



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES
Y REDES**

**“IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE
COMUNICACIÓN PARA TRANSMITIR VIDEO DE BAJA
RESOLUCIÓN EN TIEMPO REAL PARA UN VEHÍCULO AÉREO
NO TRIPULADO (DRONE)”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto técnico

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y
REDES**

AUTOR:

VICTOR ALEJANDRO SIGCHA VILLA

Riobamba – Ecuador

2021



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES
Y REDES**

**“IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE
COMUNICACIÓN PARA TRANSMITIR VIDEO DE BAJA
RESOLUCIÓN EN TIEMPO REAL PARA UN VEHÍCULO AÉREO
NO TRIPULADO (DRONE)”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto técnico

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y
REDES**

AUTOR: VICTOR ALEJANDRO SIGCHA VILLA

DIRECTOR: ING. HUGO OSWALDO MORENO AVILÉS Ph.D.

Riobamba – Ecuador

2021

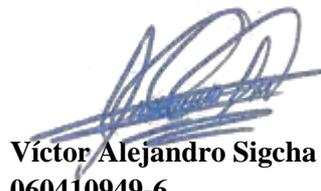
© 2021, Víctor Alejandro Sigcha Villa

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Víctor Alejandro Sigcha Villa, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 14 de octubre de 2021



Víctor Alejandro Sigcha Villa
060410949-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo: Proyecto Técnico. **IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN PARA TRANSMITIR VIDEO DE BAJA RESOLUCIÓN EN TIEMPO REAL PARA UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (DRONE)** realizado por el señor: **VICTOR ALEJANDRO SIGCHA VILLA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Jefferson Alexander Ribadeneira Ramírez; PhD. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	2021-10-14
Ing. Hugo Oswaldo Moreno Avilés; PhD. DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	2021-10-14
Ing. José Luis Tinajero León M; Sc. MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	2021-10-14

DEDICATORIA

Todo este esfuerzo está dedicado a mis Padres VICTOR y SONIA por su apoyo incondicional en cada momento de mi vida, creyendo en este proyecto que hoy se hace realidad gracias a la constancia, esfuerzo y dedicación.

A mis hermanos por su cariño, apoyo y paciencia que me brindaron a lo largo de este proceso académico.

A toda mi familia y amigos que siempre estuvieron pendientes de mi formación profesional.

Alejandro.

AGRADECIMIENTO

Agradecido con Dios por ser mi guía y mi acompañante en el transcurso de mi vida, bendiciéndome con paciencia, perseverancia y sabiduría para culminar una de mis metas propuestas.

Agradezco al personal docente de la Escuela de Ingeniería Electrónica, Telecomunicaciones y Redes que tiene la responsabilidad de formar profesionales de calidad y brindar conocimientos, amistad y confianza.

Al director de trabajo de titulación el Ing. Hugo Moreno, por su ayuda en el proceso de mi formación académica y ejecución del presente proyecto.

Alejandro.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvii
RESUMEN.....	xviii
SUMMARY.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Formulación del Problema.....	2
1.2. Sistematización del Problema.....	2
1.3. Justificación.....	2
1.4. Justificación Teórica.....	2
1.5. Justificación Aplicativa.....	4
1.6. Objetivos.....	4
1.6.1. <i>Objetivo General</i>	4
1.6.2. <i>Objetivos Específicos</i>	4

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Vehículos Aéreos no Tripulados (Drones).....	6
2.1.1. <i>Aplicaciones</i>	6
2.1.2. <i>Visión en primera persona (FPV)</i>	7
2.2. Sistemas de Comunicación para VANT.....	7
2.2.1. <i>Espectro radioeléctrico</i>	7
2.2.2. <i>Comunicaciones inalámbricas</i>	9
2.2.3. <i>Modulaciones</i>	10
2.2.3.1. <i>Modulación de video</i>	10
2.2.3.2. <i>Modulación en amplitud (AM)</i>	10

2.2.3.3. <i>Modulación en frecuencia (FM)</i>	11
2.2.4. <i>Procesamiento digital de señales</i>	11
2.2.4.1. <i>Procesado de imágenes digitales</i>	12
2.2.4.2. <i>Aplicaciones del DPS</i>	12
2.3. Componentes tecnológicos de un sistema aéreo no tripulado (UAS)	13
2.3.1. Segmento de vuelo	13
2.3.1.1. <i>Drone DJI Matrice 600</i>	13
2.3.1.2. <i>Transmisor TS-830</i>	14
2.3.1.3. <i>Cámara Raspberry pi versión 1.3</i>	15
2.3.1.4. <i>Sistema de alimentación de energía</i>	16
2.3.1.5. <i>Raspberry Pi 3 B</i>	16
2.3.2. Segmento terreno	17
2.3.2.1. <i>Receptor RC-832</i>	18
2.3.2.2. <i>Mando a distancia series Matrice 600</i>	19
2.3.2.3. <i>Arduino nano</i>	19
2.3.2.4. <i>Capturadora de video (EasyCap)</i>	20
2.4. Software y equipamiento	21
2.4.1.1. <i>CST STUDIO Suite</i>	21
2.4.1.2. <i>Python</i>	21
2.4.1.3. <i>Analizador de redes vectoriales E5071C ENA Keysight</i>	22
2.4.1.4. <i>Analizador de espectros MS2724C</i>	22
2.5. Antenas de un sistema de comunicación para un VANT	23
2.5.1. Tipos de Antenas para FPV	24
2.5.1.1. <i>Antena Monopolo</i>	24
2.5.1.2. <i>Antena Dipolo</i>	25
2.5.1.3. <i>Antenas Patch</i>	25
2.5.1.4. <i>Arreglo de antenas</i>	26
2.5.1.5. <i>Antenas Pagoda</i>	27
2.5.1.6. <i>Antena Hoja de Trébol</i>	27
2.5.1.7. <i>Antena Helicoidal</i>	28
2.6. Regulación relativa a los VANT	28
2.6.1. Regulaciones en el Ecuador	28
2.6.2. Regulación del uso de frecuencias	29
2.6.2.1. <i>Aspectos legales</i>	29
2.6.2.2. <i>Normas técnicas</i>	30
2.6.2.3. <i>Bandas de frecuencia restringidas</i>	31
2.6.2.4. <i>Condiciones de Operación para Uso Determinado en Bandas Libres, (UDBL)</i>	31

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO	33
3.1. Metodología de la investigación	33
3.1.1. Tipo de investigación	33
3.1.1.1. Investigación bibliográfica.	33
3.1.1.2. Investigación descriptiva.....	33
3.1.1.3. Investigación de campo.....	34
3.1.2. Técnicas de investigación	34
3.1.2.1. Población y Muestra	34
3.1.2.2. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	34
3.1.2.3. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos	34
3.1.2.4. Validación y confiabilidad	34
3.1.3. Metodología del diseño y construcción del prototipo del sistema de comunicación ...	35
3.2. Diseño del sistema de comunicación	35
3.2.1. Diseño del sistema de transmisión (Tx)	36
3.2.1.1. Diseño del sistema radiante tipo trébol (cloverleaf).....	36
3.2.1.2. Parámetros obtenidos del diseño de la antena trébol (cloverleaf) banda-S.	39
3.2.1.3. Construcción de antena tipo trébol (cloverleaf)	41
3.2.1.4. Carga del sistema operativo en la Raspberry Pi	42
3.2.1.5. Esquema de implementación (Tx)	44
3.2.1.6. Implementación del sistema de transmisión (Tx).....	45
3.2.1.7. Instalación del software Python OpenCv.....	47
3.2.1.8. Procesamiento digital de imágenes con Python OpenCv.....	48
3.2.2. Diseño sistema de Recepción (Rx)	51
3.2.2.1. Diseño del arreglo antenas parche 2 x 2 Microstrip	51
3.2.2.2. Parámetros obtenidos del diseño de arreglo de antenas parche 2x2 microstrip.....	56
3.2.2.3. Construcción arreglo de antenas parche 2x2 microstrip.....	57
3.2.2.4. Esquema de implementación (Rx).....	59
3.2.2.5. Implementación del sistema de recepción.....	59

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN	61
4.1. Prueba de los sistemas radiantes con el analizador de espectros MS2724C ANRITSU	61

4.1.1. Pruebas del sistema radiante tipo parche 2x2 microstrip	62
4.1.2. Pruebas del sistema radiante tipo trébol (cloverleaf).....	63
4.2. Prueba de los sistemas radiantes con el analizador de redes vectoriales E5071C ENA Keysight.....	63
4.2.1. Pruebas del sistema radiante tipo parche 2x2 microstrip con el analizador de redes vectoriales.....	64
4.2.2. Pruebas del sistema radiante tipo trébol (cloverleaf) con el analizador de redes vectoriales.....	65
4.3. Sistema de comunicación inalámbrico para la transmisión de video en tiempo real	66
4.3.1. Cálculo del presupuesto de potencia del enlace	66
4.4. Pruebas del prototipo funcional para verificar la transmisión de video en tiempo real.....	70
4.4.1. Prueba de sincronización de frecuencias para la transmisión	71
4.4.2. Prueba transmisión de video en tiempo real	72
4.4.3. Prueba con el indicador porcentual de señal recibida (RSSI).....	72
4.4.4. Prueba de tiempo de retardo en la recepción de video.....	73
4.4.5. Pruebas de cambio de resolución de video	74
4.5. Pruebas del procesamiento de imágenes	74
4.5.1. Prueba de reconocimiento de perfiles o siluetas	74
4.5.1.1. Prueba sin el procesamiento de imágenes	75
4.5.1.2. Prueba con el procesamiento de imágenes	76
CONCLUSIONES	77
RECOMENDACIONES	79
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

tabla 1-2:	Aplicaciones civiles de los VANT.....	6
Tabla 2-2:	Aplicaciones del DPS.....	12
Tabla 3-2.	Especificaciones módulo de cámara Raspeberry Pi versión 1.3.....	16
Tabla 4-2.	Especificaciones tarjetas de desarrollo Raspberry Pi 3 B.....	17
Tabla 5-2:	Especificaciones mando Dji Matrice 600.....	19
Tabla 6-2.	Especificaciones capturadoras de video Easycap.....	20
Tabla 7-2:	Tipos de antenas para FPV.....	24
Tabla 8-2:	Banda de frecuencias restringidas.....	31
Tabla 9-2:	Límites a las transmisiones para el espectro ensanchado.....	31
Tabla 10-2:	Limites a las transmisiones de UDBL.....	32
Tabla 1-3:	Parámetros establecidos para la antena tipo trébol (Cloverleaf).....	38
tabla 2-3:	Nombres, descripción y valores de cada elemento del diseño de la antena tipo trébol (cloverleaf).....	39
Tabla 3-3:	Parámetros establecidos para el arreglo de antenas parche 2x2 microstrip.....	53
Tabla 4-3.	Nombres, descripción y valores de cada elemento del diseño del arreglo de antenas.....	55
Tabla 1-4:	Datos para determinar el enlace en la frecuencia de 5860 MHz.....	66
Tabla 2-4:	Perdidas de espacio libre con diferentes distancias en la frecuencia de 5860 MHz.....	66
Tabla 3-4:	Ganancia total de las antenas.....	67
Tabla 4-4:	Pérdidas totales del enlace.....	68
Tabla 5-4:	Presupuesto de enlace de comunicación.....	68
Tabla 6-4:	Margen de enlace de comunicación.....	69
Tabla 7-4:	Bandas y canales para la frecuencia de 5.8 GHz.....	71
Tabla 8-4:	Formatos de resolucion de video.....	74
Tabla 9-4:	Parámetros para la prueba sin procesamiento de imagen.....	75

Tabla 10-4: Parámetros para la prueba con el procesamiento de imagen 76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Concepto operacional del UAS	7
Figura 2-2:	Bandas del espectro radioeléctrico.....	8
Figura 3-2:	Elementos de un sistema de procesado digital.....	11
Figura 4-2:	Componentes de un sistema aéreo no tripulado (VANT).....	13
Figura 5-2:	Drone DJI Matrice 600 (a), rango de transmisión (b).....	14
Figura 6-2:	Transmisor ts-832	15
Figura 7-2:	Cámara v1.3 ov5647	15
Figura 8-2:	Batería lipo.....	16
Figura 9-2:	Raspberry Pi 3 B	17
Figura 10-2:	Receptor RC-805	18
Figura 11-2:	Mando DJI Matrice 600	19
Figura 12-2:	Arduino nano	20
Figura 13-2:	Capturadora de video	20
Figura 14-2:	Interface CST Studio Suite	21
Figura 15-2:	Interface Python.....	21
Figura 16-2:	Keysight Vector Network Analyzer <i>E5071C</i>	22
Figura 17-2:	Analizador de espectros ANRITSU MS2724C.....	23
Figura 18-2:	Efecto multipath (polarización lineal).....	24
Figura 19-2:	Antena monopolo.....	25
Figura 20-2:	Configuraciones de antenas dipolo (a) antena dipolo, (b)antena bucle circular (cuadrado), (c) antena helicoidal	25
Figura 21-2:	Antenas parche. (a) parche rectangular, (b) parche circular	26
Figura 22-2:	Configuración típicas de arreglos microstrip, cable y apertura.....	26
Figura 23-2:	Polarización (LHCP, RHCP)	27
Figura 24-2:	Antena pagoda	27
Figura 25-2:	Antena hoja de trébol	27

Figura 26-2: Antena helicoidal	28
Figura 1-3: Diagrama de bloques del sistema de comunicación.....	35
Figura 2-3: Diagrama de bloques del sistema de transmisión	36
Figura 3-3: Vista lateral de la antena hoja de trébol	37
Figura 4-3: Vista superior de la antena hoja de trébol	37
Figura 5-3: Vista isométrica antena cloverleaf. (a) vista parámetros físicos. (b)	38
Figura 6-3: Diseño antena tipo trébol (cloverleaf) en cst studio.....	38
Figura 7-3: Simulación antena tipo trébol (cloverleaf). (a)vista frontal de la antena, (b)vista superior	39
Figura 8-3: Medición y corte del alambre solido mic.....	41
Figura 9-3: Proceso de ensamblaje de la antena cloverleaf. (a) ajuste y dobles a 90°, (b) curvatura superior, (c) posicionamiento a 45°	42
Figura 10-3: Antena tipo trébol (cloverleaf) terminada. (a) soldadura de los puntos al cable coaxial, (b) vista frontal terminada, (c) vista superior.....	42
Figura 11-3: Interfaz Raspberry Pi imager v1.5	43
Figura 12-3: Selección sistema operativo	43
Figura 13-3: Selección tarjeta sd	43
Figura 14-3: Descarga e instalación del sistema operativo a la tarjeta sd.....	44
Figura 15-3: Esquema de implementación (Tx)	44
Figura 16-3: Implementación del sistema de trasmisión (Tx). (a) vista superior del sistema Tx, (b) vista lateral del sistema de Tx, (c) vista del sistema tx acoplado al VANT...	45
Figura 17-3: Comando de acceso a configuración.....	46
Figura 18-3: Menú de configuración Raspeberry Pi. (a) ventana de opciones de interfaz, (b) ventana activación de cámara	46
Figura 19-3: Verificación de configuración. (a) comando para visualizar la captura de imagen, (b) captura de imagen	47
Figura 20-3: Versión de python preinstalada.....	47
Figura 21-3: Instalación de paquetes	47
Figura 22-3: Instalación opencv con OpenCv-contrib-Python	48
Figura 23-3: Comprobación de la versión instalada de OpenCv	48

Figura 24-3: Interfaz Thonny de Python.....	48
Figura 25-3: Códigos fuente en Python OpenCv, (a) código para transformar el espacio de color de RGB a HSV, (b) código para determinar el rango de colores.	49
Figura 26-3: Códigos fuente en python opencv, (a) código delimitar la máscara de imagen, (b) código de la función de obtención de contornos, (c) código para dibujar los contornos obtenidos.....	50
Figura 27-3: Captura de imagen y obtención de contornos	50
Figura 28-3: Diagrama de bloques del sistema de recepción.....	51
Figura 29-3: Arreglo plano mxn	51
Figura 30-3: Parche. (a) vista superior (conductor), (b) vista lateral (sustrato).....	52
Figura 31-3: Diseño del arreglo de antenas parche 2x2 microstrip. (a) vista frontal, (b) vista lateral (altura h del sustrato)	54
Figura 32-3: Arreglo de antenas parche 2x2 microstrip. (a)vista frontal parcial del arreglo de antenas 4 parches, (b) vista frontal parcial del arreglo de antenas 2 parches.	54
Figura 33-3: Diseño del arreglo de antenas microstrip en cst studio.	54
Figura 34-3: Simulación en fr4 arreglo de antenas parche 2x2 microstrip. (a)vista frontal del arreglo de antenas, (b)vista posterior- tierra.....	56
Figura 35-3: Diseño a construir del arreglo de antenas parche en formato .dxf visualizado en AUTOCAD	58
Figura 36-3: Proceso de freseo con el plotter protomat en la placa FR4. (a) iniciación de freseo, (b) resultado parcial.....	58
Figura 37-3: Arreglo de antenas microstrip 2x2 culminadas.....	58
Figura 38-3: Esquema de implementación en la estación terrena.....	59
Figura 39-3: Estación terrena. (a) vista interna frontal rssi, (b) vista interna estación terrena, (c) vista externa maletín receptor.....	60
Figura 1-4: Pruebas de los sistemas radiantes con el analizador de espectros MS2724C ANRITSU.....	61
Figura 2-4: Pruebas de los sistemas radiantes con el generador de señales.....	62
Figura 3-4: Generación de señal con la antena tipo trébol (cloverleaf)	62
Figura 4-4: Pruebas con el analizador de espectro del arreglo de antenas 2x2 microstrip	62

Figura 5-4:	Generación de señal con el arreglo de antenas 2x2 microstrip	63
Figura 6-4:	Pruebas con el analizador de espectro de la antena tipo trébol (cloverleaf)	63
Figura 7-4:	Pruebas con el analizador de redes vectoriales del arreglo de antenas parche 2x2 microstrip.....	64
Figura 8-4:	Grafica resultante de la prueba con el analizador de redes vectoriales del arreglo de antenas parche 2x2 microstrip	64
Figura 9-4:	Pruebas con el analizador de redes vectoriales del sistema radiante tipo trébol (cloverleaf)	65
Figura 10-4:	Grafica resultante de la prueba con el analizador de redes vectoriales del sistema radiante tipo trébol (cloverleaf)	65
Figura 11-4:	Prueba funcional del prototipo de comunicación.....	71
Figura 12-4:	Sincronización de frecuencias tx/rx	71
Figura 13-4:	Prueba de transmisión. (a) estación terrena conectada al ordenador (b) visualización en dos dispositivos.....	72
Figura 14-4:	Prueba de transmisión. (a) máxima calidad porcentual de imagen (b) mínima calidad porcentual de imagen.	72
Figura 15-4:	Pruebas de latencia de video	73
Figura 16-4:	Pruebas de latencia de video procesado	73
Figura 17-4:	Línea de comando para el cambio de resolución de video.....	74
Figura 18-4:	Localidad santa lucia de tembo.....	75
Figura 19-4:	Imagen obtenida en la estación terrena sin procesamiento de imágenes	75
Figura 20-4:	Imagen de detección de colores a silueta de personas obtenidas en la estación terrena.....	76

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3: Parámetros de Scattering S11 (-31.2006 dB) del diseño de la antena tipo trébol (cloverleaf).	40
Gráfico 2-3: Diagrama de radiación del diseño de la antena tipo trébol (cloverleaf). (a) diagrama polar, en theta y phi (b) diagrama 3D en dBi.	41
Gráfico 3-3: Parámetros de Scattering S11 (-18.32 dB) del diseño del arreglo de antenas parche 2x2 microstrip.	56
Gráfico 4-3: Diagrama de radiación del diseño del arreglo de antenas parche 2x2 microstrip. (a) diagrama polar, (b) diagrama 3D en dBi.	57

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** PRUEBAS Y MEDICIONES DE LOS SISTEMAS RADIANTES CON EL ANALIZADOR DE ESPECTROS Y GENERADOR DE SEÑALES
- ANEXO B:** PRUEBAS Y MEDICIONES DE LOS SISTEMAS RADIANTES CON EL ANALIZADOR DE REDES VECTORIALES
- ANEXO C:** PROTOTIPO DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN ENSAMBLADO EN EL VANT
- ANEXO D:** PRUEBAS DE SOBREVUELO Y TRANSMISIÓN DE VIDEO EN TIEMPO REAL
- ANEXO E:** CÓDIGO INDICADOR PORCENTUAL DE SEÑAL (RSSI) INTERFACE ARDUINO
- ANEXO F:** CÓDIGO PROCESAMIENTO DE IMÁGENES INTERFACE PYTHON

RESUMEN

En el siguiente trabajo de titulación se presenta un aporte a las comunicaciones inalámbricas, con la implementación de un sistema de comunicación para transmitir video en tiempo real, complemento relacionado con los vehículos aéreos no tripulados VANT debido a su evolución significativa en el área industrial, comercial y educativa. Por tal razón se optó por el estudio y análisis de la normativa que rige sobre estos dispositivos aéreos y que permitieron la selección adecuada de los elementos electrónicos a intervenir en el sistema de comunicación, entre el DRONE y la estación terrena. Además, se realizó el diseño y construcción de dos tipos de sistemas radiantes, el primero un arreglo de antenas tipo parche 2x2 microstrip y un segundo sistema, una antena omnidireccional tipo trébol (cloverleaf) en la banda de frecuencia de 5.8GHz. Las pruebas ejecutadas a los sistemas radiantes se realizaron con el analizador de espectros y el analizador de redes vectoriales, obteniendo resultados similares a los simulados con un parámetro de dispersión de -27.2dB para la antena Cloverleaf y -20.2dB para el arreglo de antenas 2 x 2. A las pruebas ejecutadas sobre la comunicación se realizó un cálculo de presupuesto de enlace en la frecuencia de 5860 MHz, con el fin de obtener pérdidas de transmisión a través del espacio libre a distancias de 10 metros hasta 5 km. De la prueba de retardos de tiempos del sistema de comunicación se obtuvo una latencia de 134 milisegundos, adicionalmente se aportó con un aplicativo de procesamiento de imágenes con la detección de colores, permitiendo reconocer siluetas de personas u objetos sobre un área determinada. Se concluye que el prototipo implementado cumplió con los requerimientos establecidos inicialmente. Se recomienda tomar en consideración las resoluciones emitidas por el ente regulador de telecomunicaciones sobre el uso de frecuencias no licenciadas en VANT.

Palabras clave: <TELECOMUNICACIONES> <VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT)> <SISTEMA DE COMUNICACIÓN> <TRANSMISIÓN EN TIEMPO REAL> <ESTACIÓN TERRENA>.



1716-DBRA-UPT-2021

2021-09-06

SUMMARY

The current degree work shows a contribution to wireless communications with the implementation of a communication system to transmit video in real-time. It is a complement related to UAV unmanned aerial vehicles due to its significant evolution in the industrial, commercial, and educational areas. For this reason, it was decided to study and analyze the regulations governing these aerial devices, these allowed the proper selection of the electronic elements to get involved in the communication system: the DRONE and the ground station. In addition, the design and construction of two types of radiating systems were carried out, the first system is a 2x2 microstrip patch antennas array and the second system is an omnidirectional cloverleaf antenna in the 5.8GHz frequency band. The tests carried out on the radiating systems were conducted with the spectrum analyzer and the vector network analyzer, obtaining results similar to those simulated with a dispersion parameter of -27.2dB for the Cloverleaf antenna and -20.2dB for the 2x2 antenna array. A link budget calculation was performed on the communication tests on the 5860 MHz frequency to obtain transmission losses through free space at distances of 10 meters to 5 km. From the time delay test of the communication system, a latency of 134 milliseconds was obtained. Additionally, an image processing application with the detection of colors was provided allowing to recognize silhouettes of people or objects in a certain area. It is concluded that the implemented prototype met the originally established requirements. It is recommended to take into consideration the resolutions given by the telecommunications regulator on the use of not licensed frequencies in UAV.

Keywords: <TELECOMMUNICATIONS> <UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAV)> <COMMUNICATION SYSTEM> <REAL TIME TRANSMISSION> <GROUND STATION>

INTRODUCCIÓN

Los VANT denominados comercialmente como Drones, teniendo este la peculiaridad de volar sin tripulación humana a bordo siendo capaz de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado y sostenido dirigido por una persona o sistema electrónico externo. Estos vehículos aéreos tienen una diferencia muy marcada sobre otros vehículos de similar funcionalidad y es que los drones son utilizados para tomar datos o monitorear áreas específicas a través de diferentes sistemas.

Lo que antes parecía imposible y se ha convertido en una realidad la posibilidad de tener un sistema de vista de primera persona (First Person View) y tener una transmisión de video desde este tipo de vehículos fluyendo en ambos sentidos, introduciéndonos en el campo del cómo se transmite esta información y que tipos de elementos intervienen en un sistema de comunicación que son determinantes para factores como el alcance y la calidad de una señal desde el lugar a transmitir hacia la estación terrena.

Se espera que el presente trabajo ayude a otras investigaciones con aportes tecnológicos a la carrera de Ing. Electrónica, en Telecomunicaciones y Redes.

CAPÍTULO I

1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Formulación del Problema

¿Cómo se implementa el prototipo de un sistema de comunicación para la transmisión de video de baja resolución en tiempo real para un vehículo aéreo no tripulado?

1.2. Sistematización del Problema

¿Cuáles son las normativas y regulaciones existentes en el país, para la utilización de frecuencias para la transmisión de información desde un vehículo aéreo no tripulado?

¿Cuáles son los parámetros óptimos de funcionamiento para la transmisión de video en tiempo real desde un Drone?

¿Qué tipo de elementos se ajustan a los requerimientos de este tipo de sistema de comunicación?

¿Cómo se va evaluar los parámetros de funcionamiento del sistema durante la transmisión de video en tiempo real?

1.3. Justificación

El presente proyecto tecnológico aportara con un sistema de comunicación para la transmisión de video en tiempo real un análisis desde su diseño hasta su implementación, los parámetros objeto de estudio serán, frecuencia de operación, potencia de transmisión, interferencias, resolución y procesamiento del video con el (VANT), los equipos de microonda y telecomunicaciones de propiedad de la ESPOCH.

1.4. Justificación Teórica

En Ecuador la dirección general de aviación civil (DGAC) en el 2015 expidió una resolución sobre el uso de drones el mismo que establece que estos vehículos aéreos no tripulados no pueden ser operados en la cercanía de las bases militares, lugares de aterrizaje y despegue de aviones con una restricción de distancia mínima a 9 km, así mismo el documento detalla las condiciones de

responsabilidades de operación. Por otro lado, la normativa del uso de frecuencia para transmitir información desde este tipo de vehículos aéreos acorde con el plan nacional de uso de frecuencias en la misma que existen atribuciones de frecuencias que son reguladas las menores a 2,4 GHz entiéndase estas: desde 0.9GHz a 1.5GHz por otra parte frecuencias libres que se pueden ser utilizadas son de 2.4GHz y la de 5.8GHz para fines como la transmisión de video en tiempo real para vehículos aéreos no tripulados.

El uso de estos vehículos aéreos es de gran ayuda en materia de vigilancia aérea sea este de uso civil o de seguridad puesto que resulta caro el equipo de vigilancia tripulado esa sería una de las razones esenciales por las que se opta por este tipo de aeronaves no tripuladas mismas que tiene la posibilidad de volar a bajas velocidades de ser necesario para obtener imágenes sean estas grabadas o emitidas en tiempo real. De igual manera en protección civil, previo a la temporada de lluvias se hacen mapas de riego, hacen un mapa topográfico de la zona es decir de gran uso para la prevención.

Por el expuesto en párrafos anteriores se pretende con esta propuesta de realizar una implementación un sistema de comunicación que permita la transmisión de video de baja resolución en tiempo real desde un vehículo aéreo no tripulado para ello se pretende potenciar la captura, transmisión y análisis de imágenes acorde a las condiciones del terreno que va ser sobrevolado tomando en cuenta parámetros como identificación de obstáculos altura del vuelo y delimitación del área de estudio con el objetivo de obtener una herramienta tecnológica para fines acordes a investigaciones y estudios a ser realizados en diferentes campos, además se pretende evaluar parámetros de funcionamiento de los diferentes elementos que se ajusten a los requerimientos del sistema propuesto además de efectuar un análisis de operatividad es decir regulaciones tanto de frecuencias como del uso de drones, el alcance al que puede llegar, las potencias a las que trabaja para realizar la comunicación del sistema.

Finalmente se cree conveniente y factible realizar la implementación del prototipo propuesto, además que este proyecto va acorde a las líneas de investigación de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, además se ajusta al Plan Nacional del Buen Vivir afines a sus objetivos 3,8 y 11 que mencionan mejorar la calidad de vida de la población, consolidar el sistema económico social y asegurar la soberanía y eficiencia de los sectores estratégicos para la transformación industrial y tecnológica respectivamente.

1.5. Justificación Aplicativa

Sabiendo que la tecnología forma parte fundamental de la globalización y aunque se ha ido reduciendo esta brecha tecnológica entre los países más desarrollados y los subdesarrollados es evidente que el bienestar de las sociedades se ha hecho sinónimo de tecnología por ejemplo en los sistemas de salud, información, seguridad entre otros, dando paso a una exigencia de cubrir las necesidades crecientes de las sociedades, sabiendo que con este tipo de dispositivos cubre dichos requerimientos.

El presente trabajo tiene por objetivo plasmar conocimientos adquiridos durante este proceso académico, conocimientos como la electrónica, sistemas de comunicaciones, diseño de antenas, comunicaciones inalámbricas entre otras, mismas que conlleva a diseñar e implementar un sistema de comunicación que procese y transmita video de baja resolución en tiempo real ubicado en un vehículo aéreo no tripulado (Drone), este sistema de comunicación se completa con la parte de recepción del video transmitido con una fase de procesamiento y visualización de imágenes, además con el cumplimiento de parámetros de funcionamiento acordes a requerimientos establecidos para la comunicación.

Los resultados obtenidos de esta implementación serán analizados para determinar parámetros de funcionamiento del sistema de comunicación tanto en transmisión como en recepción.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

- Implementar el prototipo de un sistema de comunicación para transmitir video de baja resolución en tiempo real para un vehículo aéreo no tripulado (DRONE).

1.6.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión de la normativa y regulación del uso de frecuencias para transmitir información desde vehículos aéreos no tripulados.
- Investigar los sistemas de comunicación a través de la funcionalidad y comportamiento de los elementos a intervenir.

- Diseñar un prototipo para el procesamiento, transmisión y recepción de video en tiempo real estableciendo los requerimientos que debe tener la comunicación.
- Evaluar los parámetros de funcionamiento del sistema de comunicación.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Vehículos Aéreos no Tripulados (Drones)

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT), son considerados herramientas tecnológicas cuyo objetivo es cumplir con un sin número de funciones, gracias a la capacidad que tienen de sobrevolar áreas de difícil acceso o zonas peligrosas a las que no pueden llegar las personas, los hace capaces de dar una visión única de los lugares que requieren una inspección o monitoreo. Con el propósito de ser un complemento importante para proyectos de investigación con la captura de información, procesamiento de datos y posterior transmisión de videos o imágenes en tiempo real, para llevar a cabo un análisis de los sitios sobrevolados. (J. Garro, 2017, p.1).

2.1.1. Aplicaciones

El uso real de los vehículos aéreos no tripulados se enfoca a una amplia gama de aplicaciones si bien fue el sector militar donde surgieron y quienes impulsaron su desarrollo, ha surgido la necesidad de acoplarse a la sociedad civil con un enfoque hacia la investigación y desarrollo de nuevos sistemas, ajustándose a requerimientos de operatividad. A continuación, en la tabla 1-2 se detalla las aplicaciones civiles de los vehículos aéreos no tripulados. (A. Barrientos, 2015, pp.7-8).

Tabla 1-2: Aplicaciones civiles de los VANT

Aplicaciones	Ejemplos
Inspección de infraestructura	Líneas eléctricas, Oleoductos
Inspección de obra civil	Puentes, Presas
Patrulla marítima	Contrabando, Migración ilegal
Filmografía	Cine, Reportaje fotográfico
Reconocimiento y toma de datos en desastres naturales	Volcanes, Huracanes
Climatología	Toma de muestras, Monitorización, Contaminación atmosférica
Supervisión de tráfico	Sobrevuelos autopistas y avenidas
Agricultura	Aplicación de Fungicidas, Agricultura de Precisión
Búsqueda y Rescate	Naufragios, Accidentes en zonas montañosas
Levantamiento de mapas	Topografía
Transporte de paquetería	Encomiendas
Localización de recursos naturales	Pesca, Minería
Enlace de comunicaciones	Internet inalámbrico
Vigilancia de fronteras	Migración y contrabando

Fuente: (A. Barrientos, 2015,p.9)

2.1.2. *Visión en primera persona (FPV)*

La componente adicional de los vehículos aéreos no tripulados considerados de gran importancia relacionado al campo aplicativo que se va ejecutar, su funcionalidad se refiere a un estilo de vuelo en el cual se podrá visualizar el área de sobrevuelo a través de una cámara montada en el vehículo aéreo y dar una perspectiva real de vuelo.

El objetivo principal de este componente es tener un mayor control sobre la trayectoria del vehículo aéreo cuando se vuela a grandes alturas y largas distancias donde resulta muy difícil tener control sobre el vehículo. (Flynt, 2017).

2.2. **Sistemas de Comunicación para VANT**

El sistema de comunicaciones, formado de enlaces de comunicación que permiten hacer vínculo entre la estación terrena y el VANT, distinguiéndose de otros sistemas, mismo que envía la información captada por la aeronave y consolidar el intercambio de datos desde el mando de control. En la figura 1-2 se muestra el concepto operacional de un UAS.

Los Sistemas Aéreos no Tripulados (UAS), definidos como: dispositivos de investigación, inteligencia y observación, con el objetivo de desarrollar actividades de exploración y control, se constituyen principalmente por una Estación de Control Terrena (ECT), un sistema de comunicación y el VANT. (Andrango, 2016, p.23).

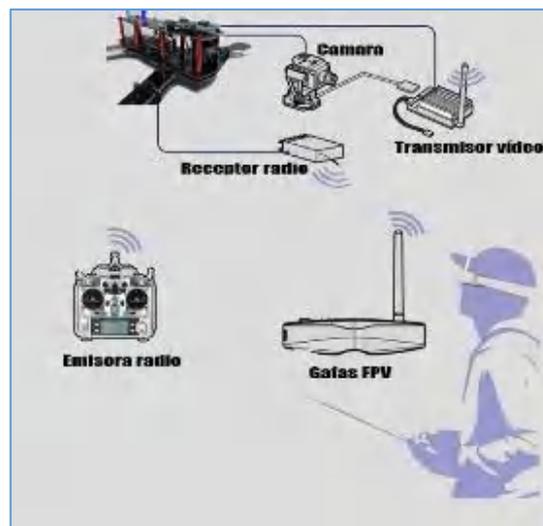


Figura 1-2: Concepto Operacional del UAS
Fuente: (Fly-Fast)

2.2.1. *Espectro radioeléctrico*

El espectro radioeléctrico medio por el cual se transmiten ondas de radio electromagnético que se propagan a través del espacio y se utilizan para la prestación de servicios de telecomunicaciones,

y constituye un rango del espectro electromagnético, establecido desde 3 KHz a 3000 GHz dividiéndose en bandas y sub-bandas de frecuencia como se muestra en la figura 2-2 (J. Bonilla, 2016, p.13).

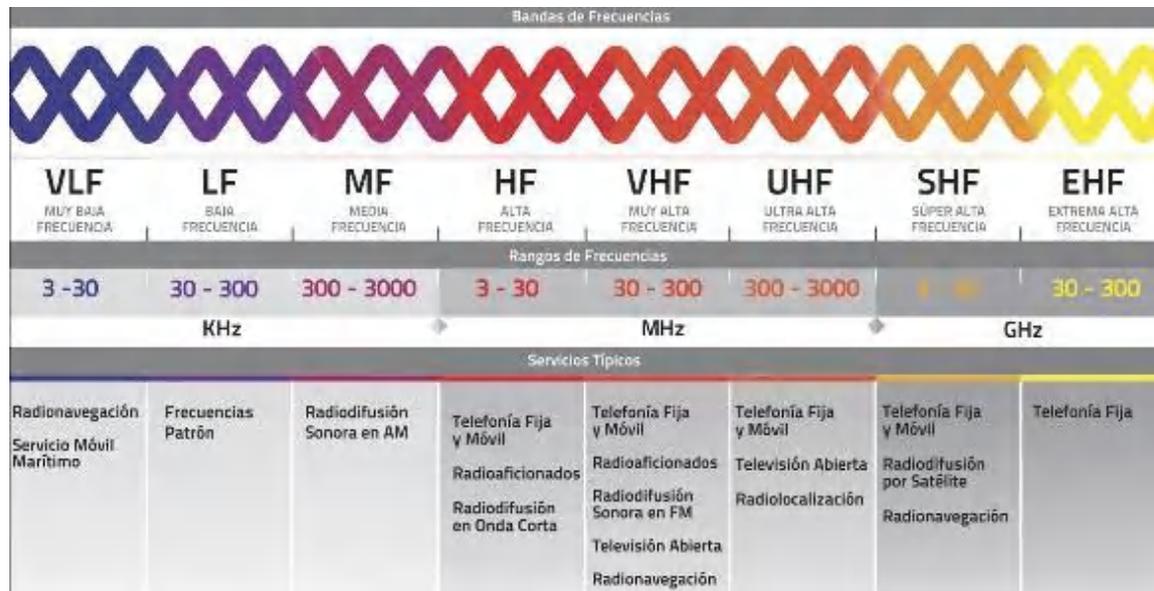


Figura 2-2: Bandas del espectro radioeléctrico
Fuente: (CONATEL)

Las diferentes bandas de frecuencia existentes para todo tipo de comunicación aérea, usando el espectro electromagnético asignado para estas radiocomunicaciones, misma que se pueden diferenciar en tres bandas de trabajo con el fin de evitar interferencias y permitir el uso eficiente del espectro.

Señales de radio de alta frecuencia (HF): también conocidas como frecuencias de onda corta que van desde los 3MHz a 30 MHz las mismas que a través de la transmisión de ondas de radio aéreas y mayormente afectadas por la reflexión de la ionosfera, y la variación en la propagación son parámetros a tomar en cuenta si bien el alcance proporciona una gran ventaja, pero las interferencias y ruidos son significativos, estas características hacen que no sean óptimas en UAS.

Señales de radio de muy alta frecuencia (VHF): de 30 MHz a 300MHz, las comunicaciones a través de estas bandas resultan ser muy eficientes para establecer enlaces de datos dentro de visión, y resultan ser robustas frente a ruidos e interferencias por lo general se las usa en comunicaciones aeronáuticas militares y civiles.

Comunicaciones satelitales: distribuidas en bandas C, Ku y Ka esta radiocomunicación que se establece para difundir señales de información mediante un sistema de satélites que disponen de

una gran cobertura y alta disponibilidad, pero el principal inconveniente es el costo de infraestructura y su latencia, fundamental en un sistema de transmisión para un vehículo aéreo. (Andrango, 2016, pp.43-44).

Existen frecuencias reservadas por el organismo internacional (UIT) que son: 35 MHz, 40 MHz, 79 MHz, 900 MHz, 2.4 GHz y 5.8GHz que son frecuencias más altas actualmente usadas para la transmisión de video y telemetría mismas que requieren un mayor ancho de banda.

Las conexiones entre el Drone y la estación terrena es imprescindible tener un canal dedicado exclusivamente para el radio-control (RC) para el manejo y maniobrabilidad del aparato aéreo es por eso que se añaden canales alternativos para la transmisión de señales telemétricas y de video y otros datos generados por la carga útil y evitar interferencias entre el mismo sistema de vuelo y comunicación. (Matienzo, p.43).

2.2.2. Comunicaciones inalámbricas

En un sistema de comunicación para aeronaves es un campo desafiante e interesante debido a factores fundamentales como el fenómeno del desvanecimiento, la variación temporal de las intensidades del canal, pérdidas de trayectoria a través de la atenuación de distancia y el sombreado por obstáculos, para el establecimiento de una comunicación inalámbrica se requiere de cierto proceso entre el emisor y el receptor como: la frecuencia de onda y el sistema de codificación/decodificación empleando la conversión analógica/digital. (Mora, 2018, p.54).

Enlace de datos: Un enlace de datos adopta del uso de varias tecnologías que deben cumplir con los parámetros como distancia, alcance y cobertura para la transmisión de la información.

Para vehículos no tripulados de reducido alcance es prioritario resaltar los diferentes procedimientos para comenzar el sistema de comunicación esperado, basándose en el uso de protocolos IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) cuyo principal propósito es la disminución de tiempos y acciones necesarias en la transmisión, para ello es esencial el uso de equipos y programas desarrollados.

- Protocolos de comunicación inalámbricas para aeronaves de corto alcance

IEEE 802.15.4 (ZigBee): se emplea módulos de comunicación X-bee que se caracteriza por minimizar el consumo de potencia, en los VANT el Uplink envía referencias de trayectoria y posición y en Downlink transmite los datos de telemetría, por medio de procesos de canalización de radiofrecuencia tecnología usada en varios tipos de vehículos aéreos.

IEEE 802.15.1 (Bluetooth): en vehículos aéreos no tripulados permite una conexión sencilla y con una mayor tasa de transmisión de datos, pero en relación a ZigBee el consumo es mucho mayor.

IEEE 802.11 (WiFi): ha quedado demostrado que este protocolo de comunicación es posible emplear en los VANT, para la transmisión de imágenes y el control del vehículo, fundamental para los dos tipos de enlaces (datos y telemetría). Esta tecnología también aplicada en las llamadas redes LAN (*Local Area Network*) usando la frecuencia de 2.4 GHz, y llegando a velocidades de transmisión de datos de 11 a 54 Mbps y el alcance del mismo está vinculado con la potencia adoptada para la transmisión y el medio de comunicación. (Andrango, 2016, pp 41-45)

2.2.3. Modulaciones

La modulación es una técnica que se utiliza para adaptar la información que desea transmitir al canal usado para la transmisión, de esta manera permite ampliar la capacidad de un medio de transmisión con la finalidad de crear diferentes canales para aumentar la capacidad. La modulación está formada por dos señales, la portadora que determina el canal que se está utilizando en la transmisión por otro lado la moduladora que contiene la información que se desea transmitir. (TMBroadcast, 2009).

2.2.3.1. Modulación de video

Esta técnica permite transmitir la señal de video de manera más eficiente, en general la modulación de video significa que la señal de video se combina con una onda portadora de frecuencia más alta de esta manera la onda portadora contiene la información de señal de video a esta combinación se la llama señal de radio frecuencia, y cuando el portador llega al destino la señal de video es extraída de la portadora por la decodificación y por lo tanto al final de este sistema de transmisión los receptores pueden obtener los datos de la señal de video original. Dependiendo como interactúan ambas señales tendremos diferentes tipos de modulación es decir cómo se cambia la forma de onda de la portadora es la clave para clasificar los tipos de modulación de video.

2.2.3.2. Modulación en amplitud (AM)

Cuando la onda portadora se combina con la señal de video, la frecuencia de la señal combinada es la misma que la frecuencia de la onda portadora mientras se varia la amplitud, en el proceso de la combinación la onda portadora corresponde al pico de la señal de video y la forma de onda será más abombada y el punto correspondiente a la pila, la forma será más estrecha, es decir el cambio en la amplitud es de la onda portadora es proporcional a la amplitud de la señal de video.

Esta modulación no permite moduladoras de muy elevada frecuencia es decir no es capaz de transmitir con elevados niveles de calidad.

2.2.3.3. Modulación en frecuencia (FM)

La modulación en frecuencia, la onda portadora se combina con la señal de video mediante la variación de la frecuencia instantánea de la onda, a diferencia de la modulación en amplitud la frecuencia permanece constante, entonces si la señal moduladora se encuentra en un semiciclo positivo, la frecuencia de la portadora aumenta, por lo contrario si la moduladora se encuentra en el semiciclo negativo la frecuencia de la portadora disminuye, en conclusión el nivel de variación de la frecuencia dependerá de la amplitud de la moduladora.

En el caso de transmisión de video la modulación FM es muy importante para reducir al mínimo los efectos de interferencia como ruido e interferencia magnética. (Francesc, pp 19-54).

Un transmisor de TV analógico, utiliza modulación FM, con una potencia de 200mW en la banda de 5.8 GHz mismo que puede transmitir audio y video en un radio de al menos 1Km usados en aeromodelismo para FPV.

2.2.4. Procesamiento digital de señales

El procesamiento digital de la señal (DPS), que se define como la representación, transformación y manipulación de las señales desde el punto de vista de la información que la contienen. Esto abarca además los convertidores de analógico/digital, que toman señales del mundo real y la convierten en formato digital de unos y ceros. A partir de aquí es cuando el DPS se hace cargo capturando la información digitalizada y procesándola. A continuación, se devuelve la información digitalizada de nuevo para su uso en el mundo real, este proceso se lo puede representar a través de dos maneras, sea en formato digital o analógico pasando por un convertidor digital a analógico, como se muestra en la figura 3-2 Aunque las señales del mundo real se pueden procesar en forma analógica el procesamiento digital de la señal proporciona ventajas de alta velocidad y precisión, tales como; programabilidad/flexibilidad, existencia de un gran número de herramientas de diseño. (Smith, 1999).

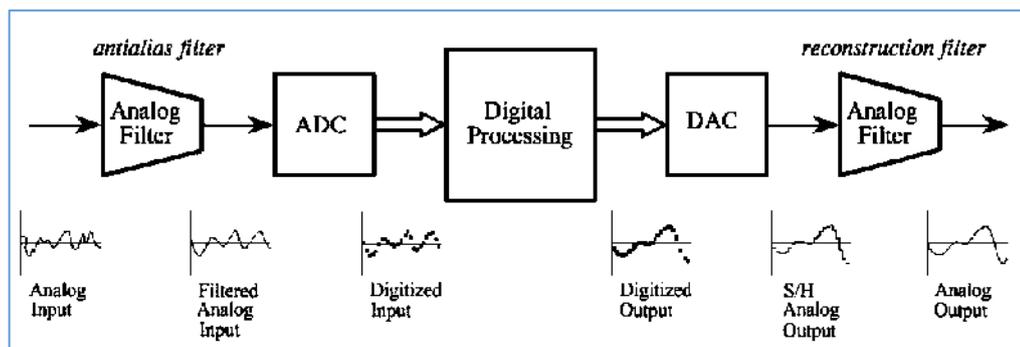


Figura 3-2: Elementos de un sistema de procesado digital

Fuente: (The-Scientist-and-Engineer's-Guide-to-Digital-Signal-Processing.SW-Smith.)

Los componentes claves que contiene un procesador digital son:

- *Memoria del programa:* mismo que almacena los programas que el DPS utilizara para procesar los datos.
- *Memoria de datos:* almacena la información a procesar.
- *Motor de cálculo:* ejecuta el procesamiento matemático.
- *Entrada salida:* proporciona las funciones para conectarse con el mundo real.

2.2.4.1. Procesado de imágenes digitales

El procesamiento digital de imágenes PDI esta segmentado por áreas para facilitar el estudio y análisis, de acuerdo a la aplicación o funcionalidad del PDI, se pueden aplicar etapas como etapa inicial la captura y adquisición, el preprocesamiento, segmentación, descripción, reconocimiento e interpretación de las imágenes.

Para realizar un procesamiento digital de imágenes es oportuno dividir en tres áreas descritas a continuación:

- *Nivel de visión bajo:* conformado por la captura /adquisición y preprocesamiento de la imagen donde se aplican técnicas de reducción de ruido, realzar determinados detalles de interés como el brillo o contraste de la imagen.
- *Nivel de visión medio:* conformado por la segmentación, descripción y reconocimiento.
- *Nivel de visión alto:* interpretación de un conjunto de objetos relacionados. (Tinajero, 2018, pp,12-37).

2.2.4.2. Aplicaciones del DPS

Las prestaciones han aumentado, debido a los costes bajos que representa realizar un procesado digital sea por microprocesadores genéricos o con hardware específico, esto ha hecho que se vaya remplazando a la electrónica analógica siendo posible la creación de productos que sin el DPS no serían posibles, como se muestra en la tabla 2-2. (Smith, 1999).

Tabla 2-2: Aplicaciones del DPS

Aplicaciones	Propósitos
Propósito general	Filtros digitales
Voz/Habla	Compresión de voz
Graficas/Imagen	Compresión/Transmisión de imágenes, reconocimiento, realidad virtual.
Control/ regulación	Servocontrol, modelización de sistemas
Telecomunicaciones	Criptografía, multiplexación de canales

Consumo	Juguetes, TV, cámaras
---------	-----------------------

Fuente: (Martinez, 2010)

2.3. Componentes tecnológicos de un sistema aéreo no tripulado (UAS)

Un sistema aéreo no tripulado está compuesto fundamentalmente por el segmento aéreo y el segmento terreno, como se muestra en la figura 4-2.



Figura 4-2: Componentes de un sistema aéreo no tripulado

Fuente: (Andrango, 2016, p.25)

2.3.1. Segmento de vuelo

Este segmento en su estructura abarca elementos relacionados con la plataforma de vuelo como: la armadura que incluyen el fuselaje, hélices, motores, entre otros, un sistema de alimentación de energía, un sistema de navegación en caso de requerirse, la carga útil correspondiente a sensores y cámaras y un sistema de transmisión de información. (Andrango, 2016, p.26)

2.3.1.1. Drone DJI Matrice 600

Fabricante DJI

El Drone modelo (M600), que se muestra en la figura 5-2 (a) es la nueva plataforma de vuelo diseñada para aplicaciones industriales y de fotografía aérea profesional, incluye un sistema de baterías inteligentes y sistema de gestión de baterías para un máximo rendimiento, el diseño modular hace que sea fácil de usar, además cuenta con un sistema que simplifica el

mantenimiento permitiendo un funcionamiento confiable durante largos periodos de vuelo, cuenta con una seguridad de vuelo inteligente para garantizar un rendimiento preciso, seguro y eficiente. El rango de transmisión se muestra en la figura 5-2 (b), con un alcance de hasta 5 Km probado en áreas sin obstáculos libres de interferencia y puede variar según las regulaciones locales. (DJI, 2020)

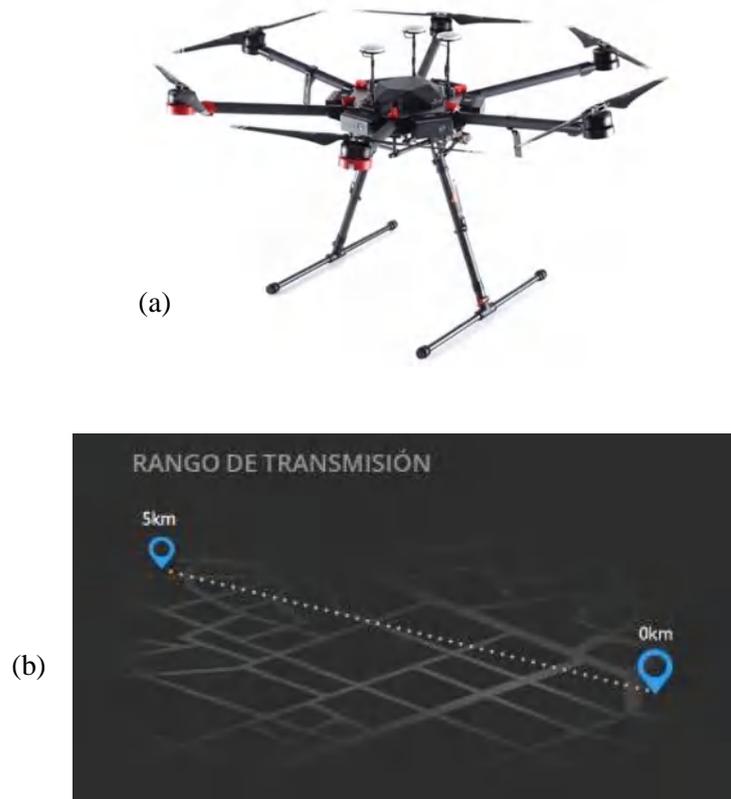


Figura 5-2: Drone DJI Matrice 600 (a), rango de transmisión (b)
Fuente: (DJI, 2020)

2.3.1.2. Transmisor TS-830

Fabricante: AKK Technology Inc

Dispositivo de video transmisión o VTX esencial en un sistema FPV, se muestra en la figura 6-2, ideal para enviar señales de video de la cámara de un Drone hacia el receptor, opera en la frecuencia de 5.8 GHz, bajo en consumo de energía, potencia de salida alta, es un transmisor ligero y compacto de gama media, puede usarse junto con 2.4 GHz de Spectrum y otros R/C, alcanza distancias hasta de 500 metros con antenas dipolo y hasta 1 km con antenas direccionales. (AKKTechnology.Inc, 2018).



Figura 6-2: Transmisor Ts-832
Fuente: (AKKTechnology.Inc, 2018)

Especificaciones

- Transmisor de frecuencia: 5705 – 5945 MHz
- Distancia de transmisión: >3000 m (área abierta)
- Frecuencia portadora de audio 6.5 MHz
- Impedancia de salida: 50 Ohmios
- Impedancia entrada de video: 75 Ohmios
- Conector de antena: RP-SMA
- Potencia de salida: 22dBm (21-23dBm)
- Voltaje de funcionamiento de transmisión: 7 – 15VDC /15mA
- Video: PAL/NTC
- Canales: 8 (5705,5865,5665,5645,5885,5905,5925,5945) MHz
- Baja radiación armónica
- Modulación: módulo de ancho de banda FM
- Video Ancho de Banda: 0 a 8.0 MHz (AKKTechnology.Inc, 2018)

2.3.1.3. Cámara Raspberry pi versión 1.3

Los módulos de cámara Raspberry pi, se muestra en la figura 7-2 son accesorios adicionales a la tarjeta de desarrollo, son ideales para aplicaciones móviles y distribuidas, como conducción autónoma, vehículos aéreos no tripulados entre otras, sus especificaciones se muestran en la tabla 3-2. (Raspberry.org, 2018)



Figura 7-2: Cámara v1.3 OV5647
Fuente: (Raspberry.org, 2018)

Especificaciones

Tabla 3-2. Especificaciones módulo de cámara Raspberry pi versión 1.3

Modulo cámara Raspberry pi versión 1.3
Sensor OV5647 5Megapixeles
Tamaño ¼ pulgadas
Angulo de visión 3.51 mm (diagonal): 69.1 grados
Resolución de sensor 1080p
Resolución de imagen 2592 * 1944
Compatibilidad de grabación de video 1080p30, 720p60 y 640x480p60 / 90
Integración de Linux: V4L2

Fuente: (Raspberry.org, 2018)

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

2.3.1.4. Sistema de alimentación de energía

Las baterías como fuente de energía responsables de alimentar a todo el VANT, en casos particulares es viable que se usen fuentes de energía adicionales para el funcionamiento de la carga útil, como se muestra en la figura 8-2, por lo que deben cumplir con ciertos requerimientos como: el rendimiento, densidad de potencia, energía, velocidad de descarga y vida útil, esenciales dentro del segmento de vuelo puesto que de ello dependerá el tiempo de vuelo. (Andrango, 2016, pp. 26-37).



Figura 8-2: Batería Lipo

Fuente: (Andrango, 2016, p.23)

2.3.1.5. Raspberry Pi 3 B

Fabricante: Raspberry.org

Raspberry pi es una tarjeta de desarrollo construida con la finalidad de promover la enseñanza de la informática, usada ampliamente en proyectos de investigación por su bajo costo y portabilidad, dispone de varios modelos ajustándose a los requerimientos y necesidades del usuario. La Raspberry pi 3 B es la tercera generación que se muestra en la figura 9-2, esta tarjeta de desarrollo

sucesora de la Raspberry pi 2 modelo B, en la tabla 4-2 se muestra sus especificaciones. (Raspeberry.org, 2018)



Figura 9-2: Raspberry pi 3 B
Fuente: (Raspeberry.org, 2018)

Especificaciones

Tabla 4-2. Especificaciones tarjetas de desarrollo Raspberry pi 3 B

Raspberry pi Modelo B
CPU: Quad Core 1.2 GHz
1GB de RAM
4 USB 2 Puertos
Salida de estéreo de poste y puerto de video compuesto
Full size HDMI
CSI Puerto de cámara
DSI puerto para display
Puerto para MicroSD

Fuente: (Raspeberry.org, 2018)

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

2.3.2. Segmento terreno

En este segmento abarca elementos como la estación de control, mismo que realiza operaciones de recepción, desde la estación terrena a través de un sistema de comunicación establecido previamente, es posible monitorear la velocidad, altitud y la posición, de esta manera observar el comportamiento del vehículo en tiempo real y conseguir resultados óptimos.

Asimismo, este segmento puede estar compuesto por elementos como; receptores de señal, computadoras para el almacenamiento, pantallas de visualización, control de movimiento del VANT, entre otros. (Andrango, 2016, p.37)

2.3.2.1. Receptor RC-832

Fabricante: AKK Technology Inc

Dispositivo de video recepción o Rx esencial en un sistema FPV, se muestra en la figura 10-2, ideal para recibir señales de video transmitidas desde un Drone, opera en la frecuencia de 5.8 GHz, utiliza la banda E de 8 canales, alta sensibilidad de recepción, es un receptor que presenta una pantalla digital y una selección de canales, incluye una salida de AV adicional para la grabación de video, totalmente compatible con el transmisor FPV TS-832 ligero y compacto de gama media. (AKKTechnology.Inc, 2018).



Figura 10-2: Receptor RC-805
Fuente: (AKKTechnology.Inc, 2018)

Especificaciones

- Frecuencia de salida: 5.8 GHz
- Frecuencia de recepción: 5725 – 5865MHz
- Sensibilidad de recepción: -90dBm
- Voltaje de entrada: 8 – 12V
- Corriente de Suministro: 150Ma
- Control de frecuencia: frecuencia incorporada y bucle de bloqueo de fase (botón de canal - pantalla LED)
- Salida AV: salida dual de 2 canales (enchufe de 2.5 mm)
- Puerto de antena: 50 Ohmios SMA
- Canales 8 (5705,5685,5665,5645,5885,5905,5925,5945) MHz
- Temperatura de operación: -10 °C – 50°C
- Temperatura de almacenamiento: -20°C – 60°C (AKKTechnology.Inc, 2018)

2.3.2.2. Mando a distancia series Matrice 600

El control de la aeronave, que se muestra en la figura 11-2, mismo que opera a la frecuencia de 2.4 GHz con un rango de transmisión de 5 Km. El dispositivo permite a los usuarios acceder rápidamente a ciertas funciones de la aeronave, se muestran las especificaciones en la tabla 5-2 (DJI, 2020)

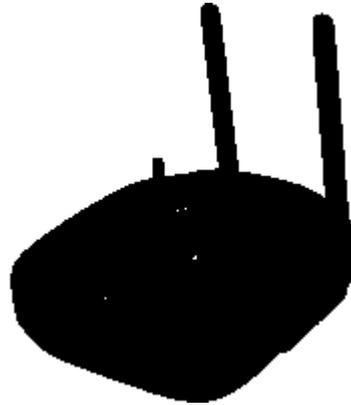


Figura 11-2: Mando DJI Matrice 600
Fuente: (DJI, 2020)

Especificaciones

Tabla 5-2: Especificaciones Mando DJI Matrice 600

Frecuencias de operación	920,6 MHz a 928 MHz (Japón) 5.725 GHz a 5.825 GHz 2.400 GHz a 2.483 GHz
Distancia de transmisión	Cumple con FCC: 3.1 millas (5 km) Cumple con CE: 2.1 millas (3.5 km)
PIRE	10 dBm @ 900 M 13 dBm @ 5.8 G 20 dBm @ 2.4 G
Puerto de salida de video	HDMI, SDI, USB
Potencia de salida	9 W
Batería incorporada	600 mAh, 2S Lipo
Temperatura de funcionamiento	14 ° a 104 ° F (-10 ° a 40 ° C)
Soporte para dispositivos móviles	Admite teléfonos inteligentes y tables

Fuente: (DJI, 2020)

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

2.3.2.3. Arduino nano

Arduino es una tarjeta de desarrollo de hardware y software libre utilizada una variedad de microprocesadores y controladores, equipadas con una variedad de pines (I/O), digitales y analógicas, además pueden conectarse a varias placas, cuentan con interfaces de comunicación serie. Los microprocesadores se pueden programar usando el lenguaje de programación C y C++ y proporciona un entorno de desarrollo (IDE), que se muestra en la figura 12-2, basado en Atmega328P. (Arduino)



Figura 12-2: Arduino nano
Fuente: (Arduino)

2.3.2.4. Capturadora de video (EasyCap)

Este dispositivo permite capturar video desde otros medios en forma analógica, esta señal de video puede venir de una cámara de video conectada al dispositivo, y la salida de forma digital ir hacia un dispositivo portátil por puerto USB, en la tabla 6-2 se muestra las especificaciones de operatividad. (EasyCap, 2020)



Figura 13-2: Capturadora de video
Fuente: (EasyCap, 2020)

Especificaciones

Tabla 6-2. Especificaciones capturadoras de video EasyCAP

EasyCAP capturadora de video	
Entrada de video	RCA compuesto
Formatos de video	NTCS, PAL
Resolución	PAL: 720 x 576p a 25 fps NTCS: 720 x 480 a 30 fps
USB	2.0, compatible con USB 1.1
Compatibilidad	Windows XP, Vista, 64 x, 7, 8 y 10 (32 y 64 bits)

Fuente: (EasyCap, 2020)
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

2.3.3. Software y equipamiento

2.3.3.1. CST STUDIO Suite

Es un paquete de software de análisis 3D EM de alto rendimiento para diseñar, analizar y optimizar componentes y sistemas electromagnéticos (EM), brinda una interfaz de usuario amigable, que se muestra en la figura 14-2 que se pueden acoplar para realizar simulaciones híbridas, brindando flexibilidad de análisis de sistemas completos de una manera eficaz y directa, incluyen el análisis de rendimiento y eficiencia de antenas y filtros, compatibilidad electromagnética entre otros. (Simulia, 2010)

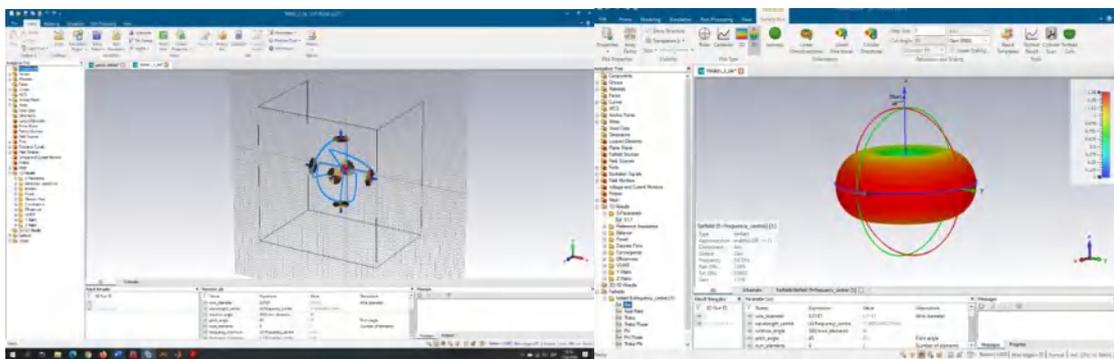


Figura 14-2: Interface CST STUDIO Suite

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

2.3.3.2. Python

Python es un lenguaje de programación lanzado en 1991, que tiene estructuras de datos eficientes de alto nivel con un enfoque efectivo para la programación orientada a objetos, con el objetivo de ayudar a los programadores a escribir códigos lógicos y claros, además es adecuado como lenguaje de extensión para personalizar aplicaciones. En la figura 15-2 se muestra la interface de programación. (Whittington, 2020)



Figura 15-2: Interface Python

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

2.3.3.3. Analizador de redes vectoriales E5071C ENA Keysight

Fabricante: Keysight Technologies

El VNA (vector network analyzer) o analizador de redes vectoriales que se muestra en la figura 16-2, es un dispositivo utilizado en telecomunicaciones, herramienta perfecta para analizar componentes pasivos y activos, una de las principales funciones es evaluar los parámetros de dispersión o “Scattering”. (Keysight, 2018)



Figura 16-2: Keysight Vector Network Analyzer E5071C
Fuente: (Keysight, 2018)

A. Especificaciones

- Amplia cobertura de frecuencia: 300 kHz a 20 GHz
- Potencia de salida: 10 dBm
- Armónicos -25 dBc
- Puertos de prueba: 2
- Bajo ruido de rastreo: <0.004 dB rms a 70 kHz IFBW
- Amplio rango dinámico:> 123 dB
- Velocidad de medición rápida: 9 ms para 401 puntos con corrección de errores (Keysight, 2018)

2.3.3.4. Analizador de espectros MS2724C

Fabricante: Anritsu

El analizador de espectro portátil MS2724C de alto rendimiento de Anritsu, que se muestra en la figura 17-2, proporciona al usuario el rendimiento necesario para la visualización de los componentes espectrales en un espectro de frecuencia de señales presentes a la entrada, específicamente para el monitoreo de espectro, prueba de transmisión, análisis de interferencia, mediciones de RF y microondas, mediciones de redes inalámbricas. (Anritsu, 2013)

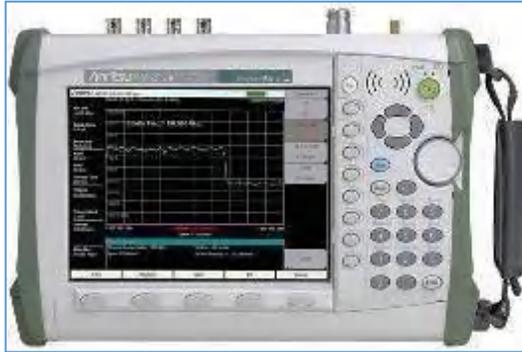


Figura 17-2: Analizador de espectros Anritsu MS2724C
 Fuente:(Anritsu, 2013)

A. Especificaciones de frecuencia

- Rango de frecuencia: 9 kHz a 20 GHz (sintonizable a 0 Hz), preamplificador 100 kHz a 20 GHz
- Resolución de sintonización: 1Hz
- Tiempo de Barrido: de 10 μ s a 600 segundos en intervalo cero
- Precisión del tiempo de barrido: \pm 2% en cero

B. Ancho de banda (modo de barrido de rendimiento)

- Ancho de banda de resolución (RBW): 1 Hz a 10 MHz en 1-3 secuencia \pm 10% (-3 dB de ancho de banda)
- Ancho de banda de video (VBW): 1 Hz a 10 MHz en secuencia 1-3 (ancho de banda de -3 dB)
- RBW con detección de cuasi-pico: 200 Hz, 9 kHz, 120 kHz (ancho de banda de -6 dB)
- VBW con detección de cuasi-pico automático: VBW está activado, RBW / VBW = 1. (Anritsu, 2013).

2.4. Antenas de un sistema de comunicación para un VANT

Son elementos que convierten una señal eléctrica en ondas electromagnéticas y viceversa. En la transmisión de video para VANT permiten la comunicación entre el VTX y VRX, además de ser elementos críticos que determinan el alcance y calidad de señal.

Los elementos básicos que constituyen unas antenas son:

Elementos activos: material conductor que recibe o transfiere la señal

Cable coaxial: cable especial que lleva la señal del conector de la antena sin emitir señales de radio, una de sus funciones es extender la altura de la antena, en algunos casos se las puede doblar y obtener el ángulo deseado.

Conector: su funcionamiento es simple, usados para conectar la antena al transmisor o al receptor. (PROMETEC, 2018)

2.4.1. Tipos de Antenas para FPV

Los tipos de antenas más comunes en un sistema de comunicación para VANT, se muestra en la tabla 7-2.

Tabla 7-2: Tipos de antenas para FPV

	Omnidireccional	Direccional
Polarización lineal	Mono polo Dipolo	Patch
Polarización circular	Trébol, Circulares planas Pagoda	Helicoidal Plana De mirilla

Fuente: (PROMETEC, 2018)

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

A. Polarización lineal

Las antenas polarizadas lineales son sensibles a interferencias cuando existen múltiples caminos para la señal (Multipathing), ocurre cuando una señal se refleja con objetos como edificios, arboles, entre otros, es decir la señal que fuera de fase e interfiere con la señal principal y se puede distinguir como señal estática aleatoria, como se muestra en la figura 18-2. (PROMETEC, 2018)

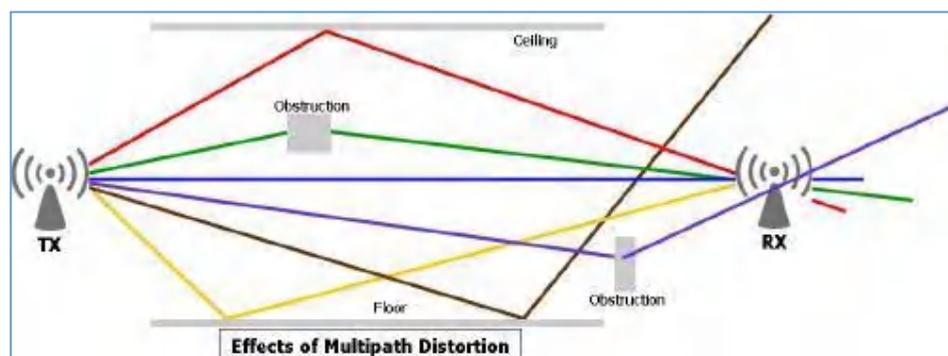


Figura 18-2: Efecto multipath (polarización lineal)

Fuente: (PROMETEC, 2018)

2.4.1.1. Antena Monopolo

Básicamente es la forma más simple de una antena, en si es un cable expuesto muy común en los receptores de radio, como se muestra en la figura 19-2, de fácil adquisición y simple reparación, frente a un dipolo poco efectivas, su frecuencia de resonancia es proporcional a la longitud del cable. (PROMETEC, 2018).



Figura 19-2: Antena monopolo
Fuente: (FPVMax)

2.4.1.2. Antena Dipolo

Están basadas en una antena monopolo con una tierra bajo el elemento activo, lo que dispara su rendimiento considerablemente, son fáciles de implementar y se ven prácticamente en todas partes, existen varias formas de antenas, que se muestra en la figura 20-2, estas antenas pueden tomar formas de rectángulo, un cuadrado, una elipse, entre otras. (Balanis, 2012,pp 3-4)

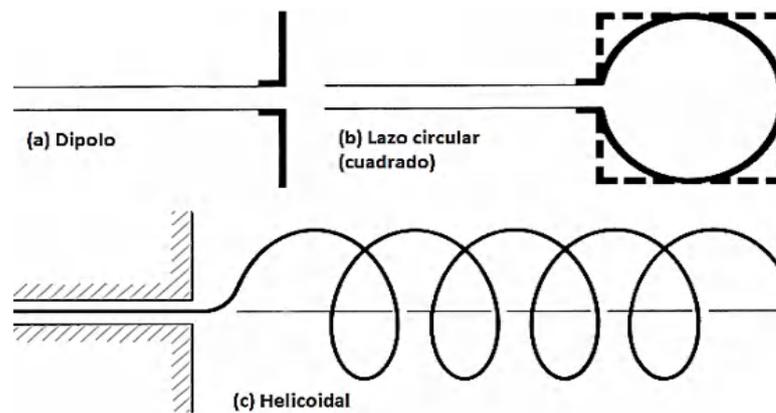


Figura 20-2: Configuraciones de Antenas dipolo (a) Antena dipolo, (b)Antena Bucle circular (cuadrado), (c) Antena helicoidal.
Fuente: (Balanis, 2012,pp 4-5)

2.4.1.3. Antenas Patch

Consiste en un parche metálico, puede tomar muchas configuraciones diferentes como se muestra en la figura 21-2, entre los más populares están los parches rectangulares y circulares debido a su fácil fabricación y análisis y sus características de radiación atractivas, su fabricación es económica utilizando tecnología moderna de circuito impreso, son robustas cuando se montan en superficies rígidas, versátiles en términos de frecuencia resonante, polarización, patrón e impedancia. Estas antenas se las puede implementar en superficies de aviones de alto rendimiento, satélites, incluso en dispositivos móviles. (Balanis, 2012,pp 4-6)

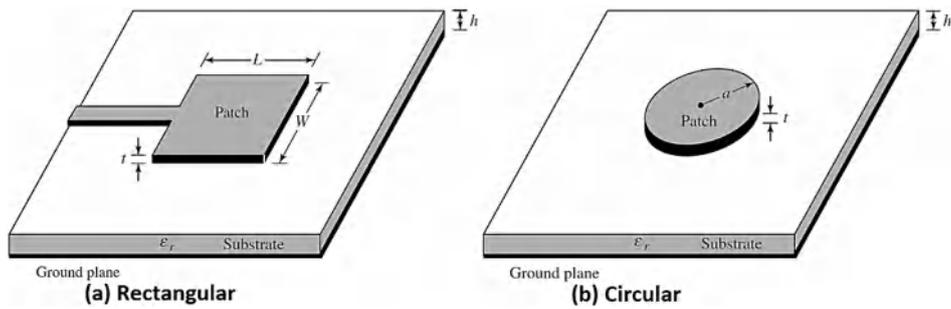


Figura 21-2: Antenas parche. (a) parche rectangular, (b) parche circular
Fuente: (Balanis, 2012,p.6)

2.4.1.4. Arreglo de antenas

Consideradas como una matriz capaz de cumplir con características de radiación que no son alcanzables por un solo elemento, esta distribución geométrica de los elementos es sumados para dar un máximo de radiación en una dirección o direcciones particulares. En la figura 22-2 se muestra configuraciones típicas de matrices, generalmente el conjunto de términos se reserva para una distribución en la que los radiadores individuales están separados, como se muestra en la figura 22-2 (a-c), asimismo se describe a un conjunto de radiadores montados en una estructura continua como se muestra en la figura 22-2 (d). (Balanis, 2012,pp 5-7).

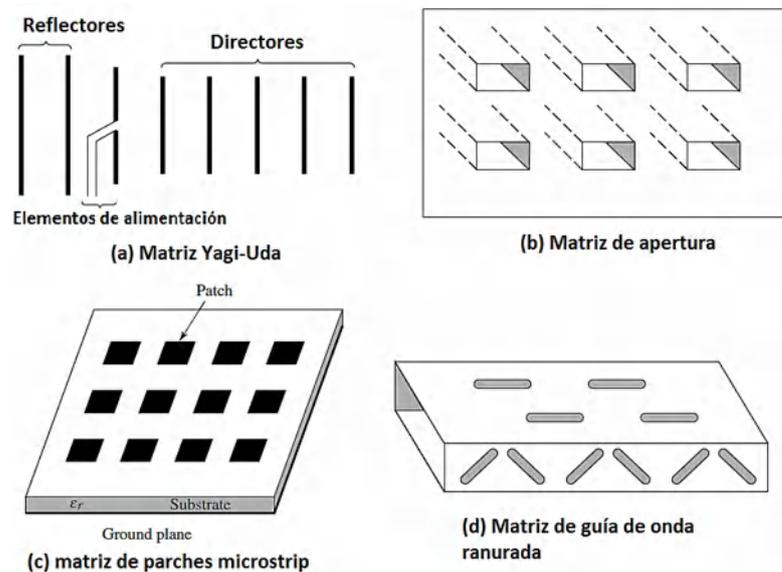


Figura 22-2: Configuración típicas de arreglos microstrip, cable y apertura
Fuente: (Balanis, 2012,p.7)

B. Polarización circular

Para este tipo de polarización existen dos tipos (LHCP) izquierda y (RCHP) derecha, se muestran en la figura 23-2, ayuda a reducir las interferencias cuando hay múltiples vehículos aéreos en la

zona, las antenas LCHP rechazan la señal de las RCHP y viceversa, por lo tanto, cada vez que una señal se refleja contra paredes o el suelo su polarización tiende a cambiar. (PROMETEC, 2018)

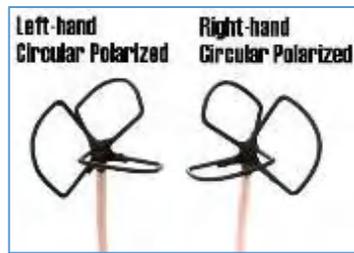


Figura 23-2: Polarización (LHCP, RHCP)
Fuente: (PROMETEC, 2018)

2.4.1.5. Antenas Pagoda

Son antenas con polarización omnidireccional, se caracterizan por estar construidas en PBC (placa de circuito impreso), dada su forma y construcción de discos y la distancia entre estos, como se muestra en la figura 24-2, dan un patrón de radiación más uniforme, siendo más omnidireccionales y con menos pérdida de señal direccional. (FPVMax)



Figura 24-2: Antena pagoda
Fuente: (FPVMax)

2.4.1.6. Antena Hoja de Trébol

Se caracterizan por tener tres o más lóbulos, son del tipo omnidireccionales como el dipolo, pero con polarización circular mismas que proporcionan mejor recepción, y menos susceptibles al (*Multipathing*), por lo tanto, se puede volar entre árboles y paredes con una buena recepción de la señal, como se muestra en la figura 25-2. (Prometec, 2018)



Figura 25-2: Antena hoja de trébol
Fuente: (FPVMax)

2.4.1.7. Antena Helicoidal

Antena formada por un alambre conductor en forma de espiral y con un plano de tierra similar al de los monopolos, determinando su ganancia acorde al número de espiras, reduciendo su tamaño al tratarse de un monopolo enrollado, como se muestra en la figura 26-2. (Rodriguez, 2013, pp16-17)

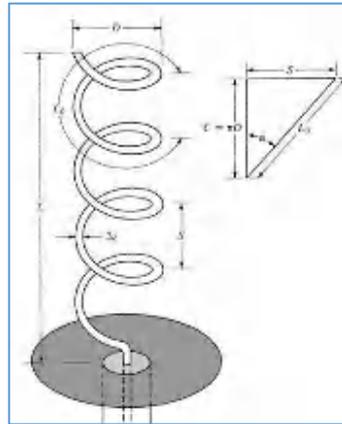


Figura 26-2: Antena helicoidal

Fuente: (Rodriguez, 2013, pp16-17)

2.5. Regulación relativa a los VANT

La necesidad e importancia de una legislación respecto al uso de vehículos aéreos no tripulados, con el objetivo de regular la operatividad y parámetros como características, componentes, prestaciones y los sistemas que pueden ser adaptados que van desde manuales o automáticos dependiendo de los requerimientos hace que se establezcan normas y requisitos de funcionalidad. La inserción de estas normas hace que los propietarios de este tipo de vehículos tengan en cuenta la responsabilidad y adquisición de conocimientos para disminuir el peligro de su entorno, al ser un sector en crecimiento existe la necesidad de una constante actualización del estatuto para un uso responsable de dichos aparatos.

2.5.1. Regulaciones en el Ecuador

La operatividad de los VANT en Ecuador regulado por la Dirección General de Aviación Civil (DGAC), expide la Resolución 251-2015; donde se establece la aprobación de operaciones de los vehículos aéreos no tripulados conocidos comercialmente como drones.

En la resolución expedida se destalla en artículos las especificaciones de operatividad como; la prohibición de operaciones en las cercanías de un aeródromo a una distancia igual o mayor a los 9 Km, la altitud máxima de vuelo no deberá exceder los 400 pies (122 metros), el tiempo de operación serán solamente en horas comprendidas entre la salida y puesta de sol y condiciones meteorológicas optimas, la responsabilidad por la operación del vehículo aéreo será únicamente

del explorador o propietario de la nave, ninguna persona podrá operar los controles de un VANT, si se encuentra fatigado o bajo efectos del consumo de bebidas alcohólicas o de cualquier droga, la capacidad de realizar un vuelo automático se permite solo si el operador tiene el control para intervenir en cualquier momento, el propietario o explorador del VANT está obligado a responder por daños causados a terceros, por lo cual debe contratar una póliza de seguros de responsabilidad civil, dichos montos están regidos por el peso del VANT, de 2 a 25 Kg y su valor será de 3000 USD a 5000 USD. El cumplimiento de estas disposiciones, no exime al operador del VANT de cumplir con las leyes y reglamentos locales aplicables. ((DGAC), 2015)

2.5.2. Regulación del uso de frecuencias

El uso de bandas no licenciadas que no requieren de permisos especiales de las autoridades de regulación y control de las telecomunicaciones para la transmisión de comunicaciones inalámbricas en las que se encuentran las frecuencias de 2.4 GHz, 5 GHz y 5.8 GHz, siendo la primera la más utilizada y popular, sin embargo, al ser de uso libre debe cumplir con ciertas regulaciones que varían dependiendo de la región o país. (Tello, 2015,p.36)

2.5.2.1. Aspectos legales

La Constitución de la Republica del Ecuador, determina que debe coexistir la contribución de los beneficios al estado en proyectos que implican los recursos naturales.

Sobre esto, el artículo 261 de la Constitución de la Republica, determina que “el Estado central tendrá competencias exclusivas sobre:” “El espectro radioeléctrico y el régimen general de las comunicaciones y telecomunicaciones”.

De la misma Manera el artículo 408, establece que: “el espectro radioeléctrico es un recurso natural de propiedad inalienable, imprescriptible e inembargable del Estado”.

Asimismo, existe la Ley Orgánica de las Telecomunicaciones donde existe un marco legal que asegura del abastecimiento de todos los servicios afines, así como la regulación del espectro radioeléctrico.

Entre los objetivos planteados en la ley Orgánica de Telecomunicaciones están:

- “Promover el desarrollo y fortalecimiento del sector de las telecomunicaciones”.
- “Fomentar la inversión pública o privada para el desarrollo de las telecomunicaciones”
- “Promover que el país cuente con las redes de Telecomunicaciones de alta velocidad y capacidad”

- “Promover y supervisar el uso efectivo y eficiente del espectro radioeléctrico y demás recursos limitados o escasos de telecomunicaciones y garantizar la adecuada gestión y administración de recursos...”.

Si bien es cierto en la Constitución establece que todas las personas tienen el derecho al acceso a bandas no licenciadas, esto no quiere decir que este exentas al control debido al riesgo de posibles saturaciones. (Tello, 2015, pp.37-38)

2.5.2.2. Normas técnicas

Esta norma expedida para el uso libre de las bandas de frecuencias, establecidas en el Plan Nacional de Frecuencias, acorde con las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), define un listado de aplicaciones usadas en los ámbitos industriales, científicos y médicos, a través de esta norma técnica se provee a la sociedad ecuatoriana un instrumento de política regulatoria para la operación de estas aplicaciones.

Según la Norma Técnica establecida por la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), establece que, “la nota nacional EQA.45 del Plan Nacional de Frecuencias aprobado mediante Resolución No. 12-09-ARCOTEL-2017 del 13 de diciembre de 2017, publicada en la Edición Especial No. 250 del Registro Oficial el 31 de enero de 2018, establece que: “En las bandas 915 –928 MHz, 2 400 –2 483,5 MHz, 5 150 –5 350 MHz, 5 470 – 5 725 MHz y 5 725 –5 850 MHz y 24.05 - 24.25 GHz operan, a título secundario, sistemas que ocupan espectro radioeléctrico para Uso Determinando de Bandas Libres (UDBL), para los servicios fijo y móvil”.

En el Anexo 1 sobre las Condiciones de operación para equipos que ocupen espectro de uso libre con numeral:

- *1.5 Control de modelos (juguetes)*, indica que “el control de Modelos incluye la aplicación de equipos de control de modelos radioeléctricos, que tiene exclusivamente el objeto de controlar el movimiento del modelo (juguete), en el aire, en tierra o sobre o bajo la superficie del agua”.
- *1.26 Voz y Video*, “En relación con los dispositivos de radiocomunicaciones de corto alcance, la voz incluye aplicaciones como radioteléfonos, radioescucha de bebés y utilidades similares. Están excluidos los equipos de banda ciudadana CB y las radios móviles privadas (PMR 446).

En video se considera que se utilizarán aplicaciones no profesionales de cámaras inalámbricas para fines de control y de vigilancia. (Resolucion-ARCOTEL, 2018).

2.5.2.3. Bandas de frecuencia restringidas

Ningún equipo o estación objeto de la presente norma técnica, podrá operar en las bandas de frecuencias descritas a continuación en la tabla 8-2.

Tabla 8-2: Banda de frecuencias restringidas

BANDA DE FRECUENCIAS							
N°	(MHz)	N°	(MHz)	N°	(MHz)	N°	(GHz)
1	0.090-0.110	17	13.36-13.41	33	399.9-410	48	5.35-5.46
2	0.495-0.505	18	16.42-16.423	34	608-614	59	6.65-6.6752
3	2.1735-2.1905	19	16.69475-16.69525	35	952-1215	50	8.025-8.5
4	4.125-4.128	20	16.80425-16.80475	36	1300-1427	51	9.0-9.2
5	4.17725-4.17775	21	21.87-21.924	37	1435-1646.5	52	9.3-9.5
6	4.20725-4.20775	22	23.2-23.35	38	1660-1710	53	10.6-11.7
7	6.215-6.218	23	25.5-25.67	39	1718.8-1722.2	54	12.2-12.7
8	6.26775-6.26825	24	37.5-38.25	40	2200-2300	55	13.25-13.4
9	6.31175-6.31225	25	73-74.6	41	2483.5-2500	56	14.47-14.5
10	8.291-8.294	26	74.8-75.2	42	2655-2900	57	15.35-16.2
11	8.362-8.366	27	108-138	43	3260-3267	58	20.2-21.26
12	8.37625-8.38675	28	149.9-150.05	44	3332-3339	59	22.01-23.12
13	8.41425-8.41475	29	156.52475 - 156.52525	45	3345.8-3352.5	60	23.6-24.0
14	12.29-12.293	30	156.7-156.9	46	4200-4400	61	31.2-31.8
15	12.51975-12.52025	31	242.95-243	47	4800-5150	62	36.43-36.5
16	12.57675-12.57725	32	322-335.4			63	Por encima de 38.6

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. :2020

Fuente: (UIT-R-SM.2153-5)

2.5.2.4. Condiciones de Operación para Uso Determinado en Bandas Libres, (UDBL)

En el apartado 1.4 del Anexo 2 de la norma técnica emitida estipula que el “Espectro Ensanchado, tecnología en la que la energía media de la señal transmitida se extiende sobre un ancho de banda considerablemente más amplio que el ancho de banda que contiene la información. Los sistemas que emplean esta tecnología compensan el uso de una banda de transmisión más ancha con una densidad espectral de potencia más baja y una mejora en el rechazo de las señales interferentes provenientes de otros sistemas que funcionan en la misma banda de frecuencia”

Además, se establece los siguientes temimos, definiciones y conceptos para el uso determinado de bandas libres, como enlaces UDBL fijos punto a punto y punto a multipunto asimismo sistemas móviles UDBL que se establecen en la tabla 9-2 (Resolucion-ARCOTEL, 2018).

Tabla 9-2: Límites a las transmisiones para el Espectro Ensanchado

Banda UDBL	Tipo de Enlace / Sistema		
	PUNTO A PUNTO	PUNTO A MULTIPUNTO	MOVIL
915 – 928 MHz	X	X	X
2400 – 2483.5 MHz	X	X	X

Tabla 9-2: (Continuación)

5150 – 5250 MHz	X	X	X
5250 – 5350 MHz	X	X	X
5470 – 5725 MHz	X	X	X
5725–5850 MHz	X	X	X
24.05 – 24.25 GHz	X	No permitido	No permitido
57 – 64 GHz	X	No permitido	No permitido

Fuente: (Resolucion-ARCOTEL, 2018)

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

A continuación, en la tabla 10-2 se detallan las características técnicas y los límites de emisión aplicables a las bandas destinadas a espectro UDBL.

Tabla 10-2: Límites a las transmisiones de UDBL

Bandas de Operación	Potencia Pico Máxima del Transmisor (mW)	P.I.R.E. (mW)	Densidad de P.I.R.E. (mW/MHz)
915 – 928 MHz	500	-----	-----
2400 – 2483.5 MHz	1000	-----	-----
5150 – 5250 MHz	50	200	10
5250 – 5350 MHz	250	1000	50
5470 – 5725 MHz	250	1000	50
5725-5850 MHz	1000	-----	-----
57 – 64 GHz	500	20000	

Fuente: (Resolucion-ARCOTEL, 2018)

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

En el Anexo 2 numeral 2.1.2 describe que: “Si la ganancia de la antena empleada en la banda 2400 – 2483.5 MHz es superior a 6 dBi, deberá reducir la potencia máxima de salida del transmisor, esto es 1 Watt, en 1 dB por cada 3 dB de ganancia de la antena que exceda los 6 dBi”.

Asimismo, el numeral 2.1.8 describe que: “Los sistemas que operen en la banda de 5725 - 5850 MHz pueden emplear antenas de transmisión con ganancia mayor a 6 dBi y de hasta 23 dBi sin la correspondiente reducción en la potencia pico de salida del transmisor. Si emplean ganancia en la antena mayor a 23 dBi, será requerida una reducción de 1 dB en la potencia pico del transmisor y en la densidad espectral de potencia pico por cada dB que la ganancia de la antena exceda a los 23 dBi. (Resolucion-ARCOTEL, 2018).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se expone las metodologías utilizadas para la construcción e implementación del prototipo de un sistema de comunicación para transmitir video de baja resolución en tiempo real para un vehículo aéreo no tripulado (DRONE), en el que se explica los diferentes métodos de investigación y las técnicas usadas.

3.1. Metodología de la investigación

El método científico es el ideal para la presente investigación, para el desarrollo de los objetivos propuestos.

3.1.1. Tipo de investigación

Para el presente trabajo de titulación es pertinente utilizar más de un tipo de investigación, para su desarrollo ideal, siendo principalmente la investigación descriptiva, bibliográfica y de campo, estas son las elegidas para conseguir un óptimo resultado.

3.1.1.1. Investigación bibliográfica.

Este tipo de investigación es la ideal para el desarrollo del presente trabajo de titulación, ya que proporciona datos obtenidos en trabajos previos basados en la transmisión de video en tiempo real, con la diferencia de los requerimientos en objetivos ya expuestos.

Posteriormente se recabó información acerca de las normativas vigentes para el uso de vehículos aéreos no tripulados, regulaciones de usos de frecuencias, las tecnologías y dispositivos inmersos en esta investigación, los parámetros a tener en cuenta (diseños, construcciones, implementaciones, mediciones y evaluación de funcionamiento), para desarrollar con eficacia la investigación y desarrollo del trabajo de titulación.

3.1.1.2. Investigación descriptiva.

Para la descripción paso a paso del desarrollo de este trabajo de titulación este tipo de investigación es la ideal, describiendo como se realizaron los diseños, la construcción e implementación del sistema de comunicación para cumplir los objetivos establecidos.

3.1.1.3. Investigación de campo

Este tipo de investigación es indispensable, debido a que los objetivos de este trabajo de titulación requieren pruebas y validación de los parámetros de funcionamiento utilizando dispositivos de caracterización de sistemas de comunicación, análisis de radio frecuencias y aplicados a la transmisión de video en tiempo real, recolectando muestras, datos y resultados de la implementación.

3.1.2. Técnicas de investigación

La técnica a utilizar en la investigación es la de campo, por lo que las diferentes mediciones, toma de muestras y validación de resultados son en tiempo real.

3.1.2.1. Población y Muestra

Conforme se realizaron las mediciones, cada una de estas se amacena en una matriz, para esta investigación se utilizó estas muestras para la validación de resultados, así determinar los objetivos del presente trabajo.

3.1.2.2. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La técnica utilizada es la observación directa, implementando el sistema de comunicación para obtener las muestras, mismas que son obtenidas exponiendo el sistema a diferentes factores de evaluación como perdidas en el espacio libre, ganancia total de las antenas, obteniendo el presupuesto de enlace y cobertura en un ambiente de exteriores, además una previa evaluación de los elementos de transmisión caracterizado mediante el analizador de redes vectoriales, para su posterior implementación.

3.1.2.3. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

El procesamiento de los datos transmitidos se programó en el software Python para su posterior visualización, evaluación de las muestras obtenidas de los diferentes escenarios a los que fue expuesto el sistema de comunicación.

3.1.2.4. Validación y confiabilidad

Para la validación y constatación de cada medición se utilizó el método manual, para verificar así directamente las distancias medidas a través de una cinta topográfica, obteniendo datos reales.

3.1.3. Metodología del diseño y construcción del prototipo del sistema de comunicación

A continuación, se detallan los pasos del proceso de diseño y construcción del prototipo del sistema de comunicación.

- 1) Para el diseño de uno de los elementos del sistema recepción (Rx), arreglo de antenas parche MxN microstrip se analiza y establece los parámetros requeridos para la recepción de la información, además la esquematización se realiza en base a software utilizando CST Studio.
- 2) Para el diseño de uno de los elementos de transmisión (Tx), antena omnidireccional tipo trébol para la transmisión de video, se diseña en base a software utilizando CST Studio, previamente analizando y estableciendo los parámetros para ser implementado al sistema de comunicación.
- 3) La construcción del elemento de recepción, arreglo de antenas se realiza con el plotter de circuitos impresos CNC ProtoMat LPKF S103 para el freseo (desgaste del cobre de la placa FR4) de las antenas.
- 4) Para el elemento de transmisión, antena omnidireccional tipo trébol se construye a partir de medidas exportadas del software de diseño, para ser armadas y ensambladas.
- 5) Para el armado del sistema de transmisión se sigue el diseño de conexión con los diferentes dispositivos a intervenir.
- 6) Para el ensamblaje de la estación en tierra se diseña un equipo de recepción portable acondicionado para la visualización en tiempo real de los eventos captados en aire.
- 7) Una vez construido el sistema comunicación, la parte trasmisora se la ubica en vehículo aéreo no tripulado y la parte receptora es ubicada en el equipo portable de visualización en la estación base.

3.2. Diseño del sistema de comunicación

El diseño del sistema de comunicación para un VANT, es necesario la implementación de comunicaciones inalámbricas para la transmisión de datos como el monitoreo del vuelo en tiempo real, definido por dispositivos físicos para la captura, procesamiento, transmisión y recepción de señales de video como se muestra en la figura 1-3, para este proyecto es necesario el diseño de sistemas radiantes que cumplan con los requerimientos de funcionalidad adaptables a los dispositivos electrónicos seleccionados.

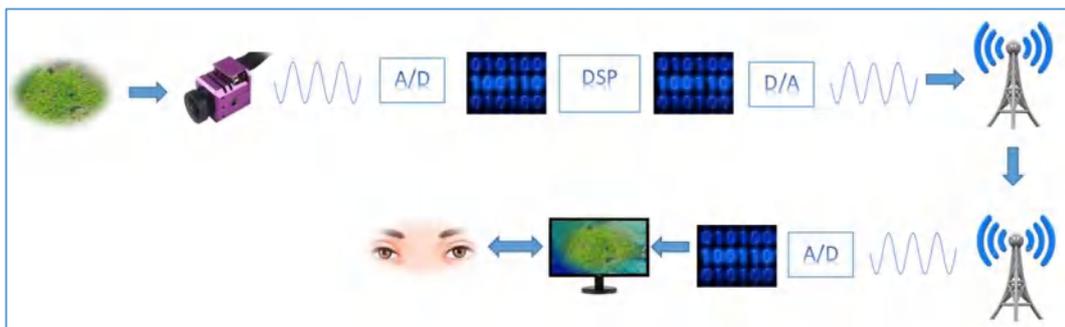


Figura 1-3: Diagrama del sistema de comunicación
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

3.2.1. Diseño del sistema de transmisión (Tx)

En la figura 2-3 se muestra el diagrama de bloques del sistema de transmisión. Está formado por el bloque de sensor de imágenes, responsable de captar imágenes de un área determinada desde el aire, bloque de hardware de procesamiento, encargado de procesar las señales captadas por el sensor de imágenes, bloque de software de procesamiento de imágenes, este está ligado directamente con el computador (hardware de procesamiento), en este se puede desarrollar algoritmos específicos para el procesamiento digital de imágenes en algún lenguaje de programación, el bloque de transmisión de señales, encargado de emitir señales a través de un sistema radiante, y finalmente el bloque de alimentación que proporciona energía a todo el sistema de transmisión.

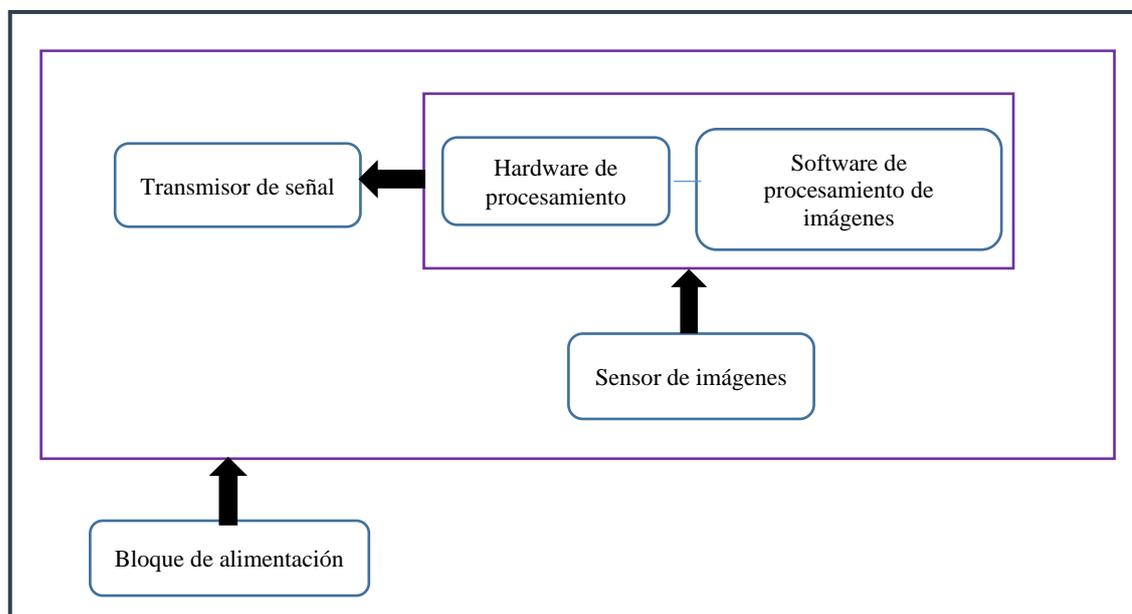


Figura 2-3: Diagrama de bloques del sistema de transmisión
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

3.2.1.1. Diseño del sistema radiante tipo trébol (cloverleaf)

Se optó por una antena de polarización circular en forma de trébol con un patrón de radiación similar a una antena dipolo, cuya dirección de radiación máxima la tiene al costado de la antena y muy poca radiación en la dirección axial es decir en el eje z, por sus características de funcionamiento en sistemas FPV tanto para aumentar la calidad y alcance de video, implementado en el sistema de comunicación para un vehículo aéreo no tripulado (VANT), determinado para trabajar en la frecuencia de 5.8 GHz.

Para antenas cloverleaf o tipo trébol se toma en consideración las dimensiones en longitud de onda y la frecuencia de operación, por lo tanto, para una frecuencia de 5.8 GHz, la longitud de onda es de 5.17 cm. (c/f , donde c = velocidad de la luz)

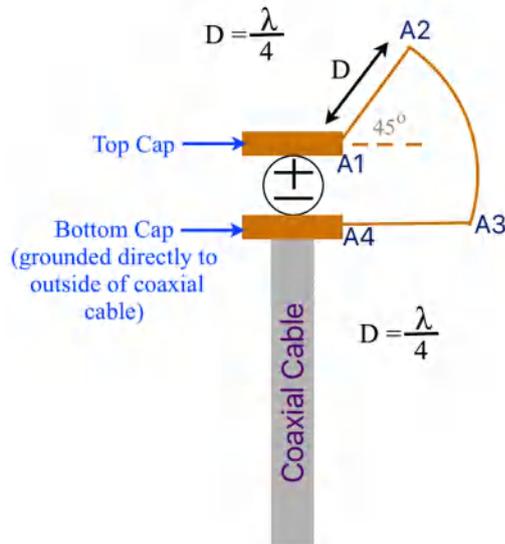


Figura 3-3: Vista lateral de la antena hoja de trébol
Fuente: (Antenna-theory, 2010-2016)

En la figura 3-3 se muestra la vista lateral de la antena hoja de trébol, misma que tiene una pequeña separación vistas como “tapas” aproximadamente de 1-2% de una longitud de onda, la alimentación se ubica entre las tapas esto significa que su conexión va al blindaje exterior de tierra del coaxial va a la gorra, y el centro de la brida de cable coaxial a la tapa superior, para las distancias de las secciones de los pétalos debe tener ser aproximadamente un cuarto de longitud de onda como se muestra en la figura 3-3 (*distancia A1-A2- A3-A4*), Además el ángulo de elevación vertical de A1-A2 respecto al plano horizontal es de 45 grados.

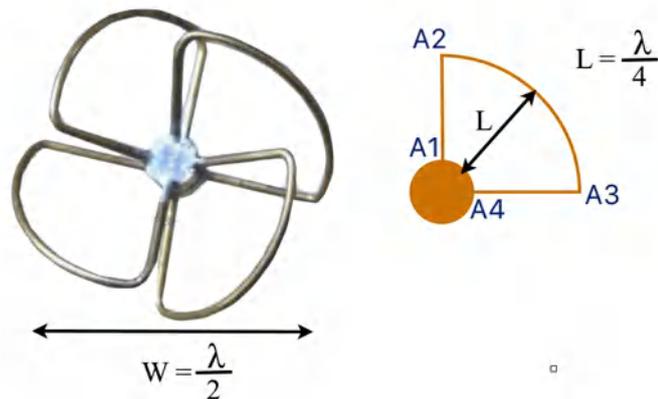


Figura 4-3: Vista Superior de la antena hoja de trébol
Fuente: (Antenna-theory, 2010-2016)

En la figura 4-3 se muestra que la distancia del pétalo (L) se aproxima a un cuarto de longitud de onda tomado desde el centro de la antena, lo que da como resultado que el ancho W sea la mitad de la longitud de onda, ajustándose así todos los demás ángulos para que la longitud total del cable, L y D coincidan con los valores predeterminados.

Tabla 1-3: Parámetros establecidos para la antena tipo trébol (Cloverleaf)

Nombre	Descripción	Valores
f_0	Frecuencia central	5.8 GHz
D	Diámetro del alambre	5.17cm
N	Número de elementos de la matriz	4
P	Polarización (transmisión)	Polarización circular

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Considerando los parámetros de la tabla 1-3, se realiza el diseño en el software CST Studio, ajustando y optimizando el diseño para que su funcionamiento sea eficiente, ajustándose a los requerimientos establecidos.

En la figura 5-3 (a) se muestra esquematizado en el CST Studio, la antena tipo trébol (cloverleaf) para ser simulado y mejorado hasta cumplir los parámetros ideales y en la figura 5-3 (b) se muestra una vista de los parámetros físicos que van a intervenir en el diseño.

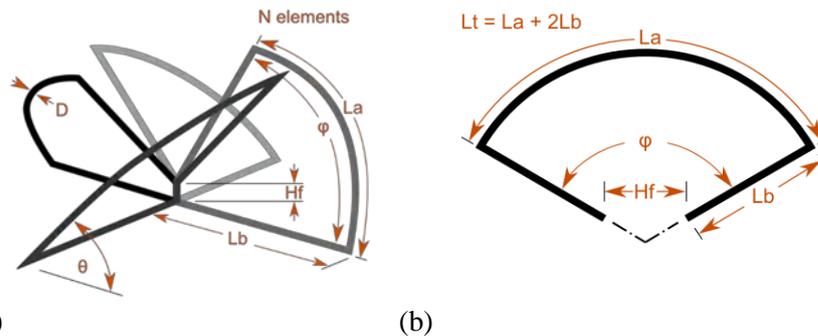


Figura 5-3: Vista Isométrica antena cloverleaf. (a) Vista parámetros físicos. (b) Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Esquematizado y optimizado el diseño en el software CST Studio figura 6-3, en la tabla 2-3 se describe las dimensiones y parámetros físicos de la antena cloverleaf, acotados anteriormente en las figuras 5-3 (a) y 5-3 (b).

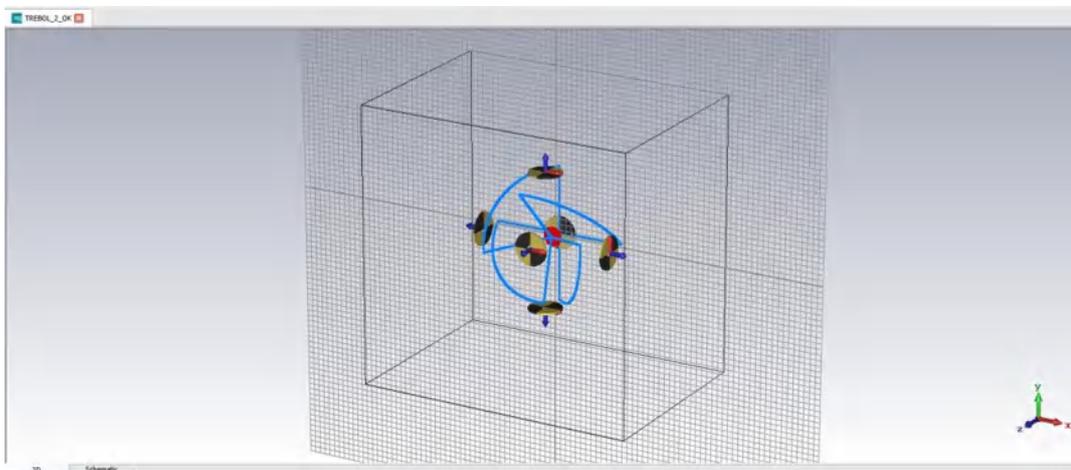


Figura 6-3: Diseño antena tipo trébol (cloverleaf) en CST Studio Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Tabla 2-3: Nombres, descripción y valores de cada elemento del diseño de la antena tipo trébol (cloverleaf)

Nombre	Descripción	Valor
fo	Frecuencia central	5.8 GHz
D	Diámetro del alambre	5.17 cm
N	Número de elementos de la matriz	4
P	Polarización (Transmisión)	Circular
Hf	Altura de alimentación	2.607 mm
Lb	Longitud de la base del elemento	11.94 mm
φ	Angulo de arco del elemento	95°
θ	Angulo de paso	45°

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

En la figura 7-3 (a) se muestra el diseño simulado por el software CST basado en los parámetros de construcción y la figura 7-3 (b) expone su parte superior de la antena tipo trébol (cloverleaf).

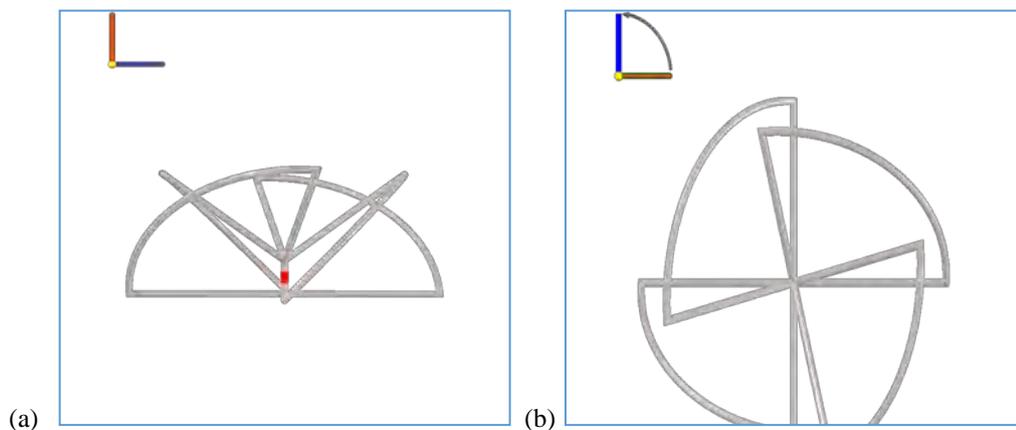


Figura 7-3: Simulación antena tipo trébol (Cloverleaf). (a)vista frontal de la antena, (b)vista superior.

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

3.2.1.2. Parámetros obtenidos del diseño de la antena trébol (cloverleaf) banda-S.

Estos resultados son conseguidos posterior a la simulación, optimización y validación del diseño de la antena tipo trébol (cloverleaf), trabajando a una frecuencia de 5.8 GHz dentro de la banda-S.

En la gráfica 1-3 expone los parámetros de dispersión en una frecuencia de 5.8 GHz, dando una caída de -31.2006 dB, adecuado para un desempeño óptimo del diseño de la antena.

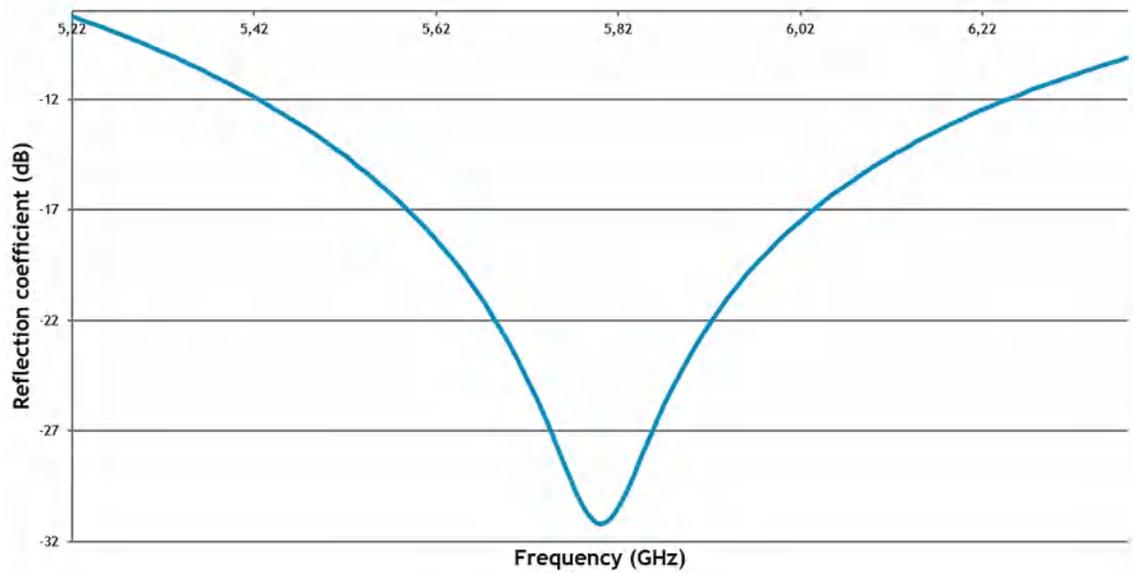
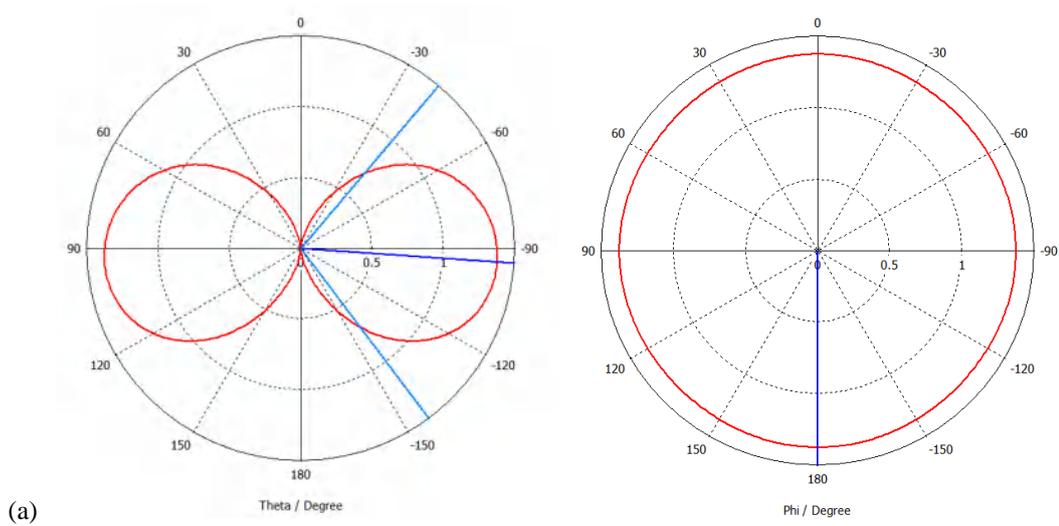


Gráfico 1-3: Parámetros de Scattering S11 (-31.2006dB) del diseño de la antena tipo trébol (cloverleaf).

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

El diagrama de radiación en polar y 3D del diseño de la antena tipo trébol (cloverleaf) se expone en los gráficos 2-3 (a) y 2-3 (b) respectivamente.



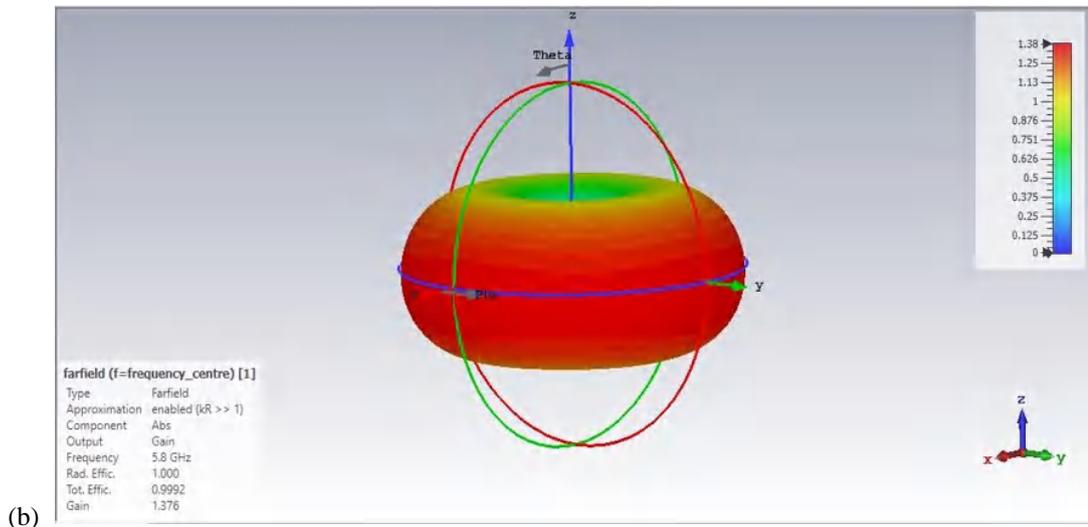


Gráfico 2-3: Diagrama de radiación del diseño de la antena tipo trébol (cloverleaf). (a) diagrama polar, en theta y phi (b) diagrama 3D en dBi.

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. :2020

3.2.1.3. Construcción de antena tipo trébol (cloverleaf)

Verificado en el software de diseño y simulación del sistema radiante, se procede a la construcción con los materiales electrónicos suministrados (alambre solido MIC, conector RP-SMA macho, cable coaxial).

Para la construcción de la antena cloverleaf se toma los parámetros expuestos en la tabla 2-3, en la figura 8-3 se muestra el diámetro y cortes del alambre solido MIC.



Figura 8-3: Medición y corte del alambre solido MIC

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. :2020

En las figuras 9-3 (a-c), se muestra el proceso de ensamblaje de la antena tipo trébol (cloverleaf), desde su doblez en los extremos a un ángulo de 90° , seguido de la curvatura en la parte superior, y el posterior posicionamiento a 45° y alineamiento de las puntas para su soldadura.

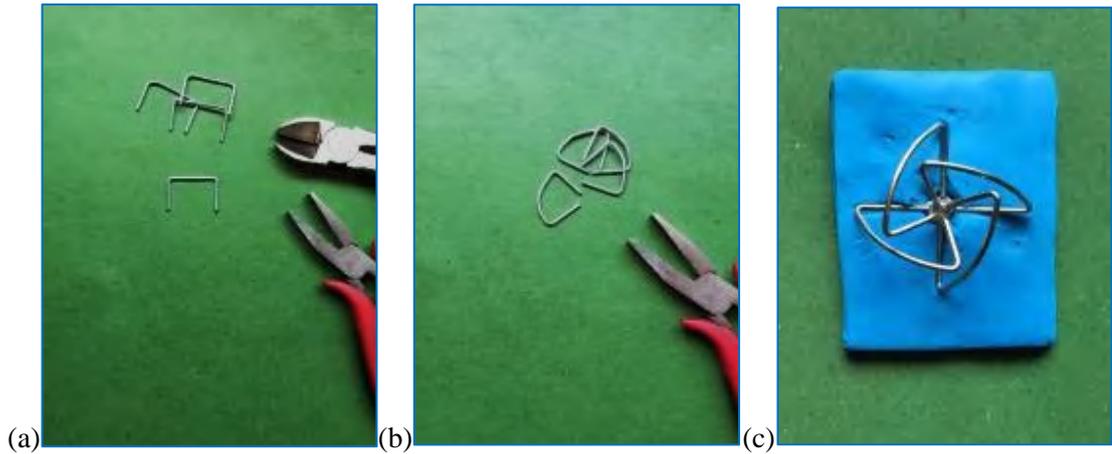


Figura 9-3: Proceso de ensamblaje de la antena Cloverleaf. (a) ajuste y dobles a 90° , (b)curvatura superior, (c) posicionamiento a 45°
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

En la figura 10-3 (a-c) se muestra la soldadura de los puntos al cable coaxial y el sistema radiante completo.

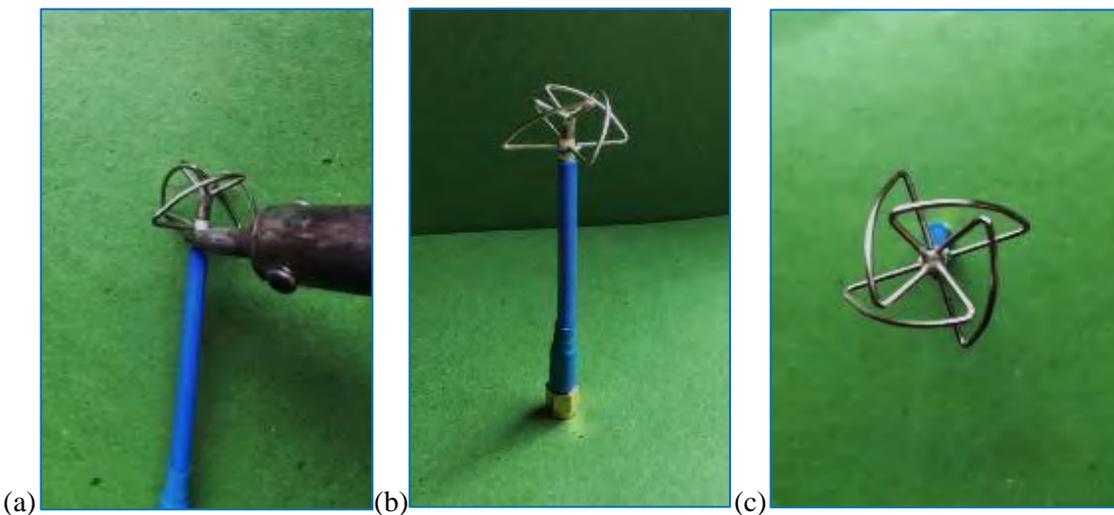


Figura 10-3: Antena tipo trébol (cloverleaf) terminada. (a) soldadura de los puntos al cable coaxial, (b)vista frontal terminada, (c) vista superior
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

3.2.1.4. Carga del sistema operativo en la Raspberry Pi

Para la transmisión de video en tiempo real se debe cargar el Package de Raspberry (OS), eso se lo realiza instalando el sistema operativo en una tarjeta SD o MicroSD, para ello se descarga Raspberry Pi Imager e instalarlo en el sistema, en la figura 11-3 se visualiza la interfaz del software.



Figura 11-3: Interfaz Raspberry Pi Imager v1.5
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Posteriormente se deberá seleccionar el tipo de sistema operativo (CHOOSE OS), es decir Raspberry Pi OS lite (32-bit), como se muestra en la figura 12-3.

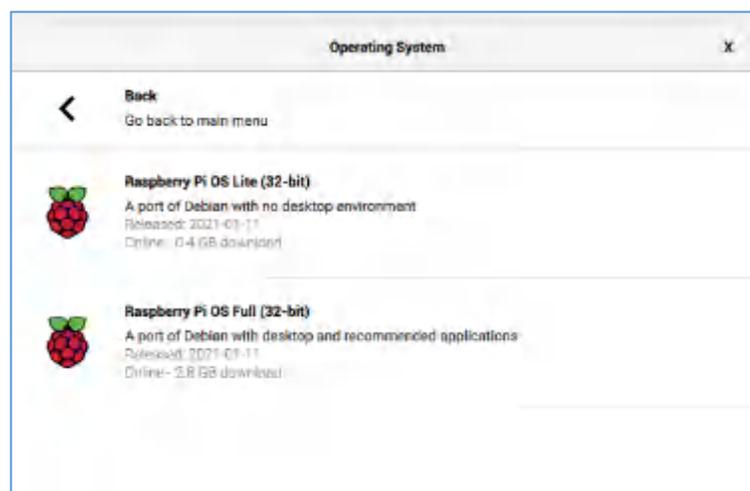


Figura 12-3: Selección sistema operativo
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Una vez elegido el sistema operativo se despliega la interfaz Raspberry pi Imager, y seleccionamos la opción CHOOSE SD CARD para seleccionar la tarjeta micro SD, como se muestra en la figura 13-3.

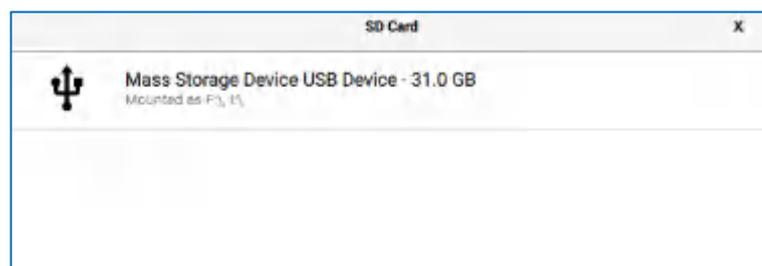


Figura 13-3: Selección tarjeta SD
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Por último, se debe seleccionar la opción WRITE, para que el programa empiece a descargar de Raspberry Pi OS, e instale en la Micro SD, como se muestra en la figura 14-3, y una vez culminado el proceso se extrae la tarjeta para su posterior ubicación en la Raspberry Pi.



Figura 14-3: Descarga e instalación del sistema operativo a la tarjeta SD
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

3.2.1.5. Esquema de implementación (Tx)

Se establece la estructura de conexión entre los dispositivos y la tarjeta Raspberry Pi, se indica los pines de conexión a intervenir en el proceso de transmisión, que se indica en la figura 15-3

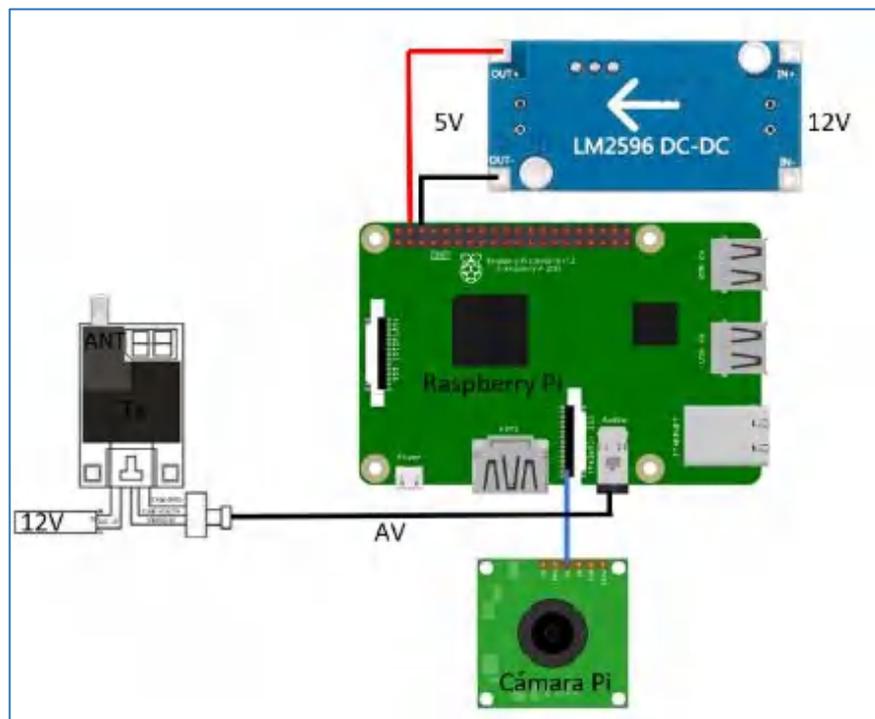


Figura 15-3: Esquema de implementación (Tx)
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

3.2.1.6. Implementación del sistema de transmisión (Tx)

Para la implementación del sistema de transmisión se siguió el esquema de conexiones mostrado en la figura 16-3, mismo que será montado a bordo del vehículo aéreo no tripulado (VANT) que se muestra en la figura 16-3 (c), en la figura 16-3 (a-b) se muestra el ensamblaje del prototipo de transmisión.



Figura 16-3: Implementación del sistema de transmisión (Tx). (a) Vista superior del sistema Tx, (b) Vista lateral del sistema de Tx, (c) Vista del sistema Tx acoplado al VANT

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Seguido del montaje de los dispositivos en la tarjeta Raspberry Pi, se inicia el proceso de configuración del sistema, en la ventana de comandos para acceder al sistema se debe ingresar el *raspberrypi login: pi*; y el *password: raspbeberry*.

Para acceder a la ventana de configuraciones digitamos el comando *sudo raspi-config* como se muestra en la figura 17-3.



(b)

Figura 19-3: Verificación de configuración. (a) comando para visualizar la captura de imagen, (b) captura de imagen

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

3.2.1.7. Instalación del software Python OpenCv

Para el procesamiento digital de imágenes adquiridas por la cámara pi OV5647 y realizar dicho tratamiento se usa el lenguaje de programación Python OpenCv instalado en la tarjeta de desarrollo Raspberry pi Model B, y posterior transmisión hacia la estación terrena. En la figura 20-3 se muestra la versión de Python desde la consola que viene precargada con el sistema operativo previamente instalado.

```
Archivo Editar Pestañas Ayuda
pi@raspberrypi:~$ python3
Python 3.7.3 (default, Jan 22 2021, 20:04:44)
[GCC 8.3.0] on linux
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
>>>
```

Figura 20-3: Versión de Python preinstalada

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

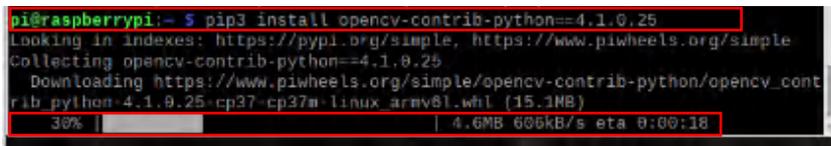
Seguido se instala los paquetes faltantes digitando los siguientes comandos: `sudo apt-get install libhdf5-dev libhdf5-serial-dev libatlas-base-dev libjasper-dev libqtgui4 libqt4-test` como se muestra en la figura 21-3.

```
pi@raspberrypi:~$ python3
Python 3.7.3 (default, Jan 22 2021, 20:04:44)
[GCC 8.3.0] on linux
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
>>> quit()
pi@raspberrypi:~$ sudo apt-get install libhdf5-dev libhdf5-serial-dev libatlas
base-dev libjasper-dev libqtgui4 libqt4-test
```

Figura 21-3: Instalación de paquetes

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

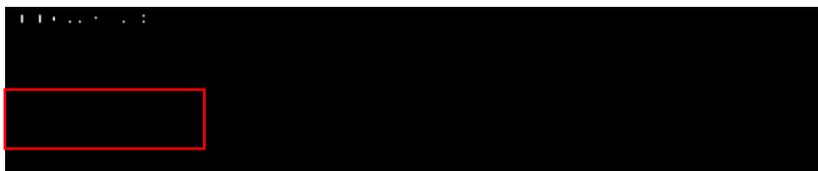
Una vez terminada la instalación de los paquetes faltantes se instala OpenCv versión 4 digitando el comando: `pip3 install opencv-contrib-python==4.1.0.25` como se muestra en la figura 22-3, para la instalación de OpenCv.



```
pi@raspberrypi:~$ pip3 install opencv-contrib-python==4.1.0.25
Looking in indexes: https://pypi.org/simple, https://www.piwheels.org/simple
Collecting opencv-contrib-python==4.1.0.25
  Downloading https://www.piwheels.org/simple/opencv-contrib-python/opencv_contrib_python-4.1.0.25-cp37-cp37m-linux-armv8l.whl (15.1MB)
30% |██████████| 4.6MB 605kB/s eta 0:00:18
```

Figura 22-3: Instalación OpenCv con opencv-contrib-python
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Seguido comprobamos la instalación de OpenCv como se muestra en la figura 23-3 digitando el comando `python 3`, seguido importamos OpenCv con el comando `import cv2`, y verificar la versión instalada con el comando `cv2.__version__` y finalmente se visualiza la versión 3.4.6 instalada.



```
python 3
3.4.6
```

Figura 23-3: Comprobación de la versión instalada de OpenCv
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

3.2.1.8. Procesamiento digital de imágenes con Python OpenCv

Una vez instalado el software para el tratamiento digital de imágenes desde la Raspberry Pi se podrá leer y visualizar imágenes creando un script en la interfaz Thonny IDE de Python como se muestra en la imagen 24-3.

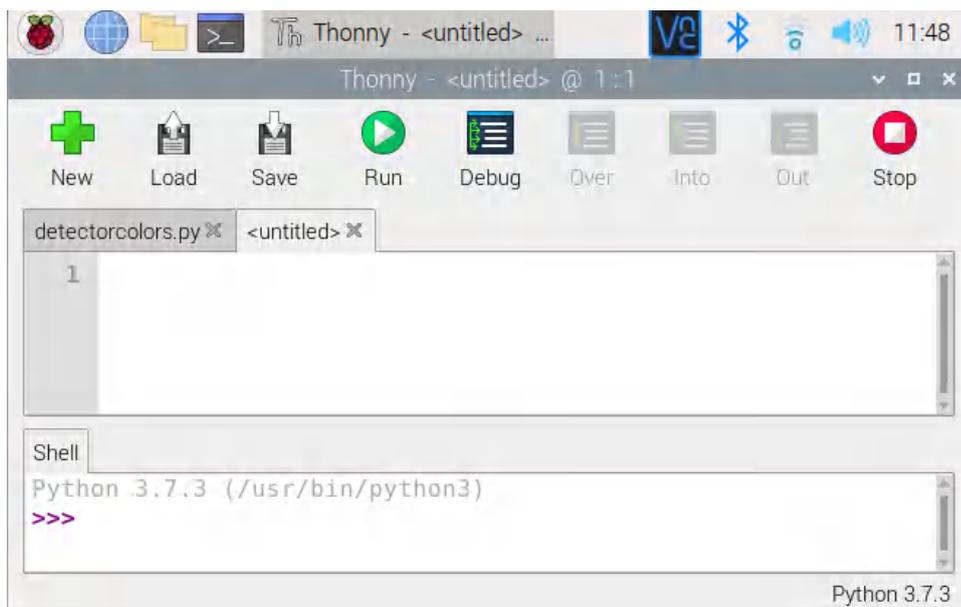


Figura 24-3: Interfaz Thonny de Python
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

A. Detección de colores

En esta sección se procede al procesamiento digital de la imagen, específicamente con la detección de colores que en OpenCV, es conocido como los espacios de colores una forma de representar los canales de colores en la imagen, entre los diferentes espacios se utiliza el HSV (Matriz, Saturación, Valor), similar al popularmente conocido modelo de color RGB.

En OpenCV, la variación de colores en canales HSV son: [H:0-179, S:0-255, V:0-255], en la figura 25-3 (a) se muestra la línea de código para la transformación del espacio de BGR a HSV, recalcando que OpenCV detecta las imágenes por efecto en espacio BGR, seguido se determina los rangos de los colores que se van a detectar como se muestra en la figura 25-3 (b).

(a)

```
ret, frame = cap.read()

if ret==True:
    frameHSV = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2HSV)
    maskAzul = cv2.inRange(frameHSV, azulBajo, azulAlto)
    maskAmarillo = cv2.inRange(frameHSV, amarilloBajo, amarilloAlto)
    maskRed1 = cv2.inRange(frameHSV, redBajo1, redAlto1)
    maskRed2 = cv2.inRange(frameHSV, redBajo2, redAlto2)
    maskRed = cv2.add(maskRed1, maskRed2)
```

(b)

```
cap = cv2.VideoCapture(0)

azulBajo = np.array([100, 100, 20], np.uint8)
azulAlto = np.array([125, 255, 255], np.uint8)

amarilloBajo = np.array([15, 100, 20], np.uint8)
amarilloAlto = np.array([45, 255, 255], np.uint8)

redBajo1 = np.array([0, 100, 20], np.uint8)
redAlto1 = np.array([5, 255, 255], np.uint8)

redBajo2 = np.array([175, 100, 20], np.uint8)
redAlto2 = np.array([179, 255, 255], np.uint8)
```

Figura 25-3: Códigos fuente en Python OpenCV, (a) código para transformar el espacio de color de RGB a HSV, (b) Código para determinar el rango de colores.

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

En la figura 26-3 (a) se muestra el código que va delimitar la máscara a la imagen por los rangos previamente determinados, seguido se define una función para obtener los contornos con la línea de código que se muestra en la figura 26-3 (b), finalmente la figura 26-3 (c) muestra el código que dibuja los contornos acordes al color de las máscaras detectadas.

```

if ret==True:
    frameHSV = cv2.cvtColor(frame,cv2.COLOR_BGR2HSV)
    maskAzul = cv2.inRange(frameHSV, azulBajo, azulAlto)
    maskAmarillo = cv2.inRange(frameHSV, amarilloBajo, amarilloAlto)
    maskRed1 = cv2.inRange(frameHSV, redBajo1, redAlto1)
    maskRed2 = cv2.inRange(frameHSV, redBajo2, redAlto2)
    maskRed = cv2.add(maskRed1,maskRed2)

```

(a)

```

def dibujar(mask,color):
    _,contornos,_ = cv2.findContours(mask, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
    for c in contornos:
        area = cv2.contourArea(c)
        if area > 3:
            nuevoContorno = cv2.convexHull(c)
            cv2.drawContours(frame, [nuevoContorno], 0, color ,2)

```

(b)

```

dibujar(maskAzul, (255,0,0))
dibujar(maskAmarillo, (0,255,255))
dibujar(maskRed, (0,0,255))

```

(c)

Figura 26-3: Códigos fuente en Python OpenCV, (a) código delimitar la máscara de imagen, (b) Código de la función de obtención de contornos, (c) código para dibujar los contornos obtenidos.

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

La figura 27-3 muestra la captura de imagen con la detección del color azul y rojo dibujando su contorno del mismo color como indicador.



Figura 27-3: Captura de imagen y obtención de contornos

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

3.2.2. Diseño sistema de Recepción (Rx)

En la figura 28-3 se muestra el diagrama de bloques del sistema de recepción en la estación terrena. Está formado por el bloque de recepción de video, responsable de recibir señales emitidas desde el VANT, bloque de procesamiento de señal, encargado de convertir las señales analógicas a digital, bloque de almacenamiento, este está ligado directamente con el bloque de visualización del evento captado, este almacena en un ordenador los eventos receptados y visualizados para un posterior análisis y tratamiento de las imágenes, el bloque de señal porcentual recibida (RSSI), encargado de medir de forma porcentual el nivel de señal recibida, finalmente el bloque de alimentación que proporciona energía a todo el sistema de recepción.

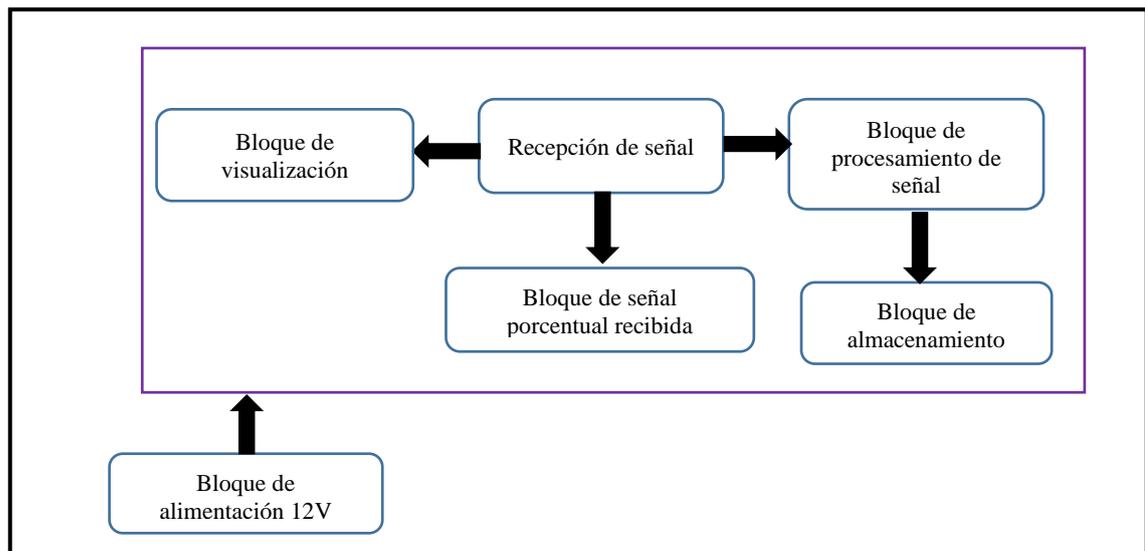


Figura 28-3: Diagrama de bloques del sistema de recepción

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

3.2.2.1. Diseño del arreglo antenas parche 2×2 Microstrip

Como se muestra en la figura 29-3, se selecciona el sistema radiante o arreglo de antenas parche $M \times N$ porque sus características son adecuadas para los sistemas de transmisión de video en tiempo real. El factor de parches 2×2 del sistema de transmisión implementado en un vehículo aéreo no tripulado (VANT) tiene mejor directividad y rango de cobertura.

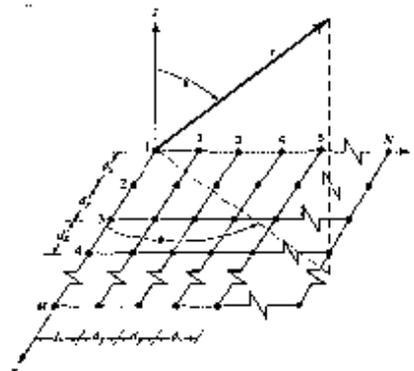


Figura 29-3. Arreglo plano $M \times N$

Fuente: (Balanis, 2012)

Determinamos el número de parches a diseñar en una matriz 2x2 de un total de 4 parches, calculamos la longitud de cada uno para operar a la frecuencia establecida en el sistema de transmisión, como se muestra en la figura 30-3 (a), la vista frontal del parche microbanda rectangular, mientras que en la figura 30-3 (b), las partes laterales muestran la longitud, ancho y la altura del sustrato del parche.

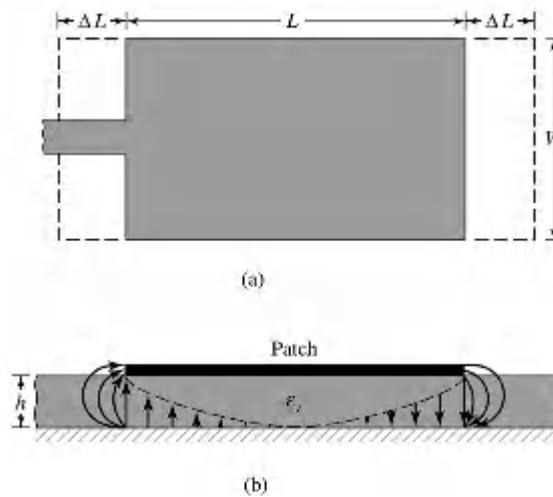


Figura 30-3. Parche. (a) vista superior (conductor), (b) vista lateral(sustrato).
Fuente: (Balanis, 2012,p.218)

Para la antena microstrip rectangular, la ecuación 1-3 usa las condiciones de diseño requerido para expresar el parámetro de ancho del parche con buena eficiencia de radiación (Balanis, 2012,p.819)

$$W = \frac{1}{2f_r\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} \quad \text{Ec (1-3)}$$

Dónde:

W = Ancho del parche

v_0 = velocidad de la luz en el espacio libre.

ϵ_r = constante dieléctrica del sustrato

f_r = frecuencia de resonancia

Para determinar la constante dieléctrica efectiva ϵ_{reff} de la antena microstrip se determina con la ecuación 2-3 donde h es la altura del sustrato.

$$W/h > 1$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad \text{Ec (2-3)}$$

Hallado el valor de W , se determina la extensión de la longitud Δ_L usando la ecuación 3-3 en función de la altura h del sustrato.

$$\frac{\Delta_L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{reff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{reff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \quad \text{Ec (3-3)}$$

La longitud real del parche se determina desarrollando la ecuación 5-3, sustituyendo en la ecuación 4-3, esta describe, la frecuencia de resonancia de la antena microstrip en el modo dominante TM010 en función de su longitud, teniendo en cuenta las franjas, también los efectos de borde, donde $q = \frac{(f_{rc})_{010}}{(f_r)_{010}}$, L es la longitud del parche. (Balanis, 2012, pp 812-220)

$$\begin{aligned} (f_{rc})_{010} &= \frac{1}{2L_{eff}\sqrt{\epsilon_{reff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = \frac{1}{2(L + 2\Delta L)\sqrt{\epsilon_{reff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \\ &= q \frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = q \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \end{aligned} \quad \text{Ec (4-3)}$$

$$L = \frac{1}{2f_r\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} - 2\Delta L \quad \text{Ec (5-3)}$$

Una vez calculados y determinados los parámetros de longitud y ancho del parche, se continua con el diseño y simulación del conjunto de antenas en el software CST Studio y también se consideraron parámetros determinados en la tabla 3-3.

Tabla 3-3: Parámetros establecidos para el arreglo de antenas parche 2x2 microstrip

Nombre	Descripción	Valores
f₀	Frecuencia central	5.8 GHz
N_x	Número de parches en la dirección X	2 parches
N_y	Número de parches en la dirección Y	2 parches
R_{in}	Impedancia de entrada	50Ω
Sustrato	laminado epoxi reforzado con vidrio	FR4
Fabricante Sustrato		Genérico
h	Altura del sustrato	1.5 mm
L	Longitud del parche	14.75 mm
W	Ancho del parche	11.04 mm
ε_r	Permitividad relativa del sustrato.	4.35

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Considerando los parámetros de la tabla 3-3, se efectúa el diseño en el software CST Studio modelando y optimizando el esquema, para que funcione en una dirección superior y cumpla con los requisitos determinados, la figura 31-3 (a) muestra el diseño de la antena 2x2 (4 parches)

descrito en el software CST Studio, que debe ser simulado y optimizado hasta que se alcancen los parámetros ideales. La figura 31-3 (b) muestra la altura h del sustrato FR4.

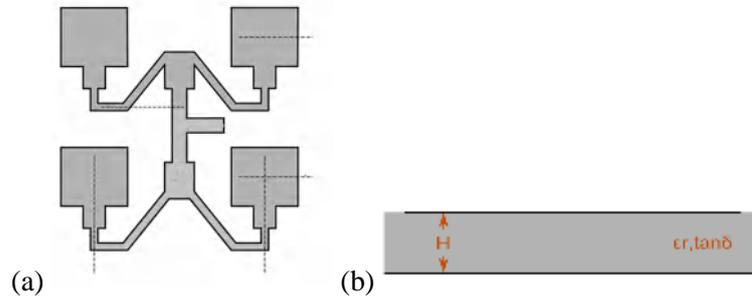


Figura 31-3. Diseño del arreglo de antenas parche 2x2 microstrip. (a) Vista frontal, (b) Vista lateral (altura h del sustrato)

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Las figuras 32-3 (a) y 32-3 (b) muestran vistas frontales del conjunto de antenas, exponiendo parcialmente las dimensiones de cada tramo del diseño.

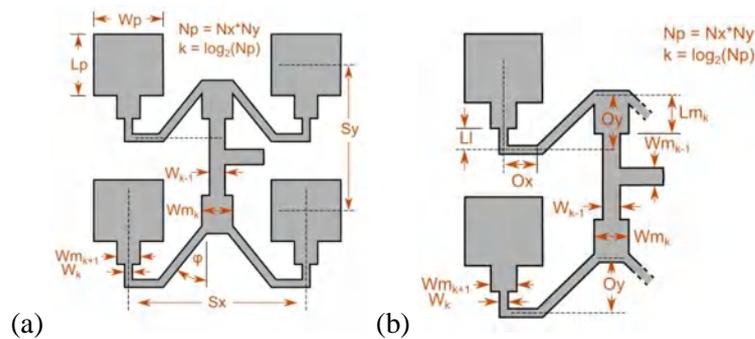


Figura 32-3. Arreglo de antenas parche 2x2 microstrip. (a) Vista frontal parcial del Arreglo de antenas 4 parches, (b) vista frontal parcial del arreglo de antenas 2 parches.

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

La figura 33-3 muestra la esquematización y optimización del diseño en el software CST Studio, en la tabla 4-3 se muestra las dimensiones de cada elemento del conjunto de antenas previamente definido en las figuras 32-3 (a) y 32-3 (b) respectivamente.

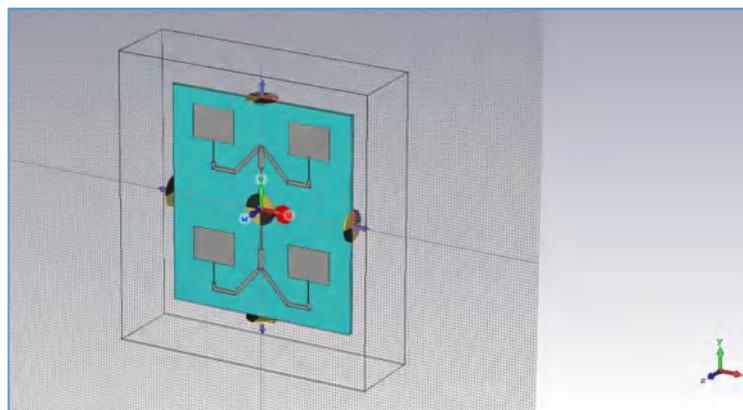


Figura 33-3. Diseño del arreglo de antenas microstrip en CST Studio.

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Tabla 4-3. Nombres, descripción y valores de cada elemento del diseño del arreglo de antenas

Nombre	Descripción	Valor
fo	Frecuencia central	5.8 GHz
Nx	Número de parches en dirección X	2 parches
Ny	Número de parches en la dirección Y	2 parches
Wp	Ancho de parche	14.75 mm
Lp	Longitud del parche	11.04 mm
Sx	Espaciado de parche entre centros de parche en la dirección X	34.40 mm
Sy	Espaciado de parche entre centros de parche en la dirección Y	410.6 mm
Ox	Desplazamiento X del elemento de parche	7.377 mm
Oy	Desplazamiento Y del elemento de parche	9.748 mm
h	Altura del sustrato	1.5 mm
ϵ_r	Permitividad relativa	4.35
$\tan\delta$	Tangente de pérdida	0.019
Wf	Ancho de línea de alimentación	2.892 mm
Lf	Longitud de la línea de alimentación	1.872 mm
Lm1	Longitud de línea de unión 1	6.765 mm
Lm2	Longitud de línea de unión 2	6.869 mm
Lm3	Longitud de línea de unión 3	7.244 mm
Lm4	Longitud de línea de unión 4	7.102 mm
Lm5	Longitud de línea de unión 5	7.102 mm
Lm6	Longitud de línea de unión 6	7.102 mm
Lm7	Longitud de línea de unión 7	7.102 mm
Wm1	Ancho de línea de unión 1	2.892 mm
Wm2	Ancho de línea de unión 2	1.960 mm
Wm3	Ancho de línea de unión 3	265.3 μm
Wm4	Ancho de línea de unión 4	673.9mm
Wm5	Ancho de línea de unión 5	673.9 μm
Wm6	Ancho de línea de unión 6	673.9 μm
Wm7	Ancho de línea de unión 7	673.9 μm
Ll	Longitud de la línea	1.872mm
W1	Ancho de línea de red 1	673.9 μm
W2	Ancho de línea de red 2	1.248 mm

Tabla 4-3. (Continuación)

W3	Ancho de línea de red 3	673.9 μm
W4	Ancho de línea de red 4	673.9 mm
W5	Ancho de línea de red 5	673.9 μm
W6	Ancho de línea de red 6	673.9 μm

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

El software CST, después de diseñar el conjunto de antenas, muestra su boceto en el sustrato FR4, como se muestra en la figura 34-3 (a) y 34-3 (b), que es la vista frontal del sistema de radiación direccional y está ubicado detrás del plano de tierra.

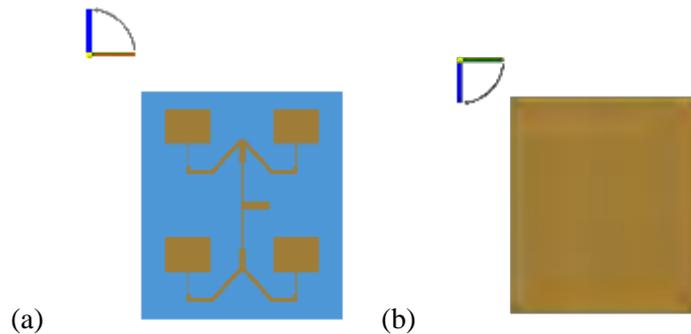


Figura 34-3. Simulación en Fr4 arreglo de antenas parche 2x2 microstrip. (a)vista frontal del arreglo de antenas, (b)vista posterior- tierra.

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

3.2.2.2. Parámetros obtenidos del diseño de arreglo de antenas parche 2x2 microstrip

Estos resultados se obtienen luego de simular, optimizar y verificar el diseño del dispositivo de antenas de parche microstrip 2x2, que trabaja a 5.8 GHz, la gráfica 3-3 muestra los parámetros de dispersión en la frecuencia de 5.8 GHz, y su disminución es de -18.32 dB que es adecuada para el mejor desempeño del diseño de la antena.

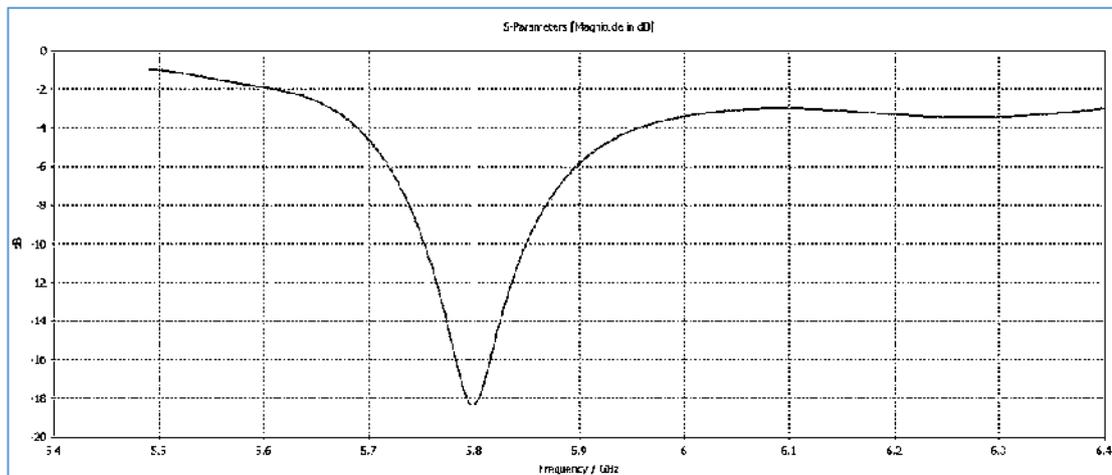


Gráfico 3-3. Parámetros de Scattering S11 (-18.32dB) del diseño del arreglo de antenas parche 2x2 microstrip.

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

El diagrama de radiación en polar y 3D del diseño de la matriz de antenas parche microstrip 2x2 se muestran en la gráfica 4-3 (a) y 4-3 (b), respectivamente.

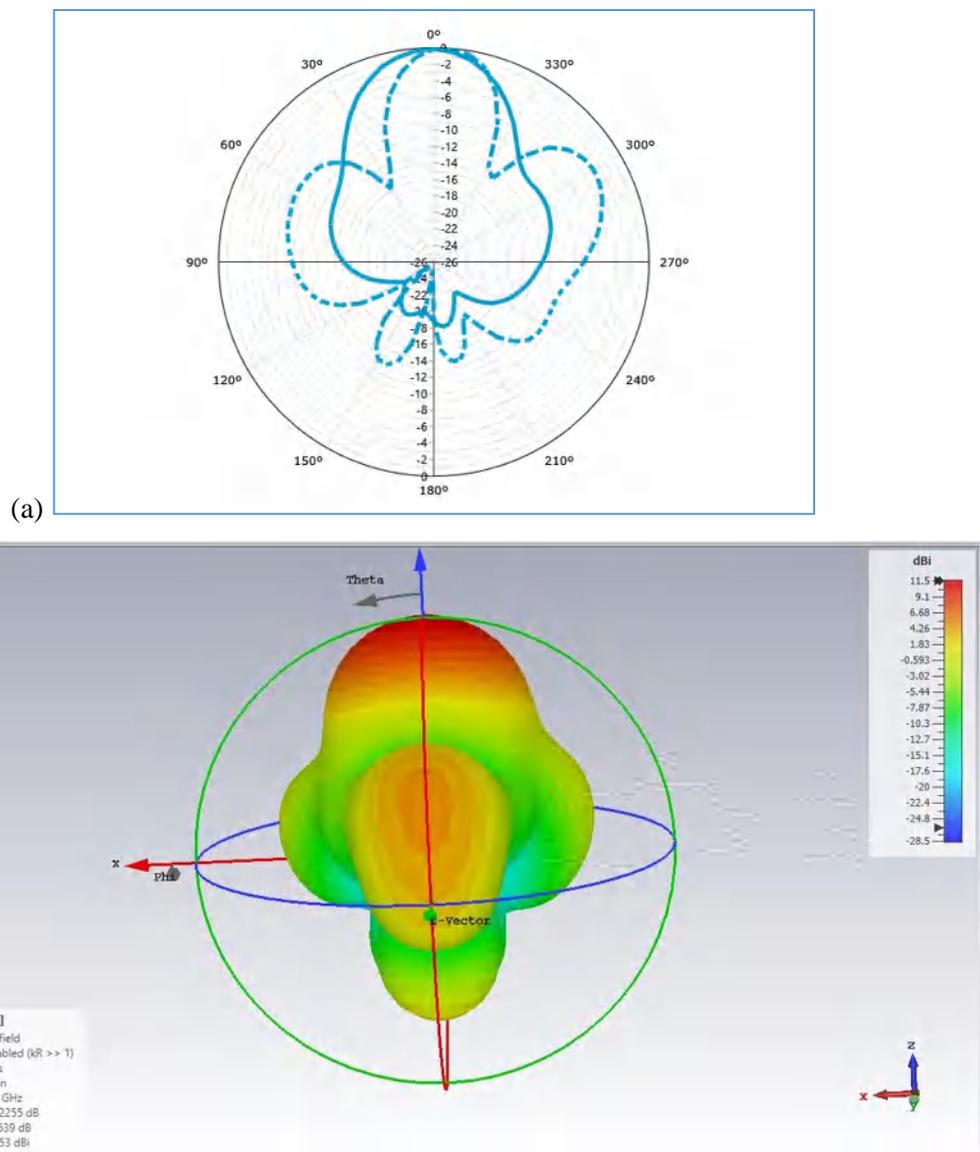


Gráfico 4-3. Diagrama de radiación del diseño del arreglo de antenas parche 2x2 microstrip. (a) diagrama polar, (b) diagrama 3D en dBi.

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

3.2.2.3. Construcción arreglo de antenas parche 2x2 microstrip

Para la construcción del arreglo de antenas parche microstrip se verifica en el software el diseño y simulación del sistema de radiación, la construcción del sistema se los realiza con materiales previstos (FR4, conector SMA hembra,) y la utilización del equipo (Plotter ProtoMat). Para la realización del arreglo se procede a la exportación del archivo en formato .dxf desde el software CST como se muestra en la figura 35-3, y posterior a la impresión en el Plotter ProtoMat.

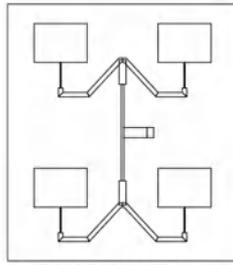


Figura 35-3. Diseño a construir del arreglo de antenas parche en formato .dxf visualizado en AutoCAD

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

El proceso de modelado del arreglo de antenas parche microstrip realizado en el plotter ProtoMat, pasando por el desgaste o freseo del cobre en la placa FR4, que se muestra en la figura 36-3 (a) y 36-3 (b)

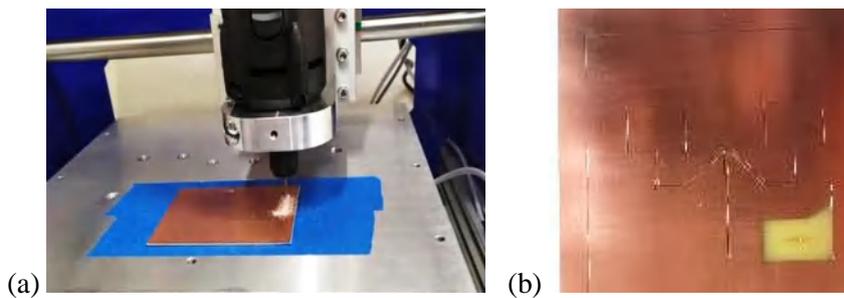


Figura 36-3. Proceso de freseo con el plotter protoMat en la placa FR4. (a) iniciación de freseo, (b) resultado parcial

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

En la figura 37-3 se muestra el sistema de radiación de un arreglo de antenas 2x2 de 4 parches, con una frecuencia de operación de 5.8 GHz.

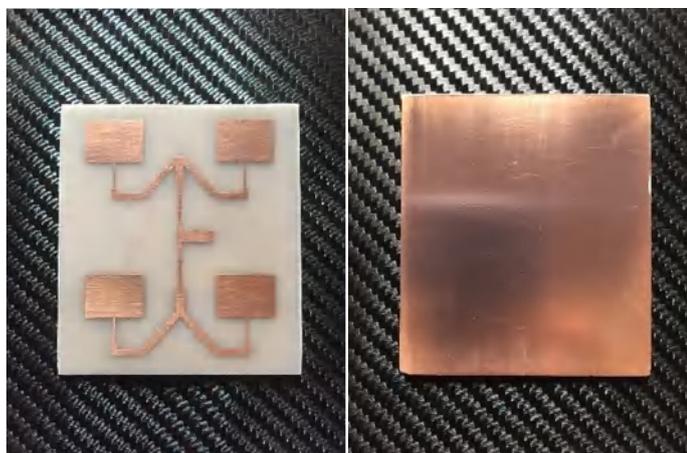


Figura 37-3. Arreglo de antenas microstrip 2x2 culminadas

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

3.2.2.4. Esquema de implementación (Rx)

El esquema de conexiones para la recepción de video en tiempo real desde el vehículo aéreo no tripulado (DRONE), se muestra en la figura 38-3.

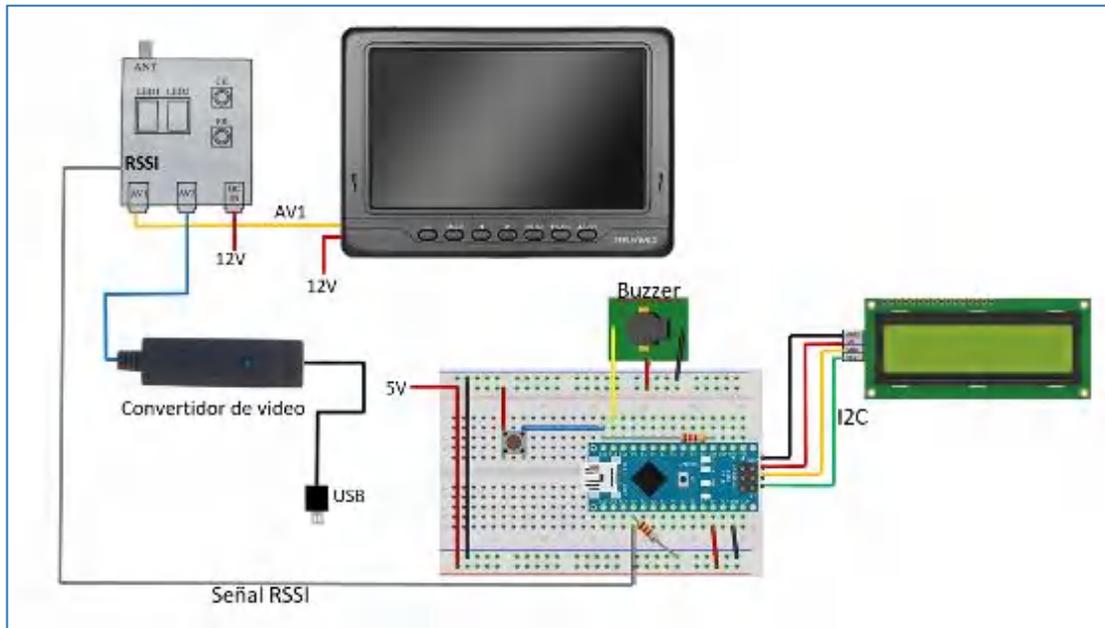


Figura 38-3. Esquema de implementación en la estación terrena
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

3.2.2.5. Implementación del sistema de recepción

Para la implementación del sistema de recepción se siguió el esquema de conexiones mostrado en la figura 38-3, mismo que será ensamblado en la estación terrena, en la figura 39-3 (a), se muestra la vista frontal del maletín de recepción, en la figura 39-3 (b) muestra la vista interior desde una perspectiva superior ubicando todos sus elementos, y en la figura 39-3 (c), muestra el maletín portable del sistema de recepción de video.



(a)



(b) (c)
Figura 39-3. Estación terrena. (a) vista interna frontal RSSI, (b) vista interna estación terrena, (c) vista externa maletín receptor
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN

En este capítulo se detalla los resultados obtenidos para las pruebas realizadas con los dispositivos que forman el prototipo de comunicación y los sistemas radiantes diseñados e implementados.

Una vez implementado el sistema de comunicación, en la fase de transmisión se realizaron las conexiones entre la Raspberry Pi como computador del procesamiento de imágenes y los demás dispositivos que integran el sistema, como el módulo de la cámara Raspberry Pi, un trasmisor de video y la antena omnidireccional (hoja de trébol), mientras que en la fase de recepción se implementó una estación terrena (Ground-Station), misma que está montada en un maletín portátil integrada por elementos como: un dispositivo de visualización de imágenes, receptor de video, una capturadora de video para convertir la señal de video captada de analógica a digital y que pueda ser conectada y visualizar las imágenes en un ordenador con el respectivo software de instalación o un dispositivo móvil con una aplicación compatible con la capturadora, un arreglo de antenas microstrip, por ultimo un Arduino Nano programado para poder visualizar la intensidad de señal recibida (RSSI).

4.1. Prueba de los sistemas radiantes con el analizador de espectros MS2724C ANRITSU

Las pruebas que se realizaron a los sistemas radiantes con el analizador de espectros y el generador de señales, se llevaron a cabo en el laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica, que se muestran en las figuras 1-4 y 2-4 respectivamente.



Figura 1-4. Pruebas de los sistemas radiantes con el analizador de espectros MS2724C ANRITSU.

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021



Figura 2-4. Pruebas de los sistemas radiantes con el generador de señales
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

Para estas pruebas se realizó el análisis del espectro de transmisión en la banda de operación del sistema de comunicaciones desde los 5645 a 5945 MHz y una frecuencia central de operación de 5800 MHz, aproximándose el máximo posible a los parámetros de operación de los equipos de comunicación implementados.

4.1.1. Pruebas del sistema radiante tipo parche 2x2 microstrip

Para esta prueba se generó una señal con una potencia de salida aproximada a los 27 dBm, potencia a la cual opera el transmisor implementado en el sistema de comunicación, y emitida a través de una antena tipo trébol como se muestra en la figura 3-4 y observando en el analizador de espectro la detección de esta señal con un arreglo de antenas parche 2x2 microstrip como se visualiza en la figura 4-4.



Figura 3-4. Generación de señal con la antena tipo trébol (cloverleaf)
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

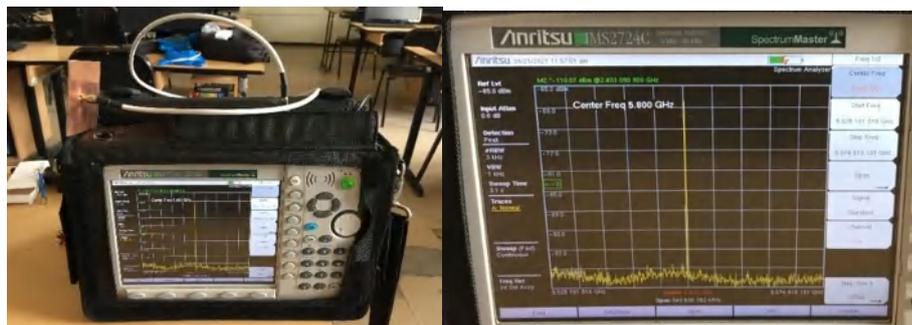


Figura 4-4. Pruebas con el analizador de espectro del arreglo de antenas 2x2 microstrip
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

4.1.2. Pruebas del sistema radiante tipo trébol (cloverleaf)

Para esta prueba se generó una señal similar a la realizada con el sistema radiante tipo parche con una potencia de aproximada de 27 dBm, utilizando el arreglo de antenas 2x2 microstrip, como se muestra en la figura 5-4, simulando un escenario con valores y parámetros de operación aproximados al sistema de implementación, observando en el analizador de espectro la señal detectada con la antenna tipo trébol (cloverleaf) como se muestra en la figura 6-4.



Figura 5-4. Generación de señal con el arreglo de antenas 2x2 microstrip
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021



Figura 6-4. Pruebas con el analizador de espectro de la antenna tipo trébol (cloverleaf)
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

4.2. Prueba de los sistemas radiantes con el analizador de redes vectoriales E5071C ENA Keysight

Las pruebas se realizaron con el analizador de redes vectoriales para obtener los parámetros de dispersión o scattering S_{11} de los sistemas de radiación construidos a una frecuencia de operación de 5.8 GHz.

4.2.1. Pruebas del sistema radiante tipo parche 2x2 microstrip con el analizador de redes vectoriales

Para la prueba de medición de los parámetros S11 al sistema radiante tipo parche 2x2 microstrip se utilizó el analizador de redes vectoriales propiedad de la ESPOCH, en el laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica, como se muestra en la figura 7-4.



Figura 7-4. Pruebas con el analizador de redes vectoriales del arreglo de antenas parche 2x2 microstrip

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

Luego de realizar la correspondiente calibración del equipo de medición y conexión del sistema radiante tipo parche 2x2 microstrip se procede a la medición de los parámetros de scattering S11, obteniendo la gráfica de este parámetro con una frecuencia de operación de 5.8812 GHz como se muestra en la figura 8-4.

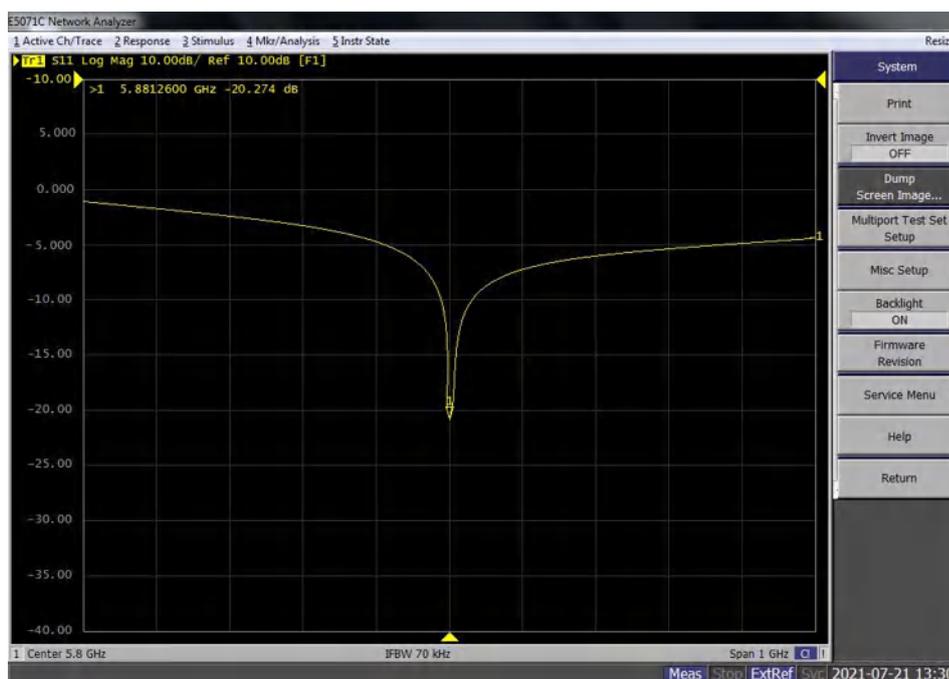


Figura 8-4. Grafica resultante de la prueba con el analizador de redes vectoriales del arreglo de antenas parche 2x2 microstrip

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

La grafica resultante de la prueba que muestra la figura 8-4 y que se estableció a una frecuencia de 5.8812 GHz un parámetro S11 de -20.274 dB, óptimo para ser utilizado en un sistema de comunicación en la recepción de señales de video.

4.2.2. Pruebas del sistema radiante tipo trébol (cloverleaf) con el analizador de redes vectoriales

Para la prueba de medición de los parámetros S11 al sistema radiante tipo trébol (cloverleaf), se utilizó el analizador de redes vectoriales propiedad de la ESPOCH, en el laboratorio de microondas de la Facultad de Informática y Electrónica, como se muestra en la figura 9-3.



Figura 9-4. Pruebas con el analizador de redes vectoriales del sistema radiante tipo trébol (cloverleaf)
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

Luego de realizar la correspondiente calibración del equipo de medición y conexión del sistema radiante tipo trébol (cloverleaf) se procede a la medición de los parámetros de Scattering S11, obteniendo la gráfica de este parámetro con una frecuencia de operación de 5.8512 GHz como se muestra en la figura 10-4.

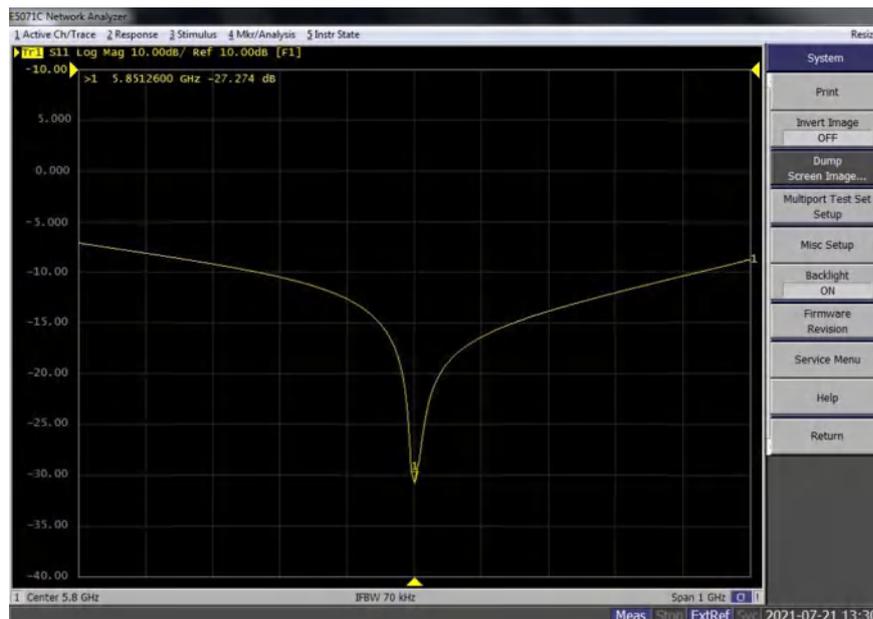


Figura 10-4. Grafica resultante de la prueba con el analizador de redes vectoriales del sistema radiante tipo trébol (cloverleaf)
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

La grafica resultante de la prueba que muestra la figura 10-4 y que se estableció a una frecuencia de 5.8512 GHz un parámetro S11 de -27.27 dB, óptimo para ser utilizado en un sistema de comunicación en la transmisión de señales de video.

4.3. Sistema de comunicación inalámbrico para la transmisión de video en tiempo real

Dada que la carga útil es un parámetro de suma importancia en el vehículo aéreo no tripulado, es importante que el equipo de transmisión sea relativamente ligero, además debe contar con una potencia considerable de transmisión y antenas de alta ganancia para garantizar un enlace de comunicación optimo con la estación en tierra.

4.3.1. Cálculo del presupuesto de potencia del enlace

Luego de una selección correcta de los equipos a intervenir en la transmisión de video en tiempo real, es importante garantizar la transmisión y propagación de la señal hacia la estación terrena (Ground-Station), para ello se debe establece un presupuesto de potencia de enlace, determinando valores de potencia de transmisión, recepción y atenuación de conectores, y no se consideran la atenuación en cables por su conexión directa a las antenas como se muestra en la tabla 1-4.

Tabla 1-4: Datos para determinar el enlace en la frecuencia de 5860 MHz

Datos para el presupuesto de potencia del enlace		
PARAMETRO	TRANSMISOR	RECEPTOR
PTx (dBm)	28	-----
PRx (dBm)	-----	-90
Antena (dBi)	1.376	11.57
Atenuación de cable y conectores	0.25	0.25

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Las pérdidas de transmisión a través del espacio libre, se consideró una distancia inicial de 10 metros hasta los 5 kilómetros en la banda de frecuencia de operación de 5860 MHz, como se muestra en la tabla 2-4 usando la siguiente expresión:

$$PEL (dB) = 32.4 + 20 * \log f (MHz) + 20 * \log d (Km) \quad Ec (1-4)$$

Tabla 2-4: Perdidas de espacio libre con diferentes distancias en la frecuencia de 5860 MHz

Distancia (Km)	Perdidas PEL (dB)
0.01	68
0.05	82

Tabla 2-4: (Continuación)

0.10	88
0.15	91
0.20	94
0.25	96
0.30	97
0.35	99
0.40	100
0.45	101
0.50	102
0.55	103
0.60	103
0.65	104
0.70	105
0.75	105
0.80	106
0.85	106
0.90	107
0.95	107
1	108
1.5	111
2	114
2.5	116
3	117
3.5	119
4	120
4.5	121
5	122

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Seguido se calcula la ganancia total de las antenas sumando los valores de cada una de las antenas usadas en dBi, como se muestra en la tabla 3-4.

Tabla 3-4: Ganancia total de las antenas

Ganancia Total de las Antenas		
Antena omnidireccional en el transmisor (dBi)	Antena direccional en el receptor (dBi)	Ganancia total (dBi)
1.376	11.57	12.95

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

A continuación, se calcula las pérdidas totales, como se muestra en la tabla 4-4 considerando las pérdidas en el espacio libre, como las pérdidas por conectores mismos que tienen un valor de 0.25 dB en el transmisor y de 0.25 dB en el receptor.

Tabla 4-4: Pérdidas totales del enlace

Perdidas en el espacio libre (PEL) (dB)	Pérdidas totales (dB)
68	68.5
82	82.5
88	88.5
91	91.5
94	94.5
96	96.5
97	97.5
99	99.5
100	100.5
101	101.5
102	102.5
103	103.5
103	103.5
104	104.5
105	105.5
105	105.5
106	106.5
106	106.5
107	107.5
107	107.5
108	108.5
111	111.5
114	114.5
116	116.5
117	117.5
119	119.5
120	120.5
121	121.5
122	122.5

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Con los valores previamente obtenidos se procede a calcular el presupuesto del enlace de comunicación desde el transmisor hasta el receptor en tierra, como se muestra en la tabla 5-4.

Tabla 5-4: Presupuesto de enlace de comunicación

Potencia de la señal recibida (dBm)	Sensibilidad del receptor (dBm)
-27.55	-90
-41.55	-90

Tabla 5-4: (Continuación)

-47.55	-90
-50.55	-90
-53.55	-90
-55.55	-90
-56.55	-90
-58.55	-90
-59.55	-90
-60.55	-90
-61.55	-90
-62.55	-90
-62.55	-90
-63.55	-90
-64.55	-90
-64.55	-90
-65.55	-90
-65.55	-90
-66.55	-90
-66.55	-90
-67.55	-90
-70.55	-90
-73.55	-90
-75.55	-90
-76.55	-90
-78.55	-90
-79.55	-90
-80.55	-90
-81.55	-90

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

A continuación, en la tabla 6-4 se muestra el resultado del margen del enlace, basado en valores obtenidos en la tabla 5-4, en la que la intensidad de la señal recibida es mejor que la sensibilidad del receptor.

Tabla 6-4: Margen de enlace de comunicación

Margen de enlace (dB)	Conclusión
-62.45	Excelente recepción de video
-48.45	Excelente recepción de video
-42.45	Muy buena recepción de video
-39.45	Muy buena recepción de video
-36.45	Muy buena recepción de video

Tabla 6-4: (Continuación)

-34.45	Muy buena recepción de video
-33.45	Buena recepción de video
-31.45	Buena recepción de video
-30.45	Buena recepción de video
-29.55	Buena recepción de video
-28.45	Suficiente para condiciones adversas
-27.45	Suficiente para condiciones adversas
-27.45	Suficiente para condiciones adversas
-26.45	Suficiente para condiciones adversas
-25.45	Suficiente para condiciones adversas
-25.45	Suficiente para condiciones adversas
-24.45	Recepción de video entrecortado
-24.45	Recepción de video entrecortado
-23.45	Recepción de video entrecortado
-23.45	Recepción de video entrecortado
-22.45	Recepción de video entrecortado
-19.45	Bordeando el límite de distancia de recepción
-16.45	Bordeando el límite de distancia de recepción
-14.45	Límite de distancia para recepción de video
-13.45	Límite de distancia para recepción de video
-11.45	Recepción de video nula
-10.45	Recepción de video nula
-9.45	Recepción de video nula
-8.45	Recepción de video nula

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

4.4. Pruebas del prototipo funcional para verificar la transmisión de video en tiempo real

Para las pruebas se consideró tomar en cuenta dos parámetros como: la distancia del VANT/GROUND-STATION, las antenas (Tx-omnidireccional, Rx-Patch) y plantear varios escenarios de pruebas que se muestra en la figura 11-4, para los obtener los mejores resultados de funcionamiento del prototipo.





(b) **Figura 11-4.** Prueba funcional del prototipo de comunicación.
 Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

4.4.1. Prueba de sincronización de frecuencias para la transmisión

Esta prueba consistió en la sincronización de frecuencias y canales para la transmisión y recepción video en el rango de frecuencias de 5645 MHz a 5945 MHz, como se muestra en la tabla 7-4, considerando que en el módulo transmisor se seleccionó la frecuencia en la banda F y el canal 7, que corresponde a la frecuencia de 5860 MHz, del mismo modo que en el módulo receptor, teniendo una sincronización de ambos módulos como se muestra en la figura 12-4.



Figura 12-4. Sincronización de frecuencias Tx/Rx
 Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

Tabla 7-4: Bandas y canales para la frecuencia de 5.8 GHz

Banda	CH 1	CH 2	CH 3	CH 4	CH 5	CH 6	CH 7	CH 8
Band-A	5865	5845	5825	5805	5785	5765	5745	5725
Band-B	5733	5752	5771	5790	5809	5828	5847	5866
Band-E	5705	5685	5665	5645	5885	5905	5925	5945
Band-F	5740	5760	5780	5800	5820	5840	5860	5880
Band-R	5658	5695	5732	5769	5806	5843	5880	5917

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

4.4.2. Prueba transmisión de video en tiempo real

Esta prueba consistió en realizar un sobrevuelo por un área determinada y la visualización de imagen en tiempo real en el dispositivo receptor, en la figura 13-4 (a), se muestra la imagen de video receptado en un dispositivo móvil, y simultáneamente la visualización en el monitor de la estación terrena como se muestra en la figura 13-4 (b), resultados de imágenes captadas desde el aire.



Figura 13-4. Prueba de transmisión. (a) estación terrena conectada al ordenador (b) visualización del escenario en los dos dispositivos

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. :2021

4.4.3. Prueba con el indicador porcentual de señal recibida (RSSI)

Esta prueba consiste en transmitir imágenes desde un vehículo aéreo no tripulado a la estación terrena a diferentes distancias y usando una antena omnidireccional (trébol) en el transmisor y una antena direccional (Patch) en el receptor, a la distancia de 50 metros aproximadamente se visualiza una señal recibida (RSSI) porcentual de 100% como se muestra en la figura 14-4 (a), además se tomó una muestra a una distancia aproximada de 3500 metros aproximadamente y su valor porcentual de fuerza de señal (RSSI) fue de 10% como se muestra en la figura 14-4 (b).

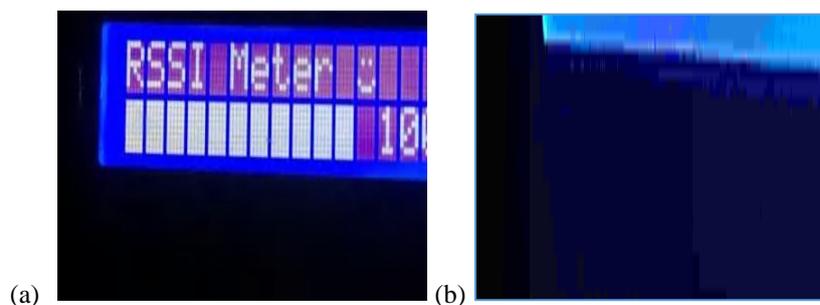


Figura 14-4. Prueba de transmisión. (a) máxima calidad porcentual de imagen (b) mínima calidad porcentual de imagen.

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. :2021

4.4.4. Prueba de tiempo de retardo en la recepción de video

Para la prueba de retardos en la transmisión de video se realizó colocando un cronometro en marcha frente a la cámara que trasmite el video (Tx), para que se pueda visualizar al otro extremo es decir al monitor en la estación en terrena (Rx) y con una segunda cámara capturar en imagen el cronometro y del monitor en la misma toma, como se muestra en la figura 15-4.



Figura 15-4: Pruebas de latencia de video
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

$$latencia_{video} = t_{cronometro} - t_{pantalla} = 22.248 - 22.114 = 134 [ms] \quad Ec(2-4)$$

Dando como resultado un retardo aproximado de 134 milisegundos, si bien se esperaba una latencia de video menor a los 100 ms; sigue siendo un tiempo de retardo óptimo y que se encuentra dentro del rango requerido (latencia menor a 200 ms) y ser considerado como transmisión en tiempo real.

Para la prueba de latencia de video con procesamiento de imágenes se optó por la misma metodología mostrada en la figura 15-4, cuyo objetivo es mostrar en pantalla el tiempo de retardo de video procesado como se muestra en la figura 16-4.



Figura 16-4: Pruebas de latencia de video procesado
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

$$latencia_{video\ procesado} = t_{cronometro} - t_{pantalla} = 07.966 - 07.497 = 469 [ms] \quad Ec(3-4)$$

El resultado de latencia del video con procesamiento de imagen, es de aproximadamente 469 milisegundos, que al tratarse de una transmisión en tiempo real es un retardo considerable en relación a la prueba mostrada anteriormente.

4.4.5. Pruebas de cambio de resolución de video

Esta prueba se la realizo desde la interface del símbolo del sistema de la Raspeberry Pi, usando una línea de comando que se muestra en la figura 17-4, que permite cambiar el tamaño de resolución. En este caso, disparar un clip de video a 480p, 720p, o 1080p, según se desee variar la resolución del video a transmitir, conforme a la tabla 8-4.

```

pi@raspberrypi:~$ raspivid -w 720 -h 480 -b 20000000 -fps 25 -pf high -t 6000 -o video.h264
pi@raspberrypi:~$ OMXPlayer video.h264
Video codec omx-h264 width 720 height 480 profile 100 fps 25.000000
Subtitle count: 0, state: off, index: 1, delay: 0
V:PortSettingsChanged: 720x480@25.00 interlace:0 deinterlace:0 anaglyph:0 par:1
.12 display:0 layer:0 alpha:255 aspectMode:0
have a nice day ;)
pi@raspberrypi:~$
  
```

Figura 17-4: Línea de Comando para el cambio de resolución de video
 Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

Tabla 8-4: Formatos de resolución de video

Resoluciones de video	
Formato	Resolución
SD	720x480p
DVD-HD	1280x720p
HD Ready	1280x720p
Full HD	1920x1080p

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

4.5. Pruebas del procesamiento de imágenes

Para las pruebas de procesamiento de imágenes se tomó en cuenta factores como la altura del VANT (10 m – 25 m), y la hora del día (08h00 – 17h00) y poder plantear varios escenarios con diferentes pruebas y obtener conclusiones validas de funcionamiento.

4.5.1. Prueba de reconocimiento de perfiles o siluetas

Esta prueba consistió en transmitir imágenes de personal, animales u objetos desde el VANT hacia la estación terrena, para detectar perfiles o siluetas. Las pruebas se realizaron a las afueras de la ciudad de Riobamba, en la localidad llamada Santa Lucia de Tembo que se muestra en la figura

18-4, misma que cuenta con el espacio necesario para realizar sobrevuelos de aeromodelismo puesto que es una zona amplia y despoblada.



Figura 18-4: Localidad Santa Lucía de Tembo
Fuente: Google Earth

4.5.1.1. Prueba sin el procesamiento de imágenes

Los parámetros utilizados para la prueba sin procesamiento de imagen fueron:

Tabla 9-4: Parámetros para la prueba sin procesamiento de imagen

Antenas Tx/Rx	Altura aproximada	Hora
Tx: Tipo Trébol (Cloverleaf) Rx: Tipo parche 2x2 microstrip	20-25 m	11:00

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Como resultado de la prueba para la detección de personas, animales u objetos se observó que la captura de imágenes en video sin que esta haga ningún procesamiento a la misma se recepto en la estación terrena imágenes de personas que no se podían distinguir fácilmente como se muestra en la figura 19-4.



Figura 19-4: Imagen obtenida en la estación terrena sin procesamiento de imágenes
Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

4.5.1.2. Prueba con el procesamiento de imágenes

Los parámetros utilizados para la prueba con el procesamiento de imágenes fueron:

Tabla 10-4: Parámetros para la prueba con el procesamiento de imagen

Antenas Tx/Rx	Altura aproximada	Hora
Tx: Tipo Trébol (Cloverleaf) Rx: Tipo parche 2x2 microstrip	10-20 m	13:00

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2020

Como resultado de la prueba para la detección de personas, animales u objetos se observó que la captura de imágenes en video realizando un procesamiento a la misma, se recepto en la estación terrena imágenes de personas que portaban vestimenta visible de color azul y rojo, dibujando un contorno del color de vestimenta detectada, como se muestra en la figura 20-4. Esta prueba permite identificar rápidamente siluetas relacionadas a una búsqueda específica, a una altura de 10 a 20 metros se obtiene una mejor detección de reconocimiento de siluetas y detección de colores.



Figura 20-4: Imagen de detección de colores a silueta de personas obtenidas en la estación terrena.

Realizado por: Sigcha, Alejandro V. ;2021

CONCLUSIONES

Durante la realización de esta tesis, se llegaron a adquirir conocimientos referentes a la existencia de normativas aplicadas a la utilización de vehículos aéreos no tripulados en el país, la utilización de los mismos y una amplia gama de aplicaciones en todo campo donde se requiera la obtención de datos, imágenes y video para ser posteriormente analizados y obtener los mejores resultados. Dentro de la normativa analizada y estudiada se encuentra el uso de frecuencias y potencias de transmisión, permitidas en el país para el manejo y enlaces de comunicación de datos, audio o video desde el VANT hacia la estación terrena, dichas frecuencias conocidas como no licenciadas y de libre utilización, donde se encuentra la banda de 5.8 GHz.

Para la implementación de este prototipo de comunicación se analizó diferentes tecnologías de comunicaciones inalámbricas que permitieran cumplir con parámetros de funcionalidad y eficacia, ajustándose a la normativa determinada por el ente regulador para ello se tomó en consideración el comportamiento y compatibilidad de los diferentes dispositivos electrónicos indicados en el capítulo 2.

En el diseño y construcción de los sistemas radiantes para la transmisión y recepción de la información se obtuvo parámetros concordantes con los realizados en la esquematización de las antenas en el software de simulación, sustentados a base de mediciones y pruebas de funcionalidad con los equipos de microondas de propiedad de la ESPOCH, teniendo en consideración los parámetros de funcionamiento de los elementos que intervienen en el prototipo, operando a una frecuencia de 5.8GHz específica para este sistema de comunicación. Esto se complementa con el procesamiento de imágenes gracias al software implementado en la Raspberry Pi 3B, que permiten obtener la detección de personas u objetos a base de una selección de colores captada por la cámara a bordo del VANT.

A fin de poder evaluar los parámetros de funcionamiento se realizó pruebas de transmisión que adquieren relevancia cuando se desea observar información en tiempo real, por tal razón se concluye que la comunicación inalámbrica con los dispositivos electrónicos implementados y detallados en el capítulo 2 es estable y confiable y permitió la visualización de imágenes con un tiempo de retardo dentro del rango estimado para considerarse transmisión en tiempo real, otro de los parámetros importantes a ser considerados fue el límite de distancia máxima de 3 Km y potencia de 28 dBm sustentado por el cálculo de presupuesto de enlace realizado. Con todo esto se pudo verificar el trabajo de cada elemento individual y del sistema en conjunto.

Cumpliendo con uno de los objetivos, la implementación de un sistema de comunicación que transmita video en tiempo real, en el presente trabajo de titulación se aporta a la investigación que fortalece el área de comunicaciones en la Facultad de Informática y Electrónica, contribuyendo con un prototipo de comunicación inalámbrica para ser usado en futuras investigaciones.

RECOMENDACIONES

Debido a la limitada disponibilidad en el mercado local y nacional de elementos de transmisión y recepción, se recomienda hacer una profunda investigación y estudio de cual tecnología de comunicación se ajusta a los requerimientos de funcionamiento planteados al inicio la implementación, además se recomienda hacer una revisión a la normativa nacional sobre el uso de frecuencias para transmisiones desde vehículos aéreos no tripulados.

Se recomienda que las frecuencias utilizadas para la transmisión (5.8 GHz) sean diferentes al control de mando (2.4GHz) del vehículo aéreo no tripulado para disminuir la posibilidad de interferencias y pérdidas de imágenes que pueden llegar a ser catastróficas si se pierde línea de vista directa con el VANT, especialmente si los vuelos se los realizan en zonas pobladas que puedan ocasionar daños en áreas restringidas y derivar en acciones legales, además de pérdidas económicas.

En el proceso de implementación del procesamiento de imágenes se recomienda la utilización de una Raspberry Pi, con un mínimo de memoria RAM de 1GB debido a la carga computacional que se utiliza en este proceso, además de una tarjeta de almacenamiento de mínimo 8GB, y la utilización de un lenguaje de programación compatible con la Raspberry Pi.

Se recomienda la utilización del sistema radiante tipo Patch en la estación terrena (Rx), misma que al ser una antena direccional permitirá un mayor rango de alcance cuando se vaya a realizar pruebas de vuelo con distancias considerables, por ende, mantener una línea de vista directa con el VANT para evitar posibles contratiempos.

La altura del VANT no deberá superar los 20 metros sobre la tierra si se desea realizar vuelos utilizando como aplicativo la detección de colores en personas o siluetas sobre un área determinada si se quiere obtener resultados satisfactorios.

En el proceso de implementación y medición del sistema de comunicación se debe realizar en lo posible en campo abierto, libre de interferencias que puedan afectar las transmisiones y disminuir un posible solapamiento de señales.

BIBLIOGRAFÍA

A. Barrientos, J. del Cerro, P. Gutierrez, R. San Martin, A. Martinez, C. Rossi. *Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones* [en línea], 2015, (España, Madrid), pp. 7-9. [Consulta: 2 octubre 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/266245324_Vehiculos_aereos_no_tripulados_para_uso_civil_Tecnologia_y_aplicaciones

Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL). *RESOLUCION ARCOTEL-2018-0661*. [en línea]. 2018. pp. 16-26. [Consulta: 23 agosto 2020]. Disponible en: https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2019/05/R.O.-545_-Res_ARCOTEL-2018-0661-UL-UDBL.pdf

AKK. *Technology TX&RX Modules 5.8 GHz*. USA: AKK Technology.Inc Company, 2019

Andrango Evelyn, & Marrasquín Luis. *Aplicación de las plataformas no tripuladas en redes de comunicación* [en línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado) UDLA, Facultad de ingeniería y ciencias agropecuarias. (Quito-Ecuador). 2016. pp. 23-44. [Consulta: 10-10-2020]. Disponible en: <http://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/6573/1/UDLA-EC-TIRT-2016-45.pdf>

ANRITSU. *Spectrum Master™ High Performance Handheld Spectrum Analyzer MS2724C 9 kHz to 20 GHz*. USA: Anritsu Company, 2013, pp. 1-8.

ARDUINO CC. *Development board Module Arduino Micro* Cod: A000053 Arduino.cc, 2020

Balanis, Constantine A. *Antenna Theory Analysis and Design*. Tercera edición. New Jersey-United States of America: Editorial John Wiley & Sons, 2012. ISBN: 0-471-66782-X, pp. 1-781

Bonilla Caballero, Jhon Eduardo, & Sainea Moreno Juan Pablo. *Estudio para el uso de bandas de frecuencias en la operación de sistemas de aeronaves no tripuladas para usos comerciales y civiles de acuerdo al cuadro nacional de frecuencias de atribuciones de bandas de frecuencia* [en línea] (Tesis de Pregrado) Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá-Colombia. 2016. Pp. 13-19. [Consulta: 2020-19-08]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/4667?show=full>

Cuerno, Cristina. Origen y desarrollo de los sistemas de aeronaves pilotadas por control remoto *Los drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil*, (2015), (España), pp. 15-32.

Dirección General de Aviación Civil (DGAC). *RESOLUCION-251-2015* [en línea]. 2018. pp. 1-3. [Consulta: 30 agosto 2020].

Disponible en: <https://www.aviacioncivil.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/09/Resol.-251-2015-Normas-Operacion-Drones.pdf>

DJI. *Developer technologies Matrice-600*. China: SZ DJI Technology Co. Ltd, 2019, p.p. 1-8.

Flyfast. Componentes FPV [blog]. [Consulta: 10 septiembre 2020]. Disponible en: <http://flyfastff.blogspot.com/p/componentes.html>

Flynt, J. *Firt Person View (FPV) 3DINSIDER* [blog]. [Consulta: 29 Julio 2020]. Disponible en: <https://3dinsider.com/author/insider/>

Fpvmax. Categorización de antenas PFV [blog]. [Consulta: 1 octubre 2020]. Disponible en: https://www.fpvmax.com/uncategorized/antena-pagoda/?fbclid=IwAR1EDqORcqYvltc6IFDedXn5kAZI9htwP8FdbtzZNmJLYKI_tyIrUVIcDP

Francesc, R. & Francesc, T. “*Comunicaciones analógicas: modulaciones AM y FM*” [en línea], España-Cataluña, pp. 19-54 [Consulta: 19 agosto 2020]. Disponible: <https://docplayer.es/77075227-Comunicaciones-analogicas-modulaciones-am-y-fm.html>

García, Israel. *Estudio sobre vehículos aéreos no tripulados y sus aplicaciones* [en línea] Trabajo de titulación (Pregrado) Universidad de Valladolid. Valladolid – España. 2017. pp. 61-64.

[Consulta: 2020-08-20]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/23021/TFG-P-528.pdf;jsessionid=C77850AC8517B55FC65CF443A1493080?sequence=1>

J. Garro, P. Vega, P. Ruiz. Vehículos aéreos no tripulados del Lanammeucr: Una herramienta multidisciplinaria adaptada para todo tipo de condiciones al servicio del país [en línea], 2017 (Costa Rica)8(4), pp. 1-7. [Consulta: 16 Julio 2020]. Disponible en: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/911/Boletin%204-%20Vehiculos%20aereos%20no%20tripulados.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

J. Whittington. *Python from very Beginning* [en línea]. London. Published in the United Kingdom by coherent press, Cambridge 2020 [Consulta:12 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.pythonfromtheverybeginning.com/>

KEYSIGHT TECHNOLOGIES, *Keysight Technologies E5071C ENA Network Analyzer E5092A Configurable Multiport Test Set.* USA: Keysight Technologies, 2018. Pp.3-33.

Larenas, N. *Como operar o volar un Drone en Ecuador* [blog]. Lugar: Quito, 28 marzo 2018. [Consulta: 16 agosto 2020]. Disponible en: <https://www.nlarenas.com/2018/03/como-operar-o-volar-un-dron-en-ecuador/>

Martinez, T. “Sistemas aéreos no tripulados de defensa y seguridad en Latinoamérica” *eDossier* [en línea], 2018, pp. 8-12. [Consulta 30 julio 2020]. ISSN: 2445-3048. Disponible en: <https://www.infodefensa.com/servicios/publicaciones/publicacion-edossier-sistemas-aereos-tripulados-defensa-seguridad-latinoamerica.html>

Martinez-Vázquez, M. Low-cost RHCP array at 5.8 GHz for FPV ground station. 2013 *IEEE Antennas Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2227-2228 [en línea], 2013, (USA). Pp. 2227-2228 [Consulta: 07 agosto 2020]. ISSN: 1947-1491. Disponible: <https://www.semanticscholar.org/paper/Low-cost-RHCP-array-at-5.8-GHz-for-FPV-ground-Mart%C3%ADnez-V%C3%A1zquez/a8c78e4e0bae26eef0ab6a45c1f389b55ecd3c11?fbclid=IwAR3dCbnCDbWSUACqfe4A1NqYgWYAM81sjaAzFMtSfkC2hehLYQEe1FuOw8E>

Matienzo Merodio, Joel Julia & Olmedilla García, Alfonso. *Estudio, ensamblaje, caracterización y ensayos de dos modelos reales de RPA.* [en línea] (Tesis de Pregrado) Universidad Politécnica de Madrid, Madrid-España. 2016. pp. 43-44. [Consulta: 2020-09-16]. Disponible en: <http://oa.upm.es/40670/>

Mora Correa, Joel Abelino. *Implementación de un sistema de transmisión de video en tiempo real utilizando el módulo de comunicación Wolf whoop Q3 5.8GHz para un robot volador de carreras.* [en línea],2018 (Tesis de Pregrado) Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Guayaquil-Ecuador. 2018. pp. 54-55. [Consulta: 2020-09-20]. Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/10230>

PROMETEC. Antenas FPV para dron [blog]. [Consulta: 13 junio 2020].

Disponible en: <https://www.prometec.net/elegir-antena-fpv-paradron/?fbclid=IwAR3v6IfdNbyqNrAZFr2m2XIV5OVsioUbIK422UzMAeRkZqqbQsyiIA2QCAI>

RASPBERRY PI. *Development board Module Raspberry Pi model 3B* RaspberryPi.org. 2020

Rodríguez, Sebastián. *Antena helicoidal cuadrifilar de banda ancha para instrumentación.* [en línea] (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería Departamento de Electrónica. Bogota-Colombia.2013. pp.16-17. [Consulta:2020-15-09]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/12704>

SANCHEZ, Claudia. “Vehículos aéreos no tripulados: descripciones generales y aplicaciones” *Desarrollo tecnológico e innovación empresarial* [en línea], 2017, (Colombia). 6(1), pp. 2-3 [Consulta: 12 julio 2020]. ISSN 2322-8725. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/332353911>

Sandvik, Kristin Bergtora & Bruno Oliveira Martins. “Revisitando el espacio aéreo latinoamericano: una exploración de los drones como sujetos de regulación”. *Latin American Law Review* [en línea], (2018): 61-81. [Consulta: 15 agosto 2020]. ISSN 2619-4880. Disponible en: <https://doi.org/10.29263/lar01.2018.03>

SIMULIA DASSAULT SYSTÈMES, CST STUDIO SUITE® *Electromagnetic and Multiphysics Simulation Software.* Darmstadt-Germany: CST, a Dassault Systemes Company.pp. 3-29.

Smith, Steven W. *Digital Signal Processing.* Second Edition California USA: California Technical Publishing. 1999. ISBN 0-9660176-7-6 pp. 35-535

Tello Peña, Rubén Patricio. *Planteamiento de conexiones alternativas a red móvil para acceso de conectividad a datos basado en el estándar 802.11* [en línea] (Tesis de Pregrado) PUCE. Quito - Ecuador. 2015. pp. 36-38. [Consulta 2020-08-16]. Disponible en: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/12497>

Tinajero León, José Luis. *Diseño de un sistema de control visual para navegación de interiores usando fusión sensorial para una plataforma móvil diferencial.* [en línea] (Tesis de Posgrado) ESPOCH. Riobamba-Ecuador. 2018. pp. 14-37. [Consulta 2020-10-25]. Disponible en: <http://dspace.esepoch.edu.ec/handle/123456789/8026>

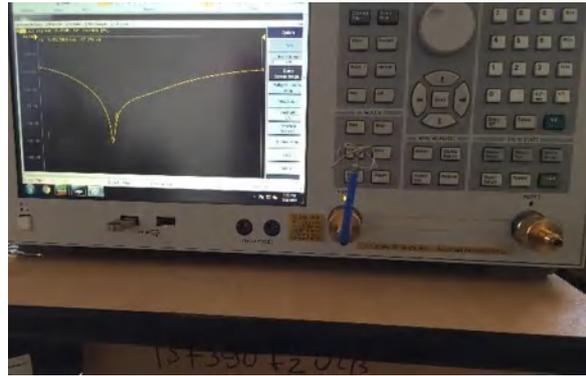
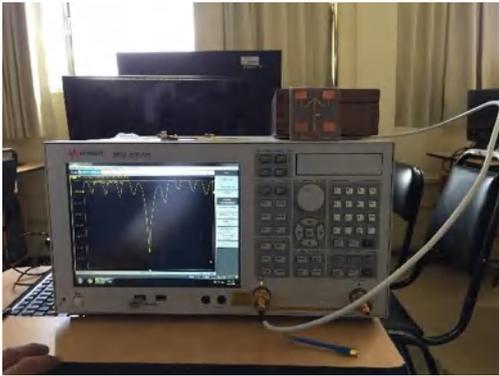
UIT-R SM.2153-5. *Parámetros técnicos y de funcionamiento de los dispositivos de radiocomunicaciones de corto alcance y utilización del espectro por los mismos.*

ANEXOS

Anexo A. Pruebas y mediciones de los sistemas radiantes con el analizador de espectros y generador de señales



Anexo B. Pruebas y mediciones de los sistemas radiantes con el analizador de redes vectoriales



Anexo C. Prototipo del sistema de comunicación ensamblado en el VANT





Anexo D. Pruebas de sobrevuelo y transmisión de video en tiempo real



Anexo E. Código indicador porcentual de señal (RSSI), interface Arduino.

```
Arduino_Read_RSSI Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

Arduino_Read_RSSI Beep ConfigurationMenu Definitions.h
#include <EEPROM.h>
#include <Wire.h>
#include <LCD.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "Definitions.h"

//LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); // set the LCD address to 0x27 for a 16 chars and 2 line display
LiquidCrystal_I2C lcd(I2C_ADDR, En_pin, Rw_pin, Rs_pin, D4_pin, D5_pin, D6_pin, D7_pin);

// pinout definitions
int speakerPin = 8; // speaker pin
int pushButtonPin = 9; // push button pin

unsigned long currentTime;
unsigned long timeMarkRssiMonitor;
unsigned long timeMarkSystem;
unsigned long timeMarkBeep;
unsigned long timeButtonMark;
boolean toggle;
int oldRssiValue;
float rssiPercent;
boolean beepAlarm;
int beepLevel;
int beepCount;
int buttonPushedCount;
boolean isConfigMenu;
config_st myConfig;

void setup() {

    timeMarkRssiMonitor = 0;
    timeMarkSystem = 0;
    timeMarkBeep = 0;
    isConfigMenu = false;
    oldRssiValue = -255;

    lcd.begin (16, 2); // initialize the lcd
    // Switch on the backlight
    lcd.setBacklightPin(BACKLIGHT_PIN, POSITIVE);
    lcd.setBacklight(LED_ON);
    lcd.backlight();
```

```

// create a new character
lcd.createChar(5, happyface);
lcd.createChar(6, neutralface);
lcd.createChar(7, sadface);
lcd.createChar(8, deadface);
lcd.createChar(9, heart);

lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(" Groundstation ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(" RSSI Meter ");
pinMode(speakerPin, OUTPUT);

beep(50);
beep(50);
beep(200);

delay(1500);

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("RSSI Meter");
EEPROM.get(0, myConfig);
}

void loop() {

  if (isConfigMenu) {
    configurationMenu();
  } else {
    // rssi monitor screen
    monitorLoop();
  }
}

void monitorLoop() {

  currentTime = millis();

  // is button pressed for more than a second?
  // go to config menu
  if (timeButtonMark < currentTime) {
    int v = digitalRead(pushButtonPin);

    setBeepAlarmOn(30);
  } else if (rssiPercent >= 5 && rssiPercent < 10) {
    setBeepAlarmOn(20);
  } else if (rssiPercent >= 0 && rssiPercent < 5) {
    setBeepAlarmOn(10);
  } else {
    setBeepAlarmOff();
  }

  if (rssiPercent >= 0) {

    if (rssiPercent > 100)
      rssiPercent = 100;

    if (rssiBar > 10)
      rssiBar = 10;

    if (rssiPercent > 0) {
      for (int i = 0; i <= rssiBar; i++) {
        lcd.setCursor(i, 1);
        lcd.write(1023);
      }
    }

    int blank = rssiBar;
    if (rssiPercent > 0)
      blank++;

    for (int i = blank; i <= 10; i++) {
      lcd.setCursor(i, 1);
      lcd.print("_");
    }

    lcd.setCursor(11, 1);
    char buffer[50];
    sprintf(buffer, "%d%%", (int)rssiPercent);
    lcd.print(buffer);

  } else { // rssi percent < 0
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("No Signal Detected!");
  }
}
}

```

Anexo F. Código procesamiento de imágenes, interface Python.

```
*detectorcolors.py - F:\detectorcolors.py (3.9.1)*
File Edit Format Run Options Window Help
import cv2
import numpy as np

def dibujar(mask,color):
    _,contornos,_ = cv2.findContours(mask, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
    for c in contornos:
        area = cv2.contourArea(c)
        if area > 2:
            nuevoContorno = cv2.convexHull(c)
            cv2.drawContours(frame, [nuevoContorno], 0, color ,5)

cap = cv2.VideoCapture(0)

azulBajo = np.array([100,100,20],np.uint8)
azulAlto = np.array([125,255,255],np.uint8)

amarilloBajo = np.array([15,100,20],np.uint8)
amarilloAlto = np.array([45,100,20],np.uint8)

redBajo = np.array([0,100,20],np.uint8)
redAlto = np.array([8,255,255],np.uint8)

font = cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX
while True:

    ret,frame = cap.read()

    if ret==True:
        frameHSV = cv2.cvtColor(frame,cv2.COLOR_BGR2HSV)
        maskAzul = cv2.inRange(frameHSV, azulBajo, azulAlto)
        maskAmarillo = cv2.inRange(frameHSV, amarilloBajo, amarilloAlto)
        maskRed = cv2.inRange(frameHSV, redBajo, redAlto)

        dibujar(maskAzul, (255,0,0))
        dibujar(maskAmarillo, (0,255,255))
        dibujar(maskRed, (0,0,255))

        cv2.imshow('frame', frame)
        if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
            break
    cap.release()
cv2.destroyAllWindows()

Ln: 12 Col: 25
```



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL
APRENDIZAJE



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 18 / 10 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: VICTOR ALEJANDRO SIGCHA VILLA
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
Carrera: ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES
Título a optar: INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES
f. Analista de Biblioteca responsable: Lcdo. Holger Ramos, MSc.

