



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

APLICACIÓN DE LAS PLATAFORMAS NO TRIPULADAS EN REDES DE
COMUNICACIÓN.

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingenieros en Redes y
Telecomunicaciones

Profesor Guía
MSc. Diego Fabián Paredes Páliz

Autores
Evelyn Aidee Andrango Untuña
Luis Daniel Marrasquín Bermeo

Año
2016

DECLARACIÓN PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con los estudiantes, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

MSc. Diego Fabián Paredes Páliz
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones
CI. 060301414-3

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE LOS ESTUDIANTES

“Declaramos que este trabajo es original, de nuestra autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Evelyn Aidee Andrango Untuña
CI. 171490512-0

Luis Daniel Marrasquín Bermeo
CI. 080280629-9

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi amado Dios por ser mi mejor amigo, mi apoyo y guía en todo el trayecto de mi vida. A mi familia por enseñarme el valor del amor, perseverancia y lucha, a mi amigo y compañero de tesis Luis Daniel que gracias a él, sé que es duro trabajar en equipo, pero cuando nos ponemos de acuerdo lo podemos lograr, a mis amigos y personas que en algún instante de mi vida llegaron a formar una parte importante, ya que de ellos aprendí y crecí como persona.

Evelyn Aidee Andrango Untuña

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a mi madre Margarita, que por medio de todo su apoyo, sacrificio y esfuerzo he logrado alcanzar mis metas. A Evelyn Aidee, puesto que su aporte y colaboración ha sido fundamental para la culminación de este proyecto. A mi familia, compañeros y amigos que han sido parte de esta etapa importante de mi vida. A nuestro tutor de tesis, Ingeniero Diego Paredes, que gracias a su contribución hemos logrado salir adelante en la elaboración de este trabajo.

Luis Daniel Marrasquín Bermeo

DEDICATORIA

A mis padres Marina y Luis que con su ejemplo he aprendido a luchar por lo que sueño y anhelo, a mis hermanas mi Pequeño, Nini y Giselita, que con su amor incondicional me han enseñado el significado de la frase “todas para una y una para todas”. A mi hermoso sobrino Julián que con sus ocurrencias, sé que se puede llegar a ser feliz con tan poco y a Verónica, Irene y Elisa, que me ayudaron a levantarme en momentos en que mis fuerzas ya no dieron más.

Evelyn Aidee Andrango Untuña

DEDICATORIA

A mi padre Luis Daniel, que a pesar de no estar presente en esta fase de mi vida, estoy seguro que desde el cielo está orgulloso de saber que estoy alcanzando mis sueños. A mi madre Margarita Del Rocío, quien ha sido el pilar más grande he tenido en todos estos años, aquella persona que me enseñó que con trabajo y perseverancia se obtiene el éxito en cada paso que damos, quien no dejó de creer en mí durante mis buenos y malos momentos, y por su incondicional apoyo y confianza nunca la decepcionaré.

Luis Daniel Marrasquín Bermeo.

RESUMEN

Los Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV), se han desarrollado de manera semiautónoma y autónoma desde su despegue hasta su aterrizaje, debido a las diferentes aplicaciones civiles que cubren escenarios como inspección de infraestructura, agricultura, inspección de radiación en industrias nucleares, etc. Es por esto, que existe gran interés tanto en el mercado industrial aeronáutico así como en instituciones educativas, por continuar con su desarrollo e innovación.

En este trabajo de titulación se presenta un aporte sobre las aplicaciones de las plataformas no tripuladas en redes de comunicación dirigidas al ámbito civil, así como una visión general de las tecnologías inalámbricas implicadas al usar estos vehículos no tripulados; además, este trabajo forma parte del proyecto que está emprendiendo la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias de la Universidad de las Américas, a fin de conocer las principales ventajas y beneficios de los UAV, así como los problemas, límites y privaciones que poseen hoy en día y que se irán solucionando con futuras investigaciones tecnológicas.

Se definen los principales componentes de cómo están constituidos los UAV, además de los inconvenientes que tienen respecto a las limitaciones de peso y volumen de los mecanismos electrónicos a bordo; igualmente, se indican los tipos de autonomía que poseen los Vehículos Aéreos No Tripulados, ya que estos pueden llegar a ser dependientes de las estaciones base; por último, se mencionan las limitaciones de operación que tienen en el espacio aéreo debido a las regulaciones de aviación civil que posee cada país.

Por lo tanto, este proyecto abarca 4 puntos importantes sobre los UAV, que van desde su desarrollo hasta cómo han evolucionado en la actualidad, los sistemas de comunicaciones utilizados en estas plataformas, las aplicaciones civiles que obtienen con su uso, para finalmente detallar la integración de las redes de comunicaciones con las aeronaves no tripuladas.

ABSTRACT

Unmanned Aerial Vehicles (UAV) have been developed semiautonomous and autonomous from the moment of their departure to land, due to the different stages in civilian applications like infrastructure inspection, agriculture, radiation inspection in nuclear industries, and others. For this reason, there is a great interest in the aeronautical industrial market and educational institutions to continue with development and innovation.

This project presents a contribution of the applications of unmanned platforms in communication networks, as well as an overview of wireless technologies involved in using these UAV. Furthermore, this job is part of the project that is undertaking the Faculty of Engineering and Agricultural Sciences at the Universidad de las Americas, in order to know the main advantages and benefits of UAV; problems, limits and deprivations that have today and how they will be solved with future technological research.

The main components of UAV, problems related to weight and volume limitations of electronic devices on board, are defined in this project. Also, the types of autonomy of the Unmanned Aerial Vehicles are indicated, because these can become dependents of base stations; finally, the operating limitations on airspace due to civil aviation regulations that has each country, are mentioned.

Therefore, this project has four important points about UAV; development and evolution, communications systems used in these platforms, civil applications and the integration of communications networks with unmanned aircraft.

ÍNDICE

1. CAPÍTULO I	2
MARCO TEORICO Y REFERENCIAL DE LOS VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS	2
1.1 Antecedentes históricos y evolución de los UAV	2
1.2 Estado del arte	5
1.2.1 Conceptos aerodinámicos	5
1.2.1.1 Principales fuerzas que intervienen en un UAV	5
1.2.2 Tipos de Vehículos aéreos no tripulados.....	6
1.2.3 Diferencias entre los tipos de rotores de un UAV	8
1.2.4 Comparación entre UAV de ala fija y cuadricóptero	10
1.2.4.1 Ventajas y desventajas de un VANT de ala fija.....	11
1.2.4.2 Ventajas y desventajas de un Cuadricóptero	12
1.3 Clasificación de los Vehículos Aéreos No Tripulados	14
1.3.1 VANT de Ala Fija y Rotativa	14
1.3.1.1 Ala Fija	14
1.3.1.2 Ala Rotativa	16
1.3.2 VANT Tácticos.....	17
1.3.3 VANT Estratégicos	18
1.4 Legislación vigente	18
2. CAPÍTULO II.....	23
SISTEMAS DE COMUNICACIÓN UTILIZADOS EN LOS UAV.....	23
2.1 Sistemas de Aeronaves No Tripuladas.....	23
2.1.1 Descripción.....	23
2.2 Descripción de los componentes tecnológicos de los Sistemas de Aeronaves no Tripuladas.....	25
2.2.1 Principales componentes de un UAV	26

2.2.1.1	Controlador de vuelo para VANT	27
2.2.1.2	Sensores	28
2.2.1.2.1	Sensores para equilibrio del vuelo	28
2.2.1.2.1.1	Unidad de Medición Inercial (UMI).....	30
2.2.1.2.1.1.1	Acelerómetro.....	31
2.2.1.2.1.1.2	Giroscopio.....	31
2.2.1.2.1.1.3	Magnetómetro	31
2.2.1.2.2	Sensores para medición de alturas.....	32
2.2.1.2.2.1	Barómetros.....	32
2.2.1.2.3	Sensores GPS - Sistemas de Posicionamiento Global	33
2.2.1.2.4	Sensores Sonares	33
2.2.1.2.5	Sensores de Velocidad de Aire.....	34
2.2.1.3	Motores	35
2.2.1.4	Batería.....	36
2.2.2	Componentes que se utilizan en una Estación Terrena	37
2.3	Arquitectura de un sistema de reconocimiento aéreo por medio del VANT.....	38
2.4	Sistemas de Comunicaciones.....	41
2.4.1	Enlace de Telemetría.....	41
2.4.2	Enlace de datos	42
3.	CAPÍTULO III.....	46
	APLICACIONES Y AMBIENTES DE DESARROLLO DE LOS VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS	46
3.1	Aplicaciones civiles de los VANT	48
3.1.1	Inspección de infraestructuras	48
3.1.1.1	Inspección de líneas de transmisión de alta y media tensión....	49
3.1.1.2	Sistemas de Energía Eólicos y Fotovoltaicos.....	50
3.1.1.2.1	Turbinas Eólicas	50
3.1.1.2.2	Paneles de energía fotovoltaicos	50
3.1.1.3	Oleoductos y gasoductos	50
3.1.1.4	Obra civil	51

3.1.2	Cartografía y Fotogrametría	51
3.1.2.1	Reajuste y comprobación de datos urbanos y trabajos en centros históricos.....	53
3.1.2.2	Control y monitoreo continuo de zonas con reservas naturales.	54
3.1.2.3	Control de técnicas de reasentamiento de la ciudad	55
3.1.3	Patrullaje aéreo.....	55
3.1.3.1	Vigilancia terrena.....	55
3.1.3.2	Vigilancia marítima	56
3.1.3.3	Vigilancia de zonas fronterizas	57
3.1.4	Reportaje aéreo.....	57
3.1.5	Inspección y recolección de información en desastres naturales .	58
3.1.6	Aplicaciones de los UAV en el sector agropecuario de precisión.	59
3.1.6.1	Aplicaciones viables de los UAV en la agricultura.....	60
3.1.6.1.1	Manejo eficaz del agua.....	61
3.1.6.1.2	Tratamientos ubicados de herbicidas.....	61
3.1.6.1.3	Percepción anticipada de enfermedades y plagas de siembra	62
3.1.6.1.4	Inspección de zonas fumigadas y utilización adecuada de fertilizantes	62
3.1.7	Inspección de radiación en industrias nucleares o contaminantes	62
3.1.7.1	Efectos del tiempo de vida útil del UAV causados por radiación	63
3.1.7.2	Blindaje.....	64
4.	CAPÍTULO IV	66
	INTEGRACIÓN DE LOS UAV CON REDES DE COMUNICACIONES	66
4.1	Arquitecturas de Redes de comunicaciones.....	66
4.1.1	Enlaces directos	67
4.1.2	Enlaces satelitales	68
4.1.3	Enlaces celulares.....	68
4.1.4	Redes de mallas	69

4.2	Enlaces de comunicación entre la estación base y el VANT	70
4.3	Características de las tecnologías aplicadas en las redes de comunicaciones	70
4.3.1	ZigBee	71
4.3.2	Estándar IEEE 802.11 (Wi-Fi).....	72
4.3.3	4G LTE (Long Term Evolution).....	76
4.3.4	Tecnología inalámbrica de Quinta Generación (5G).....	77
4.4	Integración de los estándares y protocolos con las redes locales.....	78
4.4.1	Conexión a redes 4G LTE locales	79
4.4.2	Caso de éxito - Conexión de un UAV a red 4G LTE.....	82
4.5	Aplicaciones de los UAV en las redes de comunicación...	83
4.5.1	Sistema móvil de conexión a internet para regiones remotas por medio de un UAV.....	83
4.5.2	Red de telefonía móvil a través de UAV	84
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
5.1	Conclusiones	86
5.2	Recomendaciones.....	88
	REFERENCIAS	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de VANT	7
Tabla 2. Comparación de características de acuerdo al número de rotores	9
Tabla 3. Comparación de un UAV de ala fija y un cuadricóptero	11
Tabla 4. Varias aplicaciones, sectores y aeronaves usadas en el ámbito civil..	47
Tabla 5. Principales protocolos de la familia IEEE 802.11 utilizados en los UAV.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. VANT Motoplaneador.....	15
Figura 2. VANT de ala voladora	15
Figura 3. Multirrotoer NEO 660 V2.....	16
Figura 4. VANT Táctico Sperwer.....	17
Figura 5. VANT estratégico	18
Figura 6. Concepto operacional del SANT.	24
Figura 7. Componentes del Sistema Aéreo No Tripulado.	25
Figura 8. Componentes que incorpora un UAV.....	26
Figura 9. Controlador de vuelo modelo Arducopter APM 2.6	28
Figura 10. Ejes roll, pitch y yaw de un cuatrirrotoer.....	29
Figura 11. Sensor IMU6410	30
Figura 12. Sensor sonar MB1240.....	34
Figura 13. Sensor de velocidad de aire modelo Pixhawk.....	34
Figura 14. Esquema de conexión de una estación terrena	38
Figura 15. Inspección de infraestructuras	49
Figura 16. Nube de puntos y UAV con fotogrametría aérea.....	53
Figura 17. Actualización de información urbana.....	54
Figura 18. Inspección del campo agrícola por medio de un UAV.....	60
Figura 19. Tipos de radioactividad	64
Figura 20. Arquitecturas de Redes de Comunicaciones de los Sistemas Aéreos No Tripulados.....	67
Figura 21. Ejemplo de modulación DSSS.	73
Figura 22. Ejemplo de modulación FHSS.	73
Figura 23. Modulación OFDM.	74
Figura 24. Conexión a una red local a través de un dispositivo móvil.	80
Figura 25. Conexión a una red local a través de un servidor.	81
Figura 26. Comunicación entre UAV mediante láser.....	84

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de titulación se basa en la descripción y el análisis de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) conocidos como drones, asociados a las redes de comunicación públicas y privadas, de igual manera, se detallan las aplicaciones que estas plataformas ofrecen en el ámbito civil, por lo que es indispensable el estudio de los componentes con los que se equipa el sistema aéreo y las tecnologías que se emplean para el adecuado control de sistemas remotos como: enlaces de comunicación, sensores, controladores de vuelo, etc.

Del mismo modo, es importante realizar una comparación entre diferentes tipos de aeronaves no tripuladas, con la finalidad de aportar en proyectos de investigación futuros y el proceso de decisión al momento de seleccionar, diseñar o construir un vehículo no tripulado con respecto al tipo de labor que se requiera, por lo que se deben tener en cuenta algunos criterios como dimensiones, ventajas y desventajas operativas, sistemas de control, altura, tiempo de vuelo del VANT, así como la tecnología que poseen, características y aspectos generales que se obtienen con las distintas clases de aeronaves no tripuladas.

Por otro lado, con el constante desarrollo tecnológico que presentan los VANT, el accesible manejo a control remoto y/o la autonomía de vuelo que logran conseguir en ciertas labores asignadas, generan importantes beneficios a la ciudadanía (los mismos que serán descritos durante el progreso de los capítulos de este trabajo), es por ello, que en la actualidad se manifiesta un notorio uso de estos vehículos aéreos en varios sectores civiles (productivo, comercial e industrial); por lo que, con su aplicación en la mayoría de países a nivel mundial, cada nación ha considerado implementar aspectos regulatorios al momento de ser pilotados dentro de sus territorios.

1. CAPÍTULO I

MARCO TEORICO Y REFERENCIAL DE LOS VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

1.1 Antecedentes históricos y evolución de los UAV

Los primeros prototipos de UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), RPA (*Remotely Piloted Aircraft*), RPV (*Remotely Piloted Vehicle*), siglas en inglés, surgieron de enfrentamientos militares, siendo Austria en 1849 el primer país en transportar globos embarcados con explosivos dirigidos hacia Venecia en tiempos de guerra, pero no tuvo acogida por los fuertes vientos que existían en esa zona. Su funcionamiento se basaba principalmente en una pila galvánica y un filamento de cobre aislado transportado mediante globos.

Históricamente, los UAV fueron creados con la finalidad de batallar contra una nación, siendo utilizados previamente como un blanco aéreo para probar la eficacia que tenían al sobrevolar campo enemigo, este ejercicio consistía en permanecer el vehículo durante un trayecto definido, para ser embestidos por armas antiaéreas. Adicionalmente, fueron utilizados para entrenar a otras aeronaves, con el objetivo de preparar a la tripulación en posiciones simuladas.

En 1916, con la primera guerra mundial, el Cuerpo de Señales del ejército de los Estados Unidos, solicita al ingeniero e inventor Charles Franklin Kettering, que diseñe y construya un biplano no tripulado pre-programado, a fin de atacar a las defensas militares alemanas en el frente Occidental. Este torpedo radicaba en un mecanismo de relojería que desplegaba sus alas en un lugar estratégico y caía sobre el ejército enemigo como una bomba. Sin embargo, este torpedo no fue utilizado en combates bélicos antes del fin de la I Guerra Mundial.

Los primeros aviones no tripulados aparecen en el año de 1926, siendo el “Aerial Target” el primero en ser fabricado, su funcionamiento se basaba mediante radiofrecuencia AM baja, que le permitía tener destrezas antiaéreas. Sin embargo, el 12 de septiembre del mismo año, se crea el *Hewitt-Sperry Automatic Airplane*, apreciando así la definición de un UAV puesto que eran controlados mediante giroscopios¹.

En 1940 inicia la producción del primer RPA a gran escala llamado *Radioplane OQ-2*, con el propósito de entrenar aviadores. Por el mismo año, la Unión Soviética fabrica aeronaves lideradas por Nikitin, donde elabora un planeador no tripulado provisto de proyectil PSN-1 y 2, sin resultados exitosos en su elaboración. (Centro de estudios estratégicos, 2012)

Durante los años cincuenta, los norteamericanos perfeccionan los UAV, uno de ellos, los aviones *AQM-34* usados como aviones de inspección, lanzados desde una nave principal para cumplir con un recorrido programado y luego descender en paracaídas una vez concluido el trabajo. Tiempo después, la *Ryan Aeronautical* elabora aviones *Firebees* que contaban con dos modalidades de vuelo: si volaban a mayor altitud se manipulaban desde una estación terrena por línea de vista, y a baja altitud se controlaban desde una aeronave tripulada tipo stand off.

Se instalaban además, cámaras en los RPV para labores de observación en sectores estratégicos del campo militar enemigo, capturando imágenes que posteriormente serían reveladas en la estación base, evitando de esta manera ser detectados, derribados e impidiendo así la captura o pérdida de tripulantes, lo que no sucedía con los aviones tripulados.

¹ Giroscopio o giróscopo.- Mecanismo que se utiliza para verificar, reemplazar o mantener la ubicación en el espacio de algún dispositivo o vehículo.

A partir de los años setenta y con la Guerra Fría de por medio, se diseñan VANT mucho más resistentes en largos y cortos alcances de altitud y trayectoria, así como en los sistemas de seguridad de comunicaciones que la armada poseía, a fin de realizar tareas de verificación y vigilancia a mayores alturas, como fue el *Lockheed Aquila*, un prototipo de aeronave competente de corto alcance que incorporaba en su infraestructura sensores para operaciones militares como localización y determinación de objetivos; sin embargo, no se llegó a concretar este modelo de vehículo aéreo, debido a que la tecnología necesaria para su funcionamiento aún no estaba desarrollada.

En el año de 1971, se construye un VANT con aparatos electrónicos como relé de comunicaciones e inteligencia de señales, que permitían alcanzar altitudes de 16770 [m], con una autonomía de 20 horas transportando cargas de 680 [Kg], denominado *Boeing Gull*. (Rejado, 2015).

Con el paso de los años y el gran interés que se desarrolló por estas plataformas aéreas no tripuladas, se fabrican varios prototipos de VANT, entre ellos el *GNAT* que fue el precursor para el desarrollo de nuevos drones en sistemas MALE² y HALE³, el mismo que contaba con equipamiento SIGINT⁴ y desplazamiento mediante un motor alternativo para realizar misiones de vigilancia en el campo enemigo a elevadas alturas.

Para comprender los beneficios que conlleva la utilización de un UAV en la actualidad, se necesita conocer la evolución que han tenido a través del tiempo; como resultado de esta evolución, se ha presenciado la construcción de varios mecanismos aéreos, permitiendo a los fabricantes tener ideas claras de cómo optimizar la autonomía de vuelo, implementación de dispositivos electrónicos y redes de comunicación avanzados de última tecnología en un RPA; donde resaltan diversos ejemplos como: el *J-UVAC* (Vehículo Aéreo de Combate sin

² *Medium Altitude Long Endurance* - Sistemas de mediana altitud y gran alcance.

³ *High Altitude Long Endurance* – Sistemas de elevada altitud y gran alcance.

⁴ *Signals Intelligence* - Se basa en decodificar la información encriptada.

Tripulante), *X-47B*, *Dassault nEUROn*, *BAE Systems Taranis* o el *RQ-170 Sentinel* y finalmente el *Black Hawk* que tiene la opción de analizar y muestrear las capas atmosféricas terrestres y recolectar información para usarse en la predicción del tiempo. (López, 2016)

1.2 Estado del arte

Se entiende como UAV, aquel vehículo no tripulado capaz de navegar sin tripulantes a bordo, posee un alto potencial de vuelo debido a su movilidad y fácil manejo de operación, está compuesto de baterías o pilas de combustible que abastecen de energía a los rotores para que logren una mayor permanencia en el aire y son capaces de sobrevolar a elevadas altitudes, lo que les permite ser efectivos al momento de realizar múltiples tareas de inspección, observación o reconocimiento; para ello, es preciso saber bajo qué conceptos aerodinámicos rige el comportamiento del VANT, así como la clasificación, diferencias y comparación que existen entre ellos.

1.2.1 Conceptos aerodinámicos

Se debe estar al tanto de los diferentes parámetros y conceptos aerodinámicos que le rodean al UAV, los mismos que varían dependiendo del tipo de aplicación, velocidad, peso, tamaño, entre otros.

1.2.1.1 Principales fuerzas que intervienen en un UAV

Existen cuatro fuerzas que funcionan en una aeronave al momento de volar, las mismas que son de gran importancia tener en consideración en el instante del despegue y aterrizaje de la plataforma, con el fin de realizar una maniobra de mayor eficiencia, especialmente en misiones donde se requiera tener mayor precaución de vuelo, las mismas que son:

1. El levantamiento.- Fuerza aerodinámica formada por un cuerpo sólido que se mueve por medio de un fluido (aire); esto es, la fuerza que mantiene en el aire a la aeronave, siendo generada por el resto del UAV, aunque más explícito por el ala, estando perpendicular a la dirección del aire.
2. El peso.- Es una fuerza gravitatoria ejercida sobre el RPA. Durante el vuelo, el VANT gira en torno al centro gravitatorio, por lo que la magnitud del vector del peso depende de todas las masas que se encuentran distribuidas por toda la nave.
3. El arrastre.- Fuerza aerodinámica que ejecuta la aeronave en movimiento en dirección contraria a la fuerza empleada por el aire, es decir, es la oposición que realiza la fuerza del aire, contrarrestando el movimiento de la aeronave; además, para conseguir esta fuerza, se usa cierta energía, por lo que es necesario la disminución del arrastre.
4. El empuje.- Fuerza mecánica producida por la hélice y el motor a fin de desplazar a la nave a través del aire, donde la dirección de la fuerza de empuje resulta de la ubicación de los motores en la aeronave y la magnitud depende del empleo del sistema de propulsión.

1.2.2 Tipos de Vehículos aéreos no tripulados

En la actualidad, se fabrican variedad de UAV para que efectúen diversidad de misiones o tareas con cierta autonomía, esto quiere decir que el piloto, operador de la misión u otros supervisores realizan sus labores con total o parcial control desde la estación base hacia el VANT, por lo que es indispensable clasificar a las aeronaves no tripuladas, a fin de conocer sus distancias máximas, lanzamientos de vuelo y prestaciones de autonomía. Por otro lado, cabe mencionar que además de las aeronaves que se detallan en la Tabla 1, existen numerosos modelos comerciales adicionales, debido a la gran demanda de uso de estas plataformas en el presente.

Tabla 1. Tipos de VANT

Tipo de VANT	Siglas	Distancia recorrida [Km]	Altura de vuelo [m]	Autonomía de vuelo [horas]	Peso máximo de despegue MTOW [Kg]	Tipo de nave
Tácticos						
Nano	η	< 1	100	< 1	< 0,025	A, M
Micro	μ	< 10	250	1	< 5	A, M
Mini	mini	< 10	150 -	< 2	< 30	A, M
Distancia Cercana (<i>Close Range</i>)	CR	10 - 30	3000	2 - 4	150	A, M
Corto Alcance	SR	30 - 70	3000	3 - 6	200	A
Distancia Media (<i>Medium Range</i>)	MR	70 - 200	5000	6 - 10	1250	A
Autonomía media	MRE	> 500	8000	10 - 18	1250	A, M
Distancia Baja Penetración profunda	LADP	> 250	50 - 9000	0,5 - 1	350	A
Autonomía Alta de altitud baja	LALE	> 500	3000	> 24	< 30	A
Autonomía alta de altitud media	MALE	> 500	14000	24 - 48	1500	A, M
Estratégicos						
Autonomía alta de elevada altitud	HALE	> 2000	20000	24 - 48	12000	A

Tomado de (A. Barrientos, J. del Cerro, P. Gutiérrez, R. San Martín, A Martínez, C. Rossi, p. 15)

a. Las letras mencionadas en la columna Tipo de nave, corresponden a: Multirroto (M), Ala Fija (A).

Es necesario señalar que en el cuadro precedente se incluyen la mayoría de características que poseen los VANT; por otro lado, las actuales aeronaves no tripuladas para uso civil se encuentran dentro de la clase de micro o mini, siendo con frecuencia empleados los multirrotores.

1.2.3 Diferencias entre los tipos de rotores de un UAV

Los multirrotores actualmente forman parte del sector de los VANT, según el número de rotores que incorporen, adquieren equilibrio y fácil manejo al momento de pilotarlos; es decir, con el uso de más de dos rotores produce la sustentación absoluta para volar, asimismo, dependerán totalmente de la velocidad de giro de los rotores y del tamaño del motor para ejecutar una determinada fuerza y controlar el movimiento del aeroplano.

Los multirrotores más conocidos son: tricóptero, cuadricóptero, hexacóptero y octocóptero; dependiendo del número de rotores que posea el UAV, la potencia será mínima o máxima para su desplazamiento. La principal desventaja que poseen los multimotores o multirrotores, es que mientras se encuentran constituidos por mayor cantidad de dispositivos mecánicos o mayor número de rotores, se los consideran más costosos al momento de adquirirlos en el mercado.

Por otro lado, el consumo de energía de los diferentes UAV en los rotores, consiguen variados parámetros respecto a la energía que produce cada rotor, la energía generada por el motor, tiempo de planeo, entre otros. En la Tabla 2 se muestra una comparación del peso, ángulos, así como tiempos de vuelos de los rotores, etc., lo cual es de vital importancia el adquirir el conocimiento de las características técnicas al momento de tomar la decisión para la compra de un multirroto.

Tabla 2. Comparación de características de acuerdo al número de rotores

CARACTERÍSTICAS	NÚMERO DE ROTORES			
	3 (tricóptero)	4 (cuadricóptero)	6 (hexacóptero)	8 (octocóptero)
Peso [Kg].	1,32	1,40	1,56	1,72
Fuerza generada por cada rotor en [N].	4,40	3,50	5,20	4,3
Fuerza de empuje de cada rotor en [N].	0,88	0,70	1,04	0,86
Velocidad del rotor [RPM], en vuelo estacionario ⁵ .	5,97	5,33	5,10	4,656
Potencia de un solo motor [W], en vuelo estacionario.	40,30	32,50	29,40	23,8
Tiempo de vuelo estacionario en [min].	27,00	25,10	18,50	17,2
Tiempo de vuelo estacionario en [min] con 1 [Kg] de carga.	35,70	35,20	28,90	29,5
Potencia de 1 motor en [W], en vuelo horizontal.	41,20	33,20	30,00	24,4
Velocidad del rotor [RPM], en vuelo horizontal.	6,02	5,39	5,14	4,70
Tiempo de vuelo horizontal [min].	26,4	24,50	18,1	16,7
Tiempo de vuelo horizontal [min] con 1 [Kg] de carga.	34,90	34,40	28,20	28,80
Tamaño de la hélice [cm]	-	37,50	25,00	25,00
Revoluciones de la hélice [RPM]	-	10000	11000	12000

Tomado de (B. Domínguez y L. Martínez, 2013, p. 26)

a. Estudio ilustrado por Igor Penkov y Dmitri Aleksandrov respecto a la disipación de energía en los RPA con distintos números de rotores.

Con la tabla antes descrita, se concluye que la aeronave tricóptero presenta mayor eficiencia en la utilización de energía; no obstante, el cuadricóptero proporciona una mejor y superior operación en comparación con el UAV de 3 rotores, teniendo una diferencia en el gasto de energía de 1,5 %, por lo que garantiza al operario un sencillo manejo y equilibrio en sus vuelos.

⁵ Tiene la facultad de permanecer detenido en el aire.

Respecto a las ventajas y desventajas que los modelos de UAV tienen en relación al número de rotores se mencionan los siguientes:

- Tricóptero: Insuficiente empuje y menos tiempo de vuelo, estable y costoso debido al giro de los rotores, donde debe ser veloz para mantenerse en el aire.
- Cuadricóptero: Mecánicamente es más sencillo que un tricóptero, tiene 1/3 más de empuje con casi el mismo peso, ayudándoles a ser más equilibrados debido a que no poseen piezas móviles en la cola. Su tiempo de vuelo es mayor ya que son capaces de transportar grandes baterías y los motores producen menos revoluciones.
- Hexacóptero: Es similar al cuadricóptero, con el único detalle adicional de mayor potencia y solvencia de carga. Tiene poca redundancia, esto quiere decir que si se pierde o daña un motor, el UAV deberá aterrizar. Sin embargo, son muy costosos y grandes.
- Octocóptero: Parecido al hexacóptero pero con mayor redundancia, es decir, si pierde un motor continúa volando sin problemas. Es utilizado para colocar equipos fotográficos de elevado costo; sus desventajas son el alto precio y consumen mucha energía al momento de planear.

1.2.4 Comparación entre UAV de ala fija y cuadricóptero

Con las comparaciones entre rotores antes mencionadas, se llega a la conclusión de que un cuadricóptero es mejor ante las necesidades de un usuario; ahora bien, es necesario saber si un UAV de ala fija ofrece mejores beneficios que uno de 4 rotores. Por lo tanto, las ventajas y desventajas de ambas aeronaves es un factor necesario para determinar qué aeronave es la adecuada al momento de prestar servicio a la ciudadanía. En la Tabla 3, se realiza una comparación entre ambos aeroplanos de acuerdo a las características de calidad, capacidad, rendimiento, etc.

Tabla 3. Comparación de un UAV de ala fija y un cuadricóptero

Tipo UAV	Características				
	Autonomía de vuelo [h]	Distancia [Km]	Altura [m]	Peso máximo de despegue [Kg]	Resultado de Comportamiento
Ala Fija	1	<10	250	0,1	Malo
	<2	<10	150-300	<30	Malo
	2-4	10-30	3000	150	Bueno
	3-6	30-70	3000	200	Bueno
	6-10	70-200	3000-5000	150-500	Excelente
Cuadricóptero	1	<10	250	0,1	Excelente
	<2	<10	150-300	<30	Excelente
	2-4	10-30	3000	150	Regular
	3-6	30-70	3000	200	Malo
	6-10	70-200	3000-5000	150-500	Malo

Tomado de (B. Domínguez y L. Martínez, 2013, p.74)

a. Diferencias de peso, distancia, rendimiento de un UAV de ala fija con un cuadricóptero, para conocer su grado de eficacia.

Para concluir si un cuadricóptero brinda mayores beneficios que un UAV de ala fija, se necesita tener conocimiento de sus ventajas y desventajas.

1.2.4.1 Ventajas y desventajas de un VANT de ala fija

Las plataformas aéreas no tripuladas de ala fija, se caracterizan por ofrecer ventajas sobre otras plataformas, como la estructura muy simple en su composición, permitiendo mayores velocidades de vuelo, considerables alturas de operación y excelente resistencia.

Entre algunas de las ventajas adicionales se tienen:

- Son utilizados para realizar investigaciones, puesto que cubren mayores extensiones de terreno con tiempos de vuelo más largos
- Menor consumo de energía
- Mayor autonomía y altas distancias
- Incorpora piloto automático

- Bajo costo de mantenimiento
- Son más eficaces que los multirrotores, debido a que ofrecen mayor autonomía de vuelo sin importar el tamaño que tenga la aeronave de ala fija, llegando alcanzar hasta los 100 [Km/h]
- Tienen una menor sensibilidad en huella sonora, siendo los más requeridos para operaciones de vigilancia
- Cuentan con altos índices de rango climático, ideales para aplicaciones de obtención y análisis de información como temperatura, lluvia y viento

Por el contrario, la principal desventaja de este tipo de plataforma, se debe a que por lo general necesitan de una pista para llevar a cabo el despliegue o aterrizaje de la nave aérea no tripulada. Se pueden mencionar otras desventajas como:

- No realiza vuelo estacionario
- Alta dificultad al momento de pilotar
- Posibilidades escasas de cambiar de diseño

1.2.4.2 Ventajas y desventajas de un Cuadricóptero

Los cuadricópteros cuentan con varias ventajas sobre otro tipo de plataformas, en especial con los UAV de ala fija, puesto que poseen la capacidad de ascender y/o descender de forma vertical sin la necesidad de una pista, esto permite de igual manera, la suspensión de la nave sobre un punto fijo, siendo ideales para aplicaciones de inspección.

Otras ventajas que se obtienen de un cuadricóptero son las siguientes:

- Vuelos en zonas de espacio reducido
- Acopla dispositivos electrónicos como sensores, cámaras, etc.
- Óptimo nivel de carga útil
- Posee vuelo estacionario
- Alto control y equilibrio
- Alta precisión y fácil maniobrabilidad de vuelo; es decir, pueden volar siguiendo cualquier recorrido solicitado en las coordenadas

tridimensionales, aproximándose al objetivo si fuera preciso y, al combinarse el movimiento del UAV con el de la cámara integrada, se obtienen imágenes que antes no se podía capturar

En cuanto se refiere a las desventajas de estas aeronaves no tripuladas, uno de sus principales problemas es la poca autonomía de vuelo (aproximadamente un promedio de 15 minutos), razón por la cual aún estos UAV no son destinados para el campo de la investigación y hoy por hoy se utilizan con fines comerciales. De igual manera, estos multirrotores poseen una alta complejidad electrónica y mecánica, por lo que el proceso de mantenimiento y reparación es más difícil de realizar, aumentando así el costo operativo de la nave. Otras desventajas de los cuadricópteros son:

- Mayor consumo de energía
- Mayor costo para su desarrollo

Por lo tanto, el VANT que más se acopla a las necesidades de una persona, es el modelo Cuadricóptero, debido a su fácil control, características y ventajas antes mencionadas; además, es muy estable en el aire y no es complicado al momento de darle mantenimiento, por lo que esta generación de UAV se emplea en gran variedad de aplicaciones civiles. Existen varios países que inician sus actividades con estas aeronaves, entre ellos se encuentran China, Israel, España, Brasil y Colombia, pero debido a la gran demanda y acogida de estas plataformas, su uso se expande alrededor de todo el mundo. A pesar de las ventajas superiores mostradas en los cuadricópteros y su mayor uso en Ecuador y el mundo, es recomendable el uso de hexacópteros para labores civiles, especialmente en la agricultura para observaciones de cultivo y recolección de información de sembríos, debido a que este tipo de plataforma genera mayor fuerza al momento del vuelo y esto permite tener mayor capacidad de carga para esta y otro tipo de actividades.

1.3 Clasificación de los Vehículos Aéreos No Tripulados

En la actualidad existen diferentes tipos de Vehículos Aéreos No Tripulados dependiendo del tamaño, peso, carga de transporte y autonomía de vuelo, entre ellos se pueden clasificar: los de ala fija y rotativa, tácticos y estratégicos. (Félez, 2013)

1.3.1 VANT de Ala Fija y Rotativa

A continuación se detallan las principales características técnicas y de operación de las plataformas no tripuladas de ala fija y rotativa:

1.3.1.1 Ala Fija

Estas aeronaves son conocidas por tener una semejanza con la estructura de aviones tripulados como el planeador, parapente, avión, etc. Logran una autonomía de vuelo de una a dos horas con velocidades entre 30 y 55 [Km/h], conservan una altura de planeo entre los 100 y 600 [m] sobre el nivel del mar y son utilizados especialmente para operaciones de vigilancia en terrenos de hasta treinta hectáreas por tener distribuidos varios sensores por toda su estructura, sin afectar en lo mínimo a la hora de seguir un trayecto de vuelo. (Legarreta & Pirola, 2015). Por otro lado, se encuentra una amplia gama de plataformas de ala fija, que son reconocidas por sus características y servicios; sin embargo, existen dos modelos en particular que demuestran ser eficaces en todo momento:

1. Los motoplaneadores: Se caracterizan por tener una gran autonomía de vuelo, esto se debe al bajo coeficiente de arrastre⁶ que le posibilita ser estable al realizar capturas de imágenes. Ver Figura 1.

⁶ Cantidad que no tiene dimensiones, usada para cuantificar la resistencia o arrastre de un cuerpo en un espacio fluido como el agua o inclusive el aire.

2. Alas voladoras: La principal característica, es mantenerse estable ante vientos medidos, esto se debe al diseño del ala y a la gran resistencia del cuerpo central, obteniendo vuelos confiables inclusive en dichas zonas donde existen vientos moderados, como se muestra en la Figura 2.



Figura 1. VANT Motoplaneador

Tomado de (Avionrc, 2015).



Figura 2. VANT de ala voladora

Tomado de (Alas volantes, 2015).

1.3.1.2 Ala Rotativa

En el grupo de los VANT de Ala Rotativa, se encuentran los helicópteros o multirrotores más conocidos en la industria como tricóptero, quadcopter, hexacóptero, octacóptero, etc. Su principal ventaja es el despegar o aterrizar verticalmente con el objetivo de lograr un vuelo preciso y moderado.

El modelo de la Figura 3 es utilizado para realizar trabajos de transporte de carga liviana, fotografía, inspección del campo de trabajo y filmaciones según el área; además, por ser sólido, hábil para el vuelo estacionario y por mantener varios controles de mando, facilita al operario realizar ajustes con un mínimo de error en la obtención de información. Sin embargo, una de las desventajas presentadas en este modelo, es la poca autonomía de vuelo debido a su alto coeficiente de arrastre, presentando un mayor consumo de energía y limitando su perímetro de sobrevuelo a 3 [Km], por lo que no son utilizados en lugares donde el viento supere los 25 [Km/h].



1.3.2 VANT Tácticos

Una de las principales características de esta plataforma, es su peso, el cual varía desde los 150 a 1500 [Kg]; además, la altitud de vuelo que consigue es de 3000 [m] a los 8000 [m] y cuentan con la posibilidad de instalar misiles guiados con sistemas de alta precisión, siendo empleados generalmente en operaciones militares. Poseen tecnología de punta como enlaces a través de satélites y algunos prototipos pueden permanecer en el aire por más de 40 horas; uno de ellos, el *Stalker*, realiza su carga de energía mediante láser, esto genera nuevas ideas a los desarrolladores de RPA para que futuras generaciones puedan permanecer en el aire por más tiempo. Ver ejemplo de la Figura 4.



Figura 4. VANT Táctico Sperwer

Tomado de (Coronel Von Rohaut, 2014).

a. Drone Sperwer forma parte del Regimiento de Artillería en el Ministerio de Defensa de Francia.

1.3.3 VANT Estratégicos

Los VANT Estratégicos son plataformas conocidas por su gran tamaño y peso, llegando a pesar aproximadamente doce toneladas; por lo tanto, al igual que los drones tácticos, estos son usados por el ejército, ya que alcanzan alturas considerables de hasta 20.000 [m]. En la actualidad, también son empleados por la NASA para aplicaciones de cartografía y monitoreo de condiciones atmosféricas, como el modelo observado en la Figura 5. (Félez, 2013)



Figura 5. VANT estratégico

Tomado de (Arduino Genuino, 2015).

a. Drone Helios, controlado por la NASA. b. Trabaja con energía solar.

1.4 Legislación vigente

Con el objetivo de precautelar la seguridad del espacio aéreo de cada nación, así como la del individuo y patrimonio en tierra, la mayoría de países se encuentra en proceso de regularización o establecimiento de nuevas normas sobre el destino de los RPA, debido a que progresivamente toman mayor fuerza. Por dicha razón, la Comisión Europa evalúa y plantea nuevas y rigurosas

normas sobre las operaciones de las aeronaves teledirigidas debido a que es más recurrente los UAV civiles en territorios como Reino Unido, Francia y Suecia.

Las nuevas normas comprenden desde la protección de datos, privacidad, hasta la seguridad y responsabilidad, facultando a las empresas europeas a establecerse como líderes mundiales en la comercialización de ésta tecnología, y a su vez, garantizar que se adopten las indispensables salvaguardas. (Jefatura del Estado. (s.f), 2014)

En este sentido, España innovó varias regularizaciones sobre su empleo tanto para fines recreativos como para herramientas de trabajo; además de acatar una serie de normas aeronáuticas vigentes, para evitar posibles riesgos y multas innecesarias. Por ejemplo, para fines profesionales el operario es el responsable de la aeronave civil piloteada por control remoto y por ende del cumplimiento de la normativa, en la cual indica que debe estar inscrito en la AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea). También, tiene que contar con un seguro de competencia civil especial para aeroplanos. El operario debe conocer los lugares donde no pueden maniobrar y son: zonas urbanas, parques, conciertos, bodas, etc. De igual modo, no puede operar en espacios aéreos controlados o cerca de aeropuertos. (González, 2015)

Por otra parte, si es para vuelos de recreación y con un peso menor a 150 [Kg], no necesita una autorización de la AESA, pero si debe regirse a reglas como: mantenerlo visible con altura máxima de 120 [m], no volar sobre lugares poblados ni donde se realicen acciones de paracaidismo, helipuertos o parapente, etc.

En cuanto se refiere a nivel sudamericano, existen varios países como Chile, Colombia, Argentina, Ecuador, etc., cuyas autoridades han visto la necesidad de crear marcos legales sobre el uso de estos dispositivos aéreos. Es así que en Chile saber el tamaño y el alcance que llegan a tener los RPA, es indispensable para aplicar la respectiva normativa para cada caso.

Las reglas de la nación chilena establecen dos clases importantes: los aeroplanos con un alcance menor a 100 [m] de altura y las que sobrepasen ese desplazamiento. En el primer caso, los UAV serán vistos como dispositivos de aeromodelismo, siendo innecesario tener permiso o licencia. Sin embargo, su operación está condicionada a lugares habilitados para realizar estas actividades. También, es imposible la realización de fotografía en lugares públicos o de trabajo de reparto, así como comercial. Para el segundo caso, si sobrepasan en alcance y tamaño, es imprescindible contar con un permiso de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) de Chile, en la que se indica el objeto de la operación y el plan de vuelo con los respectivos impedimentos de no sobrevolar sobre áreas restringidas, ni pobladas, ni en pistas de despegue y terminales aeroportuarias.

Las reformas a esta ley, establecerán de forma precisa los mínimos requisitos de mantención y utilización de estos aeroplanos, además de poseer certificaciones cuando se comercialicen en el país.

Con respecto a Colombia, no hay normas definidas sobre los VANT, pero existe una norma aplicable a estos prototipos que se encuentran en los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC). Sin embargo, en estos documento no existen restricciones al momento de realizar toma de fotografía, teledetección, siempre y cuando se acaten las leyes elementales de tránsito aéreo en la que constan que no podrán volar a más de 500 pies de altura ni distanciar este mecanismo más de 750 [m] desde donde se pilote el aeroplano. Manteniéndose a la vista; además de tener un peso máximo de 25 [Kg]. (Iglesias, 2015)

En el Ecuador la Dirección General de Aviación Civil (DGAC) no posee una reglamentación respecto a los requerimientos para el ejercicio de los vehículos aéreos no tripulados. No obstante, con el objetivo de prevenir riesgos de operación que implica el uso de las plataformas no tripuladas para la ciudadanía en general y debido al aumento significativo en la utilización de estos dispositivos, la DGAC toma acciones sobre el empleo de los UAS, estableciendo

condiciones o normativas generales para el pilotaje de los mismos mediante Resolución No. 251, expedida el 17 de Septiembre de 2015. Las normativas comprenden restricciones sobre los RPA que van desde alturas, distancias, horas de pilotaje, seguros e inclusive limitaciones en diferentes zonas.

Cabe mencionar además que en el Artículo 6, numeral 3, literal a) de la Ley de Aviación Civil, anunciada en el Registro Oficial N° S-435 del 11 de Enero del 2007, otorga al DGAC, determinar deberes y derechos sobre prohibir reglamentaciones técnicas, modificar, dictaminar, ordenar y demás resoluciones de la vigente ley de la Aviación Civil, el Convenio sobre Aviación Civil Internacional y el Código Aeronáutico y todas las normativas fundamentales para la seguridad del planeo.

Por ejemplo, en el Artículo 1., se mantendrá el pilotaje de estos Sistemas Aéreos No Tripulados a distancias mayores o iguales a los 9 [Km] sobre bases aéreas militares o cualquier aeropuerto. Respecto a la altura máxima permitida de vuelo, es de 122 [m] desde tierra; otra de las características de operación son las horas permitidas de maniobra de estas plataformas, las cuales están definidas entre la puesta y salida del sol y en óptimas condiciones climatológicas, que permita al propietario mantener contacto visual constante con la nave.

Con relación a la responsabilidad de maniobra de la plataforma no tripulada, en la Resolución No. 251, Art.4, se menciona que cada operario será el encargado durante todo el pilotaje; además, el operador debe estar por todo el tiempo de vuelo en perfectas condiciones que le permitan maniobrar los controles de manera prudente, por ejemplo, sin efectos de alcohol o drogas (Art. 5.- Integridad fisiológica del operador de una RPA). En cuanto a la autonomía de vuelo del UAV, esta podrá ser empleada únicamente si se le concede al operador la posibilidad de actuar inmediatamente para adquirir el control del aeroplano en caso de cualquier eventualidad que se presente.

Finalizando lo detallado en esta resolución, el Artículo 8.- Seguros, hace referencia a las obligaciones que el propietario del UAS debe tener presente al momento de maniobrar la nave, el mismo que estará en la necesidad de responder ante los accidentes ocasionados durante su actividad de vuelo; razón por la cual, el propietario contratará un seguro de responsabilidad civil con precios establecidos dependiendo del peso del dispositivo aéreo (02 a 25 [Kg]: \$3000, >25 [Kg]: \$5000). (Roberto Yerovi De La Calle, 2015).

2. CAPÍTULO II

SISTEMAS DE COMUNICACIÓN UTILIZADOS EN LOS UAV.

2.1 Sistemas de Aeronaves No Tripuladas

2.1.1 Descripción

El *Unmanned Aerial System* (UAS), es definido como: “Aeronave y sus elementos conexos que operan sin piloto a bordo.” (Organización de Aviación Civil Internacional, 2011).

Los UAS, también denominados como Sistemas Aéreos No Tripulados (SANT), son conocidos como dispositivos de investigación, observación e inteligencia, orientados hacia actividades de control y exploración; están compuestos principalmente por: ECT (Estación de Control Terrestre), designada también como GCS (*Ground Control Station*), un sistema de comunicaciones y el VANT. La diferencia entre UAV y UAS, básicamente es que el UAV es la sección aérea de todo el sistema UAS, el mismo que opera de forma conjunta con todos sus elementos para la transmisión y recepción de datos.

El UAS se presenta como el inmediato desarrollo del UAV. Los UAV consiguen ser intervenidos de manera remota desde una estación en tierra por medio de un operario, sea éste el encargado de monitorear o supervisar la nave; por el contrario, los Sistemas Aéreos No Tripulados tienen la capacidad de ser autónomos, semiautónomos o no autónomos, y por lo general permanecerán por cierto trayecto previamente definido de acuerdo a la misión del vuelo, utilizando los medios que ofrecen los sensores adaptados al sistema.

La idea primordial en lo que respecta a la operación del SANT, es que el VANT adquiere la figura de un objetivo establecido, por medio de gran variedad de sensores o dispositivos como SAR⁷, videocámaras, entre otros; que mediante la implementación de un enlace de datos, se transfiere el detalle de la información a una GCS en un tiempo de vuelo específico. La Figura 6 describe el modo operacional de un UAS para la obtención de la información, ya sea por medio del enlace denominado como Línea de Vista, o extender el alcance utilizando enlaces satelitales conocidos como por sus siglas en inglés como BLOS (*Beyond Light of Sight*).

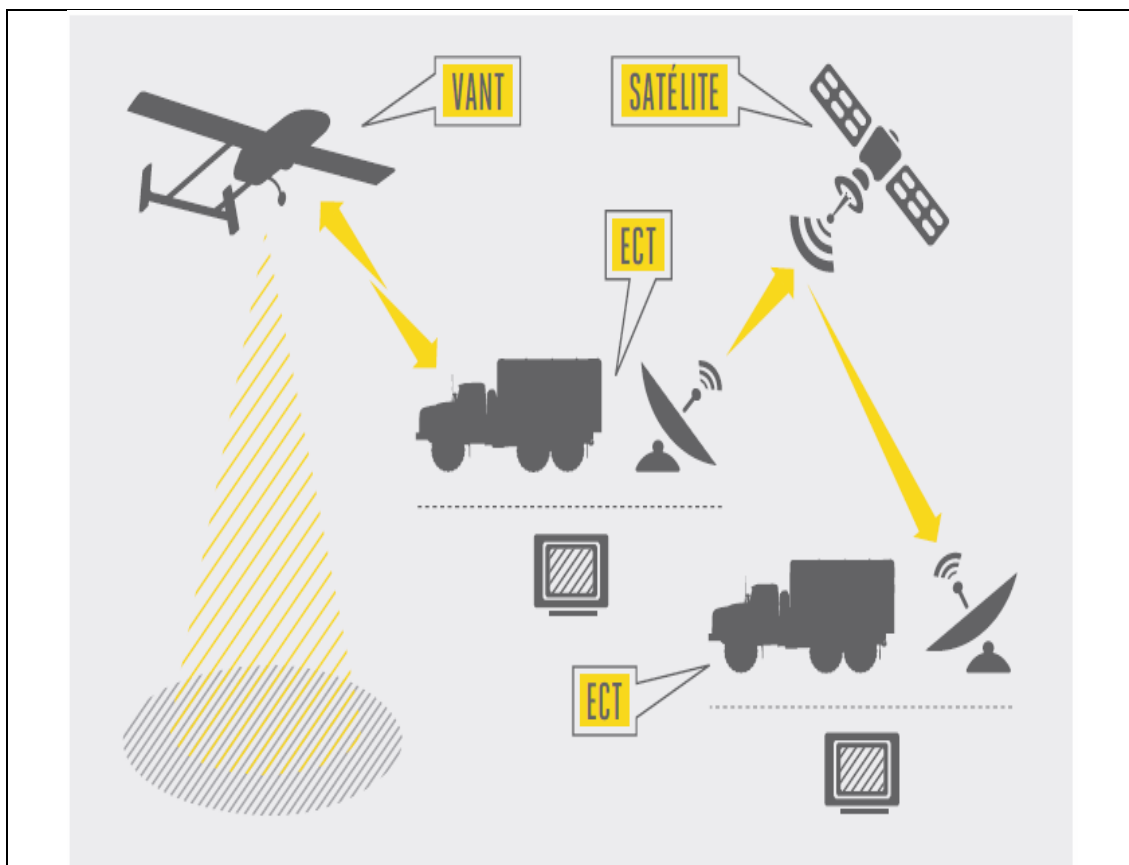


Figura 6. Concepto operacional del SANT.

Tomado de (Leonardo Arcadio Zarza, 2013, p.3).

⁷ Del inglés *Synthetic Aperture Radar* – El Radar de Apertura Sintética otorga el beneficio, en trayectos extensos, de adquirir fotografías de óptima calidad.

2.2 Descripción de los componentes tecnológicos de los Sistemas de Aeronaves no Tripuladas.

El SANT está compuesto por dos segmentos fundamentales: aéreo y terreno. El segmento aéreo o segmento de vuelo, está constituido por todos los dispositivos relacionados con la plataforma de vuelo como: el sistema de navegación, la red de datos, el motor o sistema de propulsión, entre otros; el siguiente componente de este segmento, corresponde a la carga útil proporcionada para el servicio y que la constituyen las videocámaras, radares, sensores, etc.; y finalmente, lo compone el sistema de comunicaciones que permite establecer el enlace entre el vehículo y la estación terrena. La Figura 7 detalla los principales componentes ya mencionados de un UAS:

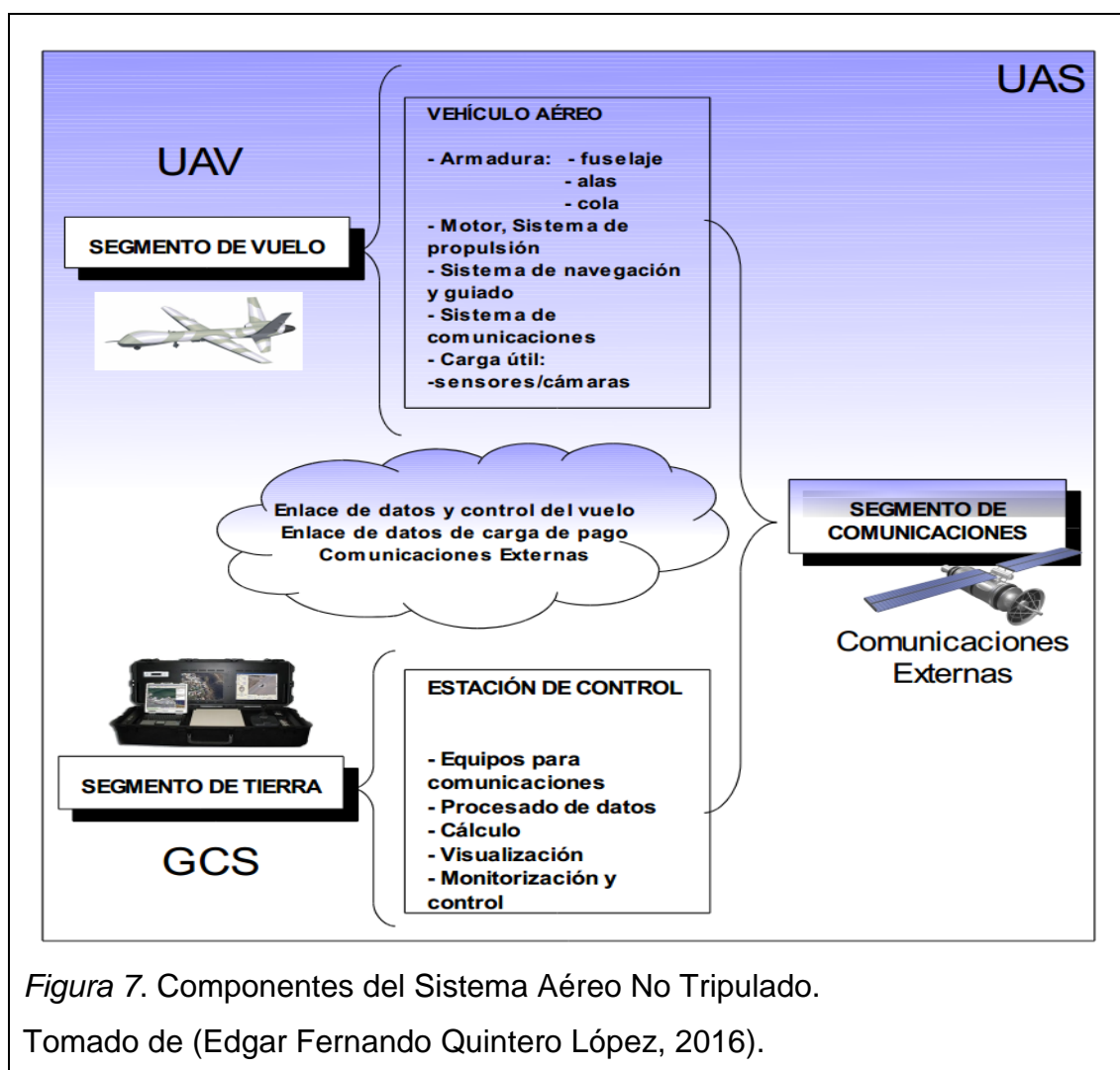


Figura 7. Componentes del Sistema Aéreo No Tripulado.

Tomado de (Edgar Fernando Quintero López, 2016).

2.2.1 Principales componentes de un UAV

Los vehículos aéreos no tripulados, contienen una infinidad de dispositivos y tecnologías que abarcan sensores, sistemas GPS (*Global Positioning System*) que especifican su posición en el espacio, baterías que amplían el tiempo de vuelo, acelerómetros capaces de comunicarse con redes 3G o 4G e inclusive cuentan con cámaras que analizan en tiempo real movimientos captados, con el objetivo de apoyar al control y comunicación satisfactoria desde el VANT hacia la estación terrena. En la Figura 8 se observan los componentes que integran un UAV.

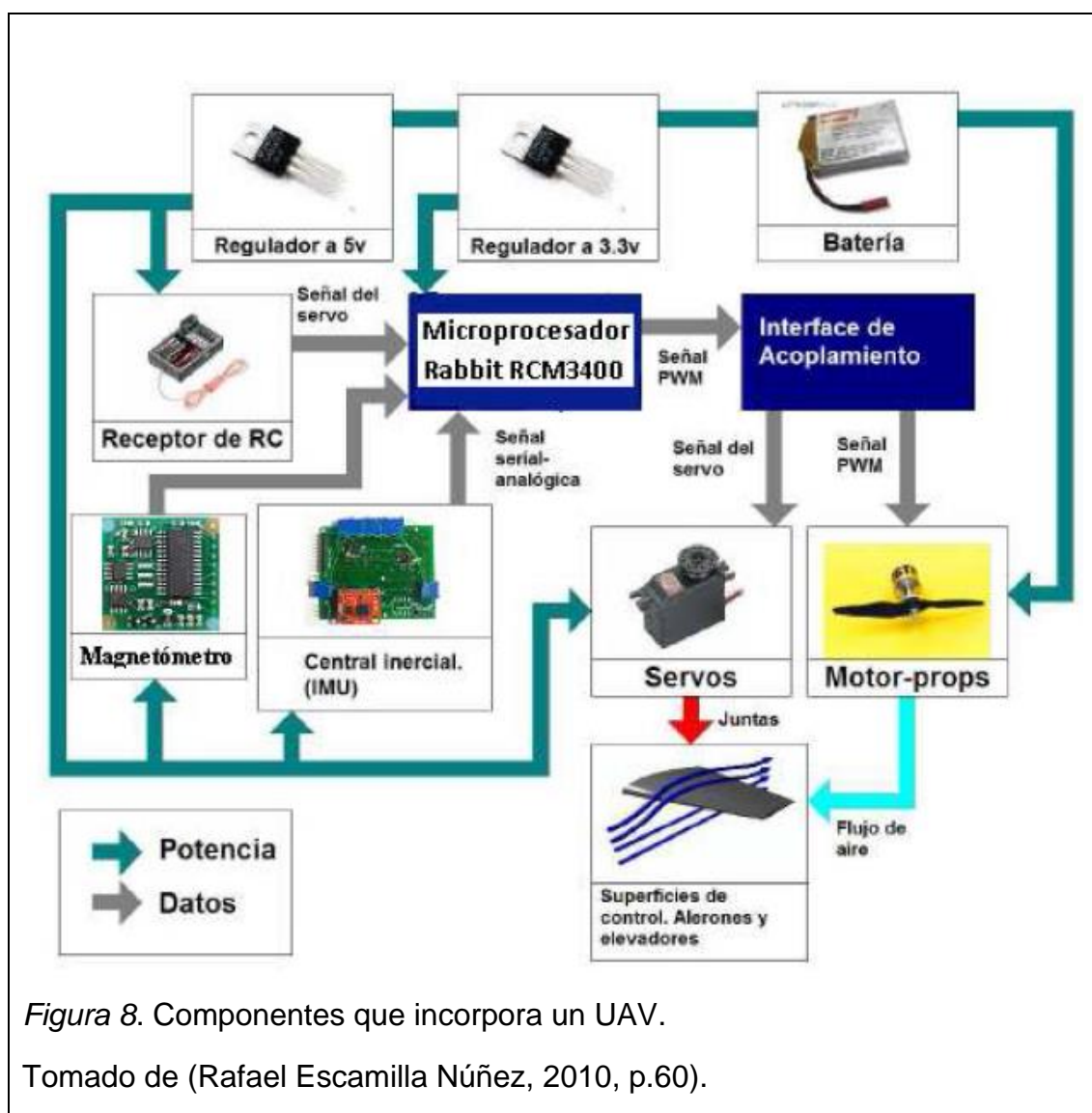


Figura 8. Componentes que incorpora un UAV.

Tomado de (Rafael Escamilla Núñez, 2010, p.60).

2.2.1.1 Controlador de vuelo para VANT

El controlador de vuelo es el cerebro de un UAV, por ser un potente dispositivo electrónico que integra operaciones de gestión de conexión con dispositivos externos y con los sensores de un aeroplano; permitiendo operar al VANT en el aire. La mayoría de controles de vuelo poseen una estructura parecida y en ciertos componentes cuentan con los siguientes sensores:

- **Acelerómetro:** mide la correcta aceleración de movimiento de un RPA en los tres ejes: x, y, z.
- **Magnetómetro:** se emplea a manera de brújula con la finalidad de conocer en cualquier instante la trayectoria en la que se encuentra el VANT.
- **Giroscopio:** mide la eficacia de la velocidad angular de las variaciones de posición.
- **Sensor barométrico:** utilizado para saber con mayor precisión la altura realizada por el aeroplano.
- **GPS:** sistema fundamentado en satélites que consiguen la longitud, altitud y altura de las coordenadas de la zona donde está realizando el pilotaje el RPA.
- **Procesador:** es considerablemente potente debido a que efectúa análisis y operaciones por fracciones de segundos de acuerdo a todos los datos adquiridos durante el vuelo del RPA.

Por lo tanto, los controladores de vuelo contienen sensores, microprocesadores que contribuyen al vuelo estable de la aeronave y permita reunir información sobre altura, velocidad y dirección; de igual manera, ayuda al UAV a sobrevolar en las coordenadas x, y, z. Un modelo conocido de controlador de vuelo que

prevalece en la industria, es el *Pixhawk*, el cual es potente e incluye licencia libre de software y hardware, o el prototipo *Arducopter* que se observa en la Figura 9.

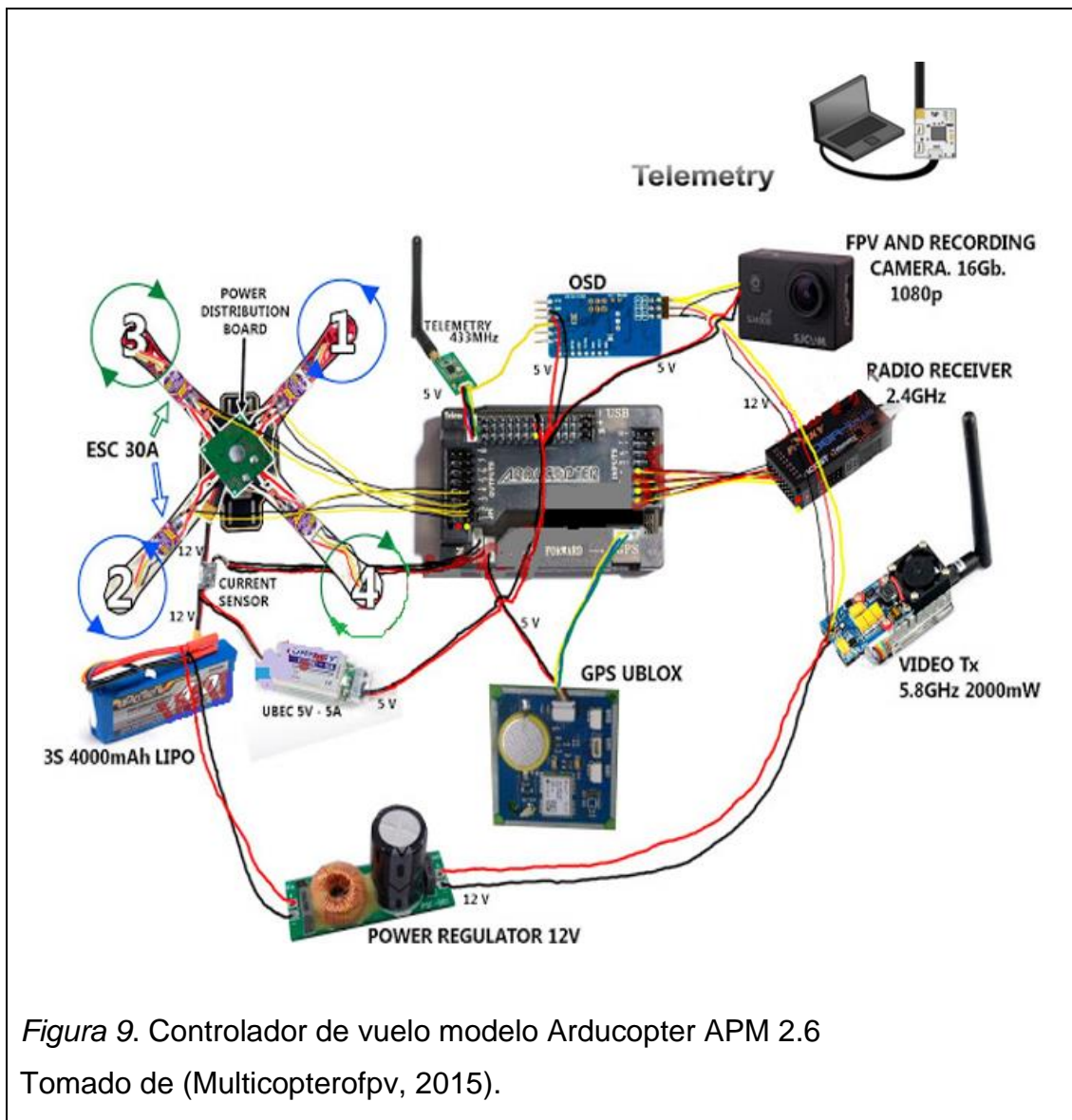


Figura 9. Controlador de vuelo modelo Arducopter APM 2.6 Tomado de (Multicopterofpv, 2015).

2.2.1.2 Sensores

2.2.1.2.1 Sensores para equilibrio del vuelo

Para alcanzar un correcto equilibrio y dominio de planeo, es indispensable que un Vehículo Aéreo No Tripulado cuente con varios sensores que colaboren en el continuo monitoreo de la posición del aeroplano, como en sus diferentes ángulos

de navegación: yaw ψ (guiñada), pitch θ (cabeceo), roll ϕ (alabeo), facultando al microprocesador recolectar datos que serán ordenados y evaluados para la obtención de información válida, a fin de ejecutar acciones y ajustes oportunos en tiempo real; además, estos tres ángulos tienen un punto de encuentro situado en el centro de gravedad del aeroplano medido en radianes, que son: el Roll (ϕ), ubicado en el eje x, se sitúa a lo largo de la línea central de la nave permitiendo desplazamientos hacia el lado derecho o izquierdo; Pitch (θ), situado en el eje y, puede desplazarse adelante y atrás, asistiendo en el equilibrio horizontal del aeroplano y Yaw (ψ) en el eje z, gira sobre su eje vertical, colabora al equilibrio vertical de la aeronave. Ver Figura 10.

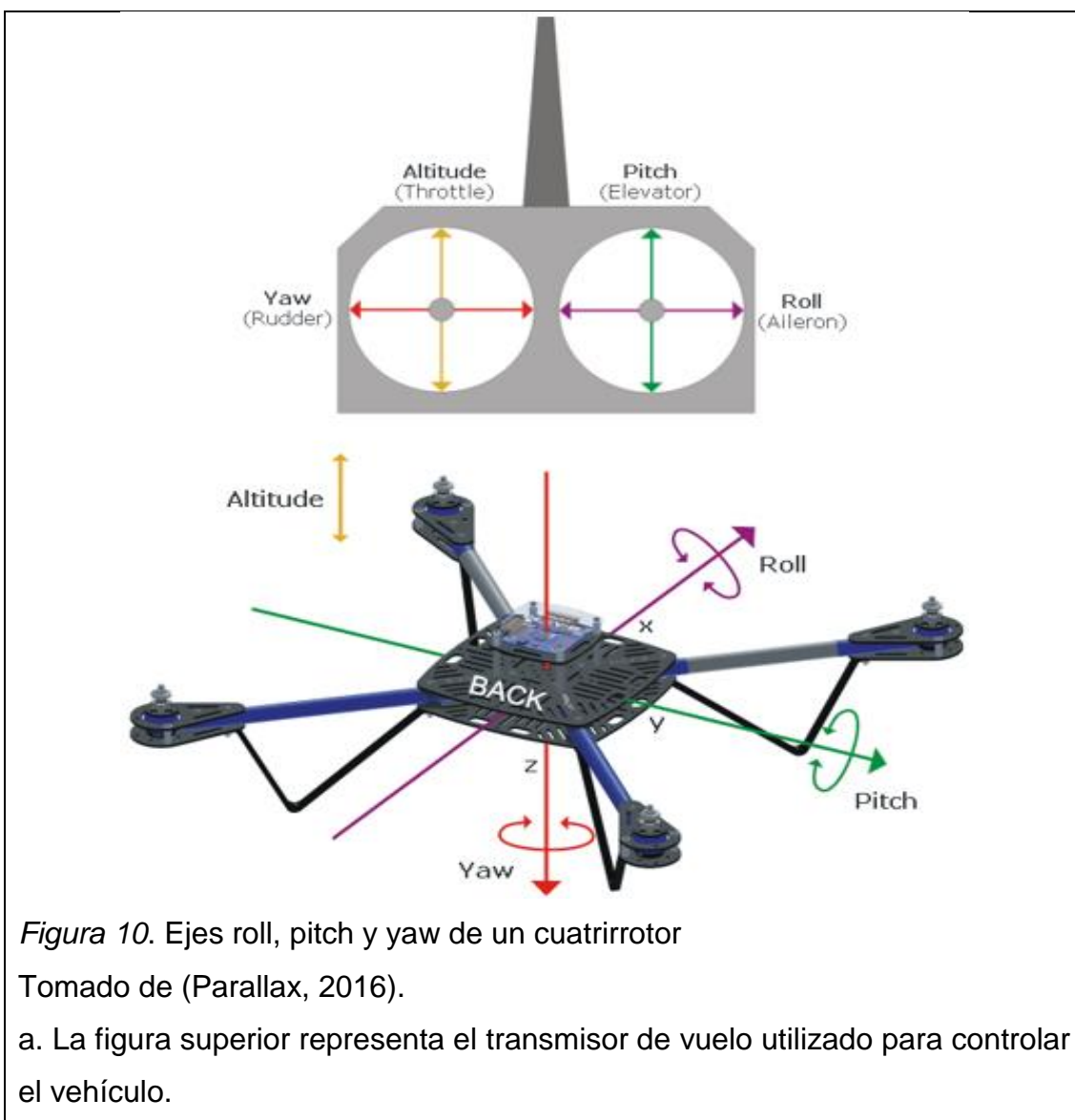


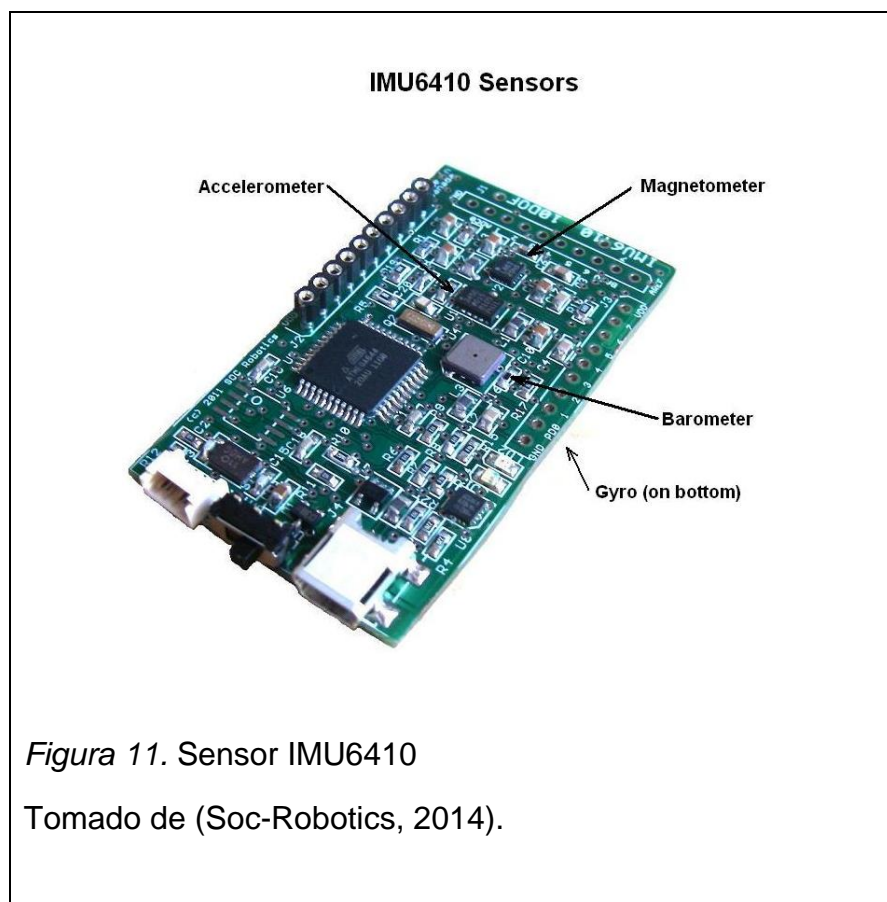
Figura 10. Ejes roll, pitch y yaw de un cuatrirrotor

Tomado de (Parallax, 2016).

a. La figura superior representa el transmisor de vuelo utilizado para controlar el vehículo.

2.2.1.2.1.1 Unidad de Medición Inercial (UMI)

El IMU (*Inertial Measurement Unit*), es un componente electrónico que mide la fuerza gravitacional, movimiento y velocidad angular, mediante la unión de giroscopios, magnetómetros y acelerómetros, para facilitar la ubicación del aeroplano respecto al área donde fueron enviados; igualmente, dependiendo del número de sensores y ejes ortogonales, se consiguen clasificar de acuerdo a los grados de libertad. Por ejemplo, con 6 grados de libertad se tienen tres giroscopios y acelerómetros de forma ortogonal; es decir, realiza un movimiento de traslación en 3 ejes perpendiculares, por lo que adquiere la capacidad de desplazarse derecha - izquierda, delante - atrás, arriba - abajo, junto con la rotación sobre 3 ejes perpendiculares que son el cabeceo, guiñada y alabeo; así, el movimiento de cada eje es independiente uno de otro, siendo autónomos de la rotación sobre cualquier eje; por esta razón, el sensor IMU tiene 3 magnetómetros, 3 giroscopios y 3 acelerómetros. (Quirós, 2014). Ver Figura 11.



2.2.1.2.1.1.1 Acelerómetro

El acelerómetro está en la capacidad de medir la aceleración lineal en 1, 2, o 3 dimensiones, esto es, en tres trayectorias perpendiculares entre sí. Esta característica, ayuda a calcular la inclinación de un objeto, debido a que se especifica la aceleración producida por la gravedad que ejerce sobre el objeto, así como la posición angular después de la medición de dicha aceleración. Por otro lado, este sensor se fundamenta en una pequeña masa suspendida por enlaces elásticos, libre de desplazarse y sujeta a un campo eléctrico tridimensional, que por causa de la gravedad se traslada de su sitio central, produciendo alteraciones en el patrón del campo eléctrico en los ejes de movimiento, que a su vez se interpretan y calculan como variaciones de capacitancia eléctrica.

2.2.1.2.1.1.2 Giroscopio

Los Giroscopios son los encargados de medir la velocidad angular de giro de un cuerpo alrededor del eje. Se emplean coordenadas geográficas como ejes de referencia para que a través de éstas se mida su desplazamiento. También cuentan con factores como la aceleración centrípeta y vibración, que cambian la medición del giroscopio, ayudando por ejemplo al cuatrirrotor donde los desplazamientos laterales o giros del aeroplano no son tan veloces como los aeroplanos de ala fija. Quizás se considere la aceleración centrípeta como despreciable, sin embargo, la vibración que producen los 4 rotores girando a distintas velocidades, es un factor que perjudica a la medición de los acelerómetros. (B. Dominguez y L.Martínez, 2013)

2.2.1.2.1.1.3 Magnetómetro

Los magnetómetros son mecanismos empleados para medir los campos magnéticos, igual que los de la tierra. Sin embargo, el campo magnético de la tierra es un vector tridimensional, mientras que en los RPA se reduce el vector

del campo magnético a bidimensional, aceptando que en el tiempo de vuelo de la nave no existen variaciones considerables del patrón magnético terrestre.

Por esta razón, se usan especialmente para conseguir la orientación definitiva del aeroplano, debido a que es imprescindible saber los grados de ubicación (yaw) que posee la aeronave con relación al norte magnético, de mediciones secundarias como el pitch y roll que este mecanismo concede.

Adicionalmente, estos dispositivos son susceptibles a los elementos ferromagnéticos del aeroplano como motores, estructuras metálicas, conductores de elevada electricidad, etc.; por esta razón, el montaje de este dispositivo perjudica la eficacia de sus mediciones, por lo que es necesario que el componente GPS se encuentre instalado en el lugar más alto del VANT para que brinde una mejor recepción de la señal hacia los satélites, lo que beneficia en gran medida al magnetómetro.

2.2.1.2.2 Sensores para medición de alturas

Para un UAV es indispensable contar con dispositivos que realicen mediciones de grandes y bajas altitudes, con el propósito de salvaguardar la estabilidad de la nave no tripulada durante el vuelo o inclusive conseguir información de la velocidad o elevación de la aeronave de forma autónoma o manual; para ello, se cuenta con los barómetros y sonar altímetro.

2.2.1.2.2.1 Barómetros

El barómetro es un sensor de presión atmosférica, debido a que calcula la variante de la presión estática al momento que el RPA modifica la altitud. Las medidas de presión que entregan estos sensores permiten una óptima apreciación de la altitud en la que se localiza el VANT.

2.2.1.2.3 Sensores GPS - Sistemas de Posicionamiento Global

Este dispositivo tiene la capacidad de establecer la posición, altitud, velocidad y orientación de un VANT a cada instante, además se basa en señales de navegación por satélite para ser utilizado en todo el mundo y bajo cualquier estado climatológico. No obstante, una desventaja de este dispositivo es la velocidad de alcance de la información, siendo muy tardía pues tiene un promedio entre 1 y 5 muestras por segundo. La conexión que realiza el GPS, cuenta con un protocolo de comunicación propio, denominado UBX y se encarga de encapsular la información en paquetes de información. Por otro lado, al emplear el GPS, provee un informe concreto a largo plazo; además, es un módulo imprescindible en un UAV ya que con la integración entre las mediciones suministradas por el GPS y las IMU, se convierte en un sistema eficaz al instante de dar resultados de la ubicación tanto local como global.

2.2.1.2.4 Sensores Sonares

Son sensores que usan ondas de sonido en un rango sobre los 20 [KHz] de frecuencia; además, miden el tiempo que demora en regresar la onda, es decir que emplean ondas sonoras con una mayor frecuencia para localizar objetos.

Los VANT emplean estos sensores para detectar rápidamente cualquier objeto inesperado que esté cercano a ellos durante el vuelo, o para divisar la distancia a la superficie cuando se efectúa la operación de aterrizaje autónomo. El sonar posee un ángulo de detección alrededor de los 60 grados, ayudándole a saber si un objeto se localiza cerca del área donde se encuentra. Sin embargo, una desventaja de estos sensores, radica que al momento de percibir ruido o eco derivados de ondas de sonido causado por cohetes, donde limita su precisión al instante de detectar algún elemento. Un ejemplo es el modelo de sensor sonar MB1240 que se observa en la Figura 12.



Figura 12. Sensor sonar MB1240

Tomado de (Guadalupe Crespo, 2014, p.25).

a. Detección de objetos a distancias entre 0 y 7,65 [m]

2.2.1.2.5 Sensores de Velocidad de Aire

Son empleados para calcular la velocidad del RPA con relación a la velocidad del aire, esto se consigue por el uso de sensores de presión diferencial, logrando la distinción entre la presión dinámica y la presión estática con el manejo de tubos Pitot. Por otro lado, con la medida de presión diferencial se determina la velocidad adecuada, considerando para ello la constante de densidad del aire respecto al nivel del mar; a su vez, la velocidad indicada por los sensores tiende a errores, para lo cual se emplean cálculos de otros sensores como por ejemplo el barómetro que calcula la velocidad real del UAV, observado en la Figura 13.

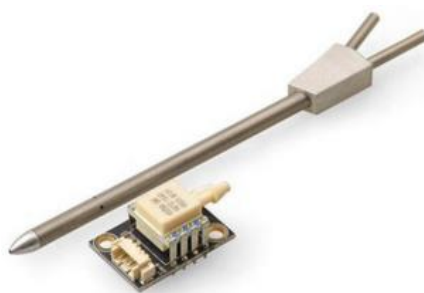


Figura 13. Sensor de velocidad de aire modelo Pixhawk

Tomado de (Rc-innovations, 2016).

a. Tubo Pitot aluminio

2.2.1.3 Motores

Los motores al igual que el resto de componentes, es una pieza fundamental para el equilibrio y control de un VANT, por esta razón se deben considerar algunos aspectos importantes acerca de la elección de motores, como son:

- Relación costo/beneficio
- Torque y velocidad
- Sincronización entre motores
- Mando de velocidad por modulación por ancho de pulso (PWM)
- Peso

Un motor es un elemento necesario que convierte la energía eléctrica en mecánica, para lo cual emplean un sistema típico de rotor. Se deben tener en cuenta los motores para manejos de corriente continua y se los clasifica en: Motores paso a paso, con escobilla o sin escobilla (brushless) y servomotores.

Los motores más usados en un RPA son los brushless, presentan beneficios respecto a los motores con escobillas, como mayor eficiencia, vida útil, rango de velocidad y menor ruido; mientras que los motores con escobilla se desgastan rápidamente y el rendimiento es menor; otro aspecto es que al realizar desconexiones y conexiones generan demasiado ruido y el número de revoluciones en las hélices es muy bajo. Una de las desventajas de los motores sin escobillas, se presentan en los sistemas de control, los cuales son más complejos y el costo es mayor.

Los servomotores y motores paso a paso, giran y se detienen con una alta precisión, donde la elevada fidelidad y la seguridad que brindan, han permitido ser usados en varios mecanismos electrónicos como robots, discos duros, impresoras, entre otros. No obstante, estos motores no son usados para propulsar hélices, debido a que es necesario que las hélices estén continuamente girando y obteniendo un control del número de revoluciones, por

lo que se usan en aeroplanos de alas fijas, en los que se requiere que las superficies de control permanezcan en una inclinación y posición adecuada.

2.2.1.4 Batería

La fuente de energía es necesaria debido a que es la responsable de proveer energía a todo el VANT. En algunos modelos de aeronaves es viable que se usen fuentes de energía adicionales para los elementos electrónicos como cámaras, sistemas de video, sensores, microprocesadores, etc., por lo que en las especificaciones y requerimientos es conveniente tener en cuenta los siguientes aspectos:

- El rendimiento tiene que ser alto y confiable
- El peso de la fuente energética debe ser menor
- La batería debe realizar recargas rápidas y totales

De esta manera, el peso y rendimiento de una batería son indispensables dentro de un RPA, puesto que de ello dependerá el tipo de misión, el tiempo de vuelo y las condiciones de pilotaje, es decir, el tiempo que dure una aeronave en el aire dependerá de la capacidad de carga que suministre la batería y para conocer el tiempo máximo de planeo se utiliza la Ecuación 1.

$$\frac{Q}{I} \times 60 = t[\text{min}] \quad (\text{Ecuación 1})$$

Q = Carga reservada por la batería [A * h]

I = corriente de ejecución del motor [A]

t = tiempo máximo de encendido del motor

La fórmula antes descrita, permite realizar el cálculo de una batería con un motor. Si la batería suministra los cuatro motores, el tiempo total deberá ser dividido para cuatro; o por el contrario, si suministra a 2 motores, se dividirá para dos.

Existen muchos tipos de baterías, como las Alcalinas, Níquel – Zinc, Níquel e Hidruro metálico y Batería de Polímero de Litio (LiPo), esta última principalmente se emplea en los VANT, puesto que dichas baterías y las tensiones que brindan junto con su peso y rendimiento, permiten suministrar de energía todo el sistema. Por ejemplo, la batería LiPo de 3 celdas alcanza una tensión nominal de 3,9 [V] x celda, por lo que se consiguen 11,7 [V].

2.2.2 Componentes que se utilizan en una Estación Terrena

El segmento terreno abarca en su composición, elementos como la estación de control donde se realizan las operaciones de recepción y transmisión de información, gracias a los equipos tecnológicos de comunicación de alta calidad, sistema de intervención de la nave, así como de toda la carga útil con la que se encuentra aprovisionada durante el objetivo del vuelo, y los correspondientes accesorios de expulsión y aterrizaje del vehículo aéreo. Desde la estación terrena, a través de un sistema de comunicación predeterminado, es posible monitorear la altitud, velocidad, posición, dirección, y estar pendiente del desarrollo del dron para el control de misiones en tiempo real; para ello, es indispensable elegir adecuadamente las frecuencias de radio que se van a utilizar dependiendo del entorno de trabajo, certificando servicios libres de interferencias para una conexión sólida y permanente con el aeroplano.

De la misma forma, se puede vigilar y observar el comportamiento de un VANT cuando está en el aire y así conseguir óptimos resultados tanto en la cobertura como en la eficacia de los enlaces de comunicación; para ello, la estación terrena podrá contar con 2 subestaciones, donde la primera sirva para la verificación de planeo del RPA, mientras que la segunda ayude a comunicarse desde un transmisor/receptor (satélite por ejemplo) hacia el VANT. Una de las ventajas de la estación terrena, es que no existen inconvenientes sobre su peso, tamaño y apuntamiento de la antena hacia el satélite.

La GCS puede estar compuesta por un solo computador o incluso formar una red compleja que cumpla las funciones de transmisión y recepción de imágenes, datos, video, etc., mejorando así, sus prestaciones para futuros trabajos en el ámbito civil. En lo que respecta a software, un ejemplo de aplicación de una estación terrena es el *QGroundControl*, que se comunica a través del envío de mensajes MAVLink; además, el software es libre con entrada al código fuente, lo que ayuda a modificar cualquier código en caso de ser imprescindible. En la Figura 14 se indica el ejemplo del esquema de una estación terrena.

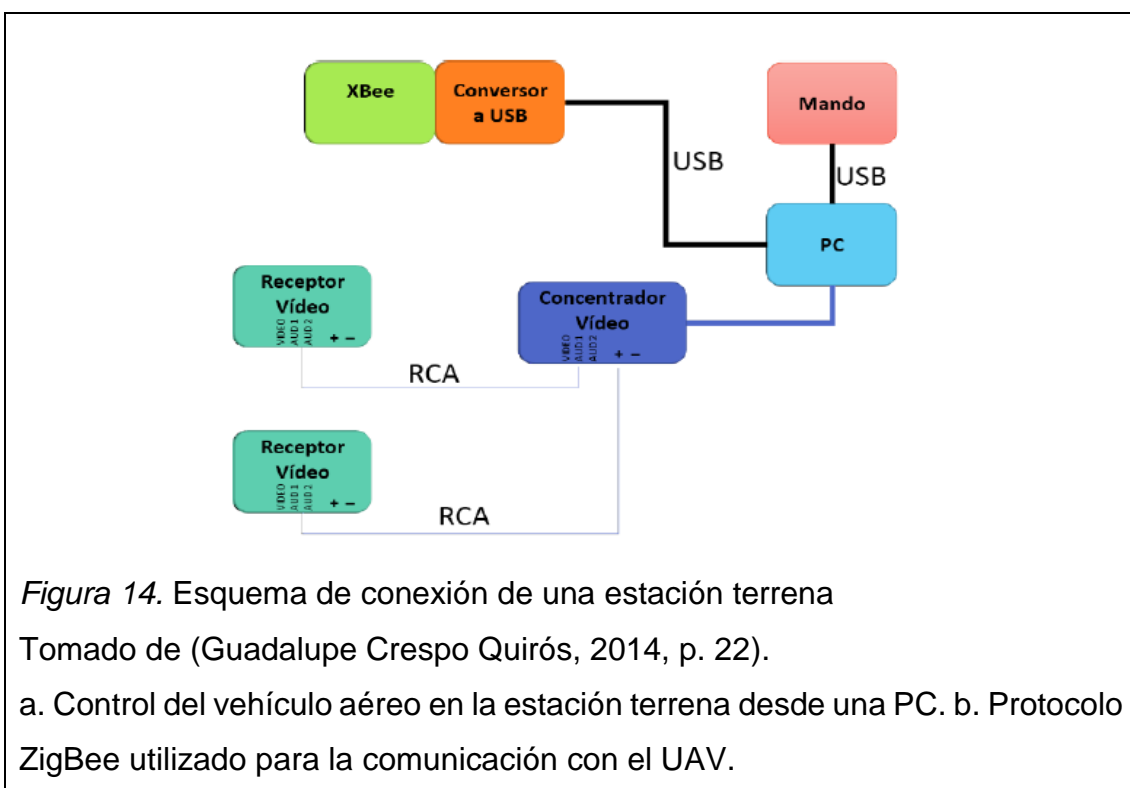


Figura 14. Esquema de conexión de una estación terrena

Tomado de (Guadalupe Crespo Quirós, 2014, p. 22).

a. Control del vehículo aéreo en la estación terrena desde una PC. b. Protocolo ZigBee utilizado para la comunicación con el UAV.

2.3 Arquitectura de un sistema de reconocimiento aéreo por medio del VANT

El diseño de un sistema de investigación aérea con el uso del vehículo no tripulado, se subdivide en cinco sistemas que se caracterizan por ser autónomos en lo que concierne a desenvolvimiento, pero ligados entre sí en aspectos de

carácter práctico o utilitario. Estos subsistemas se detallan en síntesis a continuación:

1. **Plataforma de Vuelo.**- Como ya se indicó en los componentes del Sistema Aéreo No Tripulado, la plataforma de vuelo se define como la constitución del VANT y todos los dispositivos de la carga útil que se transporta en la aeronave, como son los sensores, instrumentos de fotografía y video de magnífica calidad, antenas, entre otros. Esta plataforma, tiene la responsabilidad de deslizarse por el área donde se procederá con la adquisición de la información.

Es de vital importancia tener conocimiento sobre los métodos de control para esta plataforma, los cuales se pueden distribuir en tres diferentes modos:

- Modelo autónomo.- Esta técnica de control hace referencia a la operación del UAV, el mismo que está plenamente capacitado para cumplir con labores de vuelo asignadas de manera inteligente y eficaz, únicamente con una codificación o rutina previamente asignada para la respectiva misión y sin la necesidad de ser piloteado remotamente por algún operador desde tierra; de este modo, el vehículo se encuentra apto para realizar deberes y maniobras varias de manera automática en su totalidad, como suspensión, desplazamiento y reintegración del RPA, seguimientos de trayectorias, verificación de altitud, identificación de obstáculos, entre otros. La delegación de actividades desde la GCS, se basa absolutamente en la monitorización, inspección y certificar que la aeronave consiga un anhelado desempeño sin inconvenientes de funcionamiento.
- Modelo Semiautónomo.- La característica de este tipo de control, asocia al ejercicio híbrido de las operaciones de la plataforma; es decir, las tácticas independientes de viaje puntualizadas en el modo anterior,

pueden ser alteradas en cualquier instante de forma remota por un piloto mediante herramientas de conducción.

- Modelo No Autónomo.- Para llevar a cabo el control no autónomo, es imprescindible el dominio desde la ECT por medio del guía, para dirigir todas las actividades que se realicen con la nave.
2. Sistema de Inspección del Sobrevuelo.- Este sistema asocia los datos obtenidos durante la trayectoria de vuelo por el vehículo aéreo y de esta manera cooperar con el control del RPA, realizando estas actividades con la participación de sus integrantes esenciales como satélites y receptores del Sistema de Posicionamiento Global.
 3. Sistema de Lanzamiento y Recuperación.- Como su nombre lo indica, este subsistema favorece la correcta inspección que se necesita mantener en el instante del ascenso de un UAV, así como el recorrido preliminar del planeo programado y el descenso apropiado del mismo.
 4. Sistema de Comunicaciones.- El sistema de comunicaciones se constituye elementalmente de enlaces de comunicación que logran la vinculación de la estación terrena con el VANT. Se distingue de otros sistemas por ser el corresponsal de trasladar aquella información alcanzada por la aeronave y afianzar de modo impecable el intercambio de comunicación desde el mando de control hasta el UAV.
 5. Sistema de Información Geográfica.- Se caracteriza por ser el subsistema de recibir información por medio de sensores y demás mecanismos equipados en la plataforma aérea, con el fin de ejecutar el estudio o diagnóstico de las imágenes captadas, para posteriormente ser utilizados en mapas o cartogramas.

2.4 Sistemas de Comunicaciones

Las comunicaciones son indiscutiblemente decisivas en los entornos tanto de la circulación de la información captada por la carga útil del vehículo aéreo, como los sensores y radares, así como en la utilización de transmisiones de control y mando entre la estación de control en tierra y la plataforma de vuelo.

Los sistemas de comunicaciones de los UAV, se emplean para transmitir y recibir datos entre la aeronave y la ECT, estableciendo de esta manera un enlace de telemetría, o un enlace de datos, los cuales se describen a continuación:

2.4.1 Enlace de Telemetría

El enlace de telemetría, usa un sistema de comunicaciones inalámbrico por medio de la técnica de conmutación de paquetes de datos, conocida por sus siglas en inglés como GPRS (*General Packet Radio Services*). Esta tecnología, al ser una evolución de la Segunda Generación de comunicaciones inalámbricas, se la considera parte de la generación 2.5G. Las operaciones de enlace son maniobradas desde un computador personal proveniente de la estación de tierra.

Para llevar a cabo este tipo de enlaces, se aplica el protocolo de internet, generando de esta manera el vínculo de la información para proceder con la transmisión y recepción de paquetes de datos por medio de radio. Por esta razón, GPRS se conoce como el progreso de la tecnología GSM (*Global System for Mobile Communications*) 2G, donde adicionalmente se efectúan velocidades máximas de 128 [kbps] utilizando frecuencias de 900 [MHz]. Entre las destacadas contribuciones que se obtienen con el uso de GPRS, es alcanzar un nexo consistente, estable y eficaz entre la ECT y el UAV.

Otra de las tecnologías utilizadas para la transmisión de datos telemétricos es ZigBee, a través del uso de módulos XBee; para ello, es necesario la instalación de dos módulos: uno en la plataforma no tripulada y otro en la estación base. De

acuerdo al modelo de dichos módulos, se pueden obtener velocidades de transmisión de 200 [Kbps].

El protocolo inalámbrico conocido comúnmente como Wi-Fi, es utilizado de igual manera para enviar y recibir datos de telemetría, siendo capaz mediante la aplicación de este estándar, facilitar los vuelos cooperativos.

2.4.2 Enlace de datos

Para el caso del enlace de datos, se adopta el uso de varias tecnologías, dependiendo la distancia de cobertura o alcance para la transmisión de la información.

Para plataformas no tripuladas de alcance reducido, es significativo resaltar el manejo de diferentes procedimientos secundarios para entablar el sistema de comunicación deseado, dichos métodos se basan en el uso de los conocidos protocolos IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), cuya principal utilidad es la reducción de los tiempos y diligencias necesarias en la transmisión, gracias al uso de equipos y programas desarrollados.

- *IEEE 802.15.4*.- Conocido como estándar ZigBee, su principal aplicación dentro del enlace de comunicaciones, es el disminuir el consumo de energía como se evidencia actualmente en varios tipos de quadrotors que utilizan dispositivos XBee, con el objetivo de transmitir información entre el host y el VANT por medio de procesos de canalización de radiofrecuencias. La conexión de subida del enlace de telecomunicaciones remite detalles de posicionamiento y características de recorridos o trayectos, a diferencia de la conexión de bajada que se encarga de transmitir antecedentes de telemetría.

- *IEEE 802.15.1*.- Se refiere a la tecnología Bluetooth, se caracteriza por conceder enlaces simples y una producción de redes Ad-Hoc. Por el contrario de

la tecnología ZigBee, en esta ocasión se presencia un superior empleo de energía, obteniendo de esta forma velocidades de transferencia mayores.

- *IEEE 802.11*.- Este protocolo pertenece al destacado estándar WiFi, el cual tiene alta probabilidad de práctica en comunicaciones con las plataformas no tripuladas en sus dos principales tipos de enlaces (datos y telemetría), agregando inclusive la posibilidad de transmisión de imágenes. Estas comunicaciones son similares a las de manejo con Bluetooth y se relacionan directamente pues ambas poseen la facultad que construir conexiones Ad-Hoc. Esta tecnología es aplicada también para todas aquellas redes LAN (*Local Area Network*) que trabajan en frecuencias de 2.4 [GHz] y asignando velocidades eventuales de transmisión de datos desde los 11 a 54 [Mbps]. Su alcance difiere de acuerdo a la potencia adoptada durante la transmisión y el medio de comunicación.

Los protocolos de comunicación más utilizados en la actualidad para establecer el enlace con el VANT de mayor alcance o distancia de cobertura como 4G y 5G, serán detallados en el Capítulo 4.

Es de gran importancia tener conocimiento en cuanto se refiere a la propagación de frecuencias para el uso de los UAV; por ende, en la aviación se decretan y legalizan estas frecuencias por medio de tres distintas vías (Stacey, 2008):

- 1) *Señales de radio de Alta Frecuencia, High Frequency*.- Las señales HF, conceden alcances o trayectorias de carácter transatlántico por la reflexión que se realiza en la Ionósfera, lo cual no es del todo favorable pues el mecanismo utilizado para lograr estas distancias actualmente presentan varios inconvenientes como: ruido, interferencia, pérdidas y por último, al utilizarse en actividades en la Ionósfera, el canal por donde se transmite la información está expuesto a sufrir alteraciones por las diferentes condiciones meteorológicas, razón por la cual este tipo de señales son de escaso uso en los SANT.

- 2) *Señales de radio de Muy Alta Frecuencia, Very High Frequency.*- Se caracterizan por ser señales sólidas o resistentes al ruido y a las interferencias que se puedan presentar en el canal de radio, por ende, este tipo de comunicaciones resultan muy efectivas al momento de implantar una conexión de datos de línea de vista, por ello son consideradas para aplicaciones aeronáuticas de índole civil. Para prácticas de las plataformas no tripuladas en el campo civil, designando un rango de frecuencias entre 118 y 137 [MHz], se atribuye el uso de enlace de datos actual denominado VDL4⁸ por sus cualidades de poder construir redes aire - aire o aire - tierra.
- 3) *Comunicaciones Satélites.*- Las comunicaciones satelitales otorgan el privilegio de plasmar un sistema de comunicaciones de mucho mayor alcance que el determinado por una línea de vista directa, complementado con una estupenda fiabilidad en las particularidades del enlace de datos. A pesar de las excelentes ventajas que prestan el uso de este tipo de comunicaciones por su elevada tasa de disponibilidad, así como su extensa cobertura, presentan debilidades al momento de ser examinadas para un montaje de comunicaciones por su alto precio de instalación y la numerosa cantidad de tiempo que conlleva realizar dicha gestión, el cual es un atributo de gran repercusión para los fines aplicativos de los UAV. Por lo general para el enlace satelital que se utiliza en las plataformas no tripuladas, se aplica la banda de frecuencias Ku, puesto que proporciona la aplicación de antenas reducidas y su costo es menor que las antenas de la banda C.

Por los detalles mencionados anteriormente, para prácticas civiles ligadas con los Sistemas Aéreos No Tripulados, se recomienda el uso de las comunicaciones

⁸ *Very High Frequency Data Link Mode 4* – Posee una tasa de transmisión de 19.2[Kbps], proporciona enlaces de datos para aplicaciones de vigilancia y pilotaje. Utiliza la táctica de acceso conocida por sus siglas en inglés como S-TDMA (*Self-Organized Time Division Multiple Access*).

asociadas con la banda de frecuencia VHF para transmisiones en el rango de línea de vista directa de corto alcance; y por el contrario, los enlaces satelitales cuando el objetivo principal implique el conseguir mayores alcances de comunicación.

Esta distribución de frecuencias referidas por instituciones internacionales, no son las únicas recomendadas para ser adoptadas en los sistemas de estas aeronaves. Existen varias frecuencias suplementarias como son las de 35, 40, 72 y 900 [MHz] por un lado; y las de 2.4 y 5.4 [GHz] por otro, siendo aprovechadas estas últimas para la transmisión de ondas de telemetría o video.

3. CAPÍTULO III

APLICACIONES Y AMBIENTES DE DESARROLLO DE LOS VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

Los UAV brindan varias alternativas respecto del uso y aplicaciones en el ámbito civil; esto con la finalidad de dar soluciones a diferentes necesidades y situaciones de trabajo, como: controles terrestres y marítimos, control radioactivo, supervisión de cultivos, entre otros.

Por lo que dependiendo del tipo de tarea y características de la plataforma como alcance, autonomía, equilibrio o precisión, se elige el UAV más adecuado; es así que en misiones en las que se necesite que la aeronave no tripulada realice algún manejo estático o se desplace por pequeñas zonas con velocidades bajas, los vehículos más apropiados son los multirrotores, toda vez que aprovecha algunas funcionalidades como el empleo de sistemas de detección en el espectro visible, visión nocturna e infrarroja, mayor facilidad para despegue y aterrizaje, establecimiento de zonas de vuelo, etc.

Sin embargo, si se desea realizar un patrullaje aéreo más exhaustivo como por ejemplo visualizar el avance y dispersión de un incendio o efectuar un mapa cartográfico, es necesario que el vehículo se desplace a mayores velocidades, por lo que los VANT más convenientes son los de ala fija.

En el presente proyecto, de acuerdo a actuales necesidades de la población civil, se detalla en la Tabla 4 las principales aplicaciones, de igual manera se incluye el tipo de vehículo recomendado en cada tarea. Es importante mencionar que el tipo de aeronave no se destina únicamente a cierto tipo de actividad, las recomendaciones mencionadas a continuación, es de acuerdo a las características que poseen y que facilitará el desempeño en cada una de las actividades asignadas.

Tabla 4. Varias aplicaciones, sectores y aeronaves usadas en el ámbito civil.

Aplicaciones	Sectores que cubren	Tipo de UAV usado con más frecuencia	UAV asignado a la aplicación
Inspección de infraestructuras	Energético, estaciones transformadoras.	M	Hexacóptero
Cartografía y Fotogrametría	Representación gráfica de un espacio terreno, Cartografía urbana	A	Ala voladora
Patrullaje aéreo	Marítimo, terrestre	A, M	Octocóptero
Reportaje aéreo	Reportaje fotográfico y cine	M	Cuadricóptero
Inspección y recolección de información en desastres naturales	Inundaciones, huracanes, terremotos	M, A	Hexacóptero
Agricultura	Agricultura de precisión, análisis del terreno y cultivos, etc.	M	Cuadricóptero
Inspección de radiación en industrias nucleares o contaminantes	Vertidos contaminantes como el petróleo y radioactivos	M, A	Hexacóptero
Comunicación	Redes de comunicación	M	Cuadricóptero Hexacóptero

Tomado de (A. Barrietos, J. del Cerro, A. Martínez, R. San Martín, C. Rossi y P. Gutiérrez., 2007, p. 9).

Nota. En varias de estas aplicaciones, las distancias entre el VANT y la estación terrena, tienen una variación de metros y en ocasiones de kilómetros.

Para un adecuado desarrollo de estas aplicaciones, es necesario el trabajo en conjunto con la estación terrena.

a. M: Multirrotor, A: Ala Fija.

3.1 Aplicaciones civiles de los VANT

La sociedad actual, demanda el uso de los UAV en actividades diarias, lo cual evidencia la importancia de estas plataformas en la vida cotidiana del ser humano; es por ello, que a continuación se detallan los beneficios que se obtienen al emplearlos, tomando como punto de partida las aplicaciones descritas en la Tabla 4.

3.1.1 Inspección de infraestructuras

La inspección de infraestructuras es una aplicación que abarca los servicios relacionados con la supervisión y mantenimiento predictivo, correctivo y preventivo de diversas zonas, dando al trabajador la facultad de determinar si la infraestructura posee daños ocasionados por el tiempo de vida útil, cambios atmosféricos, inadecuados diseños arquitectónicos, entre otros, permitiendo al operario actuar de manera rápida y concisa antes de que suceda un desperfecto parcial o total de la misma. Con esta aplicación, se logra la reducción de costos, ahorro de tiempo de inspección y sobretodo se evitan riesgos para los trabajadores encargados de esta labor.

Las aplicaciones que cubren la inspección de infraestructura son: supervisión de líneas de transmisión de alta y media tensión, torres, sistemas energéticos fotovoltaicos y eólicos, oleoductos, carreteras, gasoductos, obra civil, entre otros, como se observa en la Figura 15.

La plataforma cuenta con un amplio registro gráfico que almacena todos los acontecimientos observados durante la inspección, con la finalidad de elaborar un documento con los registros obtenidos de los vuelos realizados para tomar medidas preventivas y correctivas ante sucesos de esta índole.



3.1.1.1 Inspección de líneas de transmisión de alta y media tensión

La tecnología de los UAV aporta de manera significativa al sector eléctrico, su principal objetivo es inspeccionar las líneas eléctricas en zonas de difícil acceso, los posibles efectos de corrosión en la infraestructura, que son ocasionados por el medio ambiente o por el flujo de corriente que atraviesa la línea, así como la inspección del cableado de las torres de alta tensión que en algunas ocasiones sobrepasan los 55 [m] de altura. Los VANT que emplean las empresas eléctricas cuentan con tiempos de vuelo de 25 [min] y peso del vehículo aéreo de 4 [Kg], provistos con cámaras de video de alta definición que proporcionan imágenes de

alta calidad; de igual manera, incorporan sensores por si existe acercamiento hacia los cables de alta tensión, advirtiendo de esta manera al operador la necesidad de alejarse; además, permiten la detección de pérdidas, daños y fallas de operación en las líneas eléctricas o en sus componentes críticos. Son capaces de mantenerse estables ante la presencia de vientos fuertes y son muy eficaces puesto que reducen costos de operación, evitan pérdidas de suministros y reducen el riesgo laboral.

3.1.1.2 Sistemas de Energía Eólicos y Fotovoltaicos

3.1.1.2.1 Turbinas Eólicas

El desarrollo de los UAV en el área de inspección de sistemas eólicos es notable, debido a la estabilidad de vuelo presentada en estas plataformas, soportando vientos fuertes de hasta 44 [Km/h] de velocidad y el transporte de elementos pesados como cámaras de video de alta resolución; permitiendo al operador, examinar alrededor de nueve turbinas diarias con el envío de imágenes desde la videocámara hacia la estación base.

3.1.1.2.2 Paneles de energía fotovoltaicos

Los RPA usados para la inspección de los paneles fotovoltaicos están equipados con cámaras termográficas de alta definición; logran identificar inconvenientes en el panel mediante el uso patrones de temperatura, pues las células fotovoltaicas deterioradas presentan niveles de temperatura elevadas; además, visualizan si existen desgastes por su continua utilización o residuos orgánicos causados por los efectos climatológicos.

3.1.1.3 Oleoductos y gasoductos

Los UAV tienen lugar en el sector de los hidrocarburos, especialmente en campos petroleros, debido al patrullaje que realizan en zonas extensas y

desoladas donde su acceso y control es complejo; además, reportan de manera inmediata a la estación terrena si existen averías en ciertos tramos de la tubería, por la ventaja de vuelo a bajas altitudes con cámaras, sensores electro-ópticos, y sistemas infrarrojos adecuados para este tipo de inspección, logrando actuar con eficiencia en la reparación del daño.

3.1.1.4 Obra civil

La utilización de los UAV en el campo de la construcción o edificación, adquiere importancia en la realización de inspecciones técnicas, mantenimientos en obras civiles o en proyectos urbanísticos; con el propósito principal de observar daños producidos durante la construcción, además de supervisión del cumplimiento en medidas de seguridad y controlar los plazos de entrega de la obra. Otros motivos que justifican el uso de estas plataformas en obras civiles, es su capacidad para promover, planificar o comercializar nuevos proyectos u obras; por ejemplo, el UAV captura imágenes desde diferentes perspectivas y las envía a un software dedicado a realizar diseños digitales en 3D y métodos de realidad virtual, generando vistas para un correcto diseño final del proyecto.

Además, el uso de los Vehículos Aéreos No Tripulados, permite dar seguimiento en la ejecución de una obra civil, así como del cumplimiento de medidas de seguridad y ejecución de tareas 3D (*Dangerous, Dirty and Dull*). Por otro lado, al combinar el uso de los VANT con otras tecnologías como la construcción digital o nueva materia prima de fabricación, se conseguirán edificaciones de rascacielos del futuro.

3.1.2 Cartografía y Fotogrametría

El empleo de los Vehículos Aéreos No Tripulados se extiende hacia aplicaciones de cartografía y fotogrametría, con el propósito de realizar la actualización de mapas a diferentes escalas para proyecciones urbanas, elaboración de diseños digitales y modelos de elevación de determinadas zonas.

La fotogrametría es la ciencia que reúne métodos y procesos necesarios para la medición de coordenadas tridimensionales y creación de cartografías, mediante la fotografía aérea y puntos topográficos de referencia. A partir de las imágenes obtenidas, realizan mediciones de propiedades geométricas de los elementos y entornos espaciales.

Para el manejo de imágenes y elaboración de cartografías, se necesita tanto de dispositivos de captura así como de software para el diseño de mapas. Con respecto a los componentes de captura de imágenes se tienen:

- UAV con cámaras incorporadas.- Este tipo de plataformas son utilizadas en aplicaciones que demanden captura de información con pequeño formato de resolución, como en eventos deportivos.
- Integración de cámaras de alta calidad con 36 megapíxeles de resolución y la posibilidad de intercambiar los lentes, logrando un mayor enfoque en la recolección fotográfica.
- Dispositivo GPS.- Para la obtención de información, es necesario contar con la precisión que ofrece este dispositivo, logrando una adecuada exactitud por medio del uso de puntos de control establecidos de manera uniforme sobre el territorio definido.

Una vez obtenida la información, se envía a un programa especial que realiza el proceso de fotogrametría, por medio de una nube de puntos (conjunto de registros obtenidos con el sistema de coordenadas X, Y, Z) de referencia y el uso de varias fotografías. Entre más puntos se obtenga, mejor es el detalle e información, logrando al final un diseño digital de la zona monitoreada, como se observa en la Figura 16.

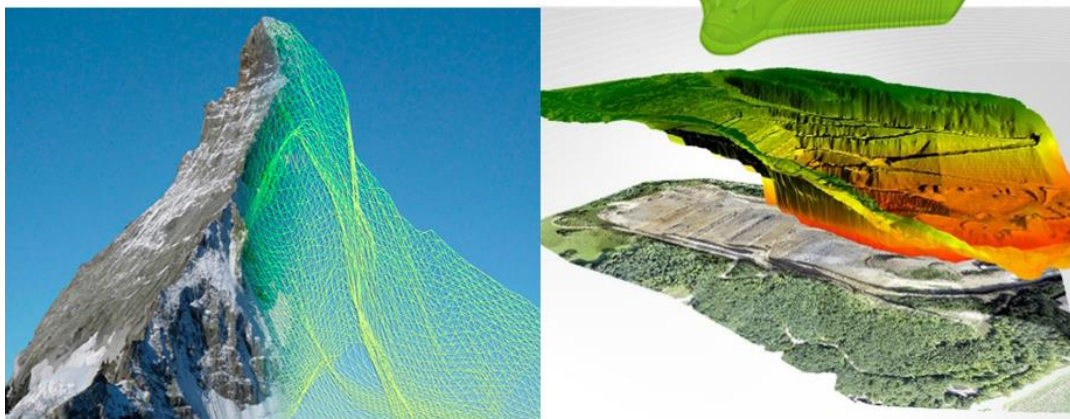


Figura 16. Nube de puntos y UAV con fotogrametría aérea

Tomado de (Geodronsl, 2014).

Hay varias aplicaciones que asocian el uso de la cartografía, destacando el reajuste y comprobación de datos urbanos y trabajos en centros históricos, control y monitoreo continuo de zonas con reservas naturales, trabajos en áreas con valor ambiental mediante la caracterización e identificación de elementos ambientales de exclusivo valor, y finalmente control de técnicas de reasentamiento de la ciudad generados por trabajos civiles de infraestructura o métodos progresivos de asentamientos urbanos.

3.1.2.1 Reajuste y comprobación de datos urbanos y trabajos en centros históricos

Los VANT son utilizados por los municipios para el estudio real y espacial de determinados lugares, con el propósito de obtener registros e inventarios actuales de zonas y monumentos patrimoniales de valor histórico. El UAV sobrevuela el área declarada como centro histórico y recolecta información a fin de detectar si existen alteraciones de la estructura predial; además, permite identificar construcciones cercanas a los sectores históricos y pérdidas forestales en sus alrededores, como se observa en la Figura 17.



Figura 17. Actualización de información urbana

Tomado de (Planifica Sustentable, 2015).

a. A la derecha imagen registrada del 2013; a la izquierda, imagen tomada con un UAV 2015.

3.1.2.2 Control y monitoreo continuo de zonas con reservas naturales

Para la mayoría de ciudades, rescatar y tener recursos ambientales es esencial para la sobrevivencia de flora y fauna en sus zonas; es por ello, que con el apoyo de las aeronaves no tripuladas, los gobiernos realizan un registro fotográfico de las reservas naturales que poseen, con el fin de conocer con detalle y precisión el estado de los parques y bosques protegidos; de igual manera, observan si parte de las zonas naturales han sido consumidas o deforestadas por los sectores de producción industrial. Por tanto, con el empleo de estas plataformas, se toman acciones como limitar y controlar la mayoría de bosques, con el objetivo de recuperar y conservar los recursos ambientales para el beneficio de toda la sociedad.

3.1.2.3 Control de técnicas de reasentamiento de la ciudad

Este tipo de técnicas, son realizadas por medio de trabajos civiles de infraestructura o métodos progresivos de asentamientos urbanos. Las municipalidades de cada país, ejecutan proyectos urbanos que incluyen la reubicación de infraestructuras como aeropuertos, edificios, carreteras o elaboración de un reasentamiento de viviendas familiares; para ello, los VANT consiguen una amplia visión de los sectores o barrios donde el número de viviendas ha incrementado y los compara con registros anteriores, con el fin de realizar programas de mejoramiento en gestiones urbanas.

3.1.3 Patrullaje aéreo

Una de las aplicaciones que comprende un análisis de la superficie de la tierra a través de sensores incorporados en los UAV, es el patrullaje aéreo, el cual abarca los siguientes tipos de observación o vigilancia:

3.1.3.1 Vigilancia terrena

Los UAV vuelan sobre territorios peligrosos o de interés, consiguiendo diferentes tipos de imágenes que son monitorizadas desde una estación terrena, donde se puede obtener lo siguiente:

- Amplio rango de observación y ubicación de accidentes ocasionados por el hombre en zonas de difícil de acceso y peligro para las personas
- Inspección en las riveras de los ríos, con el propósito de protegerlos de los efectos causados por la contaminación. Esta labor se realiza a través de patrullajes frecuentes a lo largo de su recorrido, para visualizar zonas existentes de basura y estanques contaminados, donde los RPA cubren radios de operación de 400 [m] y una altura de 50 [m], alcanzando grandes áreas en corto tiempo y mediante el uso del GPS y demás dispositivos

mencionados en el Capítulo 2, que se instalan en el vehículo aéreo con lo que se logra la recolección de información más eficaz

- Observación y monitoreo forestal
- Revisión del estado de los depósitos de agua, con la finalidad de medir el contenido o nivel del agua de los mismos a través de reflexiones de luz. Posterior al trabajo realizado, se elaboran cuadros estadísticos y programas de prevención.

3.1.3.2 Vigilancia marítima

Los servicios que presta la vigilancia marítima por medio del uso de plataformas no tripuladas, se enfocan en la visualización de áreas oceánicas asignadas para estudio o investigación científica, así como la observación de zonas marinas consideradas como peligrosas para la navegación. Otras aplicaciones que se obtienen son:

- Vigilancia y control de fauna marina para la protección de especies en peligro de extinción
- Identificación de la pesca ilegal, lo cual se logra con el apoyo de guardacostas y patrullaje aduanero para la detección de personas que se encuentren cometiendo este delito. Para esta aplicación, existe la posibilidad de programar patrullajes autónomos, de acuerdo al rendimiento de la nave
- Control de residuos y derrames tóxicos provenientes de embarcaciones marinas (barcos, buques, canoas, etc.), o procedentes del ser humano
- Prevención de accidentes en playas y océanos, especialmente en temporadas de mayor afluencia de turistas. Estos accidentes, se presentan en gran cantidad por aficionados y practicantes de deportes extremos, donde el UAV es capaz de transmitir de manera inmediata alertas a equipos salvavidas para socorrer en el menor tiempo posible y así evitar pérdidas humanas.

3.1.3.3 Vigilancia de zonas fronterizas

Uno de los campos más importantes que cubre el UAV y presume un verdadero cambio en la manera de gestionar los mayores desafíos en estos últimos años, es la vigilancia y control fronterizo, con la finalidad de evitar inmigraciones. Es así, que naciones desarrolladas, en especial las que tienen fronteras contiguas con países tercermundistas, tienen mayor afluencia de inmigrantes en sus estados, por lo que se han visto obligados a tener un control de sus zonas fronterizas para mantener a salvo a las personas que traspasan ilegalmente hacia sus territorios y así combatir a las mafias que se dedican a esta actividad ilícita.

A pesar de los constantes esfuerzos que cada nación realiza usando técnicas tradicionales como implementación de vallas y extensión del patrullaje con policías en sus fronteras, no se ha logrado contrarrestar esta problemática por los excesivos costos que generan estos métodos; es por esta razón que varios países optan el empleo de VANT, con el propósito de inspeccionar áreas desiertas donde no exista ningún tipo de control o en zonas de complicado acceso por tierra, logrando aminorar costos y obteniendo menores tiempos de intervención ante este tipo de eventos.

3.1.4 Reportaje aéreo

La utilización del VANT en el reportaje aéreo, ofrece auténticos trabajos periodísticos, ya que adquiere fotografías panorámicas y grabaciones de video de alta calidad obtenidas desde diferentes ángulos de visión. Estas aplicaciones son empleadas en diversos tipos de eventos; por ejemplo, los medios televisivos comienzan adquirir los conocidos UAV reporteros, pues tienen la capacidad de ofrecer servicios como:

- Seguimientos de protestas, especialmente en aquellas manifestaciones que finalizan con incidentes violentos. Por medio del vehículo no tripulado,

se logra identificar personas involucradas como agresores y/o heridos, así como los daños o pérdidas producidas por dicha protesta

- Supervisión del tráfico vehicular, permitiendo a la ciudadanía tomar vías alternas para evitar la congestión del tránsito de vehículos
- Filmación de eventos, donde se ha evidenciado su mayor aplicación en eventos deportivos
- Seguridad pública, identificando actores de delitos y su difusión por los medios de comunicación para la intervención inmediata del personal encargado y la prevención de futuros delitos.

3.1.5 Inspección y recolección de información en desastres naturales

En la actualidad, los UAV cumplen un papel importante en cuanto se refiere al entorno ecológico y sus catástrofes o desastres naturales, priorizando eventos como terremotos, inundaciones, desbordamientos de ríos, maremotos, erupciones volcánicas, tornados, etc.; teniendo como principal objetivo, la gestión de los problemas ocasionados por estos eventos. El monitoreo, búsqueda o inspección, se realiza en conjunto con personal calificado para la maniobrabilidad del vehículo, sobrevolando durante extensos periodos de tiempo por zonas particulares. Al contar de manera favorable el UAV con una visualización desde el aire y la factibilidad de acceder a lugares de baja visibilidad mediante el uso de cámaras termográficas, brinda servicios como:

- Localización de personas desaparecidas
- Asistencia y rescate de seres humanos que requieran atención inmediata durante o posterior al desastre natural
- Envío de provisiones, medicinas, alimentos, pintas de sangre, etc.

El uso de los Vehículos Aéreos No Tripulados en los eventos naturales mencionados en esta aplicación, permite actuar de manera eficiente e instantánea ante situaciones en donde el ser humano tardaría cierto lapso de tiempo en arribar al lugar de los hechos, evitando poner en riesgo la vida de la

persona encargada, al enfrentarse a las condiciones que puedan presentar estas catástrofes. Existen prototipos que ya han sido partícipes de este tipo de ejercicios como: Microdone MD4-1000, un cuadricóptero utilizado durante la inundación en Bosnia del 2014; otro ejemplo adicional, es el RPA que atendió situaciones de emergencias en el maremoto de Austria del 2010, así como el VANT utilizado en el terremoto de Nepal en el 2015.

Las plataformas aéreas no tripuladas, pueden alcanzar la formación de un sistema robusto mediante el conjunto de varios UAV, para ofrecer redundancia en sus actividades asignadas, con la ayuda y colaboración de las demás aeronaves; de esta manera se transmite información de manera simultánea, logrando abarcar mayor cantidad de áreas para la recolección de datos en catástrofes ambientales.

3.1.6 Aplicaciones de los UAV en el sector agropecuario de precisión.

La agricultura de precisión se relaciona con la agronomía que radica en el manejo distintivo de los sembríos a partir del estudio de la variabilidad y para ello se emplean equipos tecnológicos como los GPS, fotografías multiespectrales conseguidas a través de satélites y vehículos aéreos no tripulados, evidentes en una explotación agraria.

Es por esto, que el sector agropecuario es uno de los campos civiles más prometedores para los UAV, debido a que ofrecen varias aplicaciones para la agricultura, como volar de manera rápida y recolectar variedad de información con ayuda de sensores multiespectrales integrados en la aeronave o a través de sensores planta-suelo-clima que se implementan directamente en la tierra, ayudando a los agricultores o encargados del cultivo, a controlar sus sembríos e incrementar su producción; además, los agricultores tienen técnicas operacionales como unir diversos sensores a fin de determinar el cambio o modificación espacial, temporal de las fincas, obteniendo precisión aeroespacial al momento de recoger información, siendo exacto en los datos tomados del

área, recopilando en forma digital a manera de mapas y tablas con la finalidad de ayudarles en la toma de decisiones del cultivo (fumigación, fertirrigación⁹, podas) y la reserva temporal de aquellos datos. Razón por la cual, tienen altos rendimientos ambientales, sociales y económicos, creciendo en competitividad por medio de la eficacia en las destrezas agrícolas. En la Figura 18 se pueden observar las principales actividades de inspección que se realizan en el campo agrícola mediante el uso del VANT.



Figura 18. Inspección del campo agrícola por medio de un UAV
Tomado de (Innovaspain, 2016).

3.1.6.1 Aplicaciones viables de los UAV en la agricultura

Los UAV proporcionan a los agrónomos la capacidad de visualizar sus producciones desde el aire, sobrevolando el área de cultivo cada hora, día e

⁹ Técnica que faculta la utilización combinada de fertilizantes y agua por medio del procedimiento de riego; además de emplear los perímetros de riego localizados de alta frecuencia a fin de suministrar los indispensables nutrientes a la planta.

inclusive semana, con el propósito de dar seguimiento al progreso de sus cultivos y procedimientos agrícolas empleadas; del mismo modo, brindan información sobre el estado hídrico de la siembra, su nivel de evolución vegetativo y su estado sanitario, todo esto en tiempo real para tomar medidas en métodos sanitarios, ejecutar fertilizaciones y riegos, en los campos agrícolas donde sea indispensable realizarlo; además, descubren cualquier incidencia como: dificultades en la fertirrigación, invasiones de hongos y plagas que no se observan a nivel de la tierra; estas visualizaciones se realizan en las zonas del espectro del infrarrojo térmico y reflejado a través del uso de las cámaras multiespectrales, permitiendo al agricultor tener un adecuado punto de vista de lo que está sucediendo en la producción agrícola para que tome medidas de acción inmediatas.

A continuación se describen las aplicaciones más generalizadas que se usan en la agricultura con los VANT:

3.1.6.1.1 Manejo eficaz del agua

El estrés por carencia hídrica en las plantas perjudica a la mayoría de sus funciones vitales, minimizando la transpiración y elevando el nivel de calor de las hojas, este incremento de temperatura se consigue controlar a través de sensores térmicos, donde se obtiene una estimación sobre las insuficiencias hídricas de cada planta, tomando como medida, el aplicar la cantidad necesaria de agua para cada una de ellas.

3.1.6.1.2 Tratamientos ubicados de herbicidas

Para realizar este tipo de tratamientos ubicados de herbicidas únicamente en las áreas infectadas y lograr adquirir la dosis y herbicida adecuado, es indispensable cartografiar y divisar con exactitud la maleza. En la mayoría de casos, este tipo de tratamientos se lo emplea en etapas tempranas, cuando el cultivo y la maleza están en un estado fenológico de la planta, por lo que, al estar en este estado de

desarrollo posee una manifestación espectral, y una vez, ubicado, es preciso su apartamiento teniendo en cuenta la densidad y composición de la maleza.

3.1.6.1.3 Percepción anticipada de enfermedades y plagas de siembra

La capacidad que tienen los VANT al obtener fotografías multiespectrales a cada instante, ayudan a percibir de manera inmediata los cambios que se están suscitando en la siembra, donde la combinación de esta información con predicciones atmosféricas de detalle, permiten detectar y tomar medidas de inspección sobre las enfermedades, principalmente causadas por hongos.

3.1.6.1.4 Inspección de zonas fumigadas y utilización adecuada de fertilizantes

Las imágenes adquiridas a través de los vehículos aéreos no tripulados, son consideradas como herramientas operativas necesarias para el continuo seguimiento de acciones que se realizan sobre los campos de fincas; además con la localización del estrés nutricional en los sembríos, mediante los sensores que evalúan la evolución vegetativa, ayudan a un adecuado empleo de fertilizantes, usados únicamente en zonas afectadas.

3.1.7 Inspección de radiación en industrias nucleares o contaminantes

Un campo importante en que los UAV prestan servicios considerables, es en el sector de la industria nuclear, esto se debe en respuesta a los incidentes ocurridos en lugares como Fukushima Daiichi en Japón y Chernobyl en Ucrania donde se liberaron enormes cantidades de radiación a través de la atmósfera; es por esta razón que los Vehículos Aéreos No Tripulados son necesarios, ya que están en la capacidad de efectuar trabajos de inspección y detección de radiación en sitios con mayor gravedad de contaminación, reduciendo de manera significativa la presencia de operadores para las labores de neutralización. Sin embargo, dado que existen partículas radioactivas en el aire, esto provoca que los VANT padezcan de desgastes que causan fallas continuas o totales de la

aeronave. Para contrarrestar este deterioro en sensores, motores, equipos electrónicos y fuentes de energía, se realiza un blindaje apropiado a fin de que posean una vida útil de 25 [h], esto quiere decir 300 vuelos de 5 [min] ante radiaciones absorbidas de 10 [Gy]¹⁰.

Debido al peso extra del blindaje, el VANT utilizado es el hexacóptero, ya que produce una fuerza de empuje mayor a 117.68 [N], correspondiente a un peso equivalente de 12 [Kg], logrando así un correcto dominio de vuelo durante el trayecto en torno al reactor de energía nuclear dañado.

3.1.7.1 Efectos del tiempo de vida útil del UAV causados por radiación

Por la presencia de la radiación dispersa en el ecosistema, la duración del VANT se encuentra gravemente afectada, es decir, los deterioros que soportarán serán más bien de tipo radioactivo en lugar de fin de su vida útil, sufriendo de esta manera distintos daños en cada parte del UAV; además, genera un incorrecto funcionamiento o una falla crítica en la aeronave no tripulada, ya sea por propiedades como la mecánica, térmica, óptica o electrónica. Por ejemplo, la parte principal de los motores son las bobinas o inductores, que a pesar de ser resistencias envueltas con aislante, manifiestan fallas desde los 10 [Gy]; lo mismo sucede con los imanes para la realización de torque, en las que soportan cantidades de radiación de hasta 10⁶ [Gy] sin alteraciones magnéticas y la batería formada de litio que sufre un desgaste aproximado del 10%.

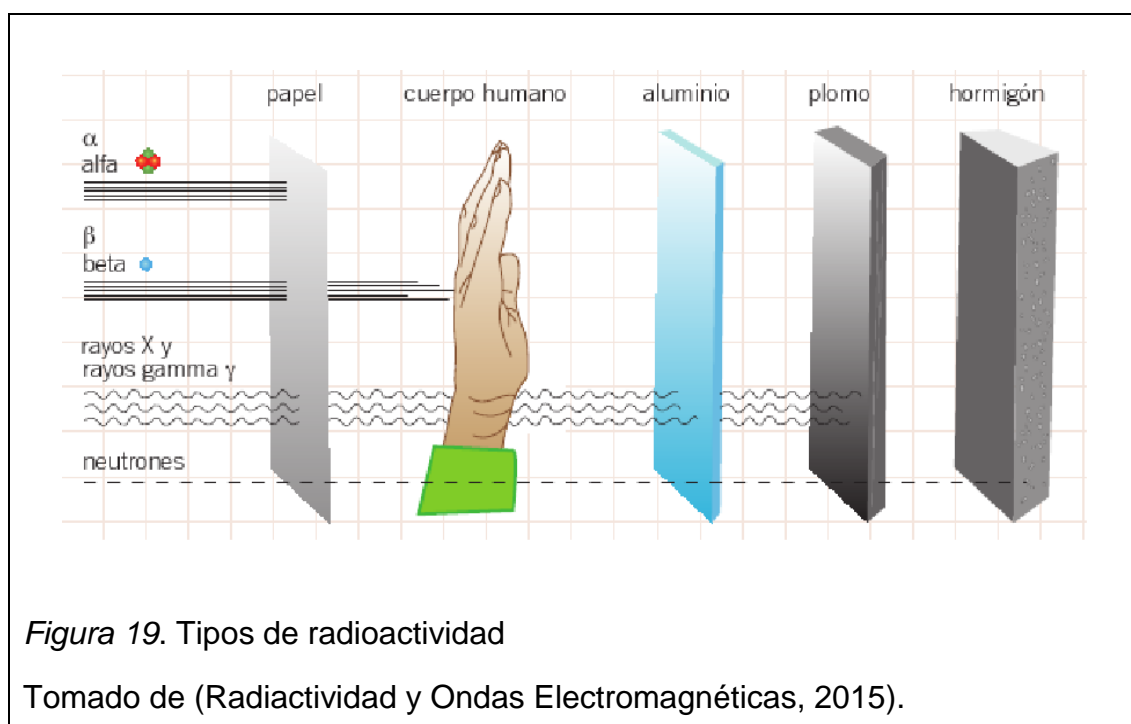
Los dispositivos electrónicos de igual manera sufren desperfectos a causa de la radiación, las cámaras de video al sobrepasar los 100 [Gy] el lente focal tiende a nublarse, teniendo como resultado la inoperatividad de la cámara; similar situación ocurre con el microprocesador, que presenta fallas como el aumento de la corriente en las conexiones o el incremento temporal de las señales.

¹⁰ Gy (Gray), se define como la unidad de absorción que mide la dosis de radiación absorbida por un material, equivalente a 100 [rad (*roentgen absorbed dose*)]

Respecto a la estructura, al superar los $5 \cdot 10^{11}$ [Gy], el material de aluminio se endurece, causando una pérdida en su capacidad de transmisión de calor; lo que no sucede con el plástico, ya que absorbiendo solo 100 [Gy] empieza a degradarse provocando rupturas y debilidad del material.

3.1.7.2 Blindaje

Existen tipos de partículas radioactivas como son β y γ en la atmósfera, siendo suficientes para causar daños tanto de tejidos humanos, así como de los materiales expuestos ante una alta intensidad de radiación como se visualiza en la Figura 19. El blindaje permite al UAV y a sus componentes electrónicos poseer una alta probabilidad de duración. (Bachfischer, 2014)



Con un blindaje garantizado se logra conservar de alguna manera la vida útil de dichos materiales. Por lo general, para prevenir la radiación β se debe realizar un adecuado blindaje, empleando materiales como el vidrio, aluminio o acrílico, ya que poseen un bajo número atómico y un espesor alto al de la penetración de las partículas en el objeto.

Con respecto a la radiación γ , el blindaje se realiza a través de un material de número atómico mayor como es el caso del plomo; por tanto, para proteger de manera eficaz a la mayoría de componentes existentes en un VANT ante los efectos de la radiación, es necesario que tenga un blindaje de 2 capas, es decir, que deben incluirse láminas tanto de acrílico como de plomo con sus respectivos espesores.

4. CAPÍTULO IV

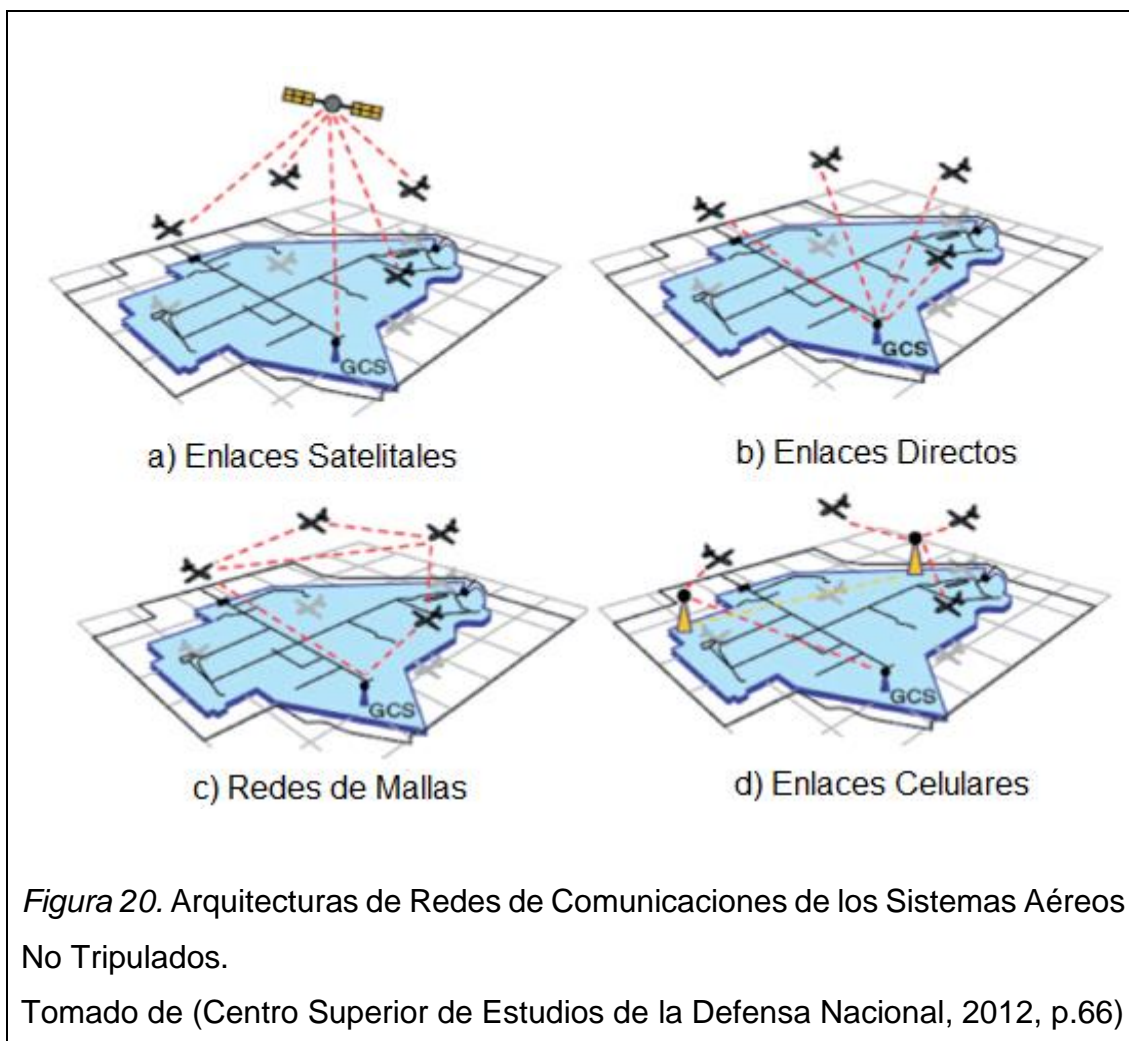
INTEGRACIÓN DE LOS UAV CON REDES DE COMUNICACIONES

Existen varias tecnologías para el establecimiento de la comunicación entre el Vehículo Aéreo No Tripulado y la estación terrena. De acuerdo a las aplicaciones de los UAV en el ámbito civil descritas en el capítulo anterior, se detallan en el presente capítulo los estándares y protocolos de mayor uso en la actualidad para llevar a cabo el enlace y formación de redes de comunicaciones, así como futuras tecnologías que se implementarán con el pasar del tiempo, debido a la gran demanda que se tiene con el uso de estas plataformas no tripuladas. El análisis y estudio de la aplicación de estos estándares, es de gran importancia para las exigencias que conlleva el empleo de nuevos equipos de comunicación con tecnología actualizada.

Finalmente, la red de comunicación formada con el UAV junto con dispositivos y protocolos requeridos para un correcto funcionamiento del sistema, se integra con una red local, ya sea de manera inalámbrica o terrestre, donde se consolida toda la información obtenida por las aeronaves no tripuladas para el estudio y diagnóstico según el objetivo propuesto.

4.1 Arquitecturas de Redes de comunicaciones

Dentro de las principales arquitecturas de red de comunicaciones utilizadas en las aplicaciones de los Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS), caben destacar cuatro arquitecturas básicas como son: enlaces directos, celulares, satelitales y redes de mallas (Ministerio de Defensa, 2012), los que se pueden observar en la Figura 20.



4.1.1 Enlaces directos

Este tipo de enlaces, conocidos también como punto a punto, representan el tipo de arquitectura de red de comunicación más sencilla. Son enlaces establecidos entre la GCS y el UAV, manteniendo de esta manera, una arquitectura centralizada en las estaciones terrestres y obligatoriamente se deberá sostener una comunicación constante con línea de vista al vehículo aéreo.

Los enlaces directos son utilizados en distancias cortas, para mayores distancias es necesario el uso de antenas con mayor concentración direccional y transmisores de elevada potencia, debido a los obstáculos existentes en el medio y esto ocasionaría el bloqueo o interferencia de la señal. Los enlaces punto a punto no

proveen técnicas que permitan la utilización del UAV en una misma zona geográfica.

4.1.2 Enlaces satelitales

Los enlaces satelitales se caracterizan por mantener una topología centralizada y permiten alcanzar una gran cobertura. Por el contrario, debido a la distancia que puede existir entre una Estación de Control Terrestre (GCS), el UAV y por supuesto el satélite de comunicaciones, se experimenta un cierto retardo en cuanto se refiere a la transmisión de la señal, el mismo que puede ser significativo con respecto a las aplicaciones en tiempo real. Es por ello, que para aplicaciones que demanden una alta tasa de datos, es de vital importancia el uso de considerables antenas con características apropiadas de acuerdo a la necesidad que se requiera en la instalación de la aplicación, como por ejemplo antenas directivas con mayor diámetro.

4.1.3 Enlaces celulares

Corresponden a una tecnología conformada por torretas, equivalente al diseño de telefonía móvil utilizado en la actualidad. Los enlaces celulares se destacan por proporcionar varios beneficios que permiten al usuario alcanzar elevados niveles de conectividad de red, que proporcionan una transmisión de información segura, para lo cual sobresalen de manera especial los siguientes aspectos:

- Su infraestructura logra aprovecharse por diversos sistemas aéreos no tripulados
- Se implementan numerosas estaciones base, en donde los sistemas no tripulados podrán efectuar el handover entre dichas estaciones conforme a las exigencias del vuelo, alcanzando de esta manera una gran área de cobertura

- En ocasiones, acorde al volumen de estaciones base que se incrementan en un determinado territorio, el ancho de banda asignado puede volver a ser utilizado según el número de ocasiones que sea necesario
- Los enlaces celulares al contar con múltiples estaciones base, admite la elección y sustitución de un enlace defectuoso con otro de mejor calidad en transmisión, proceso conocido también como redundancia natural.

Por las características presentadas en este tipo de enlace y los beneficios que se obtienen con el uso de redes celulares, se recomienda el empleo de esta arquitectura para la transmisión de información entre la estación base y el UAV, así como la integración de redes de comunicación con redes locales para las aplicaciones de las plataformas no tripuladas en el ámbito civil.

4.1.4 Redes de mallas

Las redes de mallas se definen como arquitecturas de redes, donde cada nodo puede desempeñar la función de repetidor que faculta la retransmisión de la información.

El enlace UAV-GCS puede incluir saltos, mediante la instalación de múltiples nodos intermedios. La transmisión avión-avión puede ser directamente, logrando beneficiarse de los protocolos establecidos para el enrutamiento de la malla, utilizando los nodos suplementarios esenciales para conservar la comunicación.

Este tipo de arquitectura puede ser utilizado por otro tipo de diseño como los enlaces directos, satelitales, o redes celulares; dichas topologías en una red de malla, provee el intercambio de información con todos los nodos, consiguiendo de esta manera una redundancia en el enlace, así como el vínculo con otras redes, o a un centro de control remoto.

4.2 Enlaces de comunicación entre la estación base y el VANT

Para la correcta operación con los VANT son necesarios varios radioenlaces, de los cuales se detallan a continuación los principales entre la GCS y el UAV:

- Control Primario del VANT - *Uplink*.- Provee el control de la plataforma no tripulada y el *payload* mientras se realizan las misiones de vuelo, luego de efectuarse el enlace entre la GDT (*Ground Data Terminal*) con el VANT.
- Control Secundario del VANT - *Uplink*.- Permite tomar el mismo control del enlace anterior cuando se presenta algún desperfecto en el enlace principal.
- Telemetría del VANT - *Downlink*.- Establece la señal del video en tiempo real desde el VANT al MPS (*Mision Planning Station*) en la estación base. Además, muestra el registro downlink de información del vuelo a la estación terrena y el LRS (*Launch and Recovery Station*).
- *Command Net* del VANT (VHF-UHF). Esta red se emplea para adaptar la plataforma no tripulada entre los dispositivos de la estación terrena, RVT (*Remote Video Terminal*) y LRS.

4.3 Características de las tecnologías aplicadas en las redes de comunicaciones

A continuación se describen los estándares empleados para la comunicación entre la estación terrena y el UAV de mayor uso para la obtención de información en tiempo real, así como los protocolos sugeridos para el estudio y aplicación para la implementación de futuras redes de comunicaciones. Además, para delimitar algunas tecnologías poco usadas en los VANT, se señalan características de cada tecnología como distancias de coberturas, velocidades de transmisión, anchos de banda, etc., ya que desempeñan un papel importante en la toma de alguna decisión, sobre el tipo de protocolo que se va a emplear en las diversas tareas que abarca el UAV.

Protocolos como Bluetooth y WiMax no son considerados para el estudio en este proyecto, debido al corto alcance que posee Bluetooth y WiMax es una tecnología calificada como obsoleta, pues su último desarrollo fue en el año 2011 y por ello se evita el uso de este protocolo en varias aplicaciones, especialmente en lo que respecta al manejo de las plataformas no tripuladas. Estadísticamente, se comprueba que las tecnologías de mayor uso en las aplicaciones de los VANT en el ámbito civil en la actualidad son ZigBee y Wi-Fi. Por otro lado, el empleo de la red celular en estas plataformas está incursionando a nivel mundial con total éxito, siendo el protocolo 4G LTE por todos los beneficios que se obtienen del uso de esta tecnología, el recomendado para lograr establecer los enlaces necesarios con el UAV y garantizar el correcto funcionamiento de los mismos en la sociedad. Al ser la red celular actual, el medio considerado para el objetivo planteado en este trabajo, se investigan nuevas tendencias de protocolos al respecto; en donde la tecnología inalámbrica de Quinta Generación (5G) ya se encuentra en proceso de implementación para su uso en drones, como es el caso de la compañía Google que ha propuesto el empleo de estas plataformas no tripuladas con la tecnología 5G.

4.3.1 ZigBee

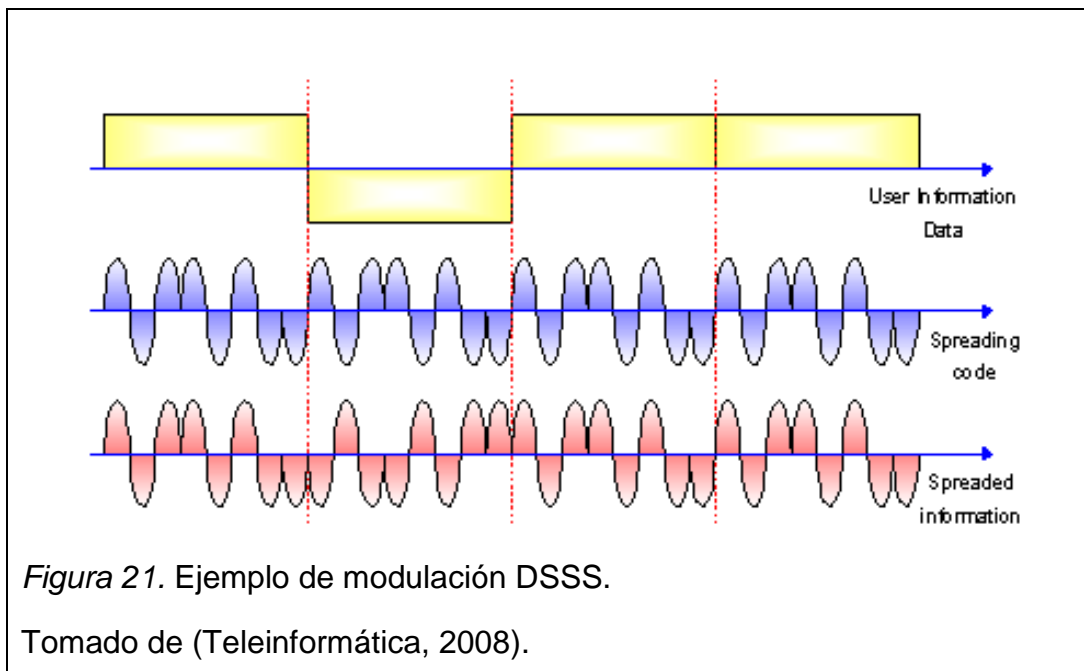
ZigBee es una tecnología de comunicación inalámbrica, utilizada tanto en entornos profesionales, así como de aficionados. Se caracteriza por lograr distancias desde los 30 [m] con un menor consumo energético. Igualmente, Zigbee no toma en cuenta el aumento de energía solicitada respecto a la distancia y la información transmitida por segundos, a pesar de que algunos dispositivos sobrepasan distancias de 15 [Km]. Asimismo, la red Zigbee, se caracteriza por tener variaciones en la velocidad de transmisión de datos que va desde los 10 [Kbps] hasta 256 [Kbps], además se fundamenta en el estándar IEEE 802.15.4 de las redes inalámbricas de área personal WPAN, con el propósito de orientarse a las redes inalámbricas seguras, con un eventual incremento de envío de datos y el aumento de la utilización de la energía, creada especialmente las redes de control y de sensores.

Tiene una arquitectura que se basa en el modelo OSI, en la que define la Capa Física, así como la Capa de Control de Acceso al medio de la capa de Enlace de Datos, donde el método de codificación de canal empleado en la capa física es el DSSS (Espectro ensanchado por secuencia directa), debido a que trabaja en cualquiera de estas bandas de frecuencia: 868 y 915 [Mhz]. Por otro lado, si usa la banda de 2.4 [Ghz] utiliza velocidades de 20, 40 y 250 [Kbps]. En cambio, la MAC (Control de acceso al medio), lo realiza a través del CSMA/CD impidiendo colisiones, insertando una tardanza aleatoria antes de utilizar el canal.

4.3.2 Estándar IEEE 802.11 (Wi-Fi)

El protocolo de comunicación 802.11 del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, conocido de igual manera como Wi-Fi, es un estándar de comunicación inalámbrica donde se especifica el empleo de dos capas del modelo OSI (*Open System Interconnection*), la capa física y la de enlace de datos. El 802.11 es una familia de protocolos en constante desarrollo tecnológico, destinando su evolución a redes inalámbricas de área local conocidas por sus siglas en inglés como WLAN (*Wireless Local Area Network*). Inicialmente, el protocolo utiliza velocidades de 1 o 2 [Mbit/s] en la banda de frecuencia de operación de 2.4 [GHz] y la modulación digital por desplazamiento de fase o PSK (*Phase Shift Keying*), la cual se caracteriza por ser la señal modulante una señal digital y consiste en la variación de la fase de la señal portadora en valores discretos. Con las versiones recientes del desarrollo del protocolo, se emplean diversas técnicas de modulación como:

- DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*).- Toma los valores discretos (ceros y unos), los mismos que son sustituidos por una secuencia de bits específicas para cada valor en el mismo intervalo de tiempo, logrando de esta manera una mayor resistencia de la señal ante ruidos e interferencias. Estas secuencias son conocidas como códigos pseudoaleatorios y son utilizados como ondas modulantes en un ancho de banda superior al de la señal original. Ver ejemplo de la Figura 21.



- FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*).- Transmite parte de los datos en determinada frecuencia durante un intervalo de tiempo fijo denominado *Dwell Time*, luego de este tiempo varía la frecuencia y se mantiene propagando a otra frecuencia diferente. Ver ejemplo de la Figura 22.

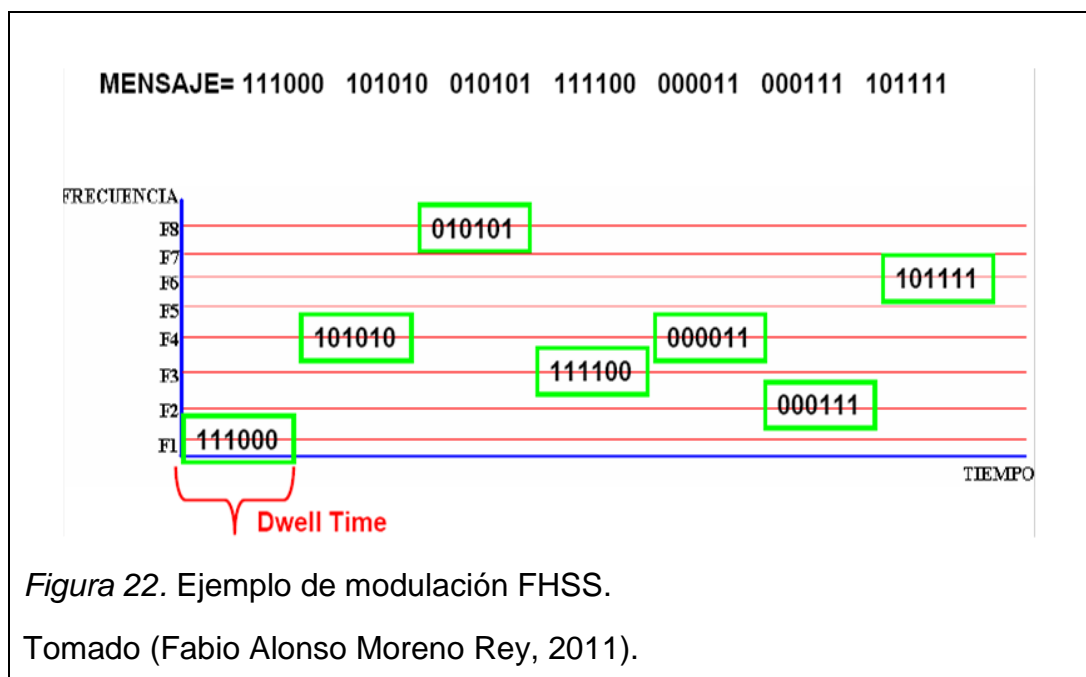
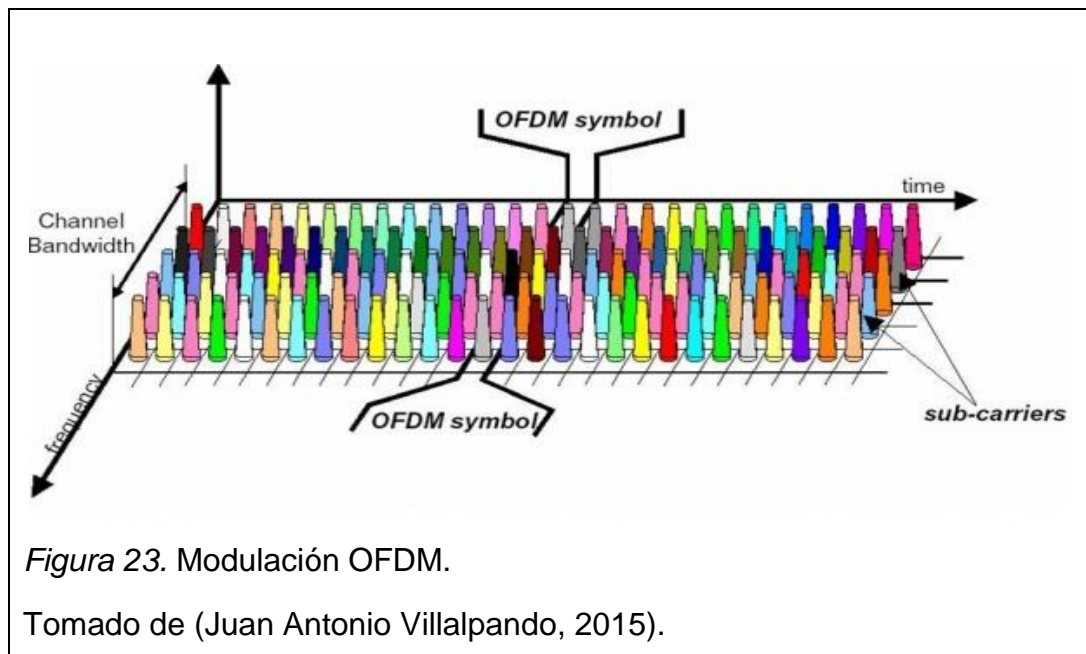


Figura 22. Ejemplo de modulación FHSS.

Tomado (Fabio Alonso Moreno Rey, 2011).

- OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*).- Técnica de modulación digital que consiste en dividir el espectro de frecuencias asignado en varios subcanales o subportadoras, las cuales se caracterizan por ser ortogonales y cercanas entre sí, permitiendo de esta manera eliminar la interferencia intersimbólica. Ver Figura 23.



- CCK (*Complementary Code Keying*).- Aumenta la eficiencia del uso de ancho de banda mediante el sistema de espectro ensanchado. Utiliza un conjunto de funciones conocidas como códigos complementarios para transmitir la información y obtiene velocidades de transmisión de 5.5 y 11 [Mbit/s] en la banda de 2.4 [GHz].
- MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).- Utiliza múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor, proporcionando mayores alcances en velocidades de datos y disminuyendo la vulnerabilidad a interferencias. Al utilizar la tecnología MIMO, se logra mayor cobertura y eficiencia en el enlace de comunicación.

Existen varias especificaciones o tipos de protocolos de la familia del IEEE 802.11, de los cuales en la Tabla 5 se mencionan los aplicados en los VANT.

Tabla 5. Principales protocolos de la familia IEEE 802.11 utilizados en los UAV.

Estándar	Características
802.11a	<ul style="list-style-type: none"> – Frecuencia de operación de 5 [GHz]. – Utiliza 64 subportadoras OFDM. – Velocidad teórica máxima de 54 [Mbit/s].
802.11b	<ul style="list-style-type: none"> – Banda de frecuencia de 2.4 [GHz]. – Velocidad teórica máxima de 11 Mbit/s. – Método de acceso CSMA/CA (<i>Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance</i>). – Alcance máximo de 300 [m] en ambientes abiertos o al aire libre y 100 [m] en ambientes cerrados. – Modulación DSSS.
802.11g	<ul style="list-style-type: none"> – Al igual que el estándar 802.11b, opera en la banda de frecuencia de 2.4 [GHz]; pero opera con las velocidades especificadas en el estándar 802.11a, siendo la velocidad teórica máxima de 54 [Mbit/s]. – Dispositivos del estándar 802.11g, tienen compatibilidad con los del 802.11b. – Mayor alcance y menor consumo que el estándar 802.11a. – Modulación OFDM, DSSS.
802.11n	<ul style="list-style-type: none"> – Última revisión de la familia de protocolos 802.11. – Funcionamiento en las bandas de frecuencia de 2.4 y 5 [GHz]. – Emplea canales de 20 y 40 [MHz]. – Velocidad de transmisión teórica hasta 600 [Mbit/s]. – Velocidad real de 100 a 250 [Mbit/s] en la capa física. – Modulación MIMO.

Tomado de (Medina A., Castro O., 2014)

Se puede mencionar además que personal de investigación de la Universidad del Norte de Texas, ha verificado que un UAV está en la posibilidad de emplear Wi-Fi en aplicaciones de búsquedas y rescates para situaciones ocasionadas por desastres naturales, llegando a obtener un alcance de hasta 5 [Km] para el sobrevuelo de la zona afectada; de esta manera, se confirma la mejora que se logra en este tipo de comunicación y con ello tomar como referencia para nuevos desarrollos en enlaces inalámbricos. Esta amplia cobertura puede ser alcanzada gracias al desarrollo de antenas direccionales, que mediante el giro sincronizado de la antena, logra alinear de manera automática a un objetivo específico y finalmente se obtiene un enlace de comunicación eficiente sin la preocupación de que la señal sea interrumpida.

Esta tecnología inalámbrica, es de gran beneficio para la ciudadanía civil posterior al desastre sucedido, puesto que las torres instaladas de telefonía móvil son afectadas y por ende no se mantiene una infraestructura de comunicación. Cabe recalcar, que para lograr este objetivo es indispensable contar con una estructura de estación terrena equipada con la tecnología adecuada para evitar la pérdida del sistema de comunicación.

4.3.3 4G LTE (Long Term Evolution)

La mayor cantidad de drones utilizan señales de corto y medio alcance como Bluetooth o Wi-Fi. Los UAV al utilizar una red de telefonía celular, podrían ir tan lejos como sus baterías lo permitan, logrando que la aeronave realice la entrega de paquetes de datos a través de largas distancias desde la ubicación de su controlador.

La tecnología 4G, que permite la conexión de dispositivos móviles, logra de igual manera el enlace con las aeronaves no tripuladas. Esta conexión, se realiza con la finalidad de transferir y recibir información con los operadores encargados del pilotaje y de esta manera tener la administración constante del vuelo en tiempo real, mediante el uso de teléfonos inteligentes junto con el uso de sensores y

controladores de vuelo instalados en la plataforma aérea. Con este tipo de sistemas de comunicaciones, se fortalece el concepto de Internet de las Cosas, compartiendo información útil que sea de beneficio para la ciudadanía; pues como se ha mencionado anteriormente, los UAV poseen gran potencial para la entrega de datos en diferentes aplicaciones para el ámbito civil.

Los receptores de este tipo de tecnología ofrecen anchos de banda superiores, así como tasas de transferencia elevadas de acuerdo a la movilidad del dispositivo (baja movilidad: 1[Gbps], alta movilidad: 100[Mbps]) y manteniendo una adecuada calidad de servicio. Por otro lado, LTE provee baja latencia de comunicación, permitiendo así una transmisión prácticamente inmediata hacia el VANT.

La red LTE, ofrece seguridad en el monitoreo y control de los drones para los operadores de red, autoridades de servicio público y gobiernos. Otro de los beneficios que se obtiene al usar este tipo de tecnología, es la entrega de imágenes y videos de alta calidad de manera eficiente y rápida, mucho más allá de los límites de las redes de corto alcance; así como nuevas características como lo es el video streaming, videoconferencias en alta definición o la apertura de aplicaciones interactivas como son los juegos en línea.

4.3.4 Tecnología inalámbrica de Quinta Generación (5G)

Existen varios planes con respecto a la utilización de la tecnología 5G, es así que grandes empresas líderes en telecomunicaciones, han puesto en marcha nuevos proyectos para dotar del servicio de internet a todo el mundo, esto se lo hará a través de UAV solares con la tecnología 5G, debido a que esta nueva tecnología podrá transmitir información en grandes cantidades; es decir, estará en la capacidad de enviar gran cantidad de Gigabits por segundo a través de ondas milimétricas y con velocidades de hasta 40 veces mayores con respecto a la tecnología actual 4G LTE. Además, las redes de Quinta Generación contarán con características de velocidad, latencia y fiabilidad, que permitirán una mayor

eficiencia al momento de trabajar, logrando mejores resultados en la obtención de información.

Para lograr esas altas velocidades con las redes 5G se hará uso de la banda de 28 [GHz], por lo que esta banda de frecuencias está saturada como el resto de las bandas utilizadas en el servicio móvil, uno de los problemas que se están observando en esta tecnología es el alcance de la señal debido a que se atenúa en función de la distancia que tiene que recorrer. Por otro lado, se obtienen varias aplicaciones con el uso de los UAV en las redes 5G, como el acceso a lugares de muy difícil acceso, vuelos sobre misiones críticas, de rescate, etc., esto se consigue gracias a las características presentadas en esta tecnología como alta confiabilidad con radioenlaces, latencia baja, largo alcance, velocidades superiores, entre otros. Sin embargo, para hacer uso de esta tecnología, será necesario contar con algunos requisitos técnicos como el acceso a bandas de frecuencia adecuada o el diseño apropiado de la interfaz de radio 5G; por ejemplo, para lograr un video de mayor calidad y resolución, serán necesarias velocidades de conexión ultra rápidas. (Pearson, 2015)

4.4 Integración de los estándares y protocolos con las redes locales

En la actualidad, la tecnología de mayor uso e importancia son las comunicaciones satelitales, la misma que brinda una gran variedad de beneficios con respecto a los enlaces comunes de radio. Este tipo de comunicaciones, no satisfacen en su totalidad la demanda de aplicaciones civiles que se presentan hoy en día con el uso de los vehículos aéreos no tripulados. Una de las desventajas más relevantes que implica el uso de la tecnología satelital es el peso y espacio que ocupan los dispositivos móviles necesarios para establecer el enlace como antenas o estación base; además, la compra y mantenimiento de estos equipos representa a nivel económico una gran inversión.

La tecnología celular actual, 4G, es una tecnología basada en el protocolo IP que permite la transmisión de voz y datos, además de la reducción de infraestructura y conversores de medios. Al ser esta tecnología interoperable con varios sistemas y redes, permite al usuario final y operadores de UAV, contar con mayor facilidad para el diseño de redes y la integración de las mismas con redes locales. Numerosos sectores industriales se benefician del uso de las plataformas no tripuladas, es por ello que mediante el apoyo de una red LTE ya existente, clientes y operadores logran el monitoreo y control de estas plataformas de manera centralizada para que finalmente la información obtenida durante una misión, sea transmitida o compartida hacia una red local simplemente con el uso de un dispositivo inteligente.

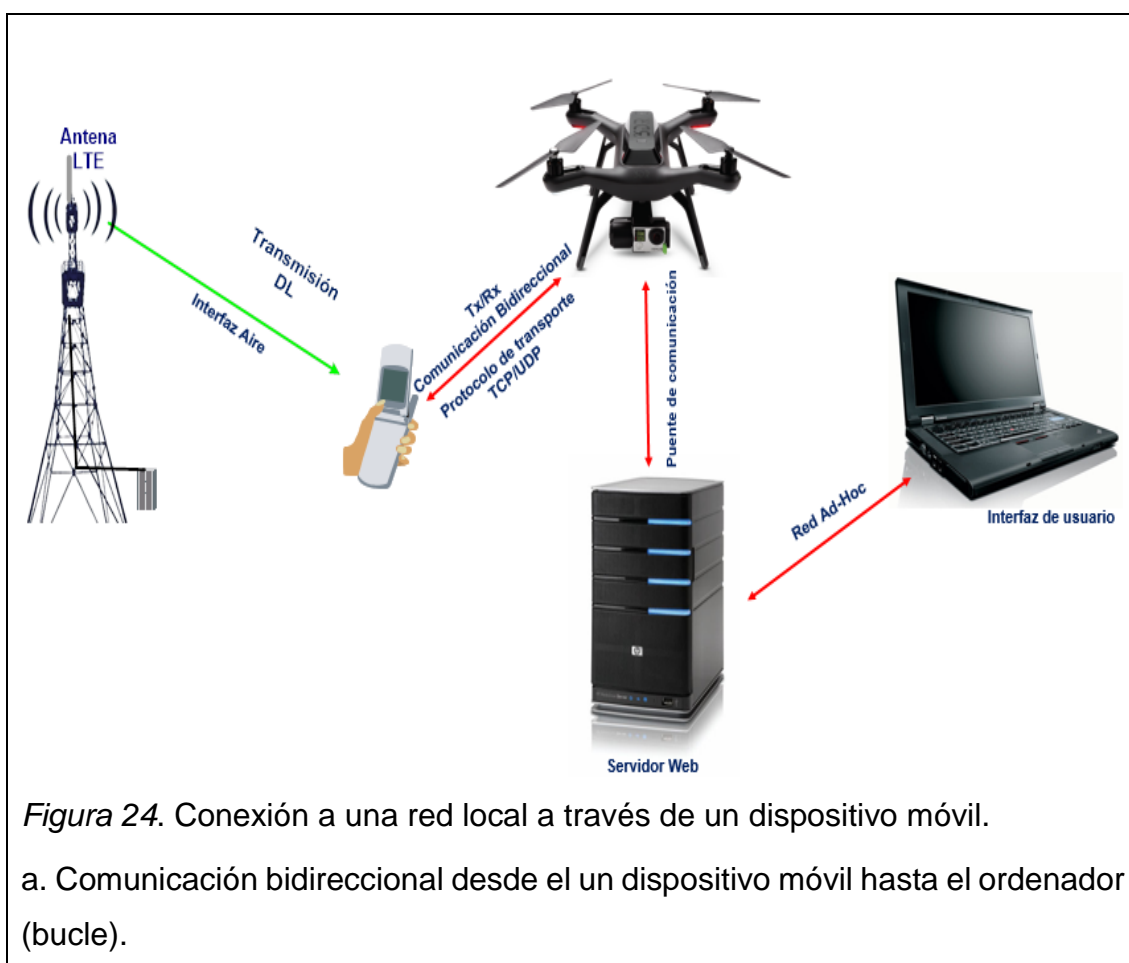
Una característica muy importante que se obtiene al usar una infraestructura de red celular ya existente, además de evitar el coste en la adquisición de equipos y materiales para instalación y mantenimientos, es que la tecnología 4G brinda mayor seguridad en la transmisión de la información, pues reduce el riesgo de infiltración o interferencia de la comunicación por medio del uso de ondas de radio licenciadas en lugar de realizarse por medio del espectro radioeléctrico público. Esto es un aspecto significativo para aplicaciones donde se comparta la información de manera local a entidades de seguridad pública o en el campo de la investigación.

4.4.1 Conexión a redes 4G LTE locales

Para el establecimiento de un enlace de comunicaciones de una determinada red entre la estación base y el UAV hacia una red local 4G, se la puede realizar por medio de la operación de un router que permita establecer la comunicación; o simplemente por medio de una tarjeta SIM de una compañía local de telecomunicaciones, evitando de esta manera la implementación de equipos adicionales. Con respecto al uso de dispositivos móviles con tarjeta SIM, existen equipos capaces de instalar doble tarjeta, siendo de mayor ventaja aún el empleo de los mismos pues logra el enlace con otros dispositivos por medio de los

operadores de comunicación local y así aumentar la capacidad en la transmisión de la información y reduciendo el volumen de equipamiento.

Un ejemplo básico de conexión hacia una red local, es mediante la creación de una red ad-hoc entre un dispositivo móvil inteligente con tarjeta SIM compatible con 4G y el VANT equipado con receptor 4G; luego de establecer esta conexión, el teléfono celular se transforma en un dispositivo de puente entre la plataforma no tripulada y un determinado servidor de datos público o privado, logrando así la transmisión y recepción de información entre estos dos equipos como se puede mostrar en la Figura 24. Posteriormente, esta información puede ser compartida a través de un ordenador, donde de igual manera se puede tomar el control del vehículo pues el servidor acepta conexiones a través del protocolo TCP/UDP.



Por el contrario, bajo el mismo concepto anterior, en una estación base se pueden recibir los datos de un UAV mediante el uso de un servidor y luego ser enviados a una red celular local ya instalada, para finalmente el cliente tomar el mando de la plataforma desde su dispositivo móvil como se observa en la Figura 25.

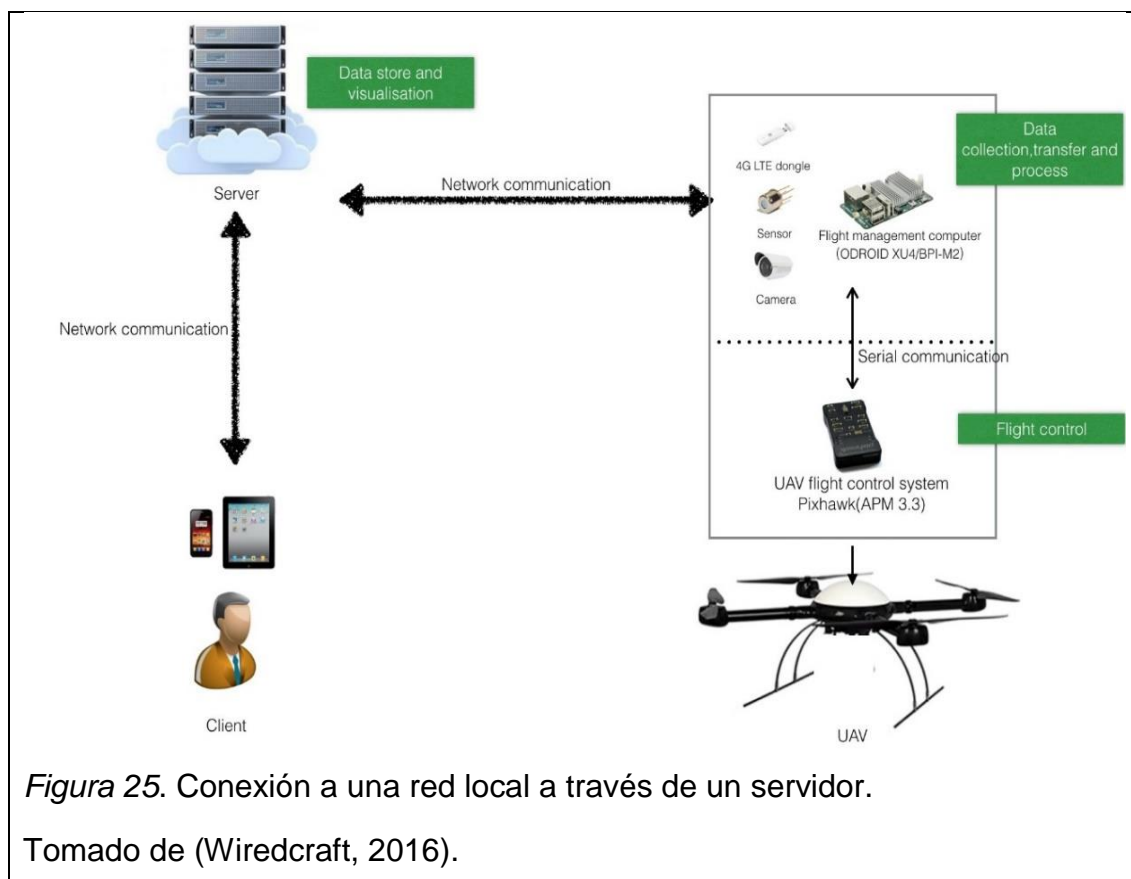


Figura 25. Conexión a una red local a través de un servidor.

Tomado de (Wiredcraft, 2016).

Cabe destacar que una de las principales ventajas del uso de esta tecnología, es el gran alcance que se obtiene con el uso, especialmente en aplicaciones como la búsqueda y rescate de personas, así como el patrullaje aéreo. No obstante, hay que tener presente que el éxito de esta integración con redes celulares locales, se mantiene durante la cobertura que exista en las zonas de trabajo asignadas de las antenas del servicio móvil ya instalado; es por ello que se debe seguir implementando la posibilidad de mayor cobertura celular a nivel nacional para evitar pérdidas en la comunicación.

La aplicación de la tecnología 4G LTE para el pilotaje de los sistemas no tripulados, permite al usuario operar desde cualquier parte del mundo con la ayuda de un operador desde tierra y una red celular. Este objetivo se cumple simplemente con el apoyo de un plan de datos de internet estándar, un set de dispositivos de monitoreo y un modem 4G LTE instalados en el UAV. Mediante esta conexión, estas plataformas pueden alcanzar vuelos a más de 60 millas dependiendo de la batería con la que se encuentre instalada y el operador es capaz de tomar el control durante todo el tiempo transcurrido, así como tiene la posibilidad de planificar misiones de vuelo autónomas.

4.4.2 Caso de éxito - Conexión de un UAV a red 4G LTE

Una de las empresas vendedoras de procesadores más grandes del mercado informático e impulsadora en el desarrollo e investigación de nuevas tecnologías a nivel mundial, Intel, se asoció en el presente año con la compañía de telefonía celular más importante de Norteamérica AT&T, con el objetivo de demostrar que los VANT logren establecer una comunicación inalámbrica con la actual tecnología celular 4G LTE, permitiendo de esta manera operar en zonas altas y en misiones de vuelo que se encuentren más allá de la línea de vista directa.

La principal meta de esta alianza es comprobar que mediante la red celular, diseñada para la conexión de equipos móviles, se pueden agregar diferentes dispositivos como las plataformas no tripuladas, con la finalidad de que estas aeronaves permitan enviar información a los operadores de vuelo para conseguir la administración de datos de manera permanente. Por otro lado, este tipo de enlace permitirá resolver varios inconvenientes de conectividad como seguridad en la transmisión de la información, interferencias en la conexión, mejorar la comunicación en tiempo real, entre otros. (Li, 2016)

Mediante la conexión de un teléfono inteligente a la cámara a bordo del UAV, el operador tendrá la capacidad de obtener la visión en tiempo real de la plataforma mientras realiza la misión de vuelo. Este tipo de enlace permite un manejo

eficiente de los dispositivos, dando un valor agregado al significado de Internet de las Cosas y entregando información importante que beneficie tanto al operador como a la sociedad de acuerdo al tipo de aplicación civil que se esté realizando.

Debido a la gran demanda de uso que los denominados drones tienen en la actualidad, muchos países han aumentado su preocupación en cuanto se refiere a las normas de seguridad que conlleva la utilización de estos dispositivos, razón por la cual Intel y AT&T se encuentran trabajando de igual manera en encontrar soluciones para regular el uso de los UAV, dependiendo de las normativas de cada nación.

4.5 Aplicaciones de los UAV en las redes de comunicación

4.5.1 Sistema móvil de conexión a internet para regiones remotas por medio de un UAV

Existen ejemplos donde se evidencia la capacidad de los UAV para brindar servicio de internet en sitios o regiones de difícil acceso. Es así, que empresas como Google o Facebook centran sus esfuerzos por construir Vehículos Aéreos No Tripulados, capaces de permitir la conexión a internet de gran velocidad a cualquier parte del planeta sin la necesidad de costosas instalaciones terrestres, para el beneficio de toda la población que hasta el momento no cuenta con este servicio de gran importancia en la actualidad.

Con respecto al caso de Google, la compañía cuenta con un UAV de última generación denominado “*SkyBender*”, el mismo que se abastece de energía solar con el objetivo de permanecer en el aire por varios días, sin la necesidad de descender a tierra para ser recargados de energía. Estos UAV se asocian con la nueva tecnología 5G, basada en ondas milimétricas y con velocidades de transmisión superiores a la tecnología actual 4G LTE. De igual manera, Facebook inició la construcción del UAV “*Aquila*”, que tiene como propósito cubrir

una amplia extensión territorial, a fin de brindar el servicio de internet a millones de personas que aún no cuentan con el mismo. Este UAV se caracteriza por su capacidad de vuelo, es decir, pueden permanecer en el aire por 90 días, a grandes alturas que pueden alcanzar los 27 [Km], ya que poseen en sus alas células solares. Además, estas plataformas no tripuladas estarán en la capacidad de conectarse con otros UAV y lograr de esta manera una red que abarque mayor espacio geográfico, la misma que mantendrá comunicación permanente con equipo terrestre. La comunicación que emplean estas plataformas, es tecnología de tipo láser, ya que así podrán conseguir velocidades de transmisión de 10 [Gbps] a dispositivos electrónicos que se encuentren a 10 [Km] de distancia, como se observa en la Figura 26.

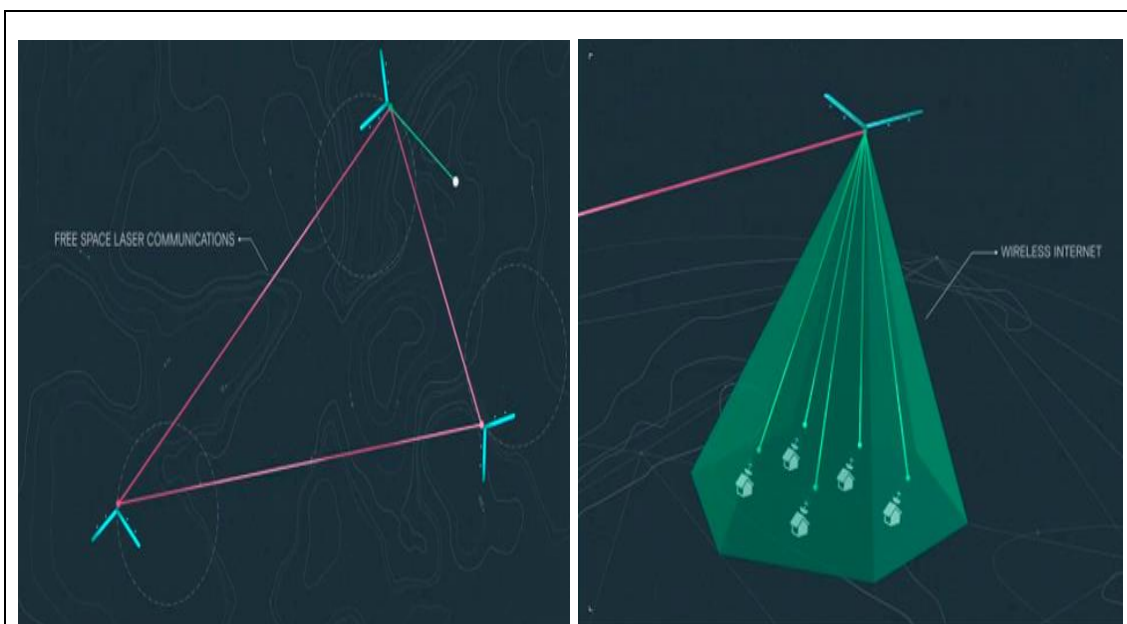


Figura 26. Comunicación entre UAV mediante láser

Tomado de (Omicrono, 2015).

4.5.2 Red de telefonía móvil a través de UAV

Esta innovadora aplicación, desarrollada por primera vez por la compañía Star Solutions, se implementa con UAV diseñados de manera exclusiva para la configuración de redes de telefonía móvil en zonas geográficas donde la cobertura sea escasa o nula.

Esta aplicación beneficiará a diferentes sectores civiles; por ejemplo, para misiones de ayuda, rescate, búsquedas, etc., se proporcionará a la población de sectores previamente asignados, la red móvil que permita establecer la comunicación para las personas que cuenten con dispositivos móviles en busca de cobertura.

Debido a que la plataforma no tripulada es la encargada de transportar una red hasta estas zonas sin cobertura de telefonía, ésta tendrá la capacidad de proceder con el envío de mensajería o realizar llamadas hacia ciertos dispositivos, así como la recepción y transmisión de instrucciones por parte del operador de vuelo.

Por las características y beneficios expuestos de esta aplicación, los usuarios que anteriormente se limitaban a realizar actividades en zonas de difícil acceso y cobertura, por precaución de no contar con servicio de telefonía móvil, con la implementación de esta red móvil a través de los UAV, necesitarán preocuparse únicamente de contar con un dispositivo móvil con cierto nivel de energía suficiente para realizar una llamada o enviar un mensaje de texto.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Durante el desarrollo de esta tesis, se llegaron a adquirir nuevos conocimientos básicos sobre los factores aerodinámicos que intervienen en el control de un vehículo aéreo no tripulado, ya que es necesario poseer estos conceptos, al momento de diseñar o construir un VANT, para así lograr un eficiente y eficaz funcionamiento de un UAV.

Los multicopteros y en especial los cuadricópteros, son utilizados en su mayoría para trabajos de vigilancia, inspección y rescate, debido al tamaño, los dispositivos que integran y la movilidad que adquieren al momento de transportar apropiadas cargas, teniendo un alto desempeño en este tipo de labores. Algo que hay que tener en cuenta es la alimentación de voltaje de cada dispositivo, esto para que su funcionamiento sea eficiente, por ejemplo, para el microcontrolador se debe tener una alimentación de voltaje de 3,3 [V] y el motor debe ser alimentado a través de una batería de Polímero de Litio (LiPo), el cual debe poseer un voltaje de 11,1 [V], regularmente estos voltajes pueden variar dependiendo del multicoptero que se llegue a emplear.

Todos los dispositivos electrónicos, indicados en el capítulo 2 son necesarios para lograr un adecuado control del UAV, ya que constituyen aspectos importantes con la finalidad de transmitir los datos entre cada uno de ellos. Por ejemplo, se indica cómo las señales procedentes del magnetómetro, receptor e IMU ingresan al microcontrolador a fin de ser procesadas y controladas, logrando de esta manera una señal controlada, con la que se llega a maniobrar los servomotores, permitiendo así, una manipulación de las superficies del VANT y un correcto control del vuelo.

La tecnología ZigBee, es eficiente en casos que se desee transmitir información hacia la estación terrena con el objetivo de realizar un sencillo monitoreo; sin

embargo, para un control más minucioso desde la estación base, ZigBee no es el más opcional debido a que, al hacer un procesamiento de datos en la tarjeta abordo, no evita la latencia, así como algunos errores de propagación; por lo que para realizar una mejor respuesta en tiempo real, se necesita realizar una comparativa de tecnologías inalámbricas que ayuden a conseguir un buen ancho de banda, disponibilidad de potencia, rango y grandes distancias.

Para aplicaciones civiles asociadas al uso de los Vehículos Aéreos No Tripulados que implique la transmisión en rangos de corta distancia o línea de vista directa, se utiliza comunicaciones inalámbricas empleando la banda de frecuencia VHF; por el contrario, para comunicaciones que abarquen mayores alcances o distancias, se utilizan enlaces celulares y satelitales.

Dentro de las arquitecturas de comunicaciones presentadas en el presente proyecto, es importante tener en consideración que la arquitectura de malla es aplicada con cualquier otro tipo de arquitectura (enlace directo, celular o satelital), con el fin de alcanzar mayor cobertura en la comunicación o para formar enlaces de redundancia y así contar con transmisiones de respaldo ante cualquier eventualidad que se presente durante la transmisión. Para ello, es necesario el estudio y aplicación de protocolos de enlace de comunicación, mismos que se detallaron en el Capítulo 4.

5.2 Recomendaciones

De acuerdo al estudio de los diversos multirrotores, los cuadricópteros son los más usados para aplicaciones civiles; sin embargo, como se menciona en el Capítulo 3, algunas de las aplicaciones como el monitoreo en empresas radionucleares, se utiliza el hexacóptero, debido a que puede llevar cargas más pesadas como cámaras y otros dispositivos de monitoreo. Por esta razón, se recomienda el uso del hexacóptero para aplicaciones civiles.

Debido a los retardos de señal que se presentan en la transmisión de comunicaciones satelitales aplicadas para alcances de grandes distancias, se recomienda el uso de la tecnología celular para realizar el enlace entre el UAV y la estación terrena, con el fin de realizar el monitoreo y control del vehículo no tripulado de acuerdo a la misión de vuelo que se realice; además, mediante el uso de una red celular ya instalada, es posible con mayor facilidad y reducción de costos, lograr la integración de la red de comunicaciones formada entre el VANT y la GCS con una red local, obteniendo el beneficio de compartir la información hacia diferentes puntos de manera más eficiente y en tiempo real.

Se recomienda que el control de la plataforma no tripulada, sea realizado por personal previamente capacitado, con el fin de evitar inconvenientes, especialmente en lugares donde exista mayor control de vuelo, como en zonas de reservas naturales, donde se puede llegar a ocasionar daños en áreas restringidas y derivar el hecho en acciones legales; de igual manera, el manejo erróneo de esta aeronave, puede ocasionar daños fatales en la misma cuando se realiza una colisión con cierto obstáculo durante el vuelo, originando pérdidas en la inversión del vehículo no tripulado.

Es de vital importancia tener conocimiento acerca de los reglamentos vigentes en cada país con respecto al uso de un UAV, ya que existen multas de por medio por el incumplimiento de estas normativas.

Para el modo de vuelo autónomo del UAV, se recomienda contar con planes de contingencia, con el objetivo de que se implemente de manera inmediata soluciones en caso de presentarse fallas en la red de comunicación y así mantener la confiabilidad de la nave y cumplir con la planificación previa de la misión.

REFERENCIAS

- B. Dominguez y L.Martínez. (2013). *Estudio comparativo entre cuatrirotores y aeronaves de ala fija. Sistemas de control de vuelo, tecnología y misiones*. Recuperado el 19 de Febrero de 2016, de <http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/12418/1/estudiocomparativo.pdf>
- Bachfischer, A. (2014). *Diseño de Vehículo Aéreo no Tripulado para inspección y minitreo en plantas nucleares*. Recuperado el 21 de Abril de 2016, de ricabib.cab.cnea.gov.ar/477/1/1Bachfischer.pdf
- Centro de estudios estratégicos. (2012). *Drone, Historia de un arma de altos vuelos*. Recuperado el 24 de Febrero de 2016, de <http://cespe.espe.edu.ec/drone-historia-de-un-arma-de-altos-vuelos/>
- Félez, E. A. (2013). Drones: una nueva era de la vigilancia y de la privacidad. *Seguritecnia*.
- Gonzáles, M. (2015). *AESA recuerda las limitaciones en el uso recreativo de drones pero ¿qué dice la ley?* Recuperado el 21 de Abril de 2016, de Xataka: <http://www.xataka.com/drones/cuidado-al-pilotar-tu-dron-alejate-de-zonas-pobladas-y-de-las-aglomeraciones-de-gente>
- Iglesias, A. (2015). *Regulación de drones en América Latina: Los casos de Chile y Colombia*. Recuperado el 4 de Marzo de 2016, de Todrone: <http://www.todrone.com/regulacion-drones-america-latina-chile-colombia/>
- Jefatura del Estado. (s.f). (2014). *Agencia Estatal de Seguridad Aérea*. Recuperado el 21 de Febrero de 2016, de http://www.seguridadaerea.gob.es/media/4243006/rdl_8_2014_4julio.pdf
- Legarreta, P., & Pirola, A. (2015). *Drones una oportunidad para la industria*. Recuperado el 19 de Febrero de 2016, de http://www.petrotecnia.com.ar/3-2015/PdfsSinPublicidad/Drones_Legarreta.pdf

- Li, C. (2016). *Make your personal drone fly even farther with a 4G network connection*. Recuperado el 26 de Mayo de 2016, de <http://wiredcraft.com/blog/drone-copter-uav-4g-network/>
- López, H. (2016). *Los Vehículos Aéreos no Tripulados (VANTs) y sus implicaciones en el ámbito militar, legal y moral*. Recuperado el 31 de Enero de 2016, de http://www.academia.edu/5025752/Los_Vehículos_Aéreos_no_Tripulados_VANTs_y_sus_implicaciones_en_el_ámbito_militar_legal_y_moral
- Ministerio de Defensa. (2012). *Tecnologías asociadas a sistemas de enjambres de μ UAV*. Recuperado el 10 de Mayo de 2016, de http://www.defensa.gob.es/ceseden/Galerias/destacados/publicaciones/docSegyDef/ficheros/049_TECNOLOGIAS_ASOCIADAS_A_SISTEMAS_DE_ENJAMBRES_DE_uUAV.pdf
- Organización de Aviación Civil Internacional. (2011). *Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS)*. Organización de Aviación Civil Internacional, Montréal, Quebec, Canada.
- Pearson, C. (2015). *Recomendaciones sobre el espectro para la 5G*. Recuperado el 2 de Junio de 2016, de www.4gamericas.org/es/
- Quirós, G. C. (2014). *Sistema de enlace robusto para la teleoperación de un UAV (vehículo aéreo no tripulado) en la plataforma robótica ARGOS*. Recuperado el 12 de Febrero de 2016, de arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20150122GuadalupeCrespoQuiros.pdf
- Rejado, C. C. (2015). *Origen y desarrollo de los drones*. Recuperado el 20 de Enero de 2016, de *Aplicaciones y Operación con Drones/RPAS*: <http://drones.uv.es/origen-y-desarrollo-de-los-drones/>
- Roberto Yerovi De La Calle. (2015). *Resolución N° 251/2015*. Dirección General de Aviación Civil, Quito.

Stacey, D. (2008). *Aeronautical Radio Communication Systems and Networks*. West Sussex, England: John Wiley & Sons. Ltd.

U.S. Army UAS Center of Excellence. (2009). *"Eyes of the Army" U.S. Army Roadmap for Unmanned Aircraft Systems 2010-2035*. Recuperado el 14 de Mayo de 2016, de <https://fas.org/irp/program/collect/uas-army.pdf>