal como muestran las figuras 4.11 y 4.12

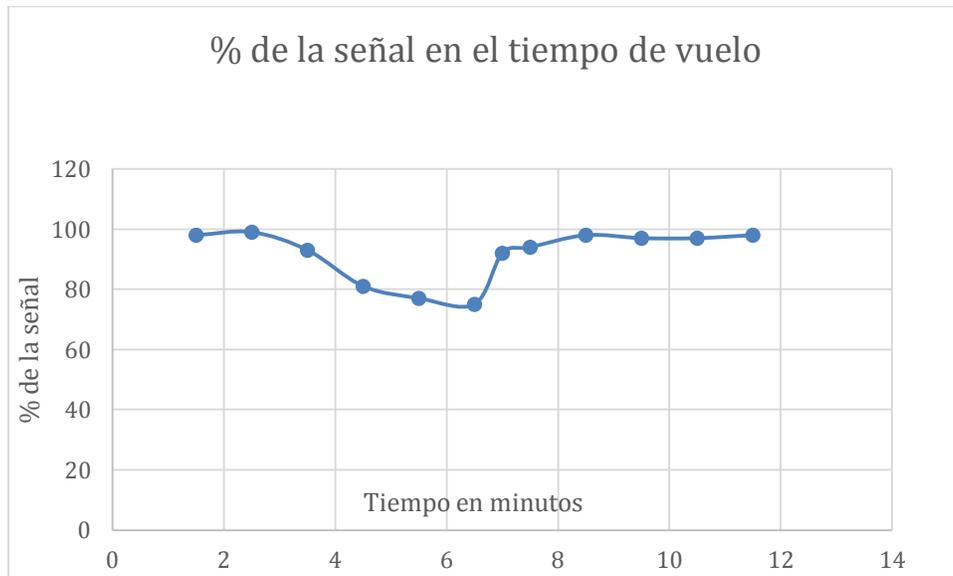


Figura 4.11 Grafica % de la señal con tiempo en minutos con el sistema desarrollado

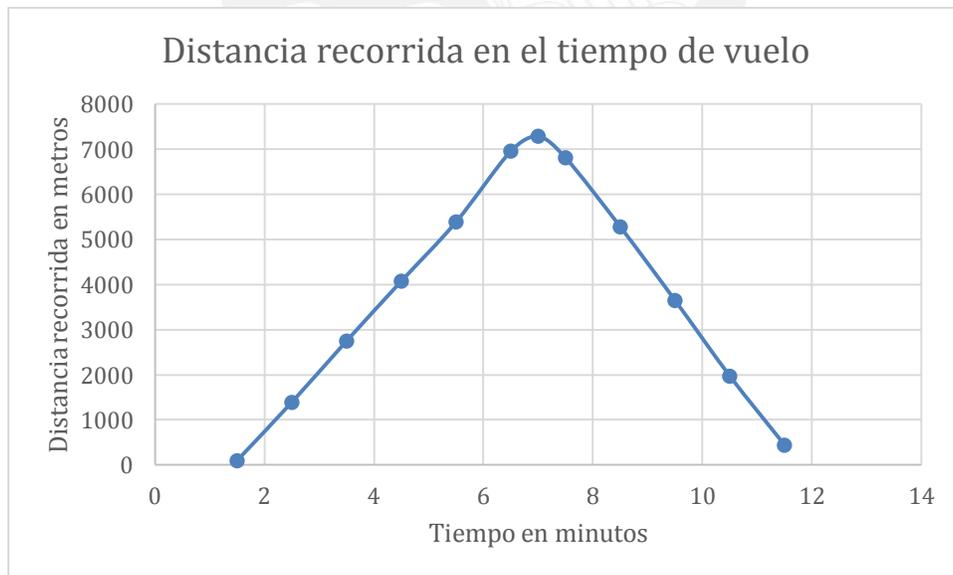


Figura 4.12 Grafica distancia recorrida en metros con tiempo en minutos con el sistema desarrollado

Estas gráficas nos indican que el recorrido tuvo un tramo en el minuto 7 del vuelo donde se perdió la señal hasta en un 28% y además el avión sobrepasaba el cráter en ese tiempo.

Esto garantiza un resultado más eficiente de la telemetría con respecto al vuelo sin el sistema desarrollado en Setiembre del 2018 [21] del mismo proyecto del IGP.

Por último, se realizó un análisis económico de la fabricación de la antena y se tuvo un costo de 130 soles aproximado y eso nos indica el bajo costo del mismo (Tabla 4.2)

| Material                       | Costo aproximado (soles) |
|--------------------------------|--------------------------|
| FR4 doble cara (media plancha) | 100                      |
| Plumones y cinta               | 5                        |
| Costo soporte (acrílico)       | 20                       |
| Acido Ferrico (decapado)       | 5                        |
|                                | 130                      |

Tabla 4.2 Análisis económico de la fabricación de la antena patch

Además, considerando unas horas-hombre aproximadas por el tiempo de trabajo de 3000 soles.

Con este sistema de comunicación, la telemetría no se perdería por más que el UAV pueda perder el rumbo, ya que al transmitir la señal continua durante todo el tiempo podríamos tener su recorrido durante todo el trayecto y así en caso perderse el UAV poder ubicarlo.

En resumen, se concluye que el sistema elaborado cumplió con los requerimientos y pudo mantenerse estable en vuelo sin perder la calidad de la señal y sin intermitencias. Esto da la mayor relevancia e importancia de la telemetría para todos los sistemas aéreos no tripulados.



# Conclusiones

Luego del desarrollo de la presente Tesis se concluye que:

- Se analizó los requerimientos necesarios con el estudio de las causas de la pérdida de la telemetría. Además de saber que uno de los factores más importantes para corregir dichas intermitencias de la telemetría era el cambio en la antena de la estación a tierra.
- Se realizó la estructura de comunicación adecuada considerando los requerimientos, la conveniencia de diseñar una antena microstrip patch y elegir los equipos adecuados para su mejor funcionamiento en transmisión y recepción.
- Se realizó todo el procedimiento general de elaboración de una antena desde su diseño, simulación, fabricación y medición para su futura implementación en el sistema aéreo no tripulado de manera exitosa.
- Se realizaron dos pruebas con dicho sistema; una en tierra en la que se solo se movía el avión sin LOS (Línea de vista) y se obtuvo que llegó a 1 km sin problemas. El otro en vuelo por el Volcán Sabancaya en el que se pudo obtener 7.3km de alcance y manteniendo la calidad de la señal hasta en un 72%.
- No se tuvo muchos problemas con el costo debido a que se tenía los equipos para el proceso de elaboración de la antena, en el cual el costo más alto era del FR4 (fibra de vidrio).

# Recomendaciones

A continuación, se realizan algunas recomendaciones que se deben tener en cuenta sobre esta tesis.

- Se debió considerar que el diseño de la antena pudo ser mejor para lograr alta ganancia con más capas de sustrato y con diferente tipo de polarización.
- Se debió medir la ganancia real con un método de 2 antenas para comparar resultados con los teóricos, pero para ello se debió realizarse una copia exacta de la antena para transmisión y recepción.
- Se pudo hacer un mejor soporte en la estación a tierra con piezas 3D y otro material más resistente.

# Bibliografía

[1] Radio division TEC. Communication aspects of Unmanned Aircraft System (UAS). Consulta Agosto 2018. <http://tec.gov.in/pdf/Studypaper/UAV.pdf>

[2] Rabanal Carretero, Danna Zuleyka

2011 INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA UAV CON CONTROL AUTÓNOMO EN UN EQUIPO AÉREO PARA AGRICULTURA DE PRECISIÓN. Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

[3] Khalid Al-Hajjaji, Mouadh Ezzin, Husain Khamdan y Abdelhakim El Hassani. Design, Development and Evaluation of a UAV to Study Air Quality in Qatar. Consulta Agosto 2018 <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1709/1709.05628.pdf>

[4] Farhan Mohamed. EFFICIENT DATA COMMUNICATION IN UNMANNED AERIAL VEHICLES. Consulta septiembre 2018 [https://scholarworks.uaeu.ac.ae/cgi/viewcontent.cgi?article=1028&context=all\\_theses](https://scholarworks.uaeu.ac.ae/cgi/viewcontent.cgi?article=1028&context=all_theses)

[5] Boyang Li, Yifan Jiang, Jingxuan Sun, Lingfeng Cai and Chih-Yung Wen. Development and Testing of a Two-UAV Communication Relay System. Consulta Setiembre 2018 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5087484/pdf/sensors-16-01696.pdf>

[6] Moseley Mark, Sanjiv Singh. Integrated Long-range UAV/UGV Collaborative Target Tracking

Consulta septiembre 2018. <https://www.researchgate.net/publication/253612001/download>

[7] Kubica, Vojtěch

Design of Communication Subsystem for Unmanned Aerial Vehicle. Consulta marzo 2018

[https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/6/6c/Bp\\_2015\\_kubica\\_vojtech.pdf](https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/6/6c/Bp_2015_kubica_vojtech.pdf)

[8] Mammadov, Elchin

Long-range Communication Framework for Autonomous UAVs. Consulta marzo 2018

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.919.3996&rep=rep1&type=pdf>

[9] Pedro de Oliveira Martins Gersão Miller

Design of a Remote Person View System for a Long Range UAV. Consulta Marzo 2018

[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/845043405437389/PedroMiller\\_Thesis.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/845043405437389/PedroMiller_Thesis.pdf)

[10] Reg Austin

UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS: UAVS DESIGN, DEVELOPMENT AND DEPLOYMENT

Consulta Mayo 2018

[http://jar2.com/Files/Reg\\_Austin\\_-](http://jar2.com/Files/Reg_Austin_-)

[\\_Unmanned\\_Air\\_Systems\\_UAV\\_Design\\_Development\\_and\\_Deployment\\_-\\_2010.pdf](http://jar2.com/Files/Reg_Austin_-)

[11] El Peruano

RESOLUCIÓN MINISTERIAL N° 095-2018 MTC/01.03 Consulta Mayo 2018

<https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/modifican-el-plan-nacional-de-atribucion-de-frecuencias-pn-resolucion-ministerial-n-095-2018-mtc0103-1620023-1/>

[12] Advance Technical Conference 2006

RF Basics, RF for Non-RF Engineers. Consulta Junio 2018

<http://www.ti.com/lit/ml/slap127/slap127.pdf>

[13] Milcom 2015

SPECTRUM - SECURE COMMUNICATIONS FOR AUTONOMOUS UAS/UAV  
PLATFORMS Consulta Junio 2018

<https://www.afcea.org/events/documents/MILCOM2015PPTDrozd-ANDROIII.pdf>

[14] Martínez Odiaga, Hansel

2015 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA MICROSTRIP PARA LA BANDA CELULAR LTE DE 700 MHZ. Tesis para optar el Título de Ingeniero de las Telecomunicaciones. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

[15] Junfei Xie, Firas Al-Emrani, Yixin Gu, Yan Wan , Shengli Fu. UAV-Carried Long Distance Wi-Fi Communication Infrastructure. Consulta Setiembre 2018.  
<http://www.uta.edu/faculty/wanlab/papers-PDF/Conference/C72.pdf>

[16] Jienan Chen, Junfei Xie, Yixin Gu, Songwei Li, Shengli Fu, Yan Wan, and Kejie Lu. Long-Range and Broadband Aerial Communication Using Directional Antennas (ACDA): Design and Implementation. Consulta Setiembre 2018.  
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7968488>

[17] C. BALANIS, "Antenna theory: Analysis and Design", New Jersey: J. Wiley, 2005.

[18] RFDesign, Hoja técnica del RFD900x. Consulta Octubre 2018.  
<http://files.rfdesign.com.au/Files/documents/RFD900x%20DataSheet.pdf>

[19] Fatthi Alsager, Ahmed. Design and Analysis of Microstrip Patch Antenna Arrays  
[http://anteny.jeziorski.info/wp-content/uploads/2011/10/2011\\_Alsager.pdf](http://anteny.jeziorski.info/wp-content/uploads/2011/10/2011_Alsager.pdf)

[20] CST STUDIO SUITE: COMPLETE TECHNOLOGY FOR ELECTROMAGNETIC SIMULATION.  
<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>

[21] El Sabancaya desde la mirada de drones, por el Dr. Danny Scipion  
<https://portal.igp.gob.pe/sabancaya-mirada-drones-dr-danny-scipion>