

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR



FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN REDES DE COMUNICACIÓN

INFORME FINAL CASO DE ESTUDIO PARA UNIDAD DE TITULACIÓN ESPECIAL

TEMA:

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICO ENTRE UN UAV/RPA
CON SU ESTACIÓN TERRENA PARA LA TRANSMISIÓN DE IMÁGENES TÉRMICAS EN TIEMPO
REAL Y SU UTILIZACIÓN EN EL CONTROL DE INCENDIOS.**

JORGE ALBERTO PARDO IBARRA

Quito – 2016

AUTORÍA

Yo, [**Jorge Alberto Pardo Ibarra**], portador de la cédula de ciudadanía No. [**0502390131**], declaro bajo juramento que la presente investigación es de total responsabilidad del autor, y que se he respetado las diferentes fuentes de información realizando las citas correspondientes. Esta investigación no contiene plagio alguno y es resultado de un trabajo serio desarrollado en su totalidad por mi persona.

[Jorge Alberto Pardo Ibarra]

Contenido

| | |
|--|----|
| AUTORÍA..... | 2 |
| Contenido..... | 3 |
| Índice de figuras..... | 5 |
| Índice de tablas..... | 7 |
| 1. Introducción..... | 8 |
| 2. Justificación..... | 9 |
| 3. Antecedentes..... | 11 |
| 4. Objetivos..... | 14 |
| 4.1 Objetivo General:..... | 14 |
| 4.2 Objetivos Específicos:..... | 14 |
| 5. Desarrollo Caso de Estudio..... | 15 |
| 4.1 ESTUDIO COMPARATIVO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS O AERONAVES PILOTEADAS REMOTAMENTE (UAV/RPA)..... | 15 |
| 4.1.1 Definiciones:..... | 15 |
| 4.1.2 Segmentos definidos de los RPA's:..... | 16 |
| 4.1.3 Partes de un UAS/RPAS..... | 18 |
| 4.1.4 Ventajas de los RPAS..... | 21 |
| 4.1.5 Clasificación de las aeronaves..... | 21 |
| 4.1.6 Criterios para la selección del UAV/RPA..... | 23 |
| 4.2 Características técnicas de cámaras térmicas y sus aplicaciones..... | 31 |
| 4.2.1 Radiación térmica y radiación infrarroja..... | 31 |
| 4.2.2 Cámaras térmicas para UAS/RPAS..... | 31 |
| 4.2.3 Aplicaciones de cámaras térmicas para UAS/RPAS..... | 35 |
| 4.3 Sistema de comunicación inalámbrico entre un UAV/RPA y su estación base para la visualización de imágenes térmicas..... | 42 |
| 4.3.1 Sistema de telemetría..... | 42 |
| 4.3.2 Conexión a una PC..... | 43 |
| 4.3.3 Conexión a una Tablet..... | 44 |
| 4.3.4 Software para estaciones de control en tierra (Ground Control Stations - GCS)..... | 45 |
| 4.3.5 Sistema de comunicación inalámbrico para la transmisión de video..... | 47 |
| 4.3.6 Descripción de los componentes..... | 48 |
| 4.3.7 Cálculo del presupuesto de potencia del enlace..... | 51 |
| 4.4 Pruebas del prototipo funcional para verificar la transmisión de imágenes térmicas en tiempo real desde el UAV/RPA a la estación terrena..... | 54 |

| | | |
|-------|--------------------------------------|----|
| 4.4.1 | Prueba 1. | 54 |
| 4.4.2 | Prueba 2. | 56 |
| 4.4.3 | Prueba 3. | 58 |
| 4.4.4 | Prueba 4. | 59 |
| 4.4.5 | Prueba 5. | 60 |
| 4.4.6 | Prueba 6. | 62 |
| 6. | Conclusiones y Recomendaciones | 65 |
| 6.1. | Conclusiones..... | 65 |
| 6.2. | Recomendaciones | 66 |
| | Bibliografía | 67 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Segmento de vuelo..... | 17 |
| Figura 2. Segmento de Tierra | 17 |
| Figura 3. Elementos de un UAS/RPAS | 18 |
| Figura 4. Sensores y equipos que son utilizados como carga útil en UAS/RPAS (Arko Lucieer, 2014) | 19 |
| Figura 5. Estación portátil de un UAS/RPAS..... | 19 |
| Figura 6. Estación terrena de un UAS/RPAS..... | 20 |
| Figura 7. Sistema de Comunicaciones UAS/RPAS | 20 |
| Figura 8. Equipo de apoyo de un UAS/RPAS | 21 |
| Figura 9. Clasificación de aeronaves por su forma de sustentación | 22 |
| Figura 10. RPA ala rotatoria | 23 |
| Figura 11. RPA de ala fija..... | 23 |
| Figura 12. Drone Phantom 3 Professional | 29 |
| Figura 13. Espectro electromagnético | 31 |
| Figura 14. Funcionamiento de una cámara termográfica..... | 32 |
| Figura 15. Cámara térmica FLIR Vue Pro..... | 34 |
| Figura 16. Imágenes térmicas de elementos de redes de alta tensión..... | 36 |
| Figura 17. Imágenes térmicas de techos de fábricas y casas..... | 37 |
| Figura 18. Imágenes térmicas de paneles solares..... | 38 |
| Figura 19. Imágenes térmicas de personas en aplicaciones de seguridad | 39 |
| Figura 20. Imágenes térmicas de pérdidas de calor en tuberías | 40 |
| Figura 21. Imágenes de un viñedo tomadas con cámara termográfica..... | 41 |
| Figura 22. Imágenes térmicas en el control de incendios desde un UAV/RPAS | 41 |
| Figura 23. Kit de Telemetría con frecuencia de trabajo de 915 MHz..... | 42 |
| Figura 24. Verificación del radio instalado en la opción administrador de dispositivos..... | 43 |
| Figura 25. Selección del puerto y tasa de transmisión..... | 44 |
| Figura 26. Pantalla de datos de vuelo con la potencia de la señal de radio | 44 |
| Figura 27. Conexión del radio TX/RX a una Tablet..... | 44 |
| Figura 28. Pantalla de una GCS Tower | 46 |
| Figura 29. Pantalla de una GCS con Mission Planner | 46 |
| Figura 30. Pantalla de una GCS con APM Planner 2..... | 47 |
| Figura 31. Enlace para transmisión de video desde el UAV/RPA hacia la estación terrena | 47 |
| Figura 32. Transmisor de video Inmersión RC | 49 |
| Figura 33. Receptor de video Inmersión RC..... | 49 |
| Figura 34. Antena omni SpiroNet con polarización circular del equipo transmisor | 50 |
| Figura 35. Antena Patch SpiroNET 5,8 GHz LHCP del equipo receptor | 50 |
| Figura 36. Sistema de transmisión de video en tiempo real..... | 51 |
| Figura 37. App Flir Vue Pro para configurar a través de bluetooth. | 54 |
| Figura 38. Diferentes paletas de colores de la cámara térmica FLIR VUE PRO..... | 56 |
| Figura 39. Hacienda Tilipulo y pista de aeromodelismo | 57 |
| Figura 40. Imágenes de personas obtenidas en la estación terrena..... | 57 |
| Figura 41. Imágenes de animales (vacas) obtenidas en la estación terrena..... | 57 |
| Figura 42. Imágenes térmicas de personas y automóviles a 20 m de altura | 58 |
| Figura 43. Imágenes térmicas de personas y automóviles a 40 m de altura | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 44. Imágenes térmicas de personas y automóviles a 40 m de altura y lóbulos de radiación alejados | 59 |
| Figura 45. Imágenes térmicas de personas a 20 m y 40 m de altura con paleta WhiteHot | 60 |
| Figura 46. Imágenes térmicas de personas a 20 m y 40 m de altura con paleta Fusion | 60 |
| Figura 47. Imágenes térmicas de personas y fuego controlado a 20 m de altura en la noche .. | 61 |
| Figura 48. Imágenes térmicas de fuego controlado transmitidas del UAV/RPA a la estación terrena..... | 61 |
| Figura 49. Imágenes térmicas de una persona y fuego controlado a 10 m de altura utilizando diferentes paletas Fuente: Elaborado por el Autor | 64 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Análisis de las principales características para los drones DJI Phantom 3 Professional, DJI Phantom 3 Advanced, 3DR Solo y Parrot Bepop 2 | 25 |
| Tabla 2 Especificaciones de la aeronave | 29 |
| Tabla 3 Especificaciones mando de control remoto | 30 |
| Tabla 4 Especificaciones de la aplicación/retransmisión en directo..... | 30 |
| Tabla 5 Matriz comparativa de cámaras térmicas para UAV/RPA..... | 32 |
| Tabla 6 Especificaciones de la cámara termográfica FLIR Vue Pro | 35 |
| Tabla 7 Datos para determinar viabilidad del enlace en la frecuencia de 5860 MHz..... | 52 |
| Tabla 8 Pérdidas de espacio libre a 5860 MHz para diferentes distancias | 52 |
| Tabla 9 Ganancia total de las antenas..... | 53 |
| Tabla 10 Pérdida total del enlace considerando cables, conectores y PEL..... | 53 |
| Tabla 11 Presupuesto del enlace | 53 |
| Tabla 12 Parámetros para la prueba 2 | 56 |
| Tabla 13 Parámetros para la prueba 3 | 58 |
| Tabla 14 Parámetros para la prueba 4..... | 59 |
| Tabla 15 Parámetros para la prueba 5 | 61 |
| Tabla 16 Parámetros para la prueba 6..... | 62 |

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las tecnologías de la información y comunicación ha permitido disminuir las brechas de conocimientos entre países desarrollados y subdesarrollados. Una de las mayores tendencias tecnológicas a nivel mundial es el desarrollo y uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT o UAV - Unmanned Aerial Vehicle) aplicados en el ámbito civil y militar.

Los sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) están definidos por el Departamento de Defensa de Estados Unidos como un avión o un globo que no lleva un operador humano y es capaz de volar por control remoto o programación autónoma.

Los UAV's o robots aéreos pueden ejecutar diferentes tipos de misiones, abarcando los sectores de defensa y seguridad, a los de agricultura o medio ambiente. Su actual capacidad de desarrollar misiones reales se ha visto difundida no solo en los ámbitos restringidos de los investigadores, fabricantes o usuarios afines a esta tecnología, sino que también ha sido dada a conocer por diferentes medios a la opinión pública general que comienza a conocer su existencia y utilidad.

Los países fabricantes con mayores desarrollos son Estados Unidos, Israel y algunos países de la Unión Europea. En Latinoamérica está despegando la aplicación y desarrollo de los UAV's. Es seguro que las proporciones cambiarán en los próximos años, dado el tremendo potencial de los UAV's para dar respuesta a problemáticas específicas en los países de América del Sur. [1]

Los sistemas aéreos no tripulados (UAS) o UAV's se están incrementando gracias a la eficacia de los aviones, sensores y las tecnologías relacionadas. Sin embargo, la opinión pública con respecto a estos sistemas inicia con la imaginación, pudiendo convertirse en un mito por las falsas ideas, por la cultura popular y por la incapacidad de imaginar los beneficios no militares de una plataforma que ha sido utilizada tradicionalmente para la defensa de los países del primer mundo.

“De vez en cuando en la historia, la aparición de una nueva tecnología cambia nuestro mundo”
Peter Singer, PhD

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV's), generalmente conocidos como drones, están empezando a tener una respuesta más positiva por parte de los ciudadanos por sus beneficios públicos y económicos, derivados del amplio uso en el sector público. Como consecuencia de esto, numerosos países como Estados Unidos, Canadá, España entre otros están desarrollando leyes para la legislación de UAV's.

Los sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) son un nuevo componente del sistema aeronáutico, que la Organización Internacional de Aviación Civil (OACI), los Estados y la industria aeroespacial se proponen comprender, definir y, en última instancia, integrar. Estos sistemas se basan en novedades tecnológicas aeroespaciales de última generación, que ofrecen avances que pueden abrir nuevas y mejores aplicaciones comerciales o civiles, así como mejoras de la seguridad operacional y eficiencia de toda la aviación civil.

La primera parte de este Caso de Estudio de la Maestría de Redes de Comunicaciones, presenta los trabajos realizados previamente relacionados con el tema en los ámbitos mundial, regional y local, para luego describir la justificación de desarrollarlo. A continuación, señala los objetivos, desarrolla el caso de estudio acorde a los objetivos específicos planteados y finalmente se describen las conclusiones y recomendaciones obtenidas con la investigación y resolución del caso de estudio.

2. JUSTIFICACIÓN

Inicialmente fue en el sector militar quien impulsó el desarrollo de los UAV, sin embargo, desde hace 15 años han surgido diferentes aplicaciones civiles que han ampliado el interés, la investigación y el desarrollo de éstos sistemas; a la vez han originado nuevos requisitos en su operatividad produciendo un mayor espectro de sistemas.

Un conjunto amplio de aplicaciones coincide en dotar a un UAV de una cámara de video y de los medios adecuados para capturar y/o transmitir imágenes a una estación base. Esta capacidad de adquisición de imágenes en el espectro visible o infrarrojo permite abordar tareas como inspección, vigilancia o búsqueda que son de interés en múltiples campos.

Los sistemas aéreos no tripulados han sido utilizados en una variedad de aplicaciones civiles, desde el reconocimiento o inspección aérea como soporte para la Universidad de Vanderbilt en el sitio arqueológico Mawchu Llacta en Perú hasta la conservación de las poblaciones de cebras en África del Sur. [1]

Un dron puede volar autónomamente sobre terrenos de difícil acceso y tomar imágenes de alta resolución. Las imágenes son unidas para crear mapas precisos en 2D y modelos de terreno en 3D. Los mapas resultantes permiten saber dónde entregar ayuda y desarrollar infraestructura. Un modelo en 3D del cauce de un río permite comprender el flujo de agua; este conocimiento se utiliza para mitigar daños por inundaciones.

Explicar la tecnología drone, permite a las personas desarrollar soluciones locales; por ejemplo, la Organización Drones Adventures en colaboración con la Organización Internacional para las Migraciones (OIM) y Open StreetMap, cubrió 45 kilómetros cuadrados de territorio y liberó todos los datos online a fin de ayudar a que los proyectos sean más reales.

Los beneficios potenciales de la UAS van mucho más allá de su uso militar - para una variedad de aplicaciones domésticas que pueden mejorar la seguridad de nuestras comunidades, fortalecer los servicios públicos y lograr un sinnúmero de beneficios adicionales para una amplia variedad de organizaciones comerciales y gubernamentales.

El Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017 tiene como ejes a la Revolución Agraria con la asistencia técnica y a la Revolución del Conocimiento que propone la innovación, la ciencia y la tecnología, como fundamentos para el cambio de la matriz productiva. Es así que se prevé articular la investigación científica, tecnológica y la educación superior con el sector productivo, para una mejora constante de la productividad y competitividad sistémica, en el marco de las necesidades actuales y futuras del sector productivo y el desarrollo de nuevos conocimientos. Es así que es necesario e importante utilizar los avances o tendencias tecnológicas mundiales para incrementar la competitividad en la región.

En el ámbito civil, una de las aplicaciones más utilizada de los UAV's es la agricultura de precisión, ya que drones relativamente baratos con sensores avanzados y capacidades de obtener imágenes están facilitando a los agricultores nuevas técnicas para aumentar la producción y reducir los daños a los cultivos; un seguimiento pormenorizado de las cosechas podría mejorar el consumo de agua y la gestión de plagas. [2]

La tecnología avanza tanto que el Ministerio de Agricultura analiza un mecanismo de investigación de campo adaptado a la nueva tecnología. Tiene un equipo de desarrolladores en ello, formado luego de que el viceministro Luis Valverde viera los drones que fueron expuestos por una compañía en la tercera Feria y Conferencia Internacional realizada, en septiembre del 2014, en Daule. [3]

Considerando que uno de los ejes del PNBV es la Revolución Agraria y que se debe articular la innovación tecnológica al sector productivo, resulta muy importante realizar un análisis de las potencialidades de esta tecnología ya que permitiría conocer las diferentes alternativas de aplicación que se podrían implementar en el país.

3. ANTECEDENTES

Según datos divulgados por la organización UVS International (www.uvs-international.org) en su publicación "The Global Perspective 2012/2013" existen alrededor de 50 países fabricantes de este tipo de sistemas UAS en el mundo y alrededor de 1600 tipos de plataformas referenciadas. El estado de desarrollo de las mismas es muy heterogéneo y los grandes países fabricantes siguen siendo Estados Unidos, seguido de Israel y algunos países de la Unión Europea.

En 1999 los Estados Unidos realizaron 100.000 horas de vuelo con sistemas no tripulados, actualmente vuelan anualmente más de 1'000.000 de horas de vuelo no tripulado; sin embargo, la gran mayoría es realizada por más de 7000 UAS operados por el Departamento de Defensa. [1]

En abril de 2013, la Organización Drone Adventures utilizó tres drones SenseFly Ebee, junto con ordenadores y pasó 10 días en Haití utilizando los UAV's para crear increíbles mapas de alta resolución en 3D. [4]. Además en agosto de 2014 realizaron el mapeo de ruinas antiguas en Turquía junto con el Instituto Arqueológico de Austria, en mayo de 2014 Drone Adventures se asoció con la Reserva de Vida Silvestre Kuzikus, así como con la Politécnica de Namibia para llevar a cabo una misión de mapeo de dos semanas con el objetivo de explorar la variedad de usos que un drone puede ofrecer para la protección de la naturaleza y en abril de 2014 la organización trabajó con investigadores de Japón para mostrar el estado de limpieza y reconstrucción de las zonas afectadas por el desastre nuclear de 2011. [5]

Keiji Nagatani, profesor de la Universidad de Tohoku en Japón, ha pasado los últimos cinco años desarrollando sistemas robóticos para exploración volcánica. Durante estos años, ha trabajado en formas de explorar áreas volcánicas remotas, potencialmente peligrosas utilizando UAV's en colaboración con robots terrestres. [6]

Países como México ya están implementando conceptos operativos para estos sistemas con la implicación de sus autoridades. Las aplicaciones son inmediatas para la vigilancia de sus largos corredores, de líneas de alta potencia y red de transporte de gas. [7].

En la zona de la Amazonía, Brasil utiliza UAV's frente a otros sensores dentro de su sistema de vigilancia de esta zona vital del planeta para evitar su explotación indebida y actividades ilícitas dentro de la misma. Todo ello con un menor riesgo y coste que con plataformas tripuladas. [7]

Varios países están adquiriendo sistemas del mercado para vigilancia de fronteras como Bolivia y Colombia. Se están llegando a acuerdos entre varios países para llevar a cabo actividades de lucha contra el tráfico de drogas y contrabando. [7]

El Ecuador tuvo su primer acercamiento con aviones no tripulados con el proyecto "RPV Cotopaxi" dicho proyecto nace en el año 1997 como un requerimiento de las FFAA, generado por las diversas necesidades operativas que involucra la Seguridad Nacional, para iniciar dicho proyecto la Fuerza Aérea Ecuatoriana delega al Centro de Investigación y Desarrollo FAE (CIDFAE) llevar a cabo las aspiraciones de la Institución de desarrollar y crear una tecnología de punta que le permita obtener una ventaja operativa en el área de la aviación tripulada remotamente. [8]

Con el objetivo de poner fin a las continuas pérdidas económicas por el contrabando de combustibles, el gobierno ecuatoriano implementó el Plan de Soberanía Energética en el 2009, para lo cual adquirió seis vehículos aéreos no tripulados a la Industria Aeroespacial de Israel por valores aproximados a los USD 22 millones de dólares. [7]. Desplegados por la marina ecuatoriana desde la base aeronaval de Manta, estos modelos son también utilizados en operaciones antinarcoáticas, de vigilancia fronteriza y de control de pesca ilícita, a través de vuelos efectuados por lo general a casi 7000 metros de altitud y controlados por un equipo conformado por tres comandantes de misión, seis pilotos, cuatro observadores, tres operadores y dieciséis técnicos para el mantenimiento. Ambos modelos, integran un sistema de vigilancia aeromarítima con las lanchas y naves interceptoras del Comando de Guardacostas y del Centro de Rescate Marítimo. [7]

Para finales del año 2010, el entonces Ministro de la Defensa, anunciaba la intención de apoyar el diseño y fabricación de UAV de desarrollo nacional (y en convenio con otros países), para ser utilizados por la Fuerza Aérea. Estas declaraciones volvieron a realizarse en el 2012, pero esta vez desde el Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea (CIDFAE), retomando proyectos de finales de los años 90 y más recientes y con el fin de producir vehículos del tipo Male, anunciándose inversiones cercanas a los US 6.000.000 millones de dólares [7]. El ministro de Defensa, Fernando Cordero, mencionó que en el 2016 el prototipo debe estar operativo y se aspira a fabricar en serie para comercializarlo en la región. [9]

La Universidad San Francisco de Quito se encuentra ejecutando el Proyecto Galápagos UAV en asociación con el Parque Nacional Galápagos para desarrollar una flota de sistemas aéreos no tripulados con el objetivo de patrullar la reserva. Cada vehículo de la flota será capaz de volar de 12 a 16 horas y transmitir imágenes en tiempo real a una estación terrestre. El proyecto

Galápagos UAV cuenta con el apoyo total del Parque Nacional Galápagos, Embry-Riddle Aeronautical University y la Universidad San Francisco de Quito. [10]

Por otra parte, la Comisión de Tránsito del Ecuador ha hecho una inversión de 160.000 USD en la adquisición de 22 drones que serán utilizados para investigar accidentes de tránsito. [11]

La tecnología de los drones también llega al agro ecuatoriano, por ejemplo, un UAV/RPA sobrevoló a 180 metros de altura, sobre una plantación de banano de 200 hectáreas (ha) ubicada en el cantón Baba, en el sur de la provincia de Los Ríos. El esbelto artefacto de poco más de un metro de envergadura y de 700 gramos de peso realizó giros precisos a lo largo de un recorrido previamente definido mediante un 'software' controlado desde tierra. [12].

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General:

Implementar un sistema de comunicación inalámbrico entre un UAV/RPA y su estación terrena para transmitir imágenes obtenidas de una cámara térmica en tiempo real.

4.2 Objetivos Específicos:

1. Realizar un estudio comparativo de UAV's/RPA's que permitan la instalación de una cámara y un sistema inalámbrico para transmisión de video en tiempo real.
2. Analizar las características técnicas de una cámara que permita obtener imágenes térmicas desde un UAV/RPA para su aplicación en el control de incendios.
3. Implementar un sistema de comunicación inalámbrico entre un UAV/RPA y su estación base que permita la transmisión de video en tiempo real para la visualización de imágenes térmicas en una estación terrena.
4. Realizar pruebas de funcionamiento del prototipo funcional para verificar la transmisión de imágenes térmicas en tiempo real desde el UAV/RPA a la estación terrena.

5. DESARROLLO CASO DE ESTUDIO

Inicialmente se establecieron los parámetros técnicos más importantes que se deben considerar para realizar el estudio comparativo de minis vehículos aéreos no tripulados con el objetivo de determinar el drone con autonomía considerable que permitió instalar una cámara térmica de bajo peso y tamaño reducido. A continuación, se instaló un sistema de comunicación inalámbrico en el rango de los 5,8 GHz de gran alcance y bajo peso con antenas omnidireccionales y patch SpiroNET entre el RPA y la estación terrena a fin de transmitir en tiempo real las imágenes obtenidas por la cámara térmica, Finalmente se realizaron varias pruebas de funcionamiento del prototipo a fin de verificar el funcionamiento de todo el sistema, objetivo de este caso de estudio.

4.1 ESTUDIO COMPARATIVO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS O AERONAVES PILOTEADAS REMOTAMENTE (UAV/RPA).

Para realizar el estudio comparativo sobre UAV/RPA, se deben conocer varias definiciones, clasificaciones, así como los parámetros que determinan las características y aplicaciones de los mismos. A continuación, se definen los más importantes:

4.1.1 Definiciones:

4.1.1.1 UAV. - Según la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) el término genérico que se utiliza para denominar a estos aparatos tecnológicos es Vehículo Aéreo No Tripulado (siglas VANT en español) o Unmanned Aerial Vehicles (UAV) en inglés. Los drones y los UAV/VANT son lo mismo, aeronaves no tripuladas por ningún piloto.

El concepto operacional de gestión del tránsito aéreo mundial establece que “un vehículo aéreo no tripulado es una aeronave que vuela sin un piloto al mando a bordo y que se controla a distancia y plenamente desde otro lugar (tierra, otra aeronave, espacio) o que ha sido programada y es plenamente autónoma” (ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, 2011). De acuerdo a la Circular 328, las aeronaves no tripuladas ante todo son aeronaves y por lo tanto están bajo las mismas regulaciones de las aeronaves tripuladas.

La misma circular establece un criterio relacionado a considerar a todo el sistema, es decir a más de la aeronave, incluir la estación de control en tierra y el enlace de comunicaciones entre ésta y la aeronave. Con este criterio se habla de UAS (sistemas de aeronaves no tripuladas) y RPAS (sistemas de aeronaves

pilotadas a distancia) diferenciando los términos UAV y RPA cuando se hable específicamente de la aeronave.

Para integrar los UAS en el espacio aéreo no segregado y en aeródromos no segregados, deberá haber un piloto responsable de la operación UAS. Los pilotos pueden utilizar equipo como el piloto automático para ayudar en la realización de sus funciones. (ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, 2011) Para reflejar mejor la condición de estas aeronaves que son realmente pilotadas, se introduce en el vocabulario la expresión “Aeronave Pilotada a Distancia” (RPA).

- 4.1.1.2 **RPA.-** Aeronave pilotada por un “piloto remoto”, titular de licencia, emplazado en una “estación de piloto remoto” ubicada fuera de la aeronave (es decir, en tierra, en barco, en otra aeronave, en el espacio) quien monitorea la aeronave en todo momento y puede responder a las instrucciones expedidas por el Controlador de Tráfico Aéreo (ATC). (ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, 2011)

Una RPA puede poseer varios tipos de tecnología de piloto automático, pero en todo momento, el piloto remoto puede intervenir en la gestión del vuelo. El término UAV es un término obsoleto

- 4.1.1.3 **RPAS.-** El sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) comprende un conjunto de elementos configurables incluyendo una RPA, sus estaciones de piloto remoto conexas, los necesarios enlaces y todo otro elemento del sistema que pueda necesitarse, en cualquier punto durante el vuelo. (ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, 2011)

4.1.2 Segmentos definidos de los RPA's:

- 4.1.2.1 Segmento de Vuelo. - Constituido por el RPA y los sistemas de recuperación (aterrizaje sobre ruedas o patines, red, cable, paracaídas, etc.)
- 4.1.2.2 Segmento de Tierra. - Constituido por la estación de control del piloto remoto (por lo general se encuentra en tierra y recibe la información enviada por el RPA y a su vez le da órdenes) y los sistemas lanzadores (pueden ser neumáticos, hidráulicos, etc.)



Figura 1. Segmento de vuelo

Fuente: http://airdronevision.es/wp-content/uploads/2016/09/matrice_600_RED_EPIC.jpg



Figura 2. Segmento de Tierra

Fuente: www.microdrones.com/fileadmin/_processed_/csm_mdAcc_BaseStation_20140512_ac7a40654e.jpg

La observación aérea mediante UAS/RPAS comprende la formación de cuatro conjuntos necesarios para hacer posible la recolección de datos, repartidos entre la plataforma aérea y la estación terrestre, estas son:

- Plataforma de Vuelo: el propio vehículo y su carga, es decir, la cámara fotográfica y otros sensores.
- Sistema de Control de Vuelo: Formado por receptores GPS integrados en la plataforma de vuelo. Georreferencia la información obtenida y controla el seguimiento del vehículo aéreo.
- Sistema de Lanzamiento y Recuperación: controla el despegue y el aterrizaje.

- Sistema de Comunicaciones: a través de la radio, comunica la estación de control con el RPA, transmite la información adquirida durante el vuelo (Díaz García-Cervigón, 2015)

4.1.3 Partes de un UAS/RPAS

Según el Centro de Competencia del Poder Aéreo Conjunto (JAPCC) en su publicación “Strategic Concept of Employment for Unmanned Aircraft Systems in NATO” los componentes de un UAS/RPAS son: (Joint Air Power Competence Centre, 2010)

- Plataforma aérea (Unmanned Aircraft Element)
- Carga útil (Payload Element)
- Elemento humano (Human Element)
- Elementos de control (Control Element)
- Sistemas de comunicaciones (Communications Element)
- Equipos de apoyo (Support Equipment Element)

A continuación, se detallan cada uno de las partes o componentes de los UAS/RPAS

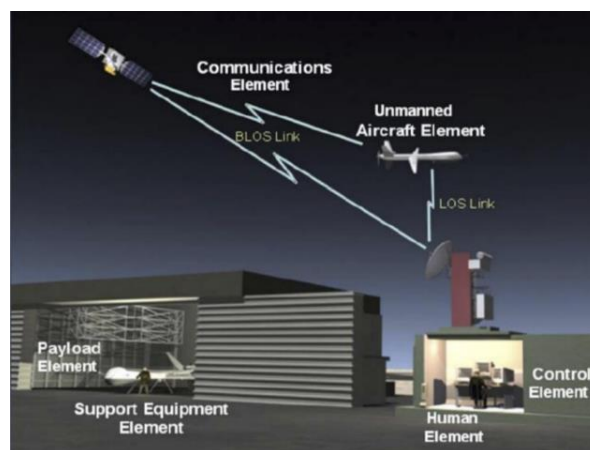


Figura 3. Elementos de un UAS/RPAS

Fuente: http://airdronevision.es/wp-content/uploads/2016/09/matrice_600_RED_EPIC.jpg

4.1.3.1 Plataforma aérea.

Es el componente inicial del segmento de vuelo. Sus tamaños varían desde los 10 cm hasta los 40 m de envergadura e incluyen diferentes subsistemas que son:

- Sustentación: Ala fija o ala rotatoria
- Propulsión: motores eléctricos, motores a gasolina, turbohélices, etc.
- Posicionamiento: GPS
- Navegación: primero recibe las órdenes para poder gestionar su vuelo.

4.1.3.2 Carga útil.

Contiene los diferentes tipos de sensores y equipos internos o externos para llevar a cabo una aplicación o misión. Ejemplos de carga útil son las cámaras infrarrojas, sistemas electroópticos, cámaras de video, radares e incluso armamento. Se diseña de acuerdo a la aplicación que se le vaya a dar al sistema UAS/ RPAS.



Figura 4. Sensores y equipos que son utilizados como carga útil en UAS/ RPAS (Arko Lucieer, 2014)

Fuente: http://www.mdpi.com/remotesensing/remotesensing-06-11051/article_deploy/html/images/remotesensing-06-11051-g005-1024.png

4.1.3.3 Elemento humano.

Es la parte fundamental del segmento de tierra puesto que es importante la participación humana para ejecutar una misión y que esta termine con éxito. Por lo general el elemento humano consta de un operador de la aeronave o piloto, personal de mantenimiento y un analista de la información.

4.1.3.4 Elementos de control.

Los elementos de control pueden estar en tierra, mar o aire, dependiendo de las necesidades de mando y control y del tipo de misión. Incluyen equipos y sistemas que controlan el vuelo, la carga útil. También incluyen los sistemas de comunicación y enlaces de datos para controlar a la plataforma aérea y todo su equipamiento. El equipamiento puede estar integrado en una estación portátil o una estación terrena.



Figura 5. Estación portátil de un UAS/ RPAS

Fuente: http://www.uavfactory.com/shopcatpics/sci_64_1326030891_big.jpg



Figura 6. Estación terrena de un UAS/RPAS

Fuente: http://www.militaryaerospace.com/content/dam/etc/medialib/new-lib/mae/online-articles/2011/05/93268.res/_jcr_content/renditions/pennwell.web.420.270.jpg

4.1.3.5 Sistemas de Comunicaciones

Constituido por todo el sistema de transmisión de información entre el segmento aéreo y el segmento de tierra. Incluye un enlace de datos (data link) por el que se transmite información de los diferentes sensores y otro enlace que transmite información de los parámetros de vuelo y control de la plataforma aérea. Estas transmisiones se las realiza con línea de vista (LOS) o más allá de la línea de vista (BLOS).

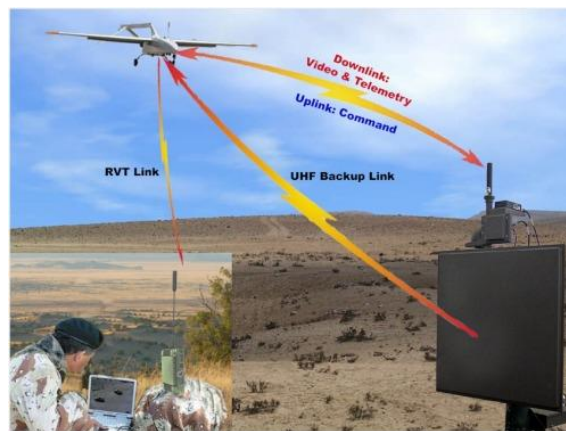


Figura 7. Sistema de Comunicaciones UAS/RPAS

Fuente: http://www.tadspec.com/includes/thumb.php?width=500&height=2000&src=../uploaded/free_page/Image/s/46/C-band%20SL_Hermes%20Multiband%20Button.jpg

4.1.3.6 Equipos de apoyo.

De la misma manera que las aeronaves tripuladas, los UAS/RPAS necesitan apoyo logístico. Los equipos de apoyo son los que se necesitan para el despliegue, transporte, mantenimiento, lanzamiento y recuperación. Para sistemas de lanzamiento manual todo este equipamiento es más sencillo.



Figura 8. Equipo de apoyo de un UAS/RPAS

Fuente: <http://www.onr.navy.mil/en/media-center/photo-gallery.aspx?pid=4>

De éstas definiciones se deduce que el término adecuado a utilizar es el de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia RPAS, puesto que engloba todo el sistema a analizar en este caso de estudio; es decir a la aeronave, la estación terrena de control y el enlace de comunicaciones.

4.1.4 Ventajas de los RPAS

En el ámbito civil existen varias ventajas, sin embargo, prevalece una consideración muy importante que es el factor del costo.

El hecho de que no exista tripulación en la aeronave, significa que la misma puede ser mucho más pequeña, traduciéndose en la reducción del costo de fabricación, mantenimiento, operación y por lo tanto en valor de la hora de vuelo. (Mora, 2015)

Las aeronaves al ser de menor tamaño, permiten realizar misiones que no son posibles con sistemas tripulados con la posibilidad de un despliegue inmediato.

La inexistencia de personas a bordo elimina el mayor riesgo de la aeronáutica, permitiendo plantear perfiles de misiones que no se cumplirían con aeronaves tripuladas.

4.1.5 Clasificación de las aeronaves

Un parámetro muy común para clasificar las aeronaves es de acuerdo a la forma de sustentación, su clasificación es la siguiente:

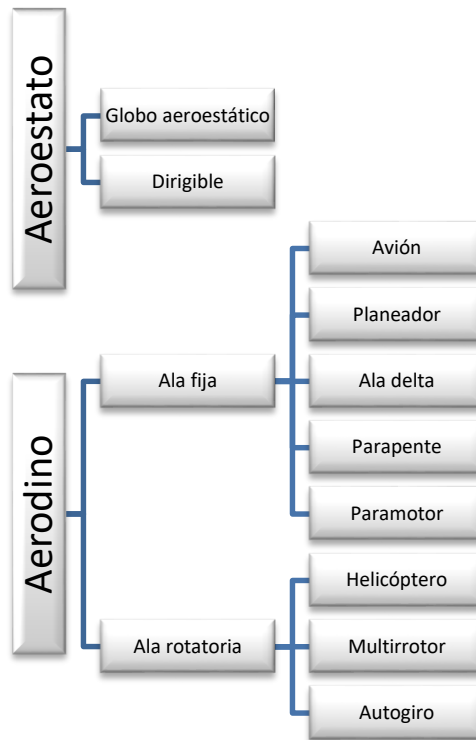


Figura 9. Clasificación de aeronaves por su forma de sustentación
Fuente: Elaborado por el autor

Considerando la clasificación anterior, existen básicamente dos tipos de plataformas UAS/RPAS, de ala fija y de ala rotaria. Según la aplicación planteada se debe utilizar cualquiera de las dos plataformas.

Los condicionantes principales para seleccionar la plataforma serán la superficie a estudiar, la resolución espacial requerida y las condiciones para el despegue y el aterrizaje en la zona. (Díaz García-Cervigón, 2015)

4.1.5.1 RPA de ala rotatoria.

Son aquellas aeronaves que se sustentan en el aire gracias a la fuerza de sustentación generada por el giro de las hélices en el aire, se las conoce como multirrotores o helicópteros. Sus características más importantes son:

- Despegue y aterrizaje vertical.
- Posibilidad de volar a puntos fijos o a muy baja velocidad.
- Mayor maniobrabilidad y precisión de vuelo.
- Permiten manejar mayores cargas útiles.



Figura 10. RPA ala rotatoria

Fuente: <http://www.cartodesia.com/wp-content/uploads/2014/02/QU4D-X-c.jpg>

4.1.5.2 RPA de ala fija.

Son aquellas aeronaves que se asemejan a los aviones, sus características más importantes son:

- Mayor autonomía puesto que son más eficientes que los de ala rotatoria.
- Mayor velocidad por lo que al tener mayor autonomía tienen una mayor área de cobertura.
- Menor huella sonora (para aplicaciones de vigilancia).
- Mayor rango climático en términos de temperatura, viento y lluvia.



Figura 11. RPA de ala fija

Fuente: www.bhphotovideo.com/images/images1000x1000/3dr_3dr0651_aero_m_drone_with_fpv_1160233.jpg

Después de definir los parámetros técnicos más importantes de los UAS/RPAS, se realizó un análisis comparativo de los dos fabricantes más representativos con sus modelos de drones de ala rotatoria, considerando que para el control de incendios se necesita maniobrabilidad, precisión de vuelo, manejo de mayores cargas útiles (cámara infrarroja) y sistemas de transmisión de video en tiempo real.

4.1.6 Criterios para la selección del UAV/RPA

De los diferentes equipos existentes en el mercado se consideraron los siguientes criterios para la selección del dron:

- ##### 4.1.6.1 Seguridad:
- Se buscó un dron que cuente con un sistema de aterrizaje automático cuando exista la pérdida de la señal de control desde la estación terrena, para evitar posibles incidentes en el transcurso del vuelo.

- 4.1.6.2 Carga útil: Este criterio es muy importante ya que el mismo permitirá instalar una cámara térmica con un determinado peso de alrededor de 100 gramos en el drone con su respectivo transmisor de video
- 4.1.6.3 Estabilidad: Con el fin de poder captar imágenes de video en tiempo real de buena calidad, es importante que el drone pueda mantenerse suspendido sin necesidad de realizar correcciones manuales.
- 4.1.6.4 Sencillez de ensamblaje y manejo: se priorizó los drones listos para volar (ready to fly-RTF) considerando que no se contaba con la experiencia en el pilotaje de estos equipos.
- 4.1.6.5 Autonomía: Como se explicó anteriormente, el tiempo de vuelo del drone o la autonomía juega un papel importante en la aplicación que se le vaya a dar al drone. En este caso los drones de ala rotatoria actualmente poseen alrededor de 25 minutos de autonomía.
- 4.1.6.6 Precio: En circunstancias donde se desarrolla e implementa un trabajo de graduación, este criterio es siempre decisivo puesto que no se dispone de elevado presupuesto para la adquisición de este tipo de tecnologías.





A continuación, se consideran las características principales de los cuatro drones más conocidos, pero en realidad son solo un pequeño grupo de los cientos que existen en el mercado. Dentro de la empresa DJI, se ha considerado al Phantom 3 Professional y al Phantom 3 Estándar, el primero está enfocado en gran medida al uso experimentado, lleva equipos de filmación de alta calidad, mientras que el segundo está dirigido a principiantes que deseen aprender sobre los drones y la fotografía. También se ha incluido al Parrot Bepop 2 y al 3DR Solo que son de los más vendidos y fáciles de utilizar, sin embargo, el 3DR Solo ofrece un conjunto de modos de vuelos avanzados y automatizados.

El drone Solo de la empresa 3DR, es un poco diferente a los otros modelos puesto que no incluye una cámara, sino que cuenta con un gimbal (cardan) para una cámara GoPro. Para el propósito de este análisis se considerará al 3DR Solo incluido con una cámara GoPro Hero4 Black Edition.

Es importante indicar que la complejidad de esta tecnología viene conjuntamente con un número indeterminable de características más profundas o finas como por ejemplo las temperaturas máximas de funcionamiento, precisión de los sistemas de transmisión de video, tiempo de carga y descarga de las baterías. En la siguiente tabla se enfocan las características o puntos principales.

Tabla 1

Análisis de las principales características para los drones DJI Phantom 3 Professional, DJI Phantom 3 Advanced, 3DR Solo y Parrot Bepop 2

| CARÁCTERÍSTICAS | DJI PHANTOM 3 PROFESSIONAL | DJI PHANTON 3 ADVANCED | 3DR SOLO | PARROT BEPOP 2 | ANÁLISIS |
|----------------------------|---|---|---|---|---|
| |  |  |  |  | |
| Resolución fotográfica | 12.4 megapixels | 12.4 megapixels | 12.4 megapixels | 14 megapixels | No existe una variación considerable en este ítem. La mayor parte de drones actuales ofrecen imágenes fijas nítidas, aunque el Parrot ofrece una resolución ligeramente mayor. |
| Resolución máxima de video | 4.7 k (30 fps) | 2.7 k (30 fps) | 4 k (30 fps) | 1080p (30 fps) | El Phantom 3 Professional tiene la mejor resolución, aunque la GoPro 4 del 3DR Solo graba 1080p a 120 fps que es útil para obtener imágenes a cámara lenta lo que no se puede lograr con la cámara del Phantom 3. |

| | | | | | |
|-----------------------------|--------------|--------------|----------------|---------------|---|
| Campo de visión del lente. | 94° | 94° | 170° | 180° | Los nuevos modelos de DJI redujeron su campo de visión para evitar que aparezca en las imágenes el tren de aterrizaje y las hélices. El campo del Bepop 2 necesita ser calibrado manualmente por lo que no es exacto. La GoPro tiene la ventaja en este punto puesto que también se puede ajustar a 127° o 90° |
| Autonomía (Tiempo de vuelo) | 23 minutos | 23 minutos | 20 minutos | 25 minutos | El dron de Parrot ha mejorado muchísimo su autonomía con respecto a sus modelos anteriores y actualmente está a la par con los grandes competidores. Es importante indicar que un campo de investigación de los UAS/RPAS está enfocado en diseñar y construir baterías que permitan volar a los drones por horas. |
| Distancia | 5km (3.1 mi) | 5km (3.1 mi) | 0.8km (0.5 mi) | 2km (1.24 mi) | Pilotear un dron más allá de la línea de vista es asombroso. Todos estos modelos ofrecen la función de retorno a casa (Return To Home); sin embargo, pilotos |

| | | | | | |
|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|---|
| | | | | | experimentados necesitan dejar libre a su drone por lo que el Phantom 3 Professional ofrece una libertad sin precedentes. Se debe considerar que el alcance o distancia de control dependerá de las interferencias electromagnéticas y de los obstáculos de línea de vista. |
| Velocidad máxima | 60 km/h (37mph) | 60 km/h (37mph) | 89 km/h (55mph) | 60 km/h (37mph) | A menos que se filmen objetos en movimiento rápido, la velocidad máxima de un drone no es crítica; sin embargo, es algo a considerar. Cualquiera de estos modelos puede captar imágenes y videos de diferentes deportes extremos. |
| Peso | 1.28 kg (2.8 lb) | 1.28 kg (2.8 lb) | 1.5 kg (3.3 lb) | 0.5 kg (1.1 lb) | El peso del Bepop2 es menor a sus competidores, sin embargo, al momento de volar es más probable que las corrientes de viento puedan afectarlo y desestabilizarlo. Cuando se planee viajar, el peso puede ser muy importante. |

| | | | | | |
|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|-----------|--|
| Modos de vuelo inteligentes | Follow me Orbit Waypoints | Follow me Orbit Waypoints | Follow me Orbit Waypoints Cable Cam Selfie | Waypoints | Últimamente los fabricantes se han enfocado en brindar opciones de vuelo automático para sus drones. La opción Follow me (sígueme) permite seguir automáticamente a una persona u objeto. Solo de 3DR introdujo nuevos modos inteligentes de vuelo como Orbit que permite orbitar en torno a un objeto con un radio definido por el usuario, el modo Cable Cam que permite enfocar a un objeto simulando un desplazamiento por un cable y Waypoint que permite volar a puntos predefinidos de manera automática, esto ha hecho que 3DR este delante de sus competidores. |
| Precio | US \$999 | US \$799 | US \$1499 | US \$799 | Relación costo/beneficio, el Phantom 3 Professional de DJI, es el que cumple excelentes características a un buen precio. |

Fuente: Elaborado por el autor

Como se evidencia, existen infinidad de parámetros a considerar al momento de adquirir un dron a más de definir la aplicación que se le dará.

Los últimos modelos de DJI incluyen los gimbals y cámaras, ofreciendo nuevas experiencias a todo tipo de pilotos. El dron Solo de 3DR básicamente muestra un mayor número de vuelos inteligentes y también una mayor velocidad, sin embargo, cuando se considera todo el conjunto con la cámara Go Pro, su precio es más costoso. La fortaleza del Bepop 2 de Parrot radica en su peso ligero y una relativa mayor autonomía, a pesar de que no cuenta con dos modos de vuelo inteligente, así como tampoco una buena resolución de video.

Analizados los anteriores factores, se seleccionó del modelo DJI Phantom Professional 3 (Figura 12), por presentar una mejor relación calidad/precio, puesto que la aeronave es fácil de pilotar, tiene vuelo estacionario en modo GPS, posee registros automáticos de vuelo, tiene un sistema de posicionamiento visual, cuenta con una videocámara 4K, fotos de 12 megapíxeles, rótula de estabilización en 3 ejes, el control remoto tiene comandos fáciles e intuitivos, DJI lightbridge integrado para la transmisión de imágenes en tiempo real, comandos personalizables y una aplicación GO APP para smartphones o tablets con la posibilidad de ver vídeo HD en directo, editor de vídeo, piloto automático y un simulador de vuelo integrado. Las principales características técnicas se recogen en las siguientes tablas.



Figura 12. Dron Phantom 3 Professional

Fuente: http://asset1.djicdn.com/uploads/product_store_photo/image/8901/medium_p3p-1.jpg

Tabla 2

Especificaciones de la aeronave

| | |
|-------------------------------------|---|
| Peso (Batería y Hélices Incluidas) | 1280 g |
| Tamaño Diagonal (Hélices Excluidas) | 350 mm |
| Velocidad Máx. en Ascenso | 5 m/s |
| Velocidad Máx. en Descenso | 3 m/s |
| Precisión en Vuelo Estacionario | Vertical: +/- 0.1 m (si el Posicionamiento Visual está activado) o +/- 0.5 m Horizontal: +/- 1.5 m |

| | |
|--|--|
| Velocidad Máx. | 16 m/s (modo ATTI, sin viento) |
| Altura Max. de Servicio sobre el Nivel del Mar | 6000 m (Límite de altura por defecto: 120 m sobre el punto de despegue) |
| Temperatura de Funcionamiento | de 0°C a 40°C |
| Modo GPS | GPS/GLONASS |
| Máx. Duración de Vuelo | Aproximadamente 23 minutos |

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 3

Especificaciones mando de control remoto

| | |
|---------------------------------|--|
| Frecuencia | 2.400 GHz-2.483 GHz |
| Distancia Máxima | Hasta 5 km o 3.1 millas (sin obstáculos ni interferencias) Según normas FCC. Hasta 3.5 km o 2.1 millas (sin obstáculos ni interferencias) Según normas CE |
| Temperatura de Funcionamiento | de 0°C a 40°C |
| Batería | 6000 mAh LiPo 2S |
| Soporte para Dispositivo Móvil | Para tableta o teléfono móvil |
| Transmisor de Potencia (PIRE) | <ul style="list-style-type: none"> • FCC: 20 dBm • CE: 16 dBm |
| Voltaje de Funcionamiento | 1.2 A @7.4 V |

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 4

Especificaciones de la aplicación/retransmisión en directo

| | |
|--|--|
| Aplicación Móvil | DJI GO |
| PIRE | 100mW |
| Densidad Espectral de Potencia | 6.9mW/MHz |
| Frecuencia de Funcionamiento de la Retransmisión en Directo | 2.4GHz ISM |
| Calidad de la Retransmisión en Directo | 720P @ 30fps (dependiendo de las condiciones y los dispositivos móviles) |
| Latencia | 220ms (dependiendo de las condiciones y los dispositivos móviles) |
| Sistema Operativo Requerido | iOS 8.0 o posterior Android 4.1.2 o posterior |
| Dispositivos Recomendados | Compatible con iPhone 5s, iPhone 6, iPhone 6 Plus, Google Nexus 9, Google Nexus 7 II, |

Fuente: Elaborado por el autor

4.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE CÁMARAS TÉRMICAS Y SUS APLICACIONES

4.2.1 Radiación térmica y radiación infrarroja

Muchos sistemas de captación y representación de imágenes, ya sean en color real como la fotografía o en falso color como las radiografías, basan su funcionamiento en la “lectura” de la radiación electromagnética emitida por diferentes fuentes. Las cámaras térmicas están entre estos sistemas, trabajando en una gama limitada de longitudes de onda correspondientes a la radiación térmica emitida en la franja infrarroja. (Termografía Aplicada, s.f.)

La radiación térmica es un tipo de radiación que se transmite en forma de calor. Toda materia que se encuentre por encima del cero absoluto (0 Kelvin) emite radiación térmica de forma continua y con una intensidad determinada por la temperatura de la materia en cuestión. (Termografía Aplicada, s.f.)

La radiación infrarroja ocupa la banda de las longitudes de onda de menor frecuencia de la radiación térmica, se extiende desde longitudes de onda de $0.78 \mu\text{m}$ hasta $1000 \mu\text{m}$, es decir los infrarrojos están a medio camino entre el espectro visible y las microondas del espectro electromagnético, esto permite cubrir la mayoría de tecnologías infrarrojas.

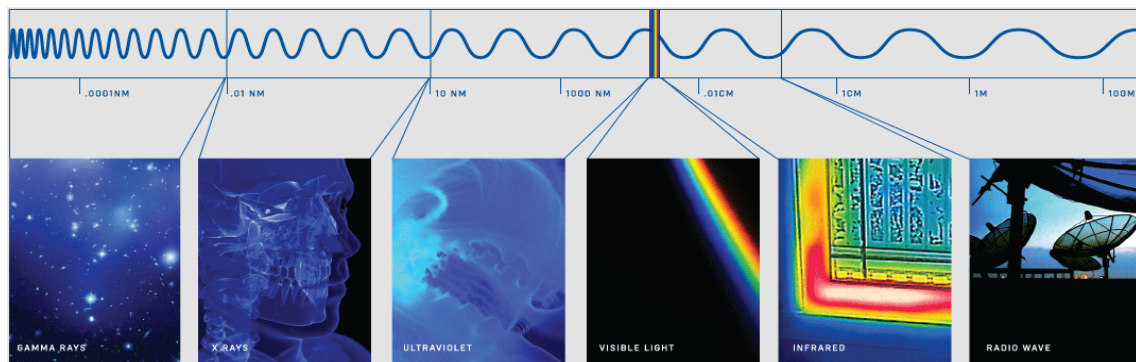


Figura 13. Espectro electromagnético

Fuente: <http://www.flir.com/flirone/asset/img/explore/header.png>

4.2.2 Cámaras térmicas para UAS/RPAS

Una cámara térmica o cámara termográfica es un equipo tecnológico que proporciona una imagen usando la radiación infrarroja. Mientras que una cámara común produce una imagen utilizando la luz visible (de 450 a 750 nanómetros), la cámara térmica produce imágenes en longitudes de onda de alrededor de 14.000 nanómetros.

La energía infrarroja (A) que emite un objeto se enfoca con el sistema óptico (B) sobre un detector de infrarrojos (C). El detector envía los datos al sensor electrónico (D) para procesar la

imagen. Finalmente, el sensor traduce los datos en una imagen (E), compatible con el visor y visible en un monitor de vídeo estándar o una pantalla LCD. La siguiente imagen muestra el proceso mencionado anteriormente.

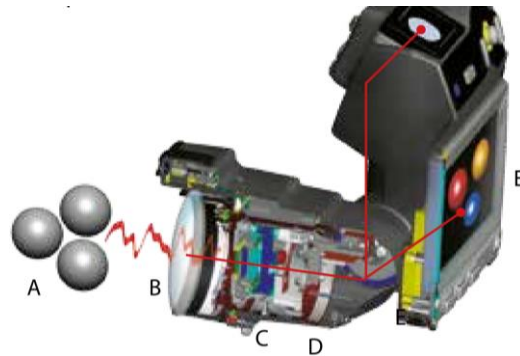


Figura 14. Funcionamiento de una cámara termográfica

Fuente: http://www.engreview.com/wp-content/uploads/2015/04/ER1504_Cover-Story_FLIR_Application-storybook-IND-LR.jpg

Gracias al desarrollo de sensores de imagen térmica, actualmente existen en el mercado cámaras térmicas comerciales sin necesidad de refrigeración a precios asequibles para ciertas aplicaciones. De igual modo, se ha conseguido desarrollar sensores multispectrales e hiperspectrales miniaturizados que pueden ser embarcados en UAS/RPAS. [2]

Considerando que el caso de estudio está enfocado en transmitir imágenes obtenidas de una cámara térmica en tiempo real desde un UAS/RPAS a su estación terrena, es importante analizar las características técnicas de varias cámaras a fin de determinar la más adecuada para su implementación.

En el mundo de los UAS/RPAS existen varios fabricantes y modelos de cámaras termográficas. A continuación, se observa una matriz comparativa basada no solamente en características técnicas, sino que también en parámetros prácticos como el peso, tamaño y resolución.

Tabla 5

Matriz comparativa de cámaras térmicas para UAV/RPA

| | ThermalCapture MiniAV | FLIR VUE | FLIR TAU 2 | FLIR VUE PRO | THERMAL CAPTURE |
|-------------------------|---|---|--|---|---|
| CARACTERÍSTICA |  |  |  |  |  |
| Video analógico en vivo | X | X | X | X | X |

| | | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Paletas de múltiples colores | X | X | X | X | X |
| Firmware actualizable | X | X | X | X | X |
| Campo amplio de visión de las lentes | | X | X | X | X |
| Isotermas | | | X | X | X |
| Punto de medición | | | X | X | X |
| Registro de datos de 14 bits | | | | X | X |
| Iniciar/detener la grabación remotamente | | | | X | X |
| Geolocalización de datos | | | | X | X |
| Campo estrecho de visión de las lentes | | | X | | X |
| Sensibilidad (NEdT) <50mK en f / 1.0 | | | X | | X |
| Registro de datos radiométricos | | | | | X |
| Mediciones de temperatura por píxeles | | | | | X |
| Registro de datos de 14 bits con total tasa de tramas | | | | | X |
| Dimensión (mm) | 32 x 20 x 11 | 58 x 44 x 44 | 55 x 44 x 44 | 58 x 44 x 44 | 60 x 60 x 60 |

| | | | | | |
|--------------------|----------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Peso (g) | 5 | 114 | 82 | 114 | 120 |
| Resolución (pixel) | 80 x 60 160 x 120 | 336 x 256 640 x 512 | 324 x 256 336 x 256 640 x 512 | 336 x 256 640 x 512 | 324 x 256 336 x 256 640 x 512 |
| Precio (USD) | Desde 689 | Desde 1500 | Desde 2750 | Desde 1999 | Desde 6070 |

Fuente: Elaborado por el autor

Del cuadro comparativo se deduce que la cámara termográfica con excelentes prestaciones y a un precio relativamente asequible es la FLIR Vue Pro que está diseñada para el uso profesional, puesto que es un instrumento de medición térmica y una grabadora de datos que añade un valor inmenso a las operaciones y servicios con UAS/RPAS, posee una completa grabación de datos de vídeo termográfico e imágenes fijas a 14 bits, la conexión de entrada de alimentación/salida de vídeo de la FLIR Vue es a través de un puerto mini USB de 10 contactos, lo que hace que la integración sea fácil y garantiza un acceso sencillo al vídeo analógico para bajarlo, otorga control en vuelo de dos funciones de cámara a través de conexiones directas PWM (modulación por ancho de pulsos) y su compatibilidad con MAVLink la habilita para la unión de imágenes necesaria para aplicaciones de mapas, topografía y agricultura de precisión. Además, es compatible con el software especializado Pix4Dmapper y posee una cómoda aplicación móvil que agiliza y facilita la configuración previa al vuelo de la cámara cuando sea necesario cambiar un ajuste sin necesidad de un ordenador. (FLIR® Systems, Inc., 2016)

La FLIR Vue Pro, utiliza el mismo núcleo termográfico que utilizan las cámaras más populares del mundo, resultando perfecta para varias aplicaciones por su flexibilidad y rendimiento.



Figura 15. Cámara térmica FLIR Vue Pro

Fuente: <http://www.flir.com/uploadedImages/sUAS/Products/Vue-Pro/flirVuePro-profile.png>

En la siguiente tabla se agrupan las principales características:

Tabla 6*Especificaciones de la cámara termográfica FLIR Vue Pro*

| | | |
|--|--|--|
| Cámara termográfica | Microbolómetro VOx no refrigerado | |
| Resolución | 640x512 | 336x256 |
| Opciones de lente | 9 mm; 69° x 56° 13 mm; 45° x 37° 19 mm; 32° x 26° | 6,8 mm; 44° x 36° 9 mm; 35° x 27° 13 mm; 25° x 19° |
| Banda espectral | 7,5 - 13,5 μ m | |
| Frecuencias de imagen máximas | 30 Hz (NTSC); 25 Hz (PAL) Solo EE. UU., no para exportar | |
| Frecuencias de imagen exportables | 7,5 Hz (NTSC); 8,3 Hz (PAL) | |
| Tamaño | 57,4 x 44,4 mm (lente incluida) | |
| Peso: | De 92,1 a 113,4 g) (en función de la configuración) | |
| Orificios de montaje de precisión | Dos M2x0,4 en cada uno de los dos lados y la parte inferior Un orificio roscado 1/4-20 en la parte superior | |
| Optimización de imágenes para sUAS | Sí | |
| Mejora digital del detalle | Sí, ajustable en la interfaz gráfica | |
| Imagen invertible | Sí, ajustable en la interfaz gráfica | |
| Control de polaridad (calor negro/calor blanco) y paletas de colores | Sí, ajustable en la interfaz gráfica | |
| Voltaje de entrada | De 4,0 a 6,0 VCC | |
| Disipación de potencia, estado estable (máximo 2,5 W durante la obturación, en 0,5 segundos) | $\pm 1,2$ W | $\sim 1,0$ W |
| Rango de temperatura operativa | (De -20°C a +50 °C) | |
| Rango de temperatura no operativa | (De -55°C a +95°C) | |
| Altitud operativa | Más de 12 000 metros | |

Fuente: (FLIR® Systems, Inc., 2016)

4.2.3 Aplicaciones de cámaras térmicas para UAS/RPAS

A continuación, se mencionarán las principales aplicaciones que se pueden desarrollar y realizar con cámaras térmicas montadas en un UAV/RPA.

4.2.3.1 Termo diagnóstico en el sector de la ingeniería eléctrica

Hoy en día, no se puede imaginar la vida sin electricidad. Sin embargo, no siempre se considera lo exigente que es producirla por las centrales eléctricas y suministrarla directamente a los hogares. La red de transmisión y distribución es un sistema muy complejo de líneas que interconectan las fuentes de energía eléctrica, centros de transformación y los consumidores. Desafortunadamente, los fallos pueden ocurrir dentro de las redes de electricidad y alta tensión que pueden conducir a averías en la energía eléctrica que llega a los domicilios, así como producir incendios destructivos. Un UAV/RPA con un sistema de imagen térmica instalada puede ser una herramienta muy útil para evitar este tipo de problemas.

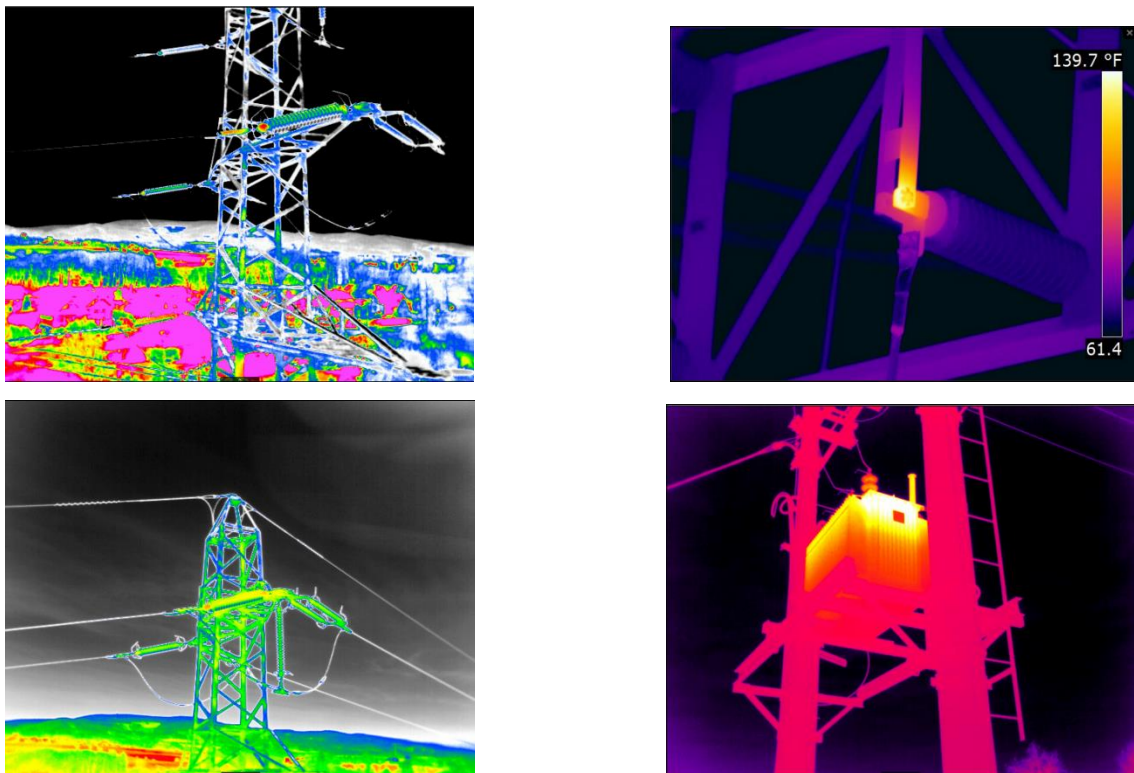


Figura 16. Imágenes térmicas de elementos de redes de alta tensión
Fuente: <http://www.drone-thermal-camera.com/wp-content/uploads/highvoltage.pdf>

4.2.3.2 Termo diagnóstico de techos lisos

Los techos lisos fueron construidos originalmente en zonas con poca lluvia. En la era moderna, se mejoró la calidad del aislamiento contra las condiciones atmosféricas, de modo que se empezaron a utilizar techos lisos en naves industriales, así como en edificios arquitectónicamente muy valorados. Estos techos permiten ahorrar material, utilizar menos mano de obra, la opción de diseños de techo por capas y el uso potencial de las zonas del techo para otras áreas. Sin embargo, pueden ocurrir problemas con fugas o pérdidas térmicas en toda o parte del techo, debido a la instalación o construcción poco profesional, un mal mantenimiento o la degradación de la superficie debido a la insuficiente protección de las capas

superficiales contra las inclemencias climáticas, carga excesiva por el viento, acumulación de agua en techos dañados. En la mayoría de los casos, las filtraciones de agua durante un largo período (incluso varios años) bajo la superficie del techo pueden destruir las capas de cimentación. Tal destrucción generalizada se puede prevenir mediante el descubrimiento oportuno del problema. Los sistemas de imágenes térmicas proporcionan la herramienta perfecta para evaluar el estado de los techos lisos. El sistema de imagen térmica ubicado en el UAV/RPA proporciona una solución rápida y económica para la topografía de grandes techos en sitios industriales debido a que se puede identificar plenamente donde ha penetrado la humedad gracias a la diferencia térmica entre un lugar seco y un lugar mojado.

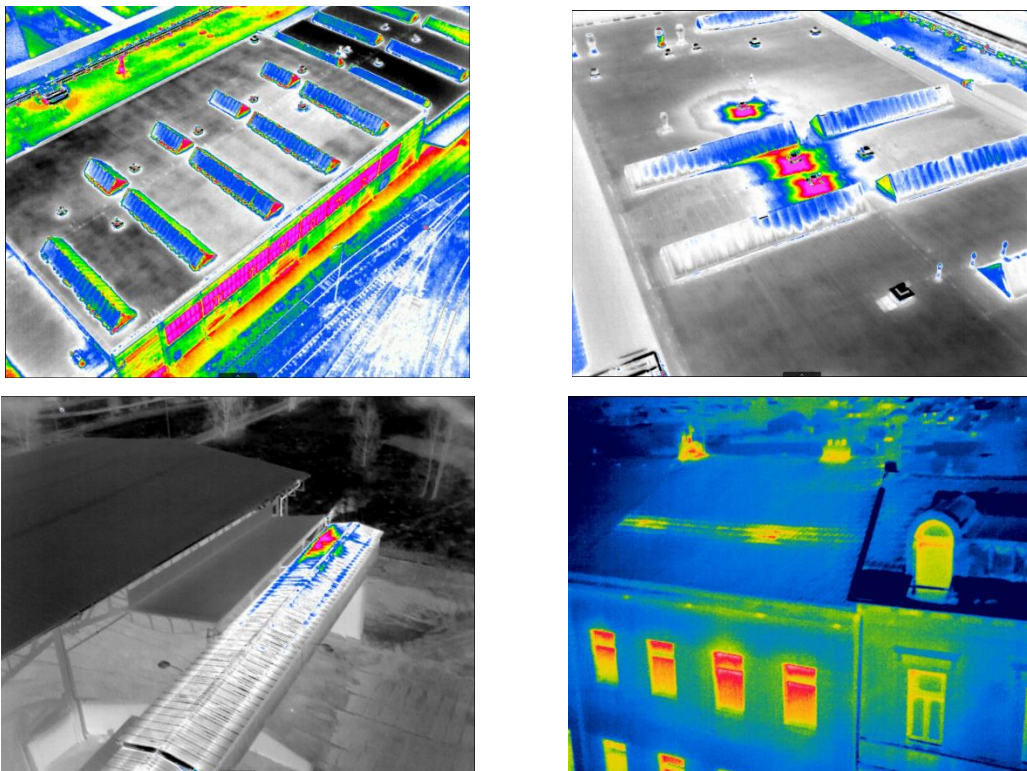


Figura 17. Imágenes térmicas de techos de fábricas y casas
Fuente: <http://www.drone-thermal-camera.com/wp-content/uploads/roof.pdf>

4.2.3.3 Termo diagnóstico de plantas de energía fotovoltaica

Los UAS/RPAS con cámaras térmicas son absolutamente recomendables para cualquier inspección de los sistemas de energía fotovoltaica (FVE) después de su montaje, antes de aprobación del proveedor, así como durante las inspecciones periódicas que aseguren que el usuario tiene la máxima eficiencia para la recolección de energía y costes mínimos en las reparaciones. La rapidez y fiabilidad en la inspección con la cámara térmica en comparación con una inspección común es superior varias veces. Este método de medición es también el método más barato en la identificación de defectos en los paneles. Actualmente, los termogramas son

una característica estándar en los informes de reclamos y son aceptados como pruebas de mal funcionamiento por las empresas.



Figura 18. Imágenes térmicas de paneles solares

Fuente: http://www.drone-thermal-camera.com/wp-content/uploads/Workswell-WIRIS_photovoltic.pdf

4.2.3.4 Aplicaciones de seguridad con cámaras térmicas.

Actualmente la seguridad es un tema muy sensible en diferentes campos de la sociedad. Sin embargo, siempre van a existir problemas de seguridad por resolver ya sea por ingreso de ladrones personas no deseables, animales, así como por la búsqueda de personas desaparecidas en zonas de difícil acceso con condiciones ambientales no favorables como por ejemplo neblina y obscuridad. Afortunadamente las cámaras térmicas juegan un papel muy importante en estas situaciones puesto que todos los cuerpos emiten radiación infrarroja y ésta puede ser detectada por cámaras térmicas instaladas en los UAV/RPA. Es así que las cámaras térmicas son usadas para monitorear y brindar seguridad por la noche, con presencia de lluvia, nieve o incluso neblina, de la misma manera proporcionan una imagen de calidad en el día o en la noche.

Las inspecciones desde un UAV/RPA equipado con cámara térmica son muy recomendadas para cualquier reconocimiento o monitoreo de seguridad, para localizar el centro u origen de incendios, así como para monitorear objetos y zonas en la búsqueda de personas desaparecidas.

La utilización de los UAV/RPA en estos casos es rápida, reduciendo el tiempo necesario para el rescate de personas.

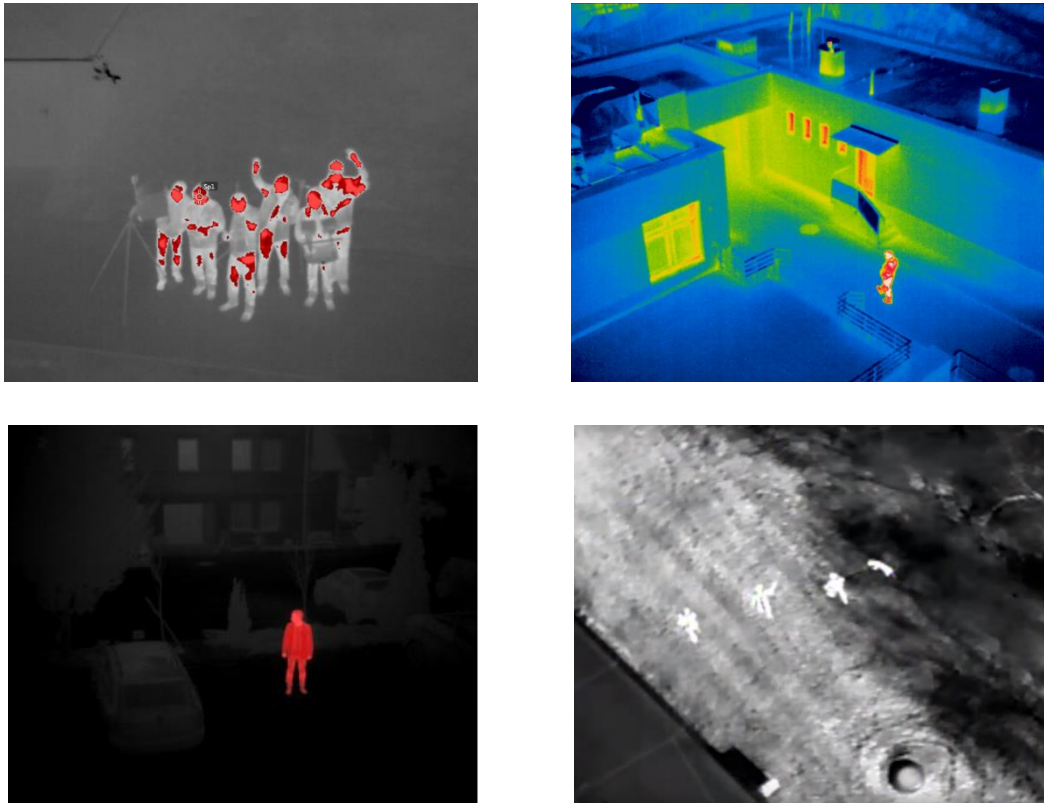


Figura 19. Imágenes térmicas de personas en aplicaciones de seguridad
Fuente: <http://www.drone-thermal-camera.com/wp-content/uploads/security-and-rescue.pdf>

4.2.3.5 Inspección de tuberías con diagnósticos térmicos

Mediante el uso de sistemas de termografía es posible determinar fugas y localizar defectos en el aislamiento de las tuberías. En algunos casos, las fugas incluso pueden ser determinadas y localizadas en tuberías subterráneas. El uso de UAV/RPA en éste tipo de aplicaciones permite contar con una visión general inmediata de las condiciones de las tuberías y si se detecta una anomalía, centrarse en los detalles y comprobar personalmente la zona de afectación. Una cámara tradicional no detecta los defectos de aislamiento y el escape del calor interno de las tuberías. Una cámara térmica puede detectar dichos defectos y registrar la radiación térmica.

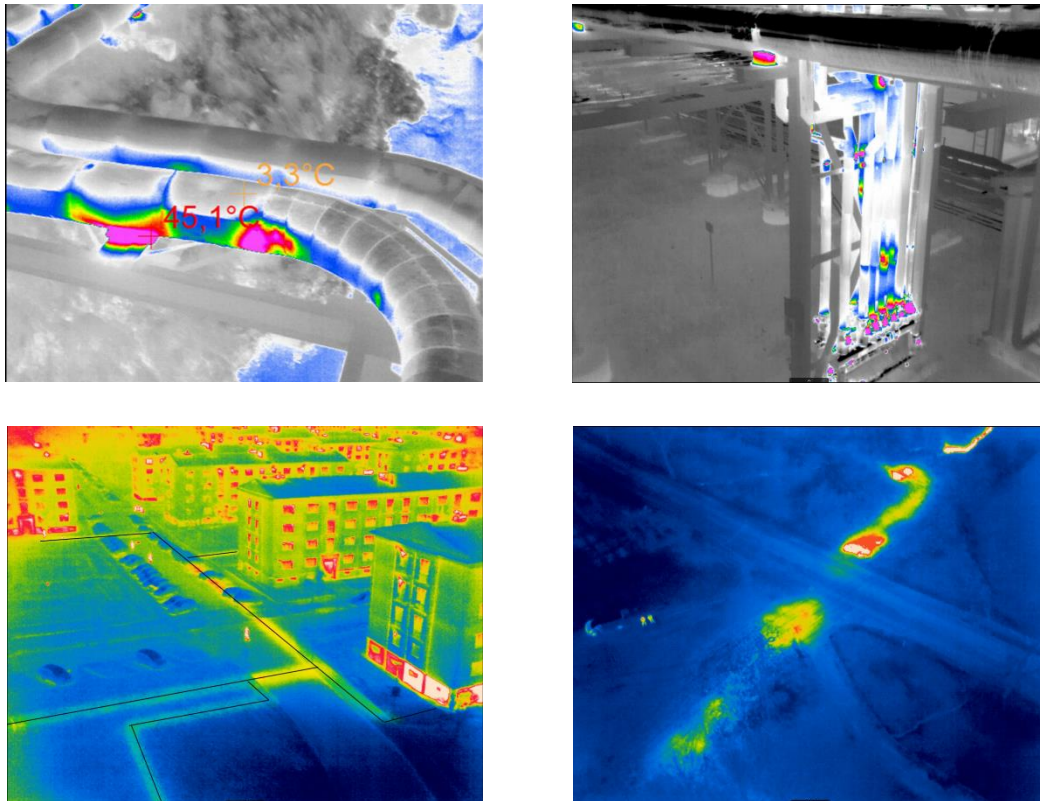


Figura 20. Imágenes térmicas de pérdidas de calor en tuberías
Fuente: <http://www.drone-thermal-camera.com/wp-content/uploads/pipeline.pdf>

4.2.3.6 Aplicación en la agricultura.

Las hojas de las plantas tienen propiedades térmicas influenciadas por su estructura interna, la misma que contiene una cantidad sustancial de agua por unidad de área. Debido a esta razón, termográficamente se puede explorar las plantas debido a la universalidad, precisión y alta resolución de la termografía de infrarrojos. Sin embargo, la medición exacta depende considerablemente de las condiciones del entorno que influyen en las propiedades térmicas de las plantas monitoreadas. Como resultado de ello, si se desea comparar los datos termográficos obtenidos en diferentes intervalos de tiempo, hay que calibrar el sistema de medición en función del tiempo. La investigación y la observación termográfica se pueden utilizar en todos los productos y procesos agrícolas en las que el calor se genera, se pierde o viceversa. Los potenciales usos de la termografía en la agricultura incluyen la supervisión de viveros, planificación e inspección de los sistemas de riego, detección de la salinización, la detección de patógenos y enfermedades en plantas y cultivos, estimaciones de rendimiento y evaluación de madurez de frutas, análisis de la distribución de la irrigación del agua, evaluación de los parámetros de humedad y análisis del estrés de las plantas.

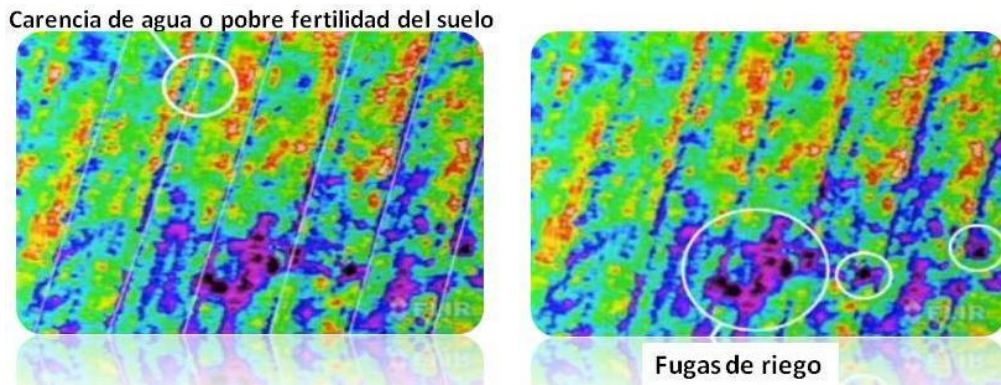


Figura 21. Imágenes de un viñedo tomadas con cámara termográfica
 Fuente: <http://3.bp.blogspot.com/-dzWU2gx0VPc/UK-E02elqdl/AAAAAAAAAMM/c8zwhw1ZMcc/s1600/Imagen+termografica.jpg>

4.2.3.7 Lucha contra incendios

Durante varias décadas las cámaras térmicas han sido una ayuda indispensable para los bomberos de todo el mundo. Un UAV/RPA equipado con una cámara térmica brinda varias ventajas importantes a los socorristas y bomberos. Por ejemplo, tienen la capacidad de observar a través del humo y en la noche al mismo tiempo, investigando grandes áreas desde un lugar seguro.

En un gran incendio las cámaras térmicas en un avión no tripulado permiten comprobar si hay personas o animales en el fuego; incluso si es de noche o en la niebla. Un UAV/RPA puede ser utilizado rápidamente durante las operaciones de rescate. Todo el sistema aéreo no tripulado o el sistema de aeronave piloteada remotamente (UAS/RPAS) con la cámara térmica y sus accesorios pueden ser transportados fácilmente en vehículos, de esta manera el UAS/RPAS puede entrar en acción en pocos minutos.



Figura 22. Imágenes térmicas en el control de incendios desde un UAV/RPAS
 Fuente: <http://www.flir.com/uploadedImages/Store/Products/sUAS/Vue-Pro/vuePro-thermal5.jpg>

Existen aplicaciones adicionales como la inspección de torres de telefonía móvil, monitoreo de redes de fibra óptica, topografía, auditorías energéticas, búsqueda y rescate entre otras que con el transcurso del tiempo se desarrollarán. Como se verifica, el mundo de la termografía con los UAS/RPAS está en constante evolución.

4.3 SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICO ENTRE UN UAV/RPA Y SU ESTACIÓN BASE PARA LA VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES TÉRMICAS.

Como se indicó en la primera sección, el sistema de comunicaciones de un UAS/RPAS está formado por todo el sistema de transmisión de información entre el segmento aéreo y el segmento de tierra, es decir un enlace que transmite información de los parámetros de vuelo y control (telemetría) desde la plataforma aérea; y un enlace de datos (data link) por el que se transmite información de los diferentes sensores o carga útil del UAV/RPA que en éste caso corresponde a las imágenes obtenidas por la cámara térmica. Estas transmisiones se las realiza con línea de vista (LOS) o más allá de la línea de vista (BLOS).

4.3.1 Sistema de telemetría

El UAS/RPA tiene incorporado su equipo de telemetría que está formado por dos radios TX/RX trabajando en la frecuencia de 433 MHz o 915 MHz, antenas omnidireccionales de 2dbi de ganancia con un rango de cobertura de alrededor de 500 m dependiendo de las condiciones ambientales y las fuentes de ruido.



Figura 23. Kit de Telemetría con frecuencia de trabajo de 915 MHz.
Fuente: http://electronicarc.com/images/Telemetria_915_3DR.jpg

Las principales características de este kit de radios son:

- Tamaño pequeño (2.67 cm x 5.05 cm x 1.33 cm)
- Peso ligero (menos de 4 gramos sin antena)
- Disponible en frecuencias 900 MHz o 433 MHz

- Sensibilidad del receptor de -121 dBm
- Potencia de transmisión de hasta 20 dBm (100 mW)
- Velocidades de datos de hasta 250kbps
- Utiliza modulación de espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS)
- Firmware de código abierto
- Puerto de comunicación micro-USB
- Voltaje de trabajo 3.7 a 6 VDC

El kit de radios es intercambiable, es decir un radio Tx/Rx está instalado en el UAV/RPA con su respectiva antena y el otro radio Tx/Rx puede estar conectado a una PC o Tablet según sea el requerimiento o viceversa. A continuación, se explican cada una de estas conexiones.

4.3.2 Conexión a una PC.

La conexión de la radio a la PC con Windows es similar a conectar un cable micro USB a una computadora. De manera automática se instalan los controladores o drivers y la radio aparecerá como nuevo "USB Serial Port". En el administrador de dispositivos de Windows en la opción Puertos (COM y LPT) se puede verificar el hardware instalado (Figura 24).

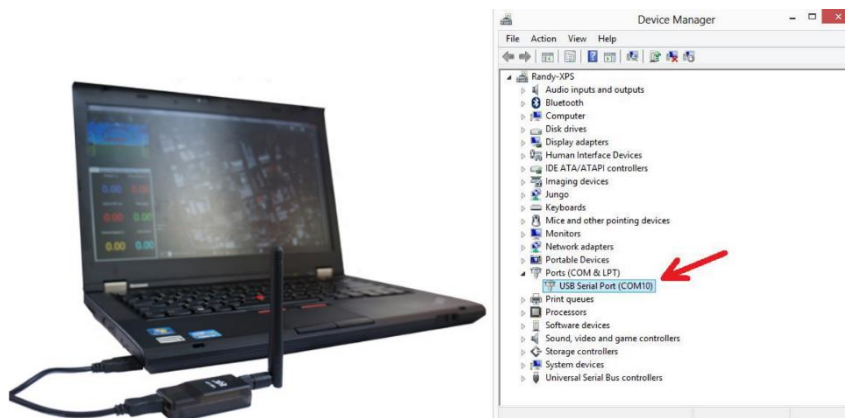


Figura 24. Verificación del radio instalado en la opción administrador de dispositivos
Fuente: Elaborado por el autor

En la aplicación "Mission Planner" de la estación terrena, se debe seleccionar la opción correcta del puerto que muestra la ventana COM, a continuación, se selecciona la tasa de transmisión a 57600 bps y el botón CONNECT (Figura 25). El radio no se conectará a menos que el UAV/RPA este encendido. Para verificar que los radios están conectados se usa la pantalla de datos de vuelo a fin de verificar el estado del vehículo y el control de la misión en vuelo (Figura 26).



Figura 25. Selección del puerto y tasa de transmisión
Fuente: Elaborado por el autor

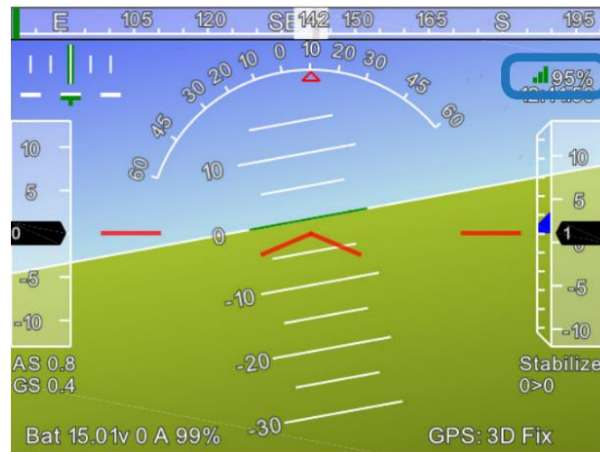


Figura 26. Pantalla de datos de vuelo con la potencia de la señal de radio
Fuente: Elaborado por el autor

4.3.3 Conexión a una Tablet

Para conectar el radio a una Tablet, es necesario que la misma posea sistema Android y tenga instalado cualquier software de estación terrena como por ejemplo Tower, DroidPlanner, Andropilot etc. A continuación, el conector azul del cable adaptador se conecta a la tablet y el conector negro al radio, finalmente se selecciona Connect (Figura 27).



Figura 27. Conexión del radio TX/RX a una Tablet
Fuente: http://www.unmannedtech.co.uk/uploads/6/7/0/2/6702064/3131112_orig.jpg

4.3.4 Software para estaciones de control en tierra (Ground Control Stations - GCS)

Una estación terrena es un software de aplicación que se ejecuta en un equipo que puede ser una PC, Tablet o Smartphone instalado en tierra que se comunica con el UAV/RPA de manera inalámbrica mediante un enlace de telemetría. La estación terrena muestra los datos en tiempo real del rendimiento (performance) y ubicación de la aeronave y puede ser utilizada como una cabina virtual puesto que muestra muchos de los mismos instrumentos que tendría un avión real. La GCS también puede ser utilizada para controlar al UAV/RPA en pleno vuelo, actualizando los comandos para una nueva misión y la configuración de parámetros. A menudo son utilizadas para mostrar el video en tiempo real o en directo de una cámara que este instalada en el UAV/RPA.

Existen al menos ocho diferentes estaciones de control en tierra (Misión Planner, APM Planner 2, MAVProxy, Tower (DroidPlanner 3), AndroPilot, MAVPilot, iDroneCtrl y QGroundControl) que se pueden utilizar para comunicarse con el piloto automático instalado en el UAV/RPA.

La decisión de instalar o seleccionar una estación de control en tierra, dependerá fundamentalmente del tipo de UAV/RPA y del equipo computacional con que se cuente; es así que los usuarios Ready to fly - RTF (listo para volar) prefieren portabilidad y facilidad de uso por lo que utilizan la aplicación Tower u otra GCS que pueda ser instalada en una tablet o Smartphone, mientras que los usuarios Do It Yourself – DIY (hazlo tú mismo) o desarrolladores, deben acceder a herramientas de análisis y configuración por lo que es necesario instalar Mission Planner, APM Planner 2 u otra GCS con todas las funciones.

4.3.4.1 *Tower*. - También conocido como "DroidPlanner 3", es una GCS para teléfonos y tabletas con sistema Android. Está destinado a usuarios finales, e incluye características como follow-me (sígueme), dronies (selfies tomadas desde UAV/RPA) y misiones especiales para mapeo en 3D. (Figura 28) (Team, 2016)

- Plataforma: móviles y tabletas Android
- Licencia: Open Source (GPLv3)

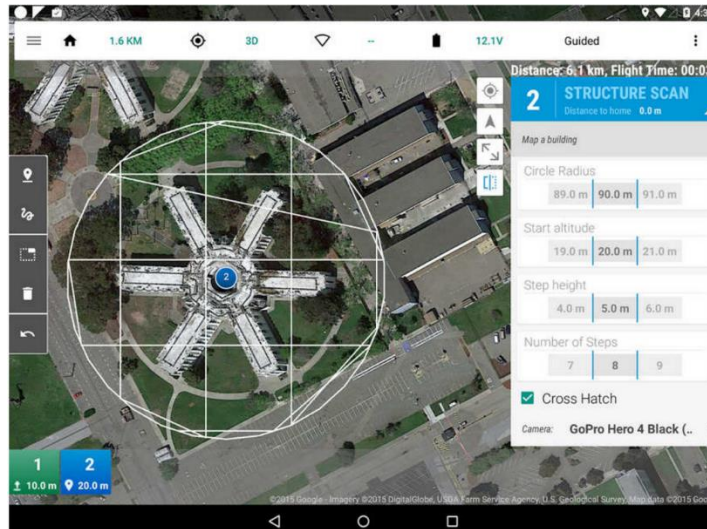


Figura 28. Pantalla de una GCS Tower

Fuente: http://ardupilot.org/copter/_images/tower_droid_planner3_structure_scan.jpg

4.3.4.2 *Mission Planner*. - Cuenta con todas las funciones de una GCS y es ampliamente utilizado por desarrolladores y entusiastas. (Figura 29) (Team, 2016)

- Plataforma: Windows, Mac OS X
- Licencia: Open Source (GPLv3)

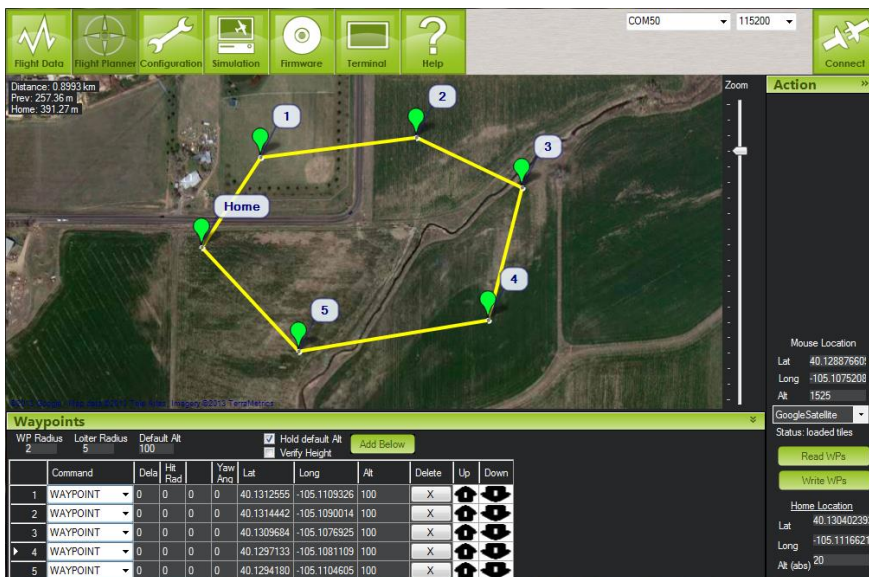


Figura 29. Pantalla de una GCS con Mission Planner

Fuente: http://www.arducopter.co.uk/uploads/6/7/0/2/6702064/772312489_orig.PNG

4.3.4.3 *APM Planner 2*.- Es el mejor piloto automático para uso en plataformas MAC y Linux. Cuenta con una base de usuarios más pequeño y un reducido conjunto de características en comparación con Mission Planner. Está destinado a desarrolladores y entusiastas. (Figura 30) (Team, 2016)

- Plataforma: Windows, Mac OS X, Linux
- Licencia: Open Source (GPLv3)

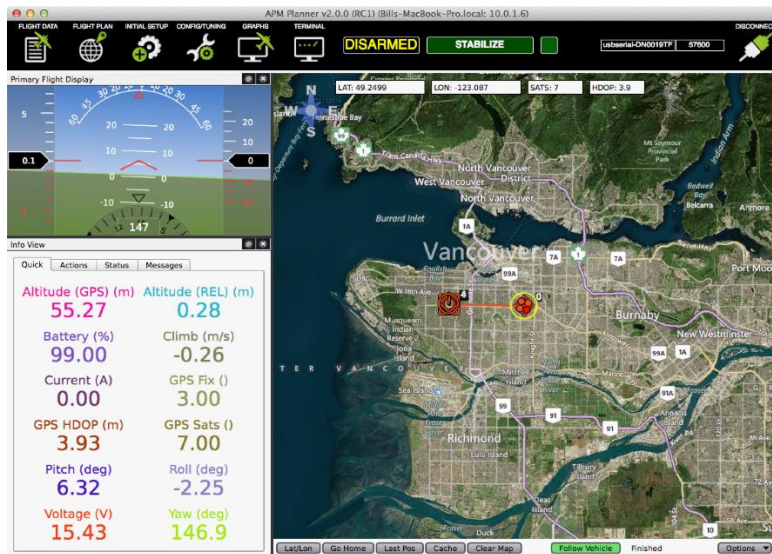


Figura 30. Pantalla de una GCS con APM Planner 2

Fuente: <http://fpvcentral.net/wp-content/uploads/2013/12/APMPlanner2.png>

4.3.5 Sistema de comunicación inalámbrico para la transmisión de video

El caso de estudio tiene como objetivo específico implementar un sistema de comunicación inalámbrico entre el UAV/RPA y su estación terrena, a fin de visualizar video en tiempo real desde la cámara infrarroja seleccionada en la sección anterior; por tal razón se detallan los equipos de transmisión, recepción y antenas utilizadas para cumplir con el propósito planteado.

Considerando que la carga útil es un parámetro crítico al momento de ejecutar una misión, es importante que el equipo de comunicación que se instale en el UAV/RPA sea liviano, debe contar con una potencia de transmisión considerable y las antenas deben ser de alta ganancia.

El sistema de transmisión de video analógico que se ha implementado cuenta con un enlace descendente (downlink) de video, en la Figura 31 se muestra un diagrama simplificado:

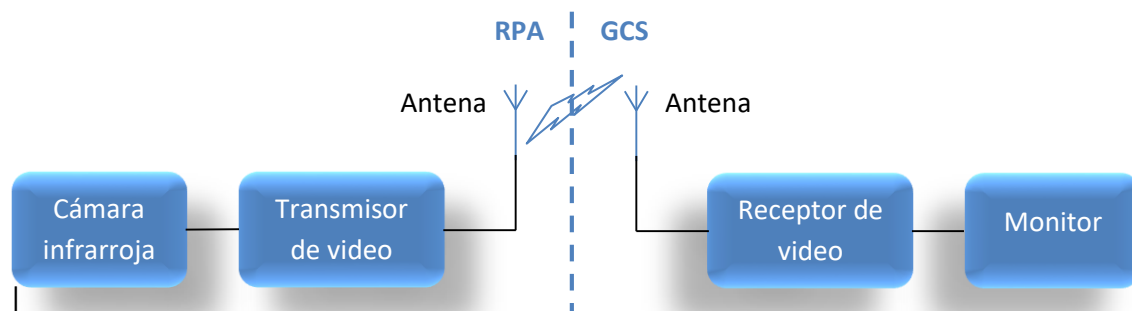


Figura 31. Enlace para transmisión de video desde el UAV/RPA hacia la estación terrena

Fuente: Elaborado por el Autor

A continuación, se describen cada uno de los componentes del sistema de transmisión de video:

4.3.6 Descripción de los componentes

4.3.6.1 *Transmisor de video*

Los sistemas de transmisión de vídeo comerciales se pueden dividir en dos grandes grupos, analógicos y digitales. Los sistemas analógicos son los que se usan principalmente por aficionados, mientras que los sistemas digitales, similares a los utilizados en las cámaras de televisión, son los que se utilizan en campos profesionales. (Quirós, 2015)

Frente a las interferencias, los sistemas de transmisión digitales son mejores puesto que son capaces de transmitir video en calidad HD utilizando compresión de video H.264 o MPGE-4. Su principal desventaja es su precio elevado; sin embargo, existen transmisores menos costosos con la desventaja de tener latencias de alrededor de un segundo, mayor potencia para transmitir la señal perjudicando al consumo de la batería y por ende a la autonomía del UAV/RPA. El peso de los transmisores digitales es mayor al de los analógicos por lo que no son utilizados comúnmente en UAV's o RPA's debido a que el peso y volumen en un drone son críticos.

Por lo general los sistemas analógicos y digitales trabajan en las mismas frecuencias. La más utilizada para transmitir el video desde un UAV/RPA es la banda de frecuencias centrada en 5,8 GHz, esto permite que las antenas sean pequeñas y ligeras, es poco probable que se interfiera con otros servicios o con el transmisor del radio control RC puesto que estos trabajan comúnmente en la frecuencia de 2,4 GHz.

Las características de propagación de las ondas electromagnéticas en frecuencias altas favorecen la transmisión en línea recta, lo que permite obtener un mayor alcance siempre y cuando exista línea de vista (LOS). (Quirós, 2015)

Por lo indicado anteriormente para la implementación del sistema de comunicación, se utilizará un transmisor de video analógico, existen varios fabricantes de equipos de comunicación inalámbrica para transmitir video en tiempo real desde un UAV/RPA, los más utilizados son de la marca Inmersión.

El transmisor InmersionRC (Figura 32) trabaja con frecuencias de entre 5740MHz y 5860MHz, tiene 7 canales con una separación de 20 MHz entre cada uno de ellos. Este transmisor, además de enviar la señal de vídeo, ofrece la opción de transmitir uno o dos canales de audio. Según las especificaciones del fabricante, la salida RF es de 600 mW (28 dBm +/- 1 dB), su peso es de 18 gramos, el voltaje de alimentación es de 6 a 25 voltios DC, tiene un consumo de potencia de 3 watt y el conector para la antena es del tipo SMA hembra.

4.3.6.3 Antenas

En el enlace de vídeo se van a utilizar antenas de polarización circular. Este tipo de polarización se utiliza en transmisión de vídeo en UAV's para evitar las pérdidas de señal por polarización cruzada entre el UAV y la estación base. (Quirós, 2015)

En el transmisor se utiliza una antena omni SpiroNet con polarización circular de mano izquierda (LHCP) de la empresa Immersion RC (Figura 34) puesto que tiene un patrón de radiación y ROE optimizada. Su diseño le da un mejor alcance y rendimiento en cualquier orientación en comparación con las antenas hoja de trébol (cloverleaf), además incluyen cables con mayor rigidez y una ganancia de 3 dB.



Figura 34. Antena omni SpiroNet con polarización circular del equipo transmisor

Fuente: http://www.hobbyrc.co.uk/content/images/thumbs/0002506_immersionrc-spiro-net-58ghz-lhcp-antenna-sma.jpeg

El complemento ideal para el receptor de video UNO5800 es la antena direccional tipo Patch SpiroNET con 13dBi de ganancia y un ancho de haz de 35° (Figura 35) debido a que se puede conectar directamente la parte posterior de la antena al receptor de video eliminando las pérdidas del cable. La antena direccional del receptor siempre apuntará en la dirección de vuelo del UAV para obtener el mayor alcance posible. Existen antenas omni y patch SpiroNET con polarización circular de mano derecha (RHCP) y de mano izquierda (LHCP).



Figura 35. Antena Patch SpiroNET 5,8 GHz LHCP del equipo receptor

Fuente: http://www.l-com.com/copyrighted_images/pattern_hg53-58-4911p.gif

Con los equipos seleccionados, el esquema del sistema de transmisión de video inalámbrico sería el siguiente:



Figura 36. Sistema de transmisión de video en tiempo real
Fuente: Elaborado por el autor

4.3.7 Cálculo del presupuesto de potencia del enlace

Después de realizar una selección adecuada de los equipos a utilizar para la transmisión de video, es importante asegurar la propagación o transmisión de la señal desde el RPA a la estación terrena.

Para esto se debe realizar el presupuesto de potencia del enlace punto a punto que consiste en el cálculo de todas las ganancias y pérdidas desde el transmisor, pasando por los cables, conectores, el espacio libre hasta llegar al receptor. Con la estimación de este cálculo se logra conseguir un mejor diseño del sistema de comunicación y utilizar de mejor manera los equipos adquiridos.

Se considera inicialmente una distancia de transmisión de 1 Km y la banda de frecuencia de operación de los equipos es de 5860 MHz.

Para determinar la viabilidad del enlace se utiliza la siguiente expresión:

$$SRx \text{ (dBm)} = PTx \text{ (dBm)} - \text{Pérdida Cable Tx (dB)} + \text{Ganancia antena Tx (dBi)} - \text{PEL (dB)} + \text{Ganancia antena Rx (dBi)} - \text{Pérdida Cable Rx (dB)}$$

Donde:

SRx (dBm) es la sensibilidad del receptor, PTx (dBm) es la potencia del transmisor. La ganancia de cada antena en el Tx y Rx se mide en dBi. La pérdida en el espacio libre PEL (dB) es la atenuación de la señal desde el transmisor hasta el receptor.

Considerando los equipos utilizados y la información anterior, se resumen los datos en la siguiente tabla para el presupuesto del enlace.

Tabla 7*Datos para determinar viabilidad del enlace en la frecuencia de 5860 MHz*

| DATOS PARA EL BALANCE DE POTENCIA DEL ENLACE | | |
|--|------------------|----------------|
| PARÁMETRO | RPA (TRANSMISOR) | GCS (RECEPTOR) |
| PTx (dBm) | 28 | - |
| SRx (dBm) | - | -90 |
| Antena (dBi) | 5,14 | 13 |
| Atenuación cable y conectores | 0,25 | 0,25 |

Fuente: Elaborado por el autor

El valor de la atenuación de los cables no se considera puesto que tanto el transmisor como el receptor se conectan directamente a las antenas y se considera una atenuación para los conectores de 0,25 dB por conector. Como se indicó anteriormente, en el lado del RPA (transmisor) se seleccionó una antena omnidireccional y para la GCS (receptor) una antena directiva.

Se deben estimar las pérdidas en el espacio libre a la frecuencia de 5860 MHz de acuerdo a la distancia de separación entre el RPA y la GCS. La pérdida en el espacio libre en dB se determina mediante la expresión:

$$PEL (dB) = 32,4 + 20 \cdot \log f (MHz) + 20 \cdot \log d (Km)$$

Si $f = 5860$ MHz y $d = 1$ Km

entonces:

$$PEL (dB) = 32,4 + 20 \cdot \log (5860) + 20 \cdot \log (1)$$

$$PEL (dB) = 107,76 \approx 108$$

Tabla 8*Pérdidas de espacio libre a 5860 MHz para diferentes distancias*

| Distancia (km) | Pérdida PEL (dB) |
|----------------|------------------|
| 0,1 | 88 |
| 0,3 | 97 |
| 0,5 | 102 |
| 1 | 108 |
| 3 | 117 |
| 5 | 122 |
| 7 | 125 |
| 8 | 126 |
| 10 | 128 |

Fuente: Elaborado por el autor

A continuación, se calcula la ganancia total de las antenas sumando los valores individuales de las ganancias de cada antena utilizada (en dBi):

Tabla 9
Ganancia total de las antenas

| Antena en el transmisor (RPA) dBi | Antena en el receptor (GCS) dBi | Ganancia total (dBi) |
|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| 5,14 | 13 | 18,14 |

Fuente: Elaborado por el autor

Luego, se estiman las pérdidas totales considerando las pérdidas de los cables, conectores y la pérdida en espacio libre:

Tabla 10
Pérdida total del enlace considerando cables, conectores y PEL

| Pérdidas cable y conector en el transmisor (RPA) dB | Pérdidas cable y conector en el receptor (GCS) dB | Pérdida en el espacio libre (dB) | Pérdida Total (dB) |
|---|---|----------------------------------|--------------------|
| 0,25 | 0,25 | 108 | 108,5 |

Fuente: Elaborado por el autor

Con los datos obtenidos se calcula el presupuesto del enlace de comunicación desde el RPA (transmisor) hasta la estación de control terrena (receptor).

Tabla 11
Presupuesto del enlace

| Potencia Tx (dBm) | (+) Ganancia Total antenas (dBi) | (-) Pérdida total (dB) | (=) Intensidad señal recibida (dB) | Sensibilidad del receptor (dBm) |
|-------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 28 | 18,14 | 108,5 | -62.36 | -90 |

Fuente: Elaborado por el autor

La intensidad de señal recibida es mejor que la sensibilidad del receptor. El margen del enlace, $-90 - (-62.36)$ es aproximadamente **-28 dB** que es suficiente para condiciones climáticas adversas.

En cambio, si se considera una distancia de **5 km**, las pérdidas es espacio libre aumentarían 14 dB y la intensidad de la señal recibida sería de -76.36 dB. En este caso el margen del enlace es aproximadamente **-14 dB** que en la práctica sería el límite de distancia para recibir video en la estación terrena.

Para una distancia de **8 km**, las pérdidas es espacio libre aumentarían 18 dB y la intensidad de la señal recibida sería de -80.36 dB. En este caso el margen del enlace es aproximadamente **-10 dB**. Con lo mencionado anteriormente se deduce que el sistema de transmisión de video teóricamente funcionaría hasta los 8 Km.

4.4 PRUEBAS DEL PROTOTIPO FUNCIONAL PARA VERIFICAR LA TRANSMISIÓN DE IMÁGENES TÉRMICAS EN TIEMPO REAL DESDE EL UAV/RPA A LA ESTACIÓN TERRENA.

Finalmente se ha obtenido un sistema de transmisión de video en tiempo real para visualizar las imágenes térmicas en la estación terrena. Es importante validar el sistema en conjunto; es decir el funcionamiento del UAV/RPA a diferentes alturas y condiciones, el funcionamiento de la cámara con sus distintas paletas de colores y el correcto funcionamiento de la transmisión de video en tiempo real. Es así que se ha considerado tomar cuatro parámetros: la altura del UAV/RPA (20 m - 50 m), paletas de colores de la cámara (WhiteHot - Fusion), antenas (omni - patch) y la hora del día (9 am - 7pm) para plantear varios escenarios de pruebas y poder concluir las mejores opciones de funcionamiento del prototipo.

4.4.1 Prueba 1.

4.4.1.1 Descripción de la prueba

La primera prueba consiste en verificar el funcionamiento de todas las paletas de colores de la cámara térmica. La prueba se realizó en exteriores tomando como imagen referencial a una persona. Se utiliza la aplicación FLIR Vue Pro instalada en un Smartphone o Tablet para el manejo de las paletas y opciones adicionales de la cámara. (Figura 37)

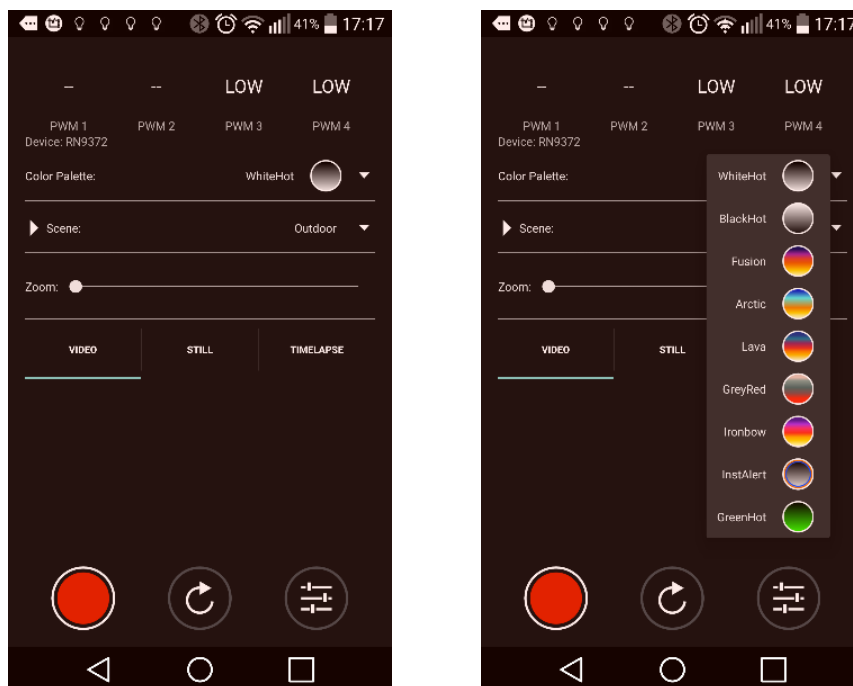


Figura 37. App Flir Vue Pro para configurar a través de bluetooth.
Fuente: Elaborado por el autor

4.4.1.2 Resultado

Los resultados esperados de esta primera prueba permitirán observar las diferentes paletas con sus colores característicos identificando las tonalidades para las diferentes temperaturas de los objetos.

En las imágenes a continuación se pueden ver cada una de las nueve paletas de la cámara Flir Vue Pro.

Se han obtenido los resultados esperados al poder diferenciar la imagen de una persona con las diferentes tonalidades de temperatura (Figura 38). Se comprobó el correcto funcionamiento de la cámara en exteriores.



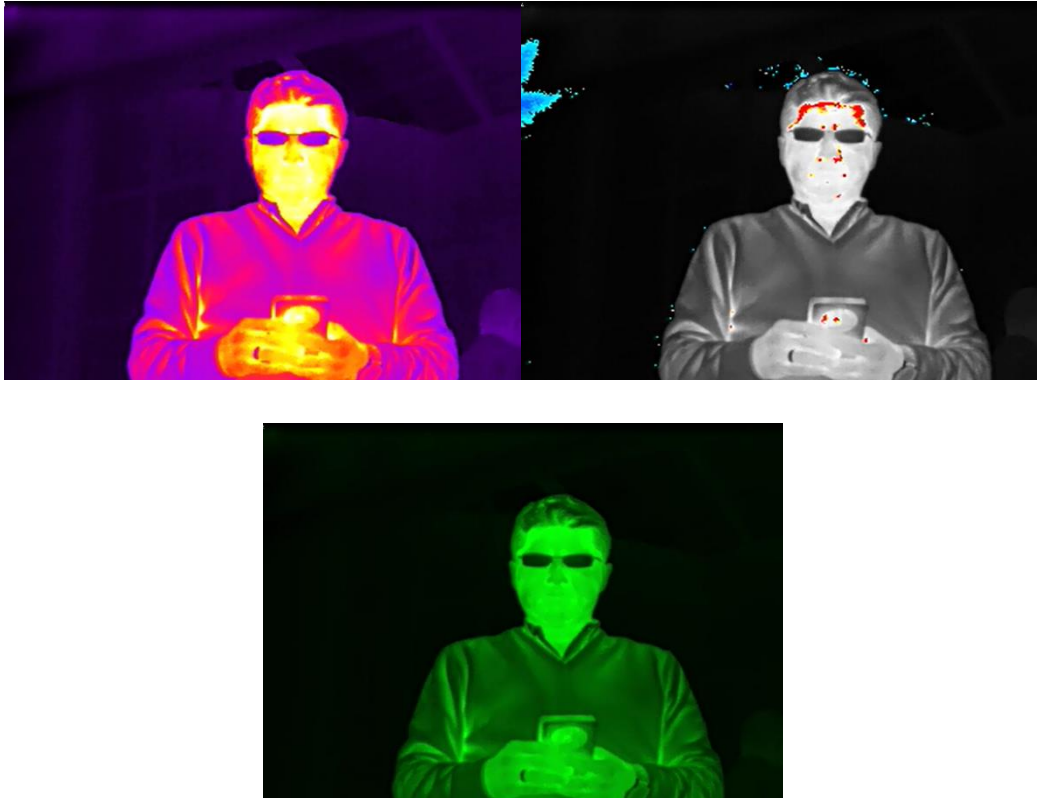


Figura 38. Diferentes paletas de colores de la cámara térmica FLIR VUE PRO
Fuente: Elaborado por el Autor

4.4.2 Prueba 2.

4.4.2.1 Descripción de la prueba

La prueba consiste en transmitir imágenes térmicas de personas y animales desde el UAV/RPA a la estación terrena (GCS), para diferenciar sus siluetas o perfiles. Las pruebas se realizaron en exteriores, en la ciudad de Latacunga, en una localidad llamada Hacienda Tilipulo (Figura 39), la misma posee una pista de aerodelismo y presta las facilidades necesarias para realizar sobrevuelos con UAV's/RPA's puesto que es una zona amplia y despoblada. Los parámetros utilizados fueron:

Tabla 12
Parámetros para la prueba 2

| ANTENA TX/RX | ALTURA | PALETA | HORA |
|--------------|--------|----------|-------|
| Dipolo | 20 m | BlackHot | 17:00 |

Fuente: Elaborado por el autor

4.4.2.2 Resultado

Se receptaron en la pantalla de la estación terrena varias imágenes de personas y animales, se observó que con la utilización de antenas dipolo y la paleta BlackHot de la cámara, la transmisión

de imágenes oscilaba, la calidad de las imágenes no era adecuada puesto que las personas no se podían diferenciar fácilmente del área de cobertura (Figura 40); sin embargo, animales como las vacas podían ser distinguidas (Figura 41).



Figura 39. Hacienda Tilipulo y pista de aeromodelismo
Fuente: Google Maps

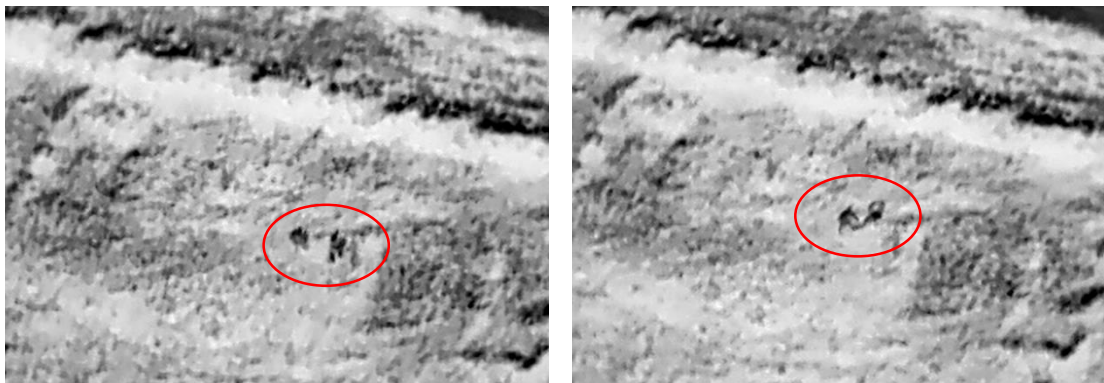


Figura 40. Imágenes de personas obtenidas en la estación terrena
Fuente: Elaborado por el Autor

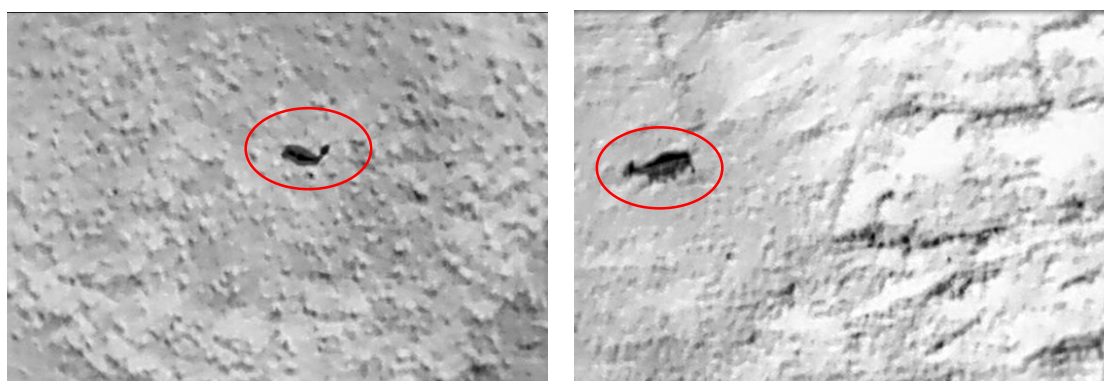


Figura 41. Imágenes de animales (vacas) obtenidas en la estación terrena
Fuente: Elaborado por el Autor

4.4.3 Prueba 3.

4.4.3.1 Descripción de la prueba

La prueba consiste en transmitir imágenes térmicas de objetos desde el UAV/RPA a la estación terrena (GCS), para diferenciar sus siluetas o perfiles. Las pruebas se realizaron en exteriores, en un estacionamiento de la Universidad de las Fuerzas Armadas en la ciudad de Latacunga. Se modificó el sentido del lóbulo de radiación cambiando el direccionamiento de las antenas para verificar el efecto en la calidad de las imágenes. Los parámetros utilizados fueron:

Tabla 13

Parámetros para la prueba 3

| ANTENA TX/RX | ALTURA | PALETA | HORA |
|---------------|-------------|--------|-------|
| Omni SpiroNet | 20 m y 40 m | Fusion | 14:00 |

Fuente: Elaborado por el autor

4.4.3.2 Resultado

Se observó en la pantalla de la estación terrena las diferentes tonalidades de temperaturas de imágenes de personas y automóviles a una altura de 20 metros, en las mismas se podían identificar a las personas como puntos de color amarillo y a los automóviles con sus siluetas y temperaturas (Figura 42).

A una altura de 40 metros, a las personas se las identifica como puntos más pequeños de color amarillo y los automóviles son visibles a través de sus siluetas (Figura 43). En estas condiciones se procedió a cambiar la dirección de la antena del receptor y se observó que afectaba directamente en la calidad de las imágenes como se puede apreciar en la figura 44.

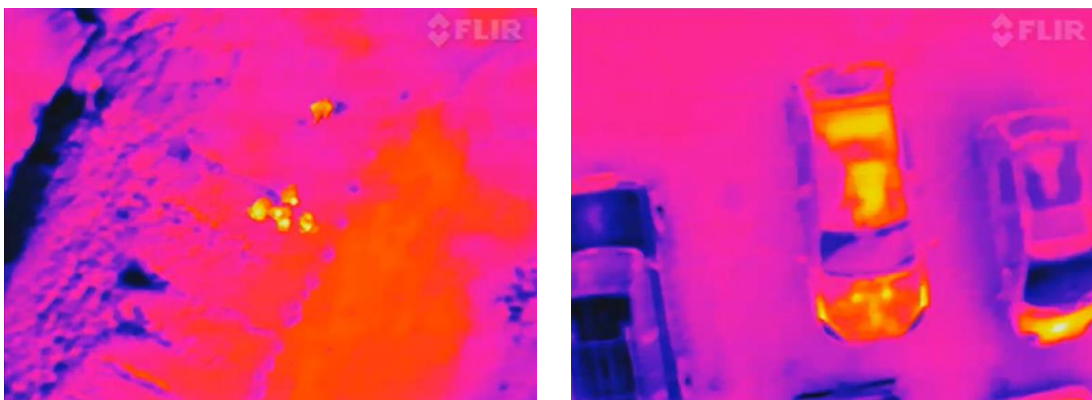


Figura 42. Imágenes térmicas de personas y automóviles a 20 m de altura

Fuente: Elaborado por el Autor

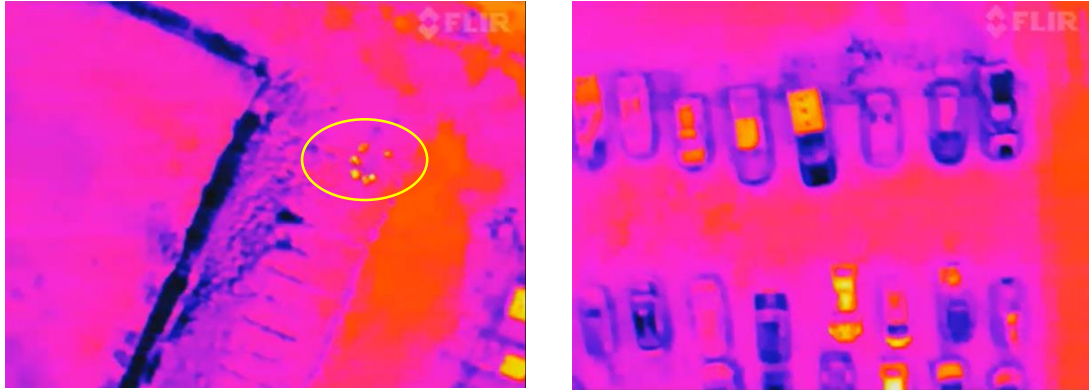


Figura 43. Imágenes térmicas de personas y automóviles a 40 m de altura
Fuente: Elaborado por el Autor

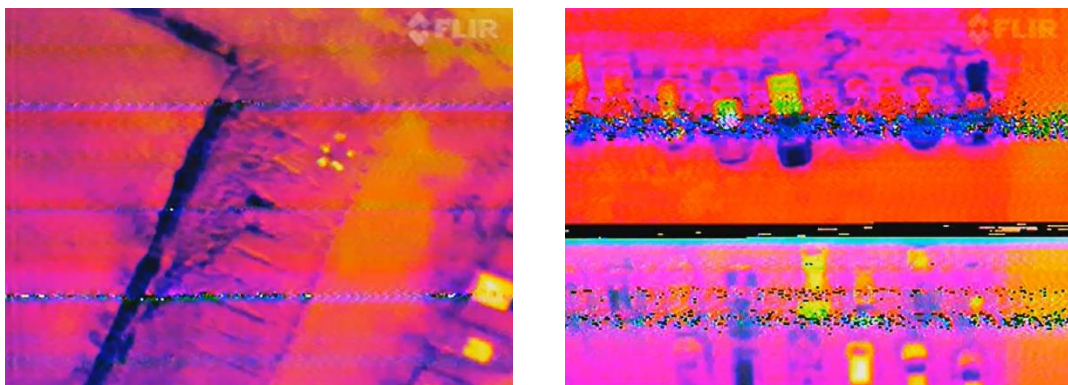


Figura 44. Imágenes térmicas de personas y automóviles a 40 m de altura y lóbulos de radiación alejados
Fuente: El Autor

4.4.4 Prueba 4.

4.4.4.1 Descripción de la prueba

Esta prueba consiste en verificar la calidad de las imágenes recibidas en la estación terrena (GCS) y transmitidas desde el UAV/RPA colocado a dos diferentes alturas y con diferentes paletas de colores, utilizando una antena tipo patch en el receptor con ganancia de 13 dBi y una antena omni SpiroNet en el transmisor. La prueba se realizó en exteriores. Los parámetros utilizados fueron:

Tabla 14
Parámetros para la prueba 4

| ANTENA TX/RX | ALTURA | PALETA | HORA |
|--------------|-------------|-----------------|-------|
| Omni / Patch | 20 m y 40 m | WhiteHot/Fusion | 17:00 |

Fuente: Elaborado por el autor

4.4.4.2 Resultado

Utilizando la paleta WhiteHot, se observó claramente en la pantalla de la estación terrena las siluetas de las personas en color blanco a una altura de 20 metros; sin embargo, a 40 metros de altura las siluetas de las personas no estaban bien definidas (Figura 45).

Si se utiliza la paleta Fusión a 20 metros de altura, se pueden apreciar las siluetas de las personas, a 40 metros de altura, las personas son puntos pequeños que podrían confundirse con cualquier objeto de tamaño similar (Figura 46). En términos generales, la utilización de la antena patch en el receptor y la omni en el transmisor permiten obtener imágenes de buena calidad. La paleta de color WhiteHot tiene una ligera ventaja al momento de diferenciar objetos a mayores alturas.

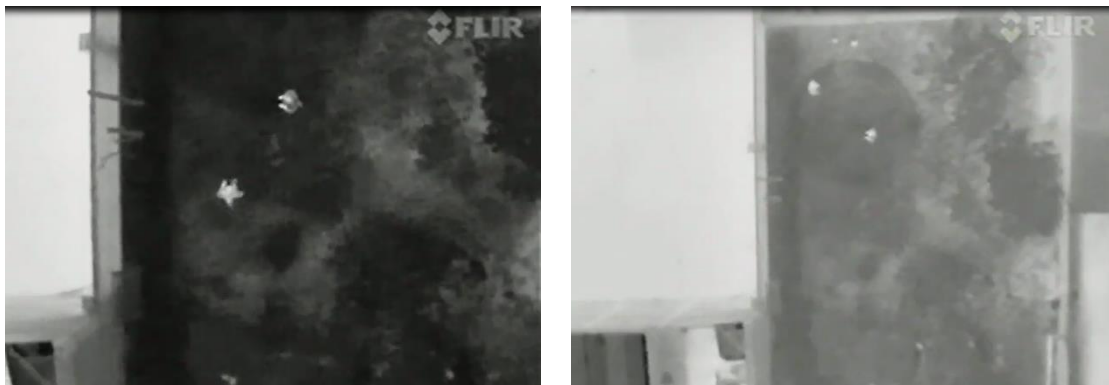


Figura 45. Imágenes térmicas de personas a 20 m y 40 m de altura con paleta WhiteHot
Fuente: Elaborado por el Autor

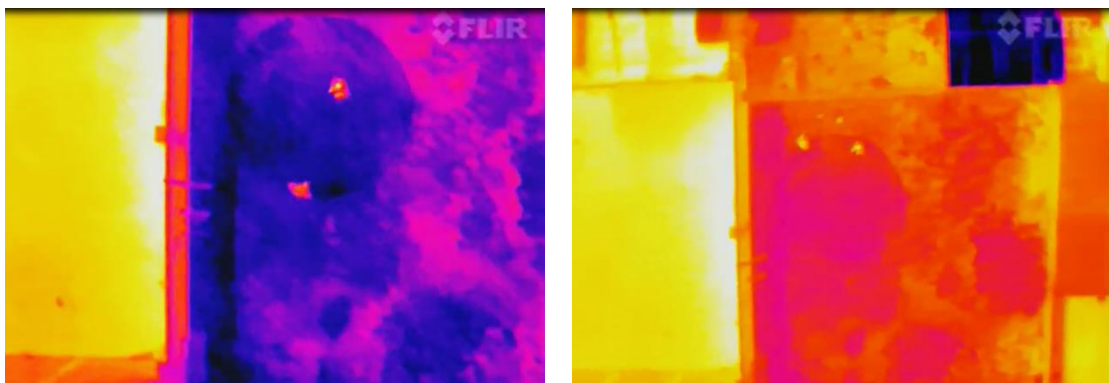


Figura 46. Imágenes térmicas de personas a 20 m y 40 m de altura con paleta Fusion
Fuente: Elaborado por el Autor

4.4.5 Prueba 5.

4.4.5.1 Descripción de la prueba

La prueba consiste en transmitir imágenes térmicas desde el UAV/RPA a la estación terrena (GCS), de personas y de un pequeño fuego controlado, para diferenciar las temperaturas de los cuerpos y siluetas, utilizando dos paletas de diferentes colores y para verificar la calidad del

video en la estación terrena. Las pruebas se realizaron en exteriores con la particularidad de que fue realizada en horas de la noche. Los parámetros utilizados fueron:

Tabla 15
Parámetros para la prueba 5

| ANTENA TX/RX | ALTURA | PALETA | HORA |
|--------------|--------|-----------------|-------|
| Omni / Patch | 20 m | WhiteHot/Fusion | 19:00 |

Fuente: Elaborado por el autor

4.4.5.2 Resultado

Utilizando la paleta WhiteHot, se observó en la pantalla de la estación terrena las siluetas del fuego en color blanco y de las personas en color plomo. Con la paleta Fusión, el fuego tiene un color blanco-amarillo y las personas se muestran en colores naranja-amarillo (Figura 47). Esta prueba permite observar claramente las diferencias de temperatura de los cuerpos; no obstante, las siluetas no son muy evidentes. A alturas de alrededor de 10 metros, se observan claramente las diferencias de temperatura del fuego con respecto a otros objetos (Figura 48).

El sistema de transmisión de video en tiempo real permite observar las diferencias de temperatura en la estación terrena sin interrupciones y con imágenes de buena calidad.

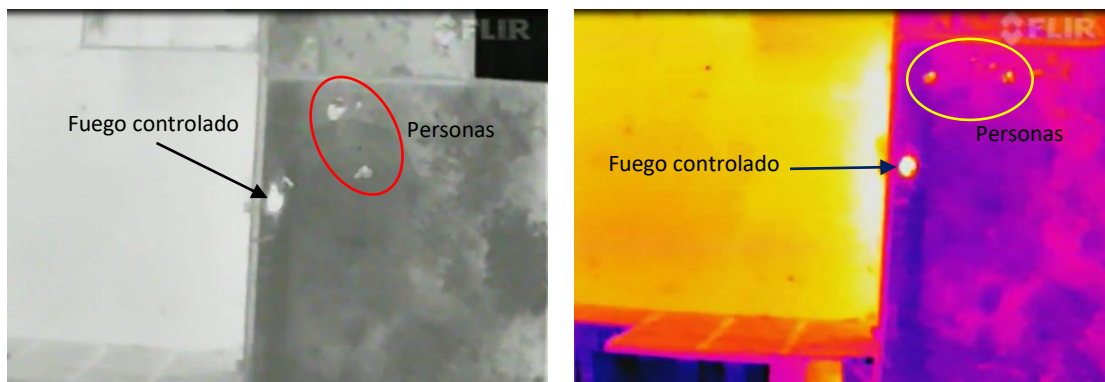


Figura 47. Imágenes térmicas de personas y fuego controlado a 20 m de altura en la noche
Fuente: Elaborado por el Autor

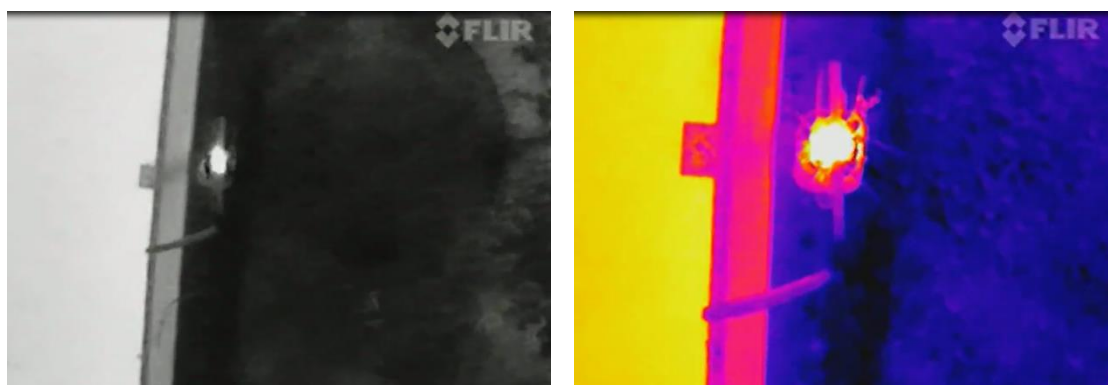


Figura 48. Imágenes térmicas de fuego controlado transmitidas del UAV/RPA a la estación terrena
Fuente: Elaborado por el Autor

4.4.6 Prueba 6.

4.4.6.1 Descripción de la prueba

La prueba consiste en transmitir imágenes térmicas desde el UAV/RPA a la estación terrena (GCS), de una persona y de un pequeño fuego controlado, para observar las gamas de las temperaturas de los cuerpos y sus siluetas, utilizando todas las paletas de colores que posee la cámara térmica. Las pruebas se realizaron en exteriores a una altura de 10 metros en horas de la noche. El sistema de transmisión de video utilizó en el transmisor una antena omni y en el receptor una antena tipo patch. Los parámetros utilizados fueron:

Tabla 16
Parámetros para la prueba 6

| ANTENA TX/RX | ALTURA | PALETA | HORA |
|---------------------|---------------|-----------------|-------------|
| Omni / Patch | 10 m | WhiteHot/Fusion | 20:00 |

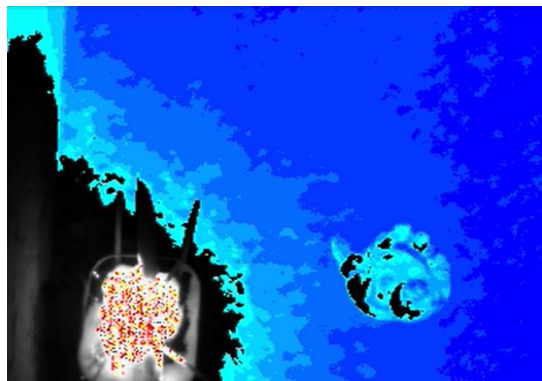
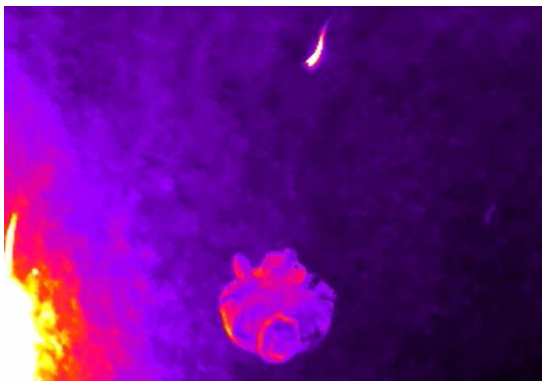
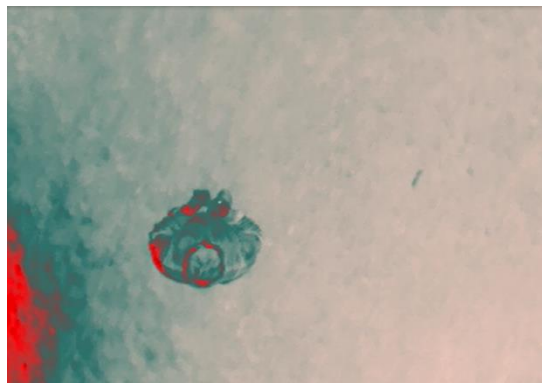
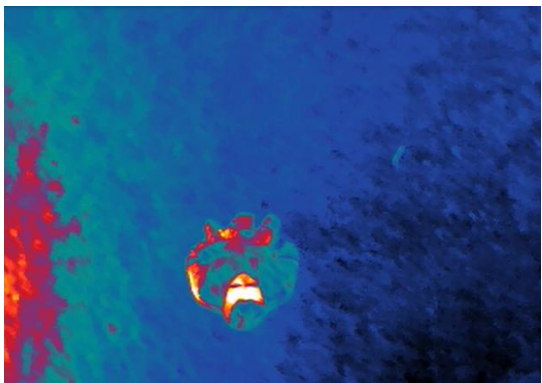
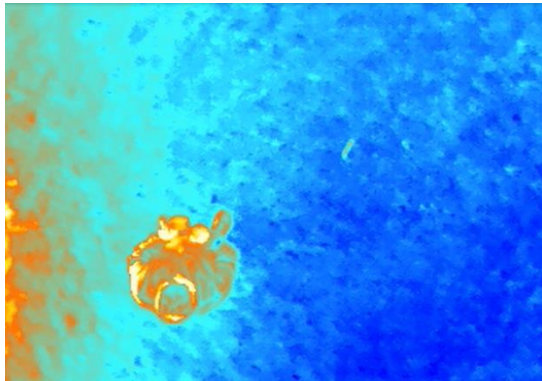
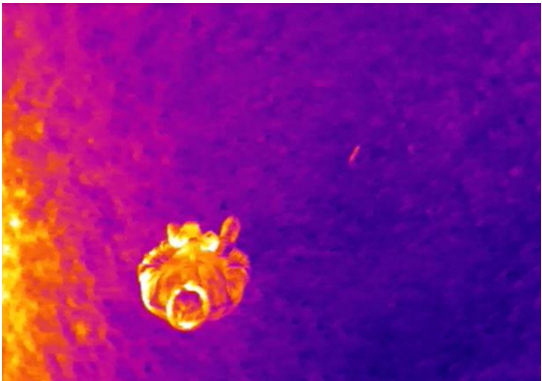
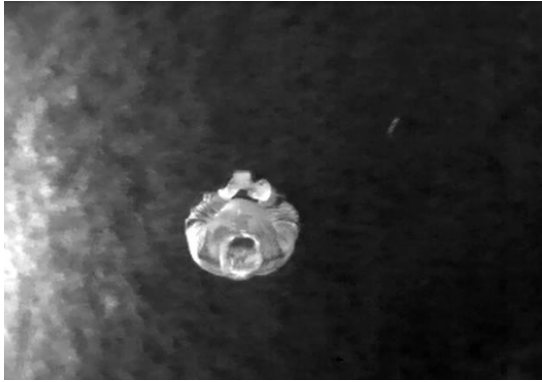
Fuente: Elaborado por el autor

4.4.6.2 Resultado

En la pantalla de la estación terrena, se observaron las diferentes gamas de temperaturas, las siluetas del fuego controlado y de la persona para cada una de las paletas seleccionadas. A alturas de alrededor de 10 metros, esta prueba permite observar claramente las diferencias de temperatura de los cuerpos, así como la silueta de la persona y del fuego. De las paletas seleccionadas, las paletas WhiteHot, BlackHot, Fusion y GreenHot permiten identificar la silueta de un objeto, en este caso el de una persona (Figura 49).

El sistema de transmisión de video en tiempo real, permite observar los diferentes colores de los objetos con cada una de las paletas seleccionadas en la estación terrena, sin interrupciones y con imágenes de buena calidad.

En base a las pruebas ejecutadas se analizó el comportamiento del UAV/RPA a diferentes alturas y configuraciones, se realizó la selección de las paletas y configuración de la cámara térmica por medio de la aplicación Flir Vue Pro vía bluetooth, se comprobó el funcionamiento del sistema de transmisión de video en tiempo real con varias opciones de antenas; esto permitió demostrar el funcionamiento de todo el conjunto con la implementación de un sistema de comunicación inalámbrico entre un UAV/RPA con su estación terrena para la transmisión de imágenes térmicas en tiempo real y su utilización en el control de incendios.



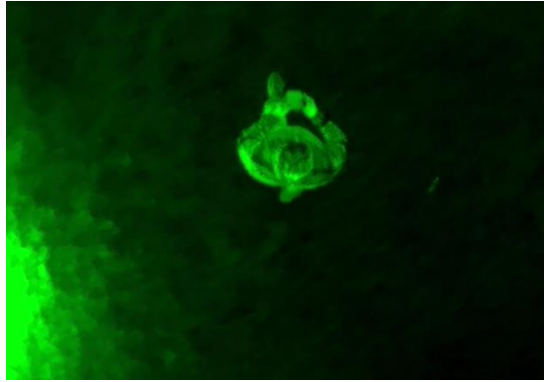


Figura 49. Imágenes térmicas de una persona y fuego controlado a 10 m de altura utilizando diferentes paletas
Fuente: Elaborado por el Autor

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Con este caso de estudio se ha implementado un sistema de comunicación inalámbrico con el objetivo de transmitir imágenes térmicas en tiempo real desde un UAV/RPA a una estación terrena, para lo cual se ha estudiado una amplia gama de drones que permitan instalar una cámara térmica de excelentes prestaciones y peso ligero, así como equipos de comunicación inalámbricos comerciales adecuados para UAV's/RPA's y se ha seleccionado el equipo adecuado para la fase de pruebas e implementación.
- Como resultado del análisis de las principales características de los UAV/RPA, se ha sugerido la utilización del drone Phantom 3 Professional, puesto que presenta la mejor relación costo/beneficio a más de contar con la transmisión de video inalámbrico desde una cámara 4k hasta una distancia teórica de 5 km; sin embargo, la tecnología de los UAV/RPA se desarrolla vertiginosamente brindando en la actualidad nuevos modelos con sistemas anticolidión, mayor autonomía, reconocimiento y seguimiento a objetos; lo que permitirá seguir desarrollando nuevas aplicaciones.
- El hecho de que todos los cuerpos emitan calor, hace que la termografía tenga aplicaciones casi infinitas. Para personal especializado, la inspección termográfica aérea es de suma utilidad e importancia, puesto que permite obtener ángulos de visión y un punto de vista nuevo, además de realizar inspecciones a mayor velocidad suponiendo un importante ahorro de costos de horas de trabajo y el monitoreo de todas las zonas de interés; es justamente donde la cámara Flir Vue Pro cumple con los requerimientos para ser utilizada en varias aplicaciones como el control de incendios.
- La transmisión de datos desde un UAV/RPA a una estación terrena, adquiere mayor importancia cuando se desea observar información en tiempo real como video o imágenes; por tal razón en base a las pruebas realizadas del sistema de comunicación inalámbrico con equipos de la marca Inmersión, antenas tipo SpiroNet y patch en la banda de frecuencia de 5,8 GHz, se concluye que el sistema de comunicación inalámbrico es confiable, puesto que permitió visualizar video en tiempo real sin interrupciones con imágenes térmicas de buena calidad.
- A fin de validar un prototipo, es importante realizar diferentes pruebas de funcionamiento, es así que las pruebas funcionales ejecutadas permitieron verificar el trabajo de cada parte individual y del sistema en conjunto. De las pruebas se concluye que el sistema para un óptimo funcionamiento de estar formado por: antena tipo SpiroNet en el transmisor, antena tipo patch en el receptor, altura del UAV/RPA

alrededor de los 20 metros y paletas WhiteHot, BlackHot, Fusion y GreenHot a fin de identificar siluetas y colores de diferentes objetos; información necesaria por ejemplo en el control de incendios.

- En base al análisis realizado en el cálculo del presupuesto del enlace, se puede concluir que, en la práctica el límite de distancia para recibir video infrarrojo en tiempo real en la estación terrena es de 5 Km aproximadamente y en la teoría los 8 Km puesto que, en esta última distancia, el margen del enlace es alrededor de -10 dB.
- Como resultado de la investigación en este caso de estudio, se generó un artículo científico referente a la implementación de un sistema de comunicación inalámbrico entre un UAV/RPA con su estación terrena para la transmisión de imágenes térmicas en tiempo real y su utilización en el control de incendios.

6.2. Recomendaciones

- La visualización de video e imágenes debe ser lo más estable posible y sin movimientos. El piloto automático del UAV/RPA de alguna manera estabiliza a la aeronave; sin embargo, al momento de transmitir video, se puede apreciar pequeños movimientos en la imagen. A fin de poder observar imágenes fijas, se recomienda acoplar o implementar gimbals o cardan al dron permitiendo mantener la imagen muy estable, a pesar de que el dron se mueva.
- Para obtener un mayor campo de visión, se pueden utilizar cámaras térmicas Flir Vue Pro con resolución de 336 x 256 y lente de 6,8 mm (45° x 35°). Si se desea tener mayor nitidez, se puede optar por cámaras con resolución de 640 x 512 y lentes de 9 mm (69° x 56°), 13 mm (45° x 37°) y 19 mm (32° x 26°). La selección de las paletas de colores se puede realizar desde el radio control RC de la estación terrena sin tener que bajar el dron para reconfigurarlo; se recomienda utilizar el cable accesorio para conectar la cámara al piloto automático Pixhawk.
- Se recomienda no obstaculizar con ningún objeto la antena tipo patch del receptor, puesto que su lóbulo de radiación es directivo y puede afectar a la calidad del video. A fin de ampliar la cobertura del sistema de transmisión de video inalámbrico, se puede acoplar un sistema de seguimiento de antenas (antenna tracking) para apuntar al UAV/RPA de manera automática y obtener imágenes o videos en cualquier dirección.
- En base a las pruebas realizadas, es recomendable que existan al menos dos personas capacitadas para el manejo del sistema completo, considerando que se debe realizar el control de vuelo y telemetría de la aeronave, así como el control de la transmisión del video en tiempo real a la estación terrena.

BIBLIOGRAFÍA

- Ackerman, E. (14 de octubre de 2014). Recuperado el 25 de 1 de 2015, de <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/aerial-robots/robot-teams-practice-for-japan-volcano-monitoring>
- Arko Lucieer, P. J.-T. (11 de Noviembre de 2014). *MDPI*. Recuperado el 22 de Enero de 2016, de <http://www.mdpi.com/2072-4292/6/11/11051/htm>
- Armas Ramírez, P. H. (17 de Mayo de 2006). *Repositorio Digital ESPE*. Recuperado el 11 de Enero de 2015, de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/289/6/T-ESPE-014364.pdf>
- Association, A. I. (10 de Mayo de 2013). <http://www.aia-aerospace.org>. Recuperado el 30 de Septiembre de 2014, de http://www.aia-aerospace.org/assets/AIA_UAS_Report_small.pdf
- Díaz García-Cervigón, J. J. (Junio de 2015). *Universidad Complutense de Madrid*. Recuperado el 25 de Enero de 2016, de http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- droneadventures.org. (2014). <http://droneadventures.org/>. Recuperado el 12 de Enero de 2015, de <http://droneadventures.org/missions/>
- FLIR® Systems, Inc. (2016). *FLIR Systems SMALL UNMANNED AERIAL SYSTEMS*. Recuperado el 30 de Enero de 2016, de <http://www.flir.com.mx/suas/content/?id=70728>
- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid - Dirección General de la Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid. (2015). *Los drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil*. Recuperado el 15 de 12 de 2015, de <http://www.icoitma.com/imagenes/imagenes-noticias/id934A.pdf>
- Gema Sánchez Jiménez, M. M. (Mayo de 2013). www.infodefensa.com. Recuperado el 3 de Octubre de 2014, de http://www.infodefensa.com/wp-content/uploads/Vehiculos_aereos_no_tripulados_en_Latam.pdf
- <http://spectrum.ieee.org/>. (29 de Mayo de 2013). *Automatización/Robótica/Robots aéreos*. Obtenido de <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/aerial-robots/drone-adventures-uses-uavs-to-help-people-make-the-world-a-better-place>
- jb/ar. (2 de Marzo de 2015). *Noticias. Los Andes*. Recuperado el 8 de Abril de 2015, de <http://www.andes.info.ec/es/noticias/drones-tecnologia-3d-comision-transito-ecuador-investigara-accidentes-carreteras.html>
- Joint Air Power Competence Centre. (January de 2010). *JAPCC Strategic Concept of Employment for UAS in NATO*. Recuperado el 30 de Enero de 2016, de http://www.japcc.org/wp-content/uploads/UAS_CONEMP.pdf
- Lizarzaburo, G. (9 de Noviembre de 2014). *expreso*. Recuperado el 1 de 2 de 2015, de <http://expreso.ec/expreso/plantillas/nota.aspx?idart=7287078&idcat=19308&tipo=2>

Mora, M. O. (2015). Tipología de aeronaves pilotadas por control remoto. En *Los Drones y sus aplicaciones en la ingeniería civil* (pág. 242). Madrid: Gráficas Arias Montano, S.A. 28935.

Noticias, *El UNiverso* . (9 de 11 de 2014). (El Universo) Recuperado el 18 de 12 de 2014, de <http://www.eluniverso.com/noticias/2014/11/09/nota/4199391/drones-fabricacion-nacional>

ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL. (2011). *Circular 328, Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS)*. Quebec: ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL.

Pantoja, J. (s.f.). <http://www.galapagosuav.org/>. Recuperado el 1 de 2 de 2014, de <http://www.galapagosuav.org/site/index.php?code=1>

Paspuel, W. (6 de Diciembre de 2014). *Actualidad, El Comercio*. (El Comercio) Recuperado el 5 de 1 de 2015, de <http://www.elcomercio.com.ec/actualidad/tecnologia-drones-plantaciones-agricultura-ecuador.html>

Quirós, G. C. (Enero de 2015). *repositorio.uam.es*. Obtenido de https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/663682/Crespo_Quiros_Guadalupe_pfc.pdf?sequence=1

Review, M. T. (23 de abril de 2014). *10 Breakthrough Technologies 2014*. Recuperado el 11 de 11 de 2014, de <http://www.technologyreview.com/featuredstory/526491/agricultural-drones/>

Team, A. D. (2016). *ardupilot.org*. Obtenido de <http://ardupilot.org/copter/docs/common-choosing-a-ground-station.html#common-choosing-a-ground-station>

Termografía Aplicada, S. (s.f.). <http://www.apliter.com>. (GironaLabs) Recuperado el 11 de 02 de 2016, de <http://apliter.com/articulo/fundamentos-fisicos/radiacion-termica-y-radiacion-infrarroja>