

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**COMUNICACIONES HABILITADAS POR DRONES: REQUISITOS,
TECNOLOGÍAS Y AUTOMATIZACIÓN**

**ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS Y PLATAFORMAS PARA PROVEER
SISTEMAS DE COMUNICACIONES HABILITADO POR DRONES**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN
TELECOMUNICACIONES**

ESTEFANÍA ANDREA ANDRADE GUTIÉRREZ

estefania.andrade@epn.edu.ec

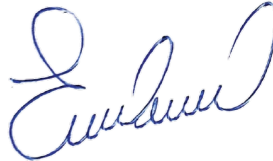
DIRECTOR: ING. CHRISTIAN JOSÉ TIPANTUÑA TENELEMA, MSC.

christian.tipantuna@epn.edu.ec

DMQ, OCTUBRE 2022

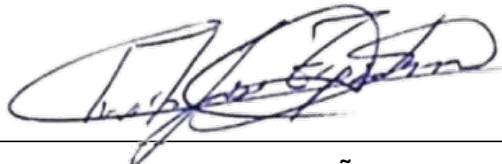
CERTIFICACIONES

Yo, ESTEFANÍA ANDREA ANDRADE GUTIÉRREZ declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



ESTEFANÍA ANDREA ANDRADE GUTIÉRREZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ESTEFANÍA ANDREA ANDRADE GUTIÉRREZ, bajo mi supervisión.



CHRISTIAN JOSE TIPANTUÑA TENELEMA

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ESTEFANÍA ANDREA ANDRADE GUTIÉRREZ

CHRISTIAN JOSE TIPANTUÑA TENELEMA

DEDICATORIA

Dedico con todo mi amor y cariño este Trabajo de Integración Curricular a mi madre Pilar, la mujer que, con su ánimo y consejo, me dio el valioso impulso para seguir adelante, por el apoyo incondicional que me ha brindado, por tener esa fortaleza que la caracteriza de salir adelante a pesar de los obstáculos. Tus esfuerzos son impresionantes y tu amor es para mí invaluable. A mi madre que, aunque hubo momentos de fatiga, siempre mostró el ejemplo de la fuerza. Gracias por ser mi ejemplo a seguir, por tu bendición cada día y en cada paso que doy, pero sobre todo por confiar en mí y por acompañarme en todo este proceso. Hoy veo convertirse en realidad lo que antes era solo ilusión, estoy segura que sin ti no lo hubiera logrado

Te amo mamá.

AGRADECIMIENTO

A Dios, padre celestial que me ha dado todo lo que tengo. Y me ha bendecido cada día de mi vida.

A mi madre, la persona más importante en mi vida, por estar conmigo en cada momento por más difícil que sea, con ella aprendí el amor incondicional. Gracias madre por todo lo que me has dado para que yo sea una persona de bien, por compartir mis tristezas y alegrías y sobre todo porque siempre confiaste en mí.

A mi padre, por su cariño y apoyo en cada etapa de mi vida, gracias por estar pendiente y confiar en mí hasta final y sobre todo por tus consejos que me permitieron llegar a dónde estoy. Siempre supo que lograría cumplir este sueño.

A mis hermanas, Dayana y Mishel que han sido parte de este proceso, por brindarme su apoyo incondicional, darme consejos y estar siempre para mí en los tiempos difíciles. Gracias porque sé lo difícil que fue especialmente por mi mal carácter; por ser mis confidentes cuando más lo necesitaba y sobre todo por darme ánimos para seguir adelante a pesar de las adversidades.

A Diego, mi pequeño sobrino que llegó a llenar de mucho amor nuestro hogar.

A Christian Tipantuña M.Sc., mi agradecimiento sincero por su perseverancia, apoyo y ayuda incondicional durante este arduo proceso; por ser una guía en cada paso que he dado en este tiempo y sobre todo por no dejarme rendir y estar conmigo hasta el final.

A mis amigos y compañeros de la universidad, por brindarme su amistad y caminar conmigo durante todos estos años siendo mi segunda familia.

A Francisco, por acompañarme en cada momento de esta etapa, compartiendo los días buenos y malos, tu compañía ha sido sumamente importante. Siempre confiaste en mí y me motivaste a seguir adelante.

A la Escuela Politécnica Nacional, por tantos años de esfuerzo, sacrificio y dedicación, que me han abierto camino a la vida misma. A cada docente por su apoyo y enseñanzas ya que constituyen una base importante en mi vida.

Estefanía A. Andrade G.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|------|
| CERTIFICACIONES..... | I |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA..... | II |
| DEDICATORIA | III |
| AGRADECIMIENTO..... | IV |
| ÍNDICE DE CONTENIDO | V |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | IX |
| ÍNDICE DE CÓDIGO..... | X |
| RESUMEN..... | XI |
| ABSTRACT | XII |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. OBJETIVO GENERAL..... | 2 |
| 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 2 |
| 1.3. ALCANCE | 2 |
| 1.4. MARCO TEÓRICO | 3 |
| 1.4.1. HISTORIA..... | 3 |
| 1.4.2. IMPACTO | 5 |
| 1.4.3. ÁREAS DE APLICACIÓN..... | 6 |
| 1.4.3.1. Aplicaciones basadas en visión | 7 |
| 1.4.3.2. Servicios de entrega | 8 |
| 1.4.3.3. Recopilación de datos de IoT | 9 |
| 1.4.3.4. Agricultura..... | 9 |
| 1.4.4. BENEFICIOS..... | 10 |
| 2. METODOLOGÍA | 11 |
| 2.1. UAV | 12 |
| 2.1.1. COMPONENTES DE UAV | 13 |
| 2.1.2. CARGA ÚTIL O PAYLOAD | 15 |
| 2.1.3. CLASIFICACIÓN DE UAVs..... | 15 |
| 2.1.3.1. Dron de rotor múltiple o multi-rotor | 15 |
| 2.1.3.2. Dron de ala fija | 16 |
| 2.1.3.3. Drones híbridos de ala fija y giratoria | 17 |
| 2.1.4. MÉTODOS DE VUELO | 17 |
| 2.1.5. UAV EN REDES CELULARES | 18 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2.1.6. | TÉCNICAS PARA LA COMUNICACIÓN SEGURA DE UAV | 18 |
| 2.1.7. | CLASIFICACIÓN DE REDES INALÁMBRICAS | 19 |
| 2.1.7.1. | Red basada en Infraestructura (IBN) | 19 |
| 2.1.7.2. | Red sin Infraestructura (ILN) | 20 |
| 2.2. | REDES FANET | 21 |
| 2.2.1. | CONSIDERACIÓN DE DISEÑO DE REDES FANET | 22 |
| 2.2.1.1. | Adaptabilidad..... | 22 |
| 2.2.1.2. | Escalabilidad | 22 |
| 2.2.1.3. | Latencia | 23 |
| 2.2.1.4. | Requisito de ancho de banda..... | 23 |
| 2.2.1.5. | Restricciones de la plataforma UAV para FANETS..... | 23 |
| 2.2.2. | ARQUITECTURA PARA EL DESPLIEGUE DE FANETS | 24 |
| 2.2.2.1. | Comunicación Centralizada..... | 24 |
| 2.2.2.2. | Comunicación Descentralizada..... | 25 |
| 2.2.3. | ARQUITECTURA DE COMUNICACIÓN DE UAVs EN REDES FANET..... | 28 |
| 2.2.3.1. | UAV – UAV..... | 28 |
| 2.2.3.2. | UAV – Estación Base Terrestre | 28 |
| 2.2.3.3. | UAV - Receptores Terrestres | 29 |
| 2.2.3.4. | UAV – Wi-Fi..... | 29 |
| 2.2.3.5. | UAV – Sistema Satelital..... | 29 |
| 2.2.4. | Diferencia entre FANET y las redes Ad-hoc existente | 30 |
| 2.2.4.1. | Movilidad de Nodos..... | 30 |
| 2.2.4.2. | Modelo de Movilidad | 30 |
| 2.2.5. | Ventajas de operar con redes FANET | 32 |
| 2.3. | TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA..... | 32 |
| 2.3.1. | Wi-Fi (IEE 8002.11) | 34 |
| 2.3.2. | Bluetooth (IEEE 802.15.1)..... | 34 |
| 2.3.3. | Zigbee (IEEE 802.15.4) | 34 |
| 2.3.4. | WiMAX (IEEE 802.16) | 34 |
| 2.3.5. | Quinta Generación (5G) | 35 |
| 2.3.6. | Comunicación por Satélite (SATCOM) | 35 |
| 2.3.7. | Lora (Long Range)..... | 36 |
| 2.3.8. | PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO EN REDES FANET | 37 |
| 2.3.8.1. | Capa Física | 37 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.3.8.2. | Capa MAC | 37 |
| 2.3.8.3. | Capa de red | 38 |
| 2.3.8.4. | Capa de aplicación..... | 38 |
| 2.3.8.5. | Otros protocolos para comunicación de UAV en redes FANET . | 38 |
| 2.3.9. | TEORÍA DE OPTIMIZACIÓN PARA SISTEMAS DE COMUNICACIÓN UAV..... | 39 |
| 2.4. | DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES | 40 |
| 2.4.1. | FUTUROS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN UAV CON TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL. | 40 |
| 2.4.2. | REDES UAV EN EL FUTURO | 40 |
| 2.4.3. | REDES UAV CONECTADAS A CELULARES..... | 41 |
| 2.4.4. | COMUNICACIÓN DE UAV EN EL MUNDO FUTURO..... | 42 |
| 3. | RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 42 |
| 3.1. | RESULTADOS..... | 42 |
| 3.2. | CONCLUSIONES | 43 |
| 3.3. | RECOMENDACIONES | 45 |
| 4. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 46 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Evolución de los drones a través de los años, basado en [1]. | 4 |
| Figura 1.2. Desarrollo porcentual de aumento de usos de UAV para el año 2022, basada en [1]. | 5 |
| Figura 1.3. Recopilación porcentual de datos para el 2022. a) Porcentaje de aumento de UAV para 2022, b) Estadística monetaria de UAV para 2022, basado en [1]. | 6 |
| Figura 1.4. Clasificación de áreas de aplicación de UAVs, basado en [12]. | 7 |
| Figura 2.1. Componentes de los UAV, basado en [1]. | 13 |
| Figura 2.2. Dron Multi-Rotor | 16 |
| Figura 2.3. Dron ala fija. | 16 |
| Figura 2.4. Tipos de UAV ala fija, ala giratoria e híbridos, a) Parrot Swing (Vista frontal), b) Kogan Nano, c) Parrot Disco, d) DJI Spreading Wings S900, e) Scout UAV helicopter, f) Predator B. | 17 |
| Figura 2.5. Taxonomía de redes inalámbricas, basado en [30]. | 19 |
| Figura 2.6. Redes MANET, VANET y FANET, basado en [1]. | 21 |
| Figura 2.7. Estructura de comunicación UAV centralizada, basada en [23]. | 25 |
| Figura 2.8. Red Ad-Hoc UAV, basada en [23]. | 26 |
| Figura 2.9. Red Ad-Hoc UAV Multi-grupo, basada en [23]. | 27 |
| Figura 2.10. Red Ad-Hoc UAV Multi-capa, basada en [23]. | 27 |
| Figura 2.11. Arquitectura de red básica de comunicación inalámbrica con UAV, basada en [8]. | 30 |
| Figura 2.12. Alcance de la Tecnología de Comunicación con Drones [7]. | 36 |
| Figura 2.13. Protocolos de comunicación UAVs, basado en [1]. | 37 |
| Figura 2.14. Redes UAV conectadas a redes celulares, basado en [7]. | 41 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1. Especificaciones generales de los drones de entrega [13]. | 8 |
| Tabla 1.2. Características de vuelo y requisitos de comunicación de UAV, basado en [12]. | 9 |
| Tabla 1.3. Beneficios de redes de comunicación basadas en UAVs..... | 10 |
| Tabla 2.1. Características MANET, VANET y FANET..... | 31 |
| Tabla 2.2. Resumen Análisis de Tecnologías. | 33 |
| Tabla 2.3. Bandas de frecuencia satelital y características para usos civiles [12]. | 35 |
| Tabla 2.4. Tipos de drones para diferentes aplicaciones. | 43 |

ÍNDICE DE CÓDIGO

| | |
|--|----|
| Código 2.1 Código de búsqueda | 11 |
|--|----|

RESUMEN

El presente Trabajo de Integración Curricular, presenta un análisis referencial para el desarrollo de temas orientados a sistemas de comunicaciones a través de vehículos aéreos no tripulados (UAVs: *Unmanned Aerial Vehicles*). Estos dispositivos han ido ganando popularidad en diferentes áreas, siendo las telecomunicaciones un campo de aplicación relativamente nuevo y de gran potencial. En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo ofrecer una descripción de los diferentes aspectos involucrados en la comunicación con UAVs, incluyendo la descripción de los componentes, posibles arquitecturas y tecnologías de red relacionadas.

El documento está organizado en tres capítulos. En el primer capítulo, se realiza un análisis descriptivo de los vehículos aéreos no tripulados, de su historia, sus áreas de aplicación y beneficios en la provisión de sistemas de comunicaciones.

El segundo capítulo presenta una descripción general los componentes de los vehículos aéreos no tripulados incluyendo la carga útil para la provisión de servicios de telecomunicaciones. De igual manera en este capítulo se revisa las arquitecturas existentes y las tecnologías que pueden ser utilizadas para establecer un sistema o una red de comunicaciones.

Finalmente, en el tercer capítulo se muestran los resultados obtenidos al igual que las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo.

PALABRAS CLAVE: UAV, drones, tecnologías inalámbricas, Redes FANET.

ABSTRACT

This research work presents a referential analysis for developing topics oriented to communication systems through unmanned aerial vehicles (UAVs: Unmanned Aerial Vehicles). These devices have been gaining popularity in different areas, with telecommunications being a relatively new field of application with great potential. In this sense, the present work aims to describe the different aspects of communication with UAVs, including the components, possible architectures, and related network technologies.

The document is organized into three chapters. In the first chapter, a descriptive analysis of unmanned aerial vehicles, their history, their areas of application, and their benefits in providing communication systems is carried out.

The second chapter presents a general description of the components of unmanned aerial vehicles, including the payload for the provision of telecommunications services. Similarly, this chapter reviews existing architectures and technologies that can be used to establish a communications system or network.

Finally, the third chapter shows the results obtained as well as the conclusions and recommendations of this work.

KEYWORDS: UAV, drones, wireless technologies, FANET networks.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace varias décadas los estándares y tecnologías de comunicaciones móviles han ido evolucionando, dando paso al surgimiento de varias generaciones, desde la primera generación (1G) hasta actualmente la quinta generación (5G) [1]. Esta nueva generación permite la aparición de nuevos casos de uso, siendo uno de los más novedosos el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAVs: *Unmanned Aerial Vehicles*) para el establecimiento de sistemas de comunicación [1]. Tomando en cuenta que un sistema basado en UAVs necesita disponer de características tales como: alta confiabilidad, baja latencia y manejo de energía para garantizar la vida útil del dispositivo a la vez que se asegura un cierto nivel de disponibilidad de los servicios, es fundamental establecer los diferentes aspectos relacionados a la provisión de servicios de comunicaciones. Este es el principal objetivo del presente Trabajo de Integración Curricular.

Los UAVs, comercialmente conocidos también como drones, se han convertido en una de las tecnologías emergentes con mayor utilidad y aplicabilidad en el mundo. Diariamente son utilizados en diversos escenarios tales como transmisión de datos, investigación científica, seguridad, movilidad y tráfico. Así también los UAVs se pueden utilizar en diferentes ambientes tales como: militar, civil, comercial, logística, supervisión en agricultura, tareas de búsqueda y rescate, entre otros [2]. Además, con el fin de perseverar la vida humana los UAVs son utilizados ampliamente en situaciones de riesgo o de peligro. A pesar del constante desarrollo en el ámbito de los sistemas de comunicaciones, los UAV se encuentran en una fase inicial de explotación y existen muchos detalles a considerar para un despliegue confiable.

Dado que los UAVs se pueden utilizar de manera independiente o formando redes las cuales técnicamente se denominan FANET (*Flying Ad-Hoc Network*) [4], resulta esencial analizar las principales características relacionadas al establecimiento de sistemas y redes de comunicaciones, los componentes tecnológicos habilitantes y posibles arquitecturas.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar las tecnologías inalámbricas y plataformas para la provisión de servicios de telecomunicaciones con drones.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Revisar el fundamento teórico de los UAVs relacionado con la provisión de servicios de comunicaciones.
2. Evaluar las tecnologías que pueden ser aplicadas, considerando parámetros tales como ancho de banda, rango de frecuencia, requisitos de potencia, velocidad y movilidad.
3. Analizar el uso de UAVs para diferentes aplicaciones de comunicaciones.
4. Describir los requerimientos y parámetros que necesita una red FANET para que pueda operar exitosamente.

1.3. ALCANCE

En el presente Trabajo de Integración Curricular se realiza un análisis de diversas tecnologías inalámbricas y plataformas de comunicaciones a utilizar para desplegar sistemas de comunicaciones habilitados por UAVs (sistemas que no forman redes) y FANETs. Para ello, se analizarán varias alternativas tanto para el procesamiento (por ejemplo, ejecución de algoritmos y protocolos) como para el establecimiento de las interfaces de comunicaciones (por ejemplo, análisis de tecnologías inalámbricas).

Para el análisis de las tecnologías se considerarán parámetros técnicos, tales como, ancho de banda, el rango de frecuencia, requisitos de potencia, entre otros. Como resultado se obtendrá un análisis comparativo de las diferentes tecnologías y plataformas, identificando ventajas, desventajas o limitaciones, desafíos técnicos y características particulares en determinados escenarios de análisis, con la finalidad de proporcionar una guía, la cual sea de utilidad para la elección de un tipo de UAV de acuerdo con la aplicación en la que es requerido.

En el análisis de redes FANET se describen las características, arquitectura de comunicación entre UAV, arquitectura de despliegue de FANETS y parámetros para su diseño como son: adaptabilidad, escalabilidad, latencia, requisitos de ancho de banda y restricciones en plataformas UAV.

1.4. MARCO TEÓRICO

1.4.1. HISTORIA

El origen de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) data del año 1849 [1], . En aquellas épocas se utilizaban globos aéreos no tripulados llenos de bombas, los cuales tenían como objetivo el ataque a ciudades, como el caso reportado a la ciudad de Venecia [1]. Sin embargo, estos globos no concuerdan con la definición específica de UAV o dron, pero si se ajustan al concepto de “plataforma no tripulada que porta una carga útil” [5], al portar explosivos en su interior. Más tarde, en el año 1898, surge la práctica de vigilancia aérea, en la cual equiparon una cámara a una cometa, dando lugar a la primera fotografía de reconocimiento aéreo [3]. En el mismo año el inventor Nikola Tesla patentó el primer vehículo de radio control “*TELEAUTOMATON*” revolucionando el futuro del guiado de objetos [2].

En el año de 1917, el mismo inventor Nikola Tesla materializa el denominado “*Aerial Target*” el cual presentaba una flota de vehículos aéreos no tripulados que serían utilizados en defensa contra Zeppelins. Sin embargo, al no dar buenos resultados esta tecnología fue olvidada en el ámbito militar. En el mismo año se lanzó el prototipo denominado “*Flying Bomb*” (*Hewitt-Sperry Automatic Airplane*) siendo una versión inicial de misil controlado remotamente [1].

Es así como estos hechos serían fundamentales para el desarrollo de los UAV durante la década de los años 80, consolidando a estos dispositivos como una tecnología fiable. Además, gracias al desarrollo computacional y sistemas de control electrónico, en los años 90 los vehículos aéreos no tripulados fueron dando forma, cuya principal aplicación era su utilización en cartografía. Más adelante en el año de 1990 se da lugar a los mini drones y micro UAVs los cuales son utilizados con fines militares [4].

A partir del año 2003 los vehículos aéreos no tripulados (UAV) son utilizados con fines comerciales gracias al director ejecutivo de Amazon. En 2006 la FAA¹ (*Federal Aviation Administration*) de Estados Unidos emitió los permisos necesarios para la comercialización de los drones al público en general [2]. Por supuesto, estos no tenían armas y se lanzaron con el objetivo de conseguir increíbles tomas de imagen y video. Los permisos otorgados a diversas organizaciones sobre el uso de UAVs eliminaron algunas de las limitaciones

¹ FAA (*Federal Aviation Administration*): Es una entidad gubernamental responsable de la regulación de todos los aspectos de la aviación en Estados Unidos.

impuestas a los aviones de pasajeros que volaban con fines recreativos, abriendo nuevas posibilidades a las empresas que requerían drones en las diferentes industrias.

En el año 2010 la compañía francesa PARROT lanzó el dron denominado “*Parrot AR Drone*”, siendo el primer UAV que podía ser controlado completamente a través de Wi-Fi en un teléfono inteligente, obteniendo un éxito inmediato tanto críticamente como comercialmente [6]. Además, se universaliza el uso de los vehículos aéreos no tripulados en el ámbito civil. En 2016 el dron “*Phantom 4*” de la compañía DJI² integró la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, dándole a los drones la capacidad de evitar obstáculos y rastrear personas y animales sin la necesidad de una señal GPS que los guíe.

Desde entonces hasta la actualidad, la creación y desarrollo de UAVs ha ganado una reputación muy importante. Por lo que, las nuevas tecnologías futuras se utilizan ampliamente para el desarrollo y despliegue de UAVs en diversas aplicaciones, tales como: navegación, localización, mapeo y búsqueda, así como también la teledetección en sistemas agrícolas [4], y respuesta a desastres, etc. De esta manera es como los casos de uso de vehículos aéreos no tripulados de consumo se están explotando en la actualidad. La Figura 1.1³, muestra el desarrollo de los UAVs desde sus inicios en el año 1780 hasta el año 2021, evidenciando que estos dispositivos han tomado diferentes formas y tamaños dependiendo de su uso [1].



Figura 1.1. Evolución de los drones a través de los años, basado en [1].

² DJI (*Da-Jiang Innovations*): Empresa líder mundial en fabricación de vehículos aéreos no tripulados enfocados en la fotografía aérea.

³ El autor ha creado todas las figuras en el presente Trabajo de Integración Curricular. De ser necesario, se han utilizado imágenes bajo la licencia Creative Commons.

1.4.2. IMPACTO

Debido al enorme potencial de aplicación, la investigación y el rápido desarrollo de los UAVs, su despliegue se ha expandido a un ritmo sin precedentes durante la última década, creando nuevas y prometedoras oportunidades comerciales. Recientemente, ha existido un aumento en el interés por el uso de vehículos aéreos no tripulados en una variedad de aplicaciones civiles [6] y se espera que su uso aumente rápidamente en un futuro cercano. De esta manera, el avance de la tecnología de drones en solo un par de años ayudará a los humanos en todos los dominios, provocando así un impacto positivo en la sociedad [7].

La tecnología de drones atrae mucho a las nuevas generaciones, un claro ejemplo es [8], en dónde jóvenes constituyeron un emprendimiento empresarial, basándose en drones como una herramienta con el fin de robotizar tareas existentes en campo abierto en cualquier industria en donde la mano de obra ya no se encuentra.

Según un informe de la FAA, la flota de drones se duplicará con creces, de un estimado de 1,1 millones de vehículos en el año 2017 a 2,4 millones de unidades para el año 2022 [9], [10], En la Figura 1.2, se muestra el desarrollo porcentual con respecto al aumento de uso de vehículos aéreos no tripulados en diferentes países para el año 2022.

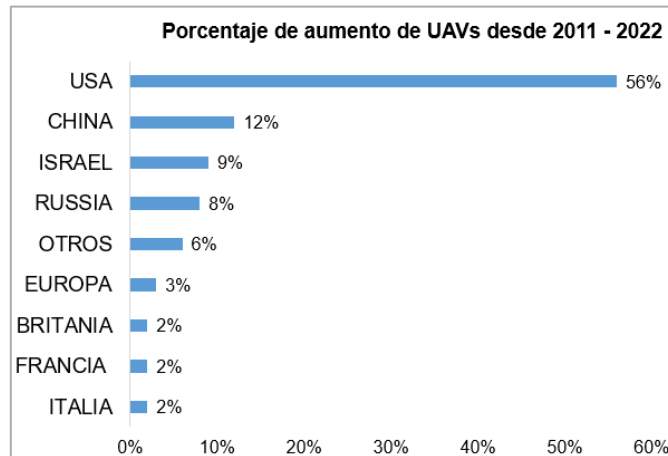


Figura 1.2. Desarrollo porcentual de aumento de usos de UAV para el año 2022, basada en [1].

La Figura 1.3 es una recopilación de datos que muestra el desarrollo porcentual basado en aplicaciones de drones y las ganancias generadas por los mismos. La Figura 1.3 (a) muestra de forma porcentual el aumento de uso de drones que se enfocan en varias aplicaciones para misiones objetivo para finales del 2022. Todos estos aspectos crean un impacto positivo en el mercado de vehículos aéreos no tripulados, tanto así que, para finales del año 2022 se estipula un incremento equivalente a \$17 millones [1] y [11], como se muestra en la Figura 1.3 (b).

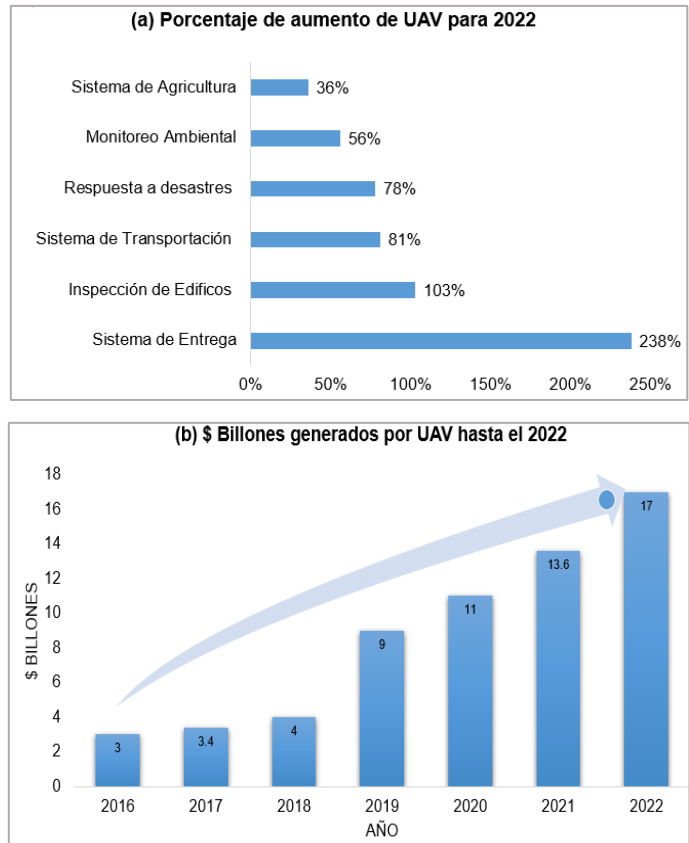


Figura 1.3. Recopilación porcentual de datos para el 2022. a) Porcentaje de aumento de UAV para 2022, b) Estadística monetaria de UAV para 2022, basado en [1].

La industria y el mundo académico están interesadas en aprovechar todo el potencial de las comunicaciones de UAV [9], demostrando que estos dispositivos tienen múltiples usos que pueden ser utilizados en beneficio de la sociedad mejorando su calidad de vida.

1.4.3. ÁREAS DE APLICACIÓN

Originalmente los UAV fueron desarrollados para operar en el ámbito militar, tiempo después los vehículos aéreos no tripulados fueron adquiridos para cubrir una amplia gama en aplicaciones civiles tales como, misiones de seguridad pública, búsqueda y rescate, vigilancia, redes IoT⁴, servicio de entrega, agricultura, recopilación remota de datos científicos, entre otros. Los UAV han demostrado que son capaces de operar en diferentes ambientes, densidad de despliegue, variadas altitudes y velocidades dependiendo de los requisitos de la aplicación en la cual son requeridos. En la Figura 1.4, se muestra una clasificación de áreas de aplicación de los UAVs.

⁴ IoT (*Internet of Things*): El internet de las cosas, es una red de dispositivos inteligentes conectados que proporcionan datos entre un humano y una computadora, máquina o dispositivo.

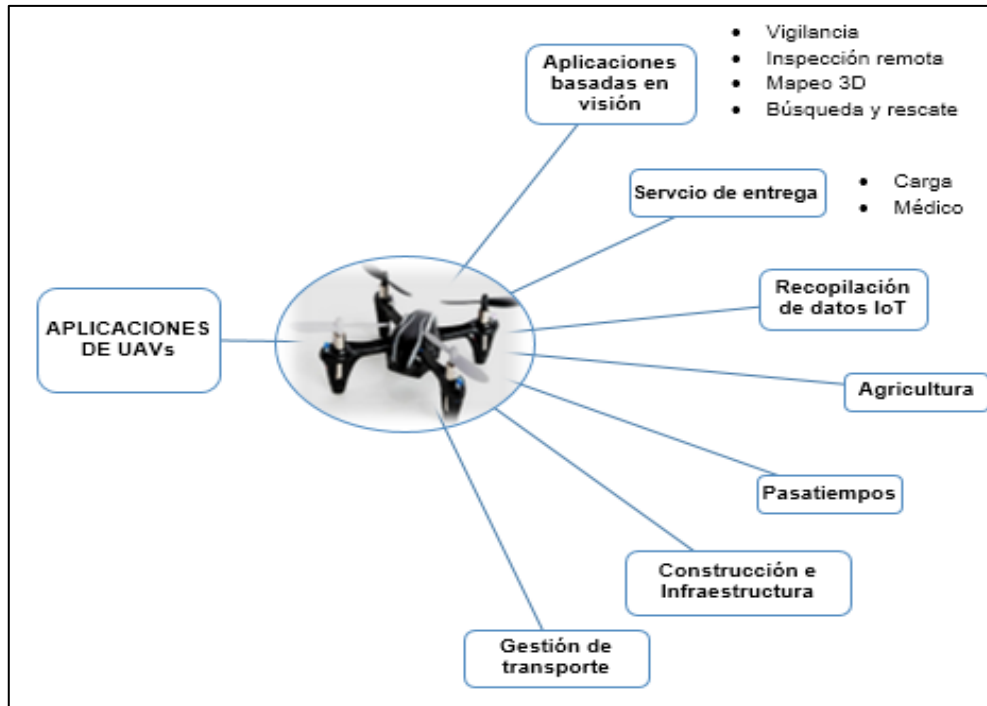


Figura 1.4. Clasificación de áreas de aplicación de UAVs, basado en [12].

1.4.3.1. Aplicaciones basadas en visión

Los UAV en este tipo de aplicaciones vuelan por debajo de los 300 metros [12] con una velocidad baja de 10 a 15 m/s o condición de vuelo estacionario, proporcionando imágenes de alta calidad. Tienen la capacidad de operar tanto en áreas urbanas como rurales y sus requisitos de conectividad dependerán de la calidad a la que se desea transmitir el video.

- **Vigilancia y Reconocimiento:** En este tipo de aplicaciones los vehículos aéreos no tripulados cumplen un papel muy importante al omitir la participación humana para su propósito. Estas tareas de vigilancia pueden recopilar imágenes y transmitir videos desde el área de aplicación o desde el área de la misión al que es destinado, tales como inspección de lugares de difícil acceso, construcciones con infraestructura físicamente críticas que tienen alto riesgo para los trabajadores [13] y vigilancia de tráfico vial [14].
- **Aplicación de Búsqueda y Rescate:** En la actualidad los UAVs permiten obtener actualizaciones en vivo, como fotografías y videografías aéreas de las áreas afectadas, ayudando a identificar y ubicar personas, infraestructuras, ganado y otras entidades vulnerables y afectadas [7].

Los sensores térmicos de los vehículos aéreos no tripulados tienen la capacidad de descubrir rápidamente el área en donde se encuentran las personas perdidas,

incluso en zonas de riesgo en dónde la vegetación es abundante y tiene difícil acceso o zonas en dónde la infraestructura es deficiente. Cabe recalcar que la calidad del enlace de comunicación depende de la distancia entre los UAV y la estación terrestre, y la velocidad con la que se mueven los UAV.

1.4.3.2. Servicios de entrega

En las aplicaciones de servicio de entrega los UAV vuelan a bajas altura y son utilizados comúnmente por industrias de comestibles y servicios postales. Para servicios de entrega los UAV demandan conectividad para actualizar los puntos de ruta hacia donde se dirige el paquete al mismo tiempo que dan seguimiento remoto [12]. La Tabla 1.1, muestra un resumen de las especificaciones generales de vehículos aéreos no tripulados fabricados para entrega de paquetes.

Tabla 1.1. Especificaciones generales de los drones de entrega [13].

| Especificación | Unidad | Valor |
|--|--------|-------|
| Masa del vehículo | kg | 8 |
| Masa de la carga útil (Máxima) | kg | 2 |
| Velocidad de ruta (Promedio) | Km/h | 50 |
| Eficiencia de transferencia para motor y hélice | - | 0.5 |
| Relación de elevación de arrastre | - | 3 |
| Consumo de energía de electrónicos | kWh | 0.1 |
| Consumo de la batería | kWh | 0.6 |
| Capacidad de la batería | kW | 1.54 |
| Tiempo de recarga (Completa) | horas | 1.5 |
| Horas de funcionamiento | horas | 9 |
| Horas de trabajo incidentales (despegue, aterrizaje, carga y descarga de paquetes) | horas | 0.25 |

Como se puede observar en la tabla 1.1, el paquete está limitado a que su peso sea aproximadamente 2 kg. Es por esta razón que la entrega no pueda realizarse con múltiples paquetes, además la distancia disponible de un dron es solo aproximadamente de 10 a 15 km, considerando vientos débiles y línea de vista despejada, debido a limitaciones de las unidades de batería. Las especificaciones pueden variar dependiendo del tamaño, modelo y tecnología de vuelo que usan los UAVs.

1.4.3.3. Recopilación de datos de IoT

Esta aplicación es denominada también no visual, en donde los UAVs operan a altitudes más altas (> 300 m) que los UAV destinados a aplicaciones basadas en visión, mientras que la velocidad operativa máxima puede ser similar y transfieren una menor cantidad de datos tolerantes a la latencia. En aplicaciones IoT, la latencia puede tolerar hasta un rango de un par de segundos. En esta aplicación los UAV pueden detectar datos como temperatura, humedad, iluminación o nivel de ruido directamente de sensores integrados y recopilarlos de forma remota desde sensores distribuidos [12].

1.4.3.4. Agricultura

Los UAVs destinados a aplicaciones de agricultura tuvieron el 80% de los ingresos globales en el año 2017 [12]. Los vehículos aéreos no tripulados se pueden implementar para la vigilancia agrícola como el monitoreo de cultivos, fumigación de cultivos y la vigilancia de siembra de cultivos.

Los UAVs permiten medir el nivel de temperatura, obtener datos de imágenes relacionadas con el monitoreo de animales y plantas, además permiten el recuento de la plantación, medir el nivel de agua en el suelo, también ayudan en la siembra, riegos, etc. [15]. Los UAVs en la agricultura brinda apoyo sobre todo en situaciones de emergencia que pueden dañar los cultivos como son los incendios forestales.

La Tabla 1.2 muestra un resumen de las características de vuelo de un UAV y requisitos de comunicación de las aplicaciones a las que son destinados.

Tabla 1.2. Características de vuelo y requisitos de comunicación de UAV, basado en [12].

| Aplicación | Características de vuelo | | | | Requerimientos de conectividad | | |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|-------------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------|
| | Altitud (m) | Velocidad (m/s) | Densidad de despliegue | Área de operación | Velocidad de datos (Mbps) | Latencia (m/s) | Confiabilidad de comunicación |
| Basadas en visión | <300 | 15 | Medio | Urbano/Rural | 0.3-120 | 20-200 | Media |
| Servicio de entrega | 100 | 15 | Alto | Urbano/Rural | 0.2-0.3 | 500 | Baja |
| Internet de las cosas (IoT) | 300 | 15 | Bajo | Urbano/Rural | 0.05-0.25 | <10 | Baja |
| Agricultura | 300 | 15 | Bajo | Rural | 0.2-0.3 | 500 | Media |

1.4.4. BENEFICIOS

La capacidad del establecimiento de redes de comunicación basada en UAVs se ha explotado en una gran variedad de aplicaciones. Algunos de los beneficios que ofrecen los UAV se mencionan en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Beneficios de redes de comunicación basadas en UAVs.

| BENEFICIO | DESCRIPCIÓN |
|--|---|
| Implementación de infraestructura de red en caso de emergencias | Los vehículos aéreos no tripulados se están probando para proporcionar infraestructura de red en caso de emergencias, como desastres naturales [17], permitiendo reemplazar la infraestructura dañada o reducir el tiempo de implementación de la nueva infraestructura. Gracias a las arquitecturas conformadas por drones especializados es posible desplegar una flota de drones, los cuales tienen la tarea de escanear una región y transmitir información necesaria y oportuna al operador. |
| Dispositivos móviles de monitoreo | Con vehículos aéreos no tripulados es posible buscar sobrevivientes atrapados en casos de terremotos. Todo esto mediante un sistema de localización de sobrevivientes, el cual consta de dispositivos inteligentes, drones y transmisión sin conexión, permitiendo que la interconexión de estos dispositivos pueda emitir rastros de sobrevivientes a un equipo de rescate. |
| Compatibilidad con la infraestructura de comunicaciones existente | Una red basada con UAVs hace posible restaurar rápidamente el servicio al sistema de información después de que la infraestructura se dañe parcial o completamente por un desastre. Los UAV también ayudan a los transmisores a operar en áreas que se vuelven extremadamente impulsadas por eventos, como un estadio que alberga un evento deportivo [53]. |
| Red de UAVs | Una red de UAVs admite la transmisión de información, donde los UAV se implementan para proporcionar conectividad inalámbrica entre dos o más transceptores/usuarios, o grupos de usuarios remotos, que carecen de una comunicación directa confiable. Por ejemplo, en algunos casos, los vehículos aéreos no tripulados se pueden colocar entre la zona de riesgo y el centro de monitoreo y operación para una pronta respuesta a la emergencia [53]. |
| Recopilación de datos y la difusión de información | Los UAV se envían para difundir (o recopilar) información tolerante a demoras a (desde) una gran cantidad de dispositivos inalámbricos distribuidos. Un ejemplo son las redes de sensores inalámbricos (WSN) que recopilan datos y envían información a la red de UAVs para su transmisión a una estación base (BS: Base Station) [53]. |

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del presente Trabajo de Integración Curricular se ha realizado utilizando la base de datos “SCOPUS⁵” como herramienta de búsqueda. SCOPUS es la mayor base de datos de artículos y de literatura estudiada por miles de editores internacionales y cuenta con herramientas que permiten controlar, analizar y visualizar la investigación académica. La base de SCOPUS permite relacionar documentos como resúmenes, revistas científicas, perfil del autor y de afiliación a través de citas [18]. Lo cual ha permitido que este trabajo disponga de literatura adecuada para cubrir los distintos aspectos de la presente propuesta.

Las principales características de la base de datos SCOPUS son:

- Permite la exploración de documentos en distintos campos con diferentes opciones de búsqueda y esquemas.
- Permite visualizar datos bibliográficos básicos (título, resumen, palabras clave, citas, referencias, etc.).
- Mantiene al usuario actualizado mediante la creación de búsquedas y citas.

Para la búsqueda de artículos relacionados con esta investigación se utiliza el Código 2.1. Una vez obtenida la bibliografía general se seleccionaron los artículos más relevantes, esto en base un proceso de lectura rápida tanto de los resúmenes como del texto completo.

```
TITLE-ABS-KEY ( "UAV" OR "drone" AND "communicate* technologies" OR "communicate* architectures" OR "net* architectures" OR "net* protocols" ) AND ( EXCLUDE ( PUBSTAGE , "aip" ) ) AND ( EXCLUDE ( AFFILCOUNTRY , "India" ) ) AND ( EXCLUDE ( SUBJAREA , "MATH" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "PHYS" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "MATE" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "DECI" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "EART" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "SOCI" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "CHEM" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "BIOC" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "ENVI" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "CENG" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "BUSI" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "MEDI" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "AGRI" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "ECON" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "NEUR" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "ARTS" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "HEAL" ) OR EXCLUDE ( SUBJAREA , "PSYC" ) ) AND ( EXCLUDE ( DOCTYPE , "ct" ) OR EXCLUDE ( DOCTYPE , "ch" ) ) AND ( LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2022 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2021 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2020 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2019 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2018 ) ) AND ( EXCLUDE ( LANGUAGE , "Chinese" ) OR EXCLUDE ( LANGUAGE , "Turkish" ) ) AND ( EXCLUDE ( SUBJAREA , "ENER" ) )
```

Código 2.1 Código de búsqueda.

⁵ SCOPUS: Base de datos de resúmenes y citas seleccionados y organizados por expertos [18].

2.1. UAV

Los UAVs son vehículos aéreos no tripulados [19], pueden volar de forma autónoma o son operados remotamente, es decir, sin humanos a bordo [4], gracias a los rápidos avances tecnológicos ha sido posible producir UAVs de tamaño reducido. Durante mucho tiempo se ha utilizado sistemas conformados por un solo UAV. Sin embargo, el uso de un grupo de UAVs pequeños presenta ventajas tales como:

- Costo reducido de adquisición y mantenimiento de UAVs pequeños [20].
- Los sistemas multi-UAVs permiten escalabilidad, es decir, se puede ampliar fácilmente la cantidad de UAVs que entran en operación [2].
- Los sistemas de multi-UAVs tienen alta capacidad de supervivencia, ya que, si un UAV se daña, la operación continúa gracias al oportuno funcionamiento de los demás UAVs que conforman el sistema.
- Las misiones se pueden completar con mayor efectividad y rapidez debido al gran número de UAVs (entre 10 a 15) que conforman el sistema [21].
- Este tipo de sistemas producen una sección transversal de radar pequeña, lo cual es muy conveniente para aplicaciones militares [22].

En sistemas multi-UAV los vehículos aéreos no tripulados mantienen dos funciones específicas: i) permitir comunicación de UAV a UAV (U2U) y ii) recopilar información de la red durante la comunicación [14]. Adicionalmente, es importante mencionar que para ampliar la cobertura de una infraestructura de red los UAV actúan como unidades de acceso remoto.

Los vehículos aéreos no tripulados se pueden clasificar por sus características en diferentes categorías, como: funcionalidad, peso/carga útil, tamaño, resistencia, configuración del ala, métodos de control, altitud de vuelo, velocidad máxima y métodos de suministro de energía [23].

En función de su uso se pueden clasificar en:

- **UAVs de blanco:** Sirven para ataques contra enemigos en sistemas de defensa en el aire o en la tierra.
- **Reconocimiento:** Los MUAV (Micro Unmanned Aerial Vehicle) son destinados para este tipo misiones, permiten detectar desastres naturales, controlan áreas conflictivas y envía información militar.

- **Combate:** Destinados a misiones contra ataques.
- **Logística:** Sirven para transportar paquetes.
- **UAVs de uso civil:** También conocidos como drones comerciales. Son destinados para diferentes tareas, tales como: vigilancias, prevención y control de incendio, fotografías, ocio, entre otras.

En general, es muy importante seleccionar un UAV, con base en sus características o su función de uso para que pueda operar en sus misiones de manera eficiente.

2.1.1. COMPONENTES DE UAV

Los UAV pueden estar equipados con antenas, cámaras y sensores, los cuales permiten realizar diversas misiones en entornos desafiantes⁶ [11]. Los principales componentes de los UAVs son los siguientes: controlador electrónico de velocidad (ESC), módulo GPS, sensores, gimbal, controles de vuelo y batería. Estos componentes se encuentran interconectados y funcionan estrechamente entre sí [1]. La Figura 2.1, muestra las partes que componen un UAV.



Esta Foto de autor desconocido está licenciada bajo [CC BY-NC-ND](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Figura 2.1. Componentes de los UAV, basado en [1].

⁶ Entorno desafiante: Hace referencia a un entorno con obstáculos, falta de visión y zonas con baja cobertura.

A continuación, se describen los componentes de un UAV:

- **Controlador de velocidad electrónico:** Es una parte fundamental de los UAVs, el cual tiene la capacidad de ofrecer alta frecuencia (de 2,4 GHz a 5 GHz) y potencia a los motores del mismo.
- **Módulo de sistema de posicionamiento global (GPS):** Utilizado para receptar ubicación de UAV a la vez que calculan la información del tiempo.
- **Controlador de vuelo:** Recepta la información enviada por el módulo GPS, es parte fundamental en la comunicación de la red UAV.
- **Batería:** Su principal componente es el Polímetro de Litio (LiPo) con el fin de que la potencia, energía y densidad de vida útil de los UAV tengan mayor duración (superior a 2 horas de vuelo).
- **Gimbal:** Su función es dar estabilidad a los UAV, ya que es un punto de pivote el cual gira sobre los ejes X, Y y Z.
- **Sensores:** Los UAV pueden utilizar dos tipos de sensores: i) LIDAR⁷ junto con cámaras de visión térmica se utilizan para crear imágenes en 3D. Estos sensores permiten que los UAV sean utilizados ampliamente en varias aplicaciones en dónde se requieren imágenes de alta resolución, recopilando datos de diversas fuentes. De igual manera es posible utilizar un sistema de comunicación basado en UAVs para obtener imágenes potenciales en aplicaciones como agricultura e investigación ecológica. ii) Un segundo tipo de sensor utilizado para la detección y evasión de colisiones a través de visión ultrasónica, infrarroja y tiempo de vuelo utilizados.
- **Cámara:** Deben ser ligeras, de tamaño pequeño, tener la capacidad de realizar fotografías de alta calidad, y transmitir videos en tamaño real. En la actualidad esas cámaras ya vienen integradas en el gimbal.
- **Hélice:** El diseño de las hélices es primordial ya que proporcionan un vuelo más suave y ayudan a que el tiempo de vuelo de un dron sea más largo (superior a 2 horas). En su mayoría las hélices son fabricadas de plástico, aunque para mayor resistencia, manteniendo un peso ligero, se fabrican hélices de fibra de carbono.

⁷ LIDAR (*Ligh Detection and Ranging*): Es un sensor active y una de las técnicas de adquisición de datos, más novedosas y exitosas, emite y recibe luz en las longitudes de onda visible e infrarroja [9].

2.1.2. CARGA ÚTIL O PAYLOAD

La carga útil hace referencia al peso máximo que puede transportar un UAV, a la vez que mide su capacidad de elevación [24]; es decir, si se tiene una carga útil de mayor tamaño se podrá transportar más equipos y accesorios considerando un dron de mayor tamaño con una batería de mejores capacidades, pero su duración será corta en el aire [9].

Un payload típico incluye principalmente cámaras de video y sensores cuyo objetivo es el reconocimiento y vigilancia.

Un payload enfocado en las comunicaciones celulares pueden llevar consigo teléfonos móviles o tabletas, como también pueden ser plataformas embebidas como Raspberry [24], denominados equipos de usuarios celulares, los cuales tienen como principal característica que su peso sea menor al de 1 Kilogramo [25].

2.1.3. CLASIFICACIÓN DE UAVs

Para utilizar adecuadamente los UAVs en cualquier aplicación específica de redes inalámbricas, se deben considerar algunos aspectos importantes que cumplan con los requisitos impuestos por la calidad de servicio deseada (QoS: Quality of Service) [3] entre los cuales se consideran la capacidad y altitud de vuelo.

EASA⁸ clasifica a los UAVs en tres tipos [12]:

- a) Dimensión máxima de 1 m y masa máxima de despegue (mtom) de 5 kg.
- b) Dimensión máxima de 3 m y MTOM de 200 kg.
- c) Dimensión máxima de 8 m y MTOM de 600 kg [26].

La altura máxima a la que puede operar un dron depende mucho de las regulaciones nacionales. Este rango de altura generalmente va desde los 90 a 150 metros de altura.

Según el mecanismo de vuelo, los vehículos aéreos no tripulados pueden clasificarse en tres tipos:

2.1.3.1. Dron de rotor múltiple o multi-rotor

También conocidos como drones de ala giratoria, poseen más de dos rotores o motores los cuales son sostenidos por una serie de brazos y conforman la estructura del dron albergando toda la electrónica y componentes [5]. Permiten un despegue y aterrizaje

⁸ EASA (*European Union Aviation Safety Agency*): Agencia Europea de Seguridad Aérea, responsable de garantizar la seguridad y la protección del medio ambiente en el transporte aéreo en Europa.

vertical y flotan sobre una ubicación fija brindando cobertura celular continua para ciertas áreas. Este tipo de drones pueden volar por una trayectoria designada, mientras transportan estaciones base, también pueden desplegar estaciones base con alta precisión en una ubicación deseada [9]. La Figura 2.2 muestra un ejemplo de dron Multi-rotor.



Figura 2.2. Dron Multi-Rotor.

2.1.3.2. Dron de ala fija

Este tipo de drones son significativamente más eficientes energéticamente, debido a que, son capaces de transportar cargas pesadas, recorrer grandes distancias y viajar a mayor velocidad dado que su ala fija los permite planear por el aire. Los drones de ala fija tienen ciertas desventajas; al no ser posible el despegue y aterrizaje vertical, necesitan una pista para estas acciones, tampoco pueden flotar sobre una ubicación fija [9].



Figura 2.3. Dron ala fija.

2.1.3.3. Drones híbridos de ala fija y giratoria

Los drones híbridos de ala fija y giratoria pueden despegar verticalmente, llegado rápidamente a su destino deslizándose por el aire y luego a flotar usando cuatro rotores o motores [9].

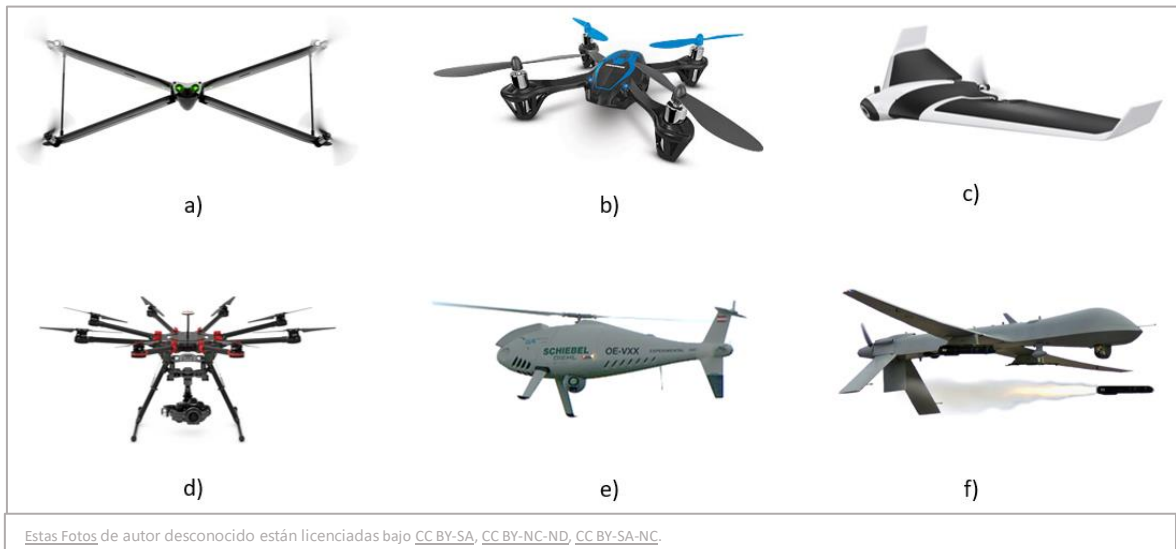


Figura 2.4. Tipos de UAV ala fija, ala giratoria e híbridos, a) Parrot Swing (Vista frontal), b) Kogan Nano, c) Parrot Disco, d) DJI Spreading Wings S900, e) Scout UAV helicopter, f) Predator B.

2.1.4. MÉTODOS DE VUELO

Los UAV pueden volar según su autonomía o su control.

Por su autonomía:

- **Autónomo:** El dispositivo es monitoreado directamente desde tierra con características de operación inteligente dentro de un ámbito de programación, en dónde todo es manejado desde una computadora que permite controlar el hardware mediante software [27].
- **Semiautónomo:** El dispositivo tiene una pre-programación configurada para su vuelo, lo que permite que el operador realice cambios a través de una interfaz de vuelo [21].
- **No autónomo:** El operador controla el vuelo remotamente en su totalidad.

Por su control:

- **Emisora:** El dispositivo es manejado por radio control manual desde la tierra.
- **Dispositivo inteligente:** El cual contiene aplicaciones que permiten el control y monitoreo del UAV [28].

2.1.5. UAV EN REDES CELULARES

El continuo crecimiento de UAV de consumo está creando nuevas oportunidades comerciales en el ámbito de operadores celulares, debido a que estos se pueden conectar nuevos tipos de equipos de usuarios a las redes celulares amplificando la cobertura, eficiencia espectral y una mejor calidad de la experiencia del usuario al permitir estaciones base voladores montadas en UAV que se reposicionan dinámicamente [9]. El proyecto de asociación de tercera generación (3GPP) se refiere a los UAV como equipo de usuario aéreo, siendo su principal objetivo conectar UAV a redes celulares.

2.1.6. TÉCNICAS PARA LA COMUNICACIÓN SEGURA DE UAV

La utilización de dispositivos UAV en la actualidad, ha traído potenciales amenazas para la seguridad especialmente en los protocolos de comunicación. Pudiendo analizar que las bandas de alta frecuencia de 60 GHz tienen un mejor rendimiento detectando la invasión de drones aficionados, lo que no sucede en las bandas de frecuencia superpobladas de 2.5 GHz o 5 GHz. Para esto se han desarrollado mecanismos que previenen ataques mediante el uso de protocolos de enrutamiento de multidifusión [29]. Este tipo de algoritmo de enrutamiento al tomar decisiones sobre las rutas más confiables y seguras selecciona nodos confiables para la transportación de información.

Otra metodología utilizada para asegurar la información que es transportada por los vehículos aéreos no tripulados es la criptografía. En donde se utiliza un protocolo de recopilación de datos basado en palabras clave ópticas que ayuda a desviar la atención del UAV intruso [29].

A través del método de negociación de clave de cifrado se puede garantizar autenticación y seguridad de datos particionados almacenados en UAVs e intercambiados entre un UAV y la estación terrestre (GS). Esta estación terrena genera y envía a los UAV un carácter pseudoaleatorio para que cada uno de estos genere su propia clave. Así mismo, guarda todos y cada uno de los caracteres aleatorios generados para crear todas las claves y luego descifrar los datos dentro de cada UAV [30].

2.1.7. CLASIFICACIÓN DE REDES INALÁMBRICAS

Según la normativa del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE⁹), la clasificación de las redes inalámbricas se divide en dos dominios: i) redes basadas en infraestructura y (IBN – *Infrastructure Based Network*) y ii) redes sin infraestructura (ILN - *Infrastructure Loss Network*) o también denominadas redes Ad-Hoc.

Las redes Ad-Hoc sin infraestructura se clasifican en: i) redes de sensores inalámbricos (WSN: *Wireless Sensor Networks*), ii) redes de malla inalámbrica (WMN: *Wireless Mesh Networks*) y iii) redes Ad-Hoc móvil (MANET: *Mobile Ad-Hoc Network*). Las MANETs a su vez se clasifican en dos subgrupos: VANET (*Vehicle Ad-Hoc Network*) y FANET [30]. La Figura 2.5, muestra la taxonomía descrita anteriormente.

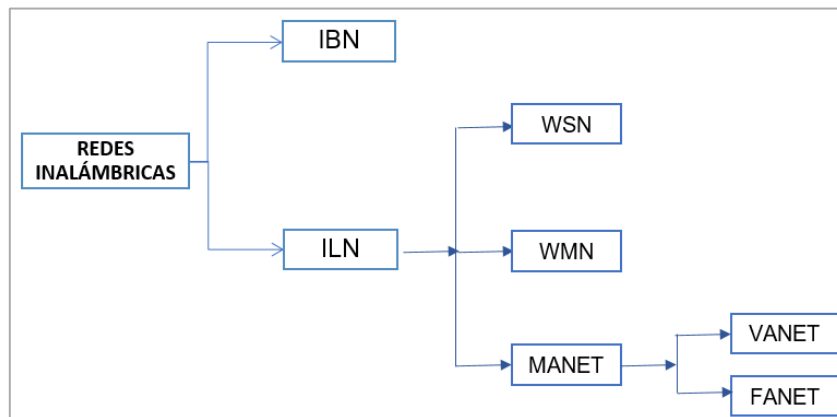


Figura 2.5. Taxonomía de redes inalámbricas, basado en [30].

2.1.7.1. Red basada en Infraestructura (IBN)

La red basada en infraestructura tiene dos subgrupos. El primer subgrupo estacionario conformado por estaciones base estáticas (BS) o fijas que también se denominan puntos de acceso (AP). El segundo subgrupo móvil consta de nodos móviles (MN) y estaciones maestras (MS) conocidas como puntos de acceso. Estos nodos móviles se comunican con otros nodos móviles para establecer una comunicación utilizando estaciones base en diferentes frecuencias [30].

⁹ IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers - Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos): Es la organización profesional técnica más grande del mundo, dedicada al avance de la tecnología en beneficio de la humanidad.

2.1.7.2. Red sin Infraestructura (ILN)

La red sin infraestructura es implementada en aplicaciones en las que la red basada en infraestructura no es adecuada para cumplir con requisitos para poder operar. Debido al entorno sin infraestructura, los nodos se comunican entre sí sin conectividad fija, modificando la topología de la red con frecuencia. Esta red admite múltiples nodos cada uno con diferentes características para establecer enlaces y comunicarse entre sí en el rango de transmisión o área de cobertura.

- **Red de sensores inalámbricos (WSN)**

Es una red sin infraestructura, está conformada por un grupo de nodos sensores que se comunican entre sí mediante el uso del canal inalámbrico. Estas redes son capaces de monitorear y compartir información de datos de forma continua de las condiciones ambientales como la presión, la temperatura y el sonido. Cada nodo reenvía la información recopilada hacia el punto principal. En esta era moderna, este tipo de redes pueden ser destinadas para la realización de hogares inteligentes, operaciones de búsqueda y rescate, vigilancia de fronteras, entre otros [30].

- **Red de malla inalámbrica (WMN)**

Se conoce como red de malla sin infraestructura, auto-configurada y auto-organizada en donde todos los nodos establecen una comunicación entre sí cuando es necesario, por lo que permite que esta red sea fácilmente implementada. El beneficio de esta red es que proporciona la posibilidad de comunicarse en cualquier lugar y en todo lugar. Este tipo de red es confiable, además que permite conexión de banda ancha y conexión entre empresas. Integra tecnologías como: WMN, Wi-Fi, WiMAX entre otras [30].

- **Red Ad-Hoc Móvil (MANET)**

MANET es un tipo de tecnología de red inalámbrica móvil [4]. Esta red ofrece nodos móviles que en comunican en cualquier lugar, en cualquier momento y en cualquier dirección. Una característica importante de las MANET es que sus nodos pueden unirse o abandonar la red en cualquier momento de la comunicación mediante configuración automática. Sus nodos son capaces de auto-organizarse y auto-configurarse en la red para la comunicación, dando a la red gran importancia en el campo tecnológico de redes inalámbricas modernas.

- **Red Ad-Hoc Vehicular (VANET)**

La red VANET es un subconjunto de las MANET. Este tipo de red vehicular gestiona el tráfico mediante el uso de un sistema de transporte inteligente (ITS: Intelligent Transport System) [11], el cual proporciona dos plataformas entre vehículos para comunicarse entre sí. Una es una red de comunicación sin infraestructura y la otra es una red basada en infraestructura entre UAVs.

- **Red Ad-Hoc Voladora (FANET)**

FANET se puede definir como una nueva forma de MANET o una forma especial de VANET en la que los nodos son UAVs [4]. Mientras que en las redes MANET los nodos típicos son hombres que caminan y en las redes VANET sus nodos son automóviles; en redes FANET sus nodos vuelan en el cielo permitiendo mayor velocidad, un alto grado de movilidad y largas distancias entre nodos en comparación a las otras redes.

La Figura 2.6, muestra un ejemplo de las redes MANET, VANET y FANET.

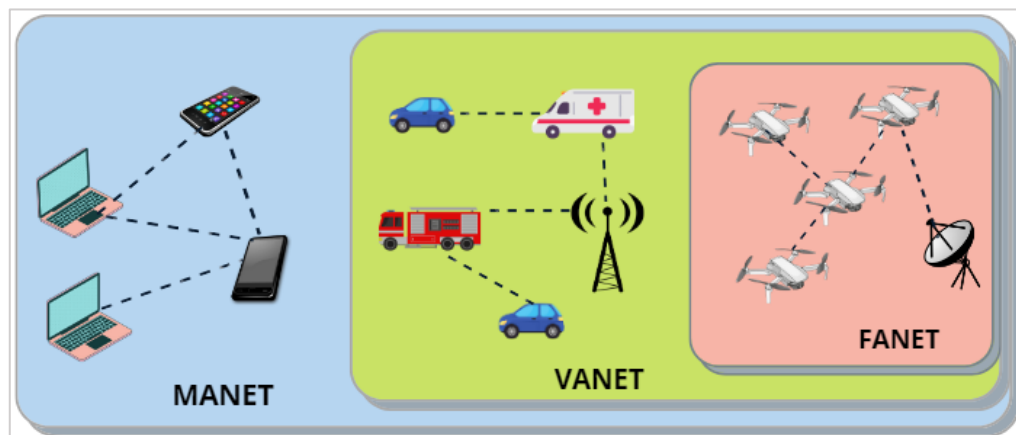


Figura 2.6. Redes MANET, VANET y FANET, basado en [1].

2.2. REDES FANET

Las redes FANET, son redes Ad-hoc que conectan múltiples UAV, están constituidas por nodos generalmente dispersos en el cielo, que tienen más grados de movimientos, lo que conlleva un cambio de topología frecuente y la distancia entre cada nodo es considerable llegando hasta kilómetros de distancia. Las redes FANET se basan en enlaces de datos de UAV a UAV ampliando así su cobertura de operación, inclusive un nodo FANET al no establecer un enlace de comunicación con la infraestructura puede continuar operando a través de otros UAVs que conforman la red.

2.2.1. CONSIDERACIÓN DE DISEÑO DE REDES FANET

Para el diseño de una red FANET se consideran diversas características, las más destacadas son: adaptabilidad, escalabilidad, latencia, limitaciones de la plataforma UAV y requisitos de ancho de banda [4].

2.2.1.1. Adaptabilidad

Los sistemas multi-UAV como las FANET, se pueden ver afectados por las condiciones ambientales provocando pérdida de enlace de datos, tienen nodos móviles los cuales siempre cambian de ubicación, por lo tanto, la distancia entre UAV no necesariamente es constante, ocasionando un cambio en sus rutas. Las fallas de UAVs durante una misión es otro aspecto a tener en cuenta, estos son producidos como consecuencia de un problema técnico o un ataque contra el sistema multi-UAV, reduciendo el número de dispositivos activos dentro de la red, lo que conlleva a inyecciones de UAV dentro del sistema para mantener la operación. Considerando que los fallos de UAVs e inyecciones de los mismos cambian los parámetros de las redes FANET.

El diseño de redes FANET deben estar enfocadas a trabajar en ambientes altamente dinámicos y que puedan ajustarse a cualquier cambio o falla. Durante una operación la red FANET debe ser capaz de actualizar la misión incluyendo datos adicionales o nueva información lo que puede requerir una actualización del plan de vuelo¹⁰.

La naturaleza altamente dinámica del entorno FANET está estrechamente relacionada con la capa física, capa de red y capa de transporte, por lo que, cualquier cambio o falla las afecta directamente. Para la elección de una capa física adecuada se deben escanear parámetros como de la densidad, distancia de nodos del sistema y los cambios ambientales. Finalmente, para tener un rendimiento óptimo del sistema FANET, el protocolo de enrutamiento debe adaptarse a los cambios del enlace de comunicación [4].

2.2.1.2. Escalabilidad

En sistemas multi-UAV el rendimiento es un factor muy importante, y esto se logra debido al trabajo en conjunto que realizan los UAV, lo que no sucede en sistemas de un único UAV. Los protocolos y algoritmos FANET son diseñados para que exista una mínima reducción de rendimiento al trabajar con cualquier cantidad de UAV [4].

¹⁰ Plan de vuelo: Se refiere a la planificación técnica del vuelo del UAV como parametrizar alturas, número de vueltas, orientación de la cámara, o solapamiento entre imágenes.

2.2.1.3. Latencia

En redes FANET la latencia es uno de los requisitos más importantes, y esta depende principalmente de la aplicación. Especialmente para redes FANET en tiempo real en dónde los paquetes de datos deben entregarse dentro de un cierto tiempo con un límite de demora. Una baja latencia evita colisiones en múltiples UAVs [4]. Cabe recalcar que para cada tipo de red MANET, FANET y VANET, se necesitan protocolos y algoritmos independientes ya que los comportamientos de demora de paquetes son diferentes y los protocolos desarrollados para una red, pueden no satisfacer los requisitos de latencia de otra red totalmente diferente [5].

2.2.1.4. Requisito de ancho de banda

Debido al desarrollo de tecnología de sensores, se logra recopilar datos con una muy alta resolución, requiriendo un ancho de banda mucho mayor. En aplicaciones FANET, la colaboración y coordinación de los múltiples UAVs que conforman el sistema multi-UAV, permiten recopilar datos del entorno y transmitirlos a una estación terrestre y esto hace que el requisito de ancho de banda sea mucho mayor.

Es por eso que, es importante que un protocolo FANET cumpla con los requisitos de capacidad de ancho de banda para que las imágenes o videos en tiempo real puedan ser transmitidas con una alta resolución bajo ciertas restricciones, tales como: i) capacidad del canal de comunicación, ii) velocidad de los UAV, iii) estructura propensa a errores de los enlaces inalámbricos, iv) falta de seguridad con la comunicación.

2.2.1.5. Restricciones de la plataforma UAV para FANETS

El hardware de comunicación FANET es una cuestión muy importante para el rendimiento de los UAVs y este debe implementarse en la plataforma UAV. El peso del hardware es una característica significativa; mientras más liviano es este, la carga útil total se vuelve liviana y constante, permitiendo implementar sensores más avanzados y otros periféricos en los UAV.

En el diseño de FANET la limitación de espacio es otra característica importante, mucho más en mini-UAV, ya que, el hardware de comunicación debe instalarse en la plataforma UAV [4].

La carga útil hace referencia al peso máximo que puede transportar un vehículo aéreo no tripulado, limitando su capacidad de elevación. Las cargas útiles van desde las decenas de gramos hasta los cientos de kilogramos[9]. Mientras mayor sea el tamaño de la carga útil,

más equipos y accesorios se pueden transportar en un dron de un gran tamaño, permitiendo mayor capacidad de batería y menor duración en el aire. La carga útil más típica incluye cámara de video y sensores enfocados en reconocimiento y vigilancia como se mostró en la Figura 2.1.

2.2.2. ARQUITECTURA PARA EL DESPLIEGUE DE FANETS

En la evolución de las redes inalámbricas, las redes Ad-hoc son un factor clave ya que, en este tipo de redes los dispositivos se comunican entre sí de forma directa por un canal inalámbrico sin necesidad de un dispositivo central que administre la red [32]. Las redes Ad-hoc existentes tienen como objetivo establecer conexiones entre pares, son autónomas, tiene la capacidad de organizarse y configurarse por sí mismas [33].

Una arquitectura eficiente que permita conectar múltiples UAV en redes FANET, es una arquitectura de comunicaciones descentralizada, ya que esta puede brindar una cobertura extendida para la transmisión de datos. Además, que en su composición consta de UAVs similares y en poca cantidad [14].

Por otro lado, en una red FANET en donde se requiera una gran cantidad de UAVs de diferentes tipos, las arquitecturas más adecuadas son las redes Ad-hoc multi-grupo [34] y redes Ad-hoc multicapa.

2.2.2.1. Comunicación Centralizada

La arquitectura de comunicación centralizada es una de las topologías de red más común, la cual consta de un nodo central (ejemplo la estación Tierra), al que todos los UAVs se encuentran conectados directamente recibiendo datos de comando y control con un retraso de información [31].

En este tipo de arquitectura los UAVs no se encuentran conectados directamente entre ellos, por lo que la comunicación entre dos UAVs debe ser enrutada a través de la estación terrestre que actúa como retransmisor con dispositivos de transmisión de radio avanzados con una alta potencia de transmisiones en los UAVs. La Figura 2.7, muestra un ejemplo de lo descrito anteriormente. Este tipo de arquitectura tiene una desventaja, la estación terrestre, la cual representa la vulnerabilidad de la red al ser el potencial de punto único de falla; es decir, toda la red se verá afectada si la estación terrestre falla.

Esta arquitectura se puede emplear en muchas aplicaciones, como cobertura inalámbrica en eventos de gran multitud de personas, operaciones de búsqueda y rescate, además de aplicaciones de monitoreo y vigilancia de multitudes [11]. Sin embargo, a pesar de que esta

arquitectura es simple y estable, solo puede usarse en misiones pequeñas y simples. Debido a todos los desafíos mencionados anteriormente, investigadores desarrollaron la comunicación descentralizada que cubre dichas falencias.



Figura 2.7. Estructura de comunicación UAV centralizada, basada en [23].

2.2.2.2. Comunicación Descentralizada

La arquitectura de comunicación descentralizada, también conocida como sistema de enjambre inteligente es una estructura donde cada UAV determina sus parámetros de control de vuelo de forma independiente. Por lo que, no se requiere un nodo central para que dos UAV se comuniquen entre sí de forma directa o indirecta. Esto implica que los datos de información que no están destinados a la estación terrestre pueden ser enrutados a través de un UAV en lugar de la estación terrestre. A continuación, se indican las tres redes con comunicación descentralizada [13].

- a) Red ad hoc de UAV.
- b) Red UAV multi-grupo.
- c) Red ad hoc de UAV multicapa.

- **Red Ad-hoc UAV**

En las redes Ad-hoc conformadas por UAVs, cada UAV está ligado al proceso de reenvío de datos hacia los demás UAV que pertenecen a la red. Este tipo de red está conformado por un UAV troncal, el cual sirve como puerta de enlace entre la estación tierra y el UAV que pertenece a esta arquitectura para la transmisión de información [14], como se muestra en la Figura 2.8. Una red Ad-hoc UAV tiene como enfoque principal la vigilancia, la operación de monitoreo y misiones en las que para su despliegue se utilicen una cantidad pequeña de UAV homogéneos (UAV similares) garantizando conectividad de red, patrones

de movilidad como velocidad y dirección de rumbo, todas estas características deben ser las mismas para todos los UAV de la red [31].

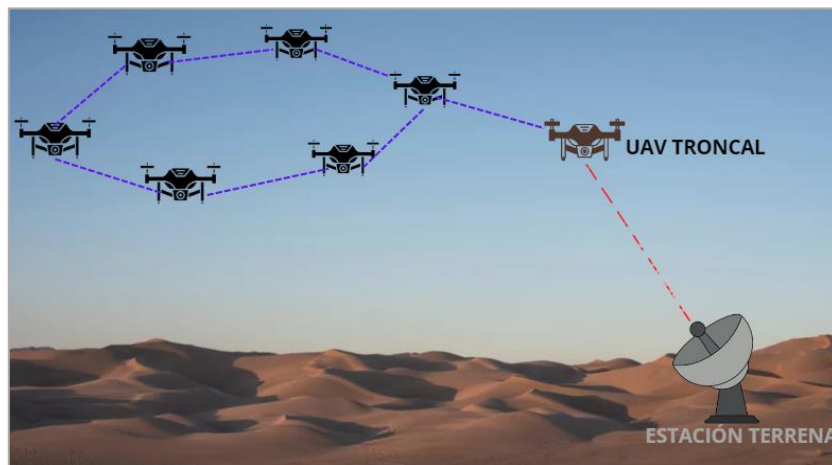


Figura 2.8. Red Ad-Hoc UAV, basada en [23].

Una gran cantidad de UAV son utilizados para ser desplegados en algunas misiones, siendo estos a menudo de diferentes tipos que van desde UAV de gran tamaño a UAV pequeños y cada uno de estos con diferentes cargas útiles. Estos UAV pueden formar múltiples grupos según su tipo. Generalmente los UAV de un tipo similar se encuentran físicamente cerca unos de otros formando un grupo, mientras que los UAV de diferentes tipos se encuentran relativamente lejos unos de otros. Debido al tráfico involucrado y a la sobrecarga de control de red causada esto no es práctico para un gran número de UAV para formar una única red Ad-Hoc de UAV. Es por eso que a continuación, se analizan dos tipos de arquitecturas de comunicación que permiten la interconexión de UAV de heterogéneos (UAV de múltiples tipos).

- **Red Ad-hoc UAV Multi-grupo**

Las redes Ad-hoc UAV multi-grupo, están conformadas por una red Ad-hoc de UAV y una arquitectura de red centralizada, es decir, involucra una estación de tierra tomándolo como nodo central y a todos los UAVs que están directamente vinculados a esta. La comunicación dentro de un mismo grupo (intragrupo) se dan dentro de una red Ad-Hoc antes descrita, mientras que la comunicación entre diferentes grupos se la realiza a través de los UAV troncales de cada grupo y la estación terrestre [14]. Estas redes Ad-hoc multi-grupo son adecuadas para misiones que utilizan una gran cantidad de UAVs de múltiples tipos para su despliegue [31]. La Figura 2.9, muestra una red de UAV de varios grupos, cada uno con una gran cantidad de UAV que presentan diferentes características de vuelo o comunicación.

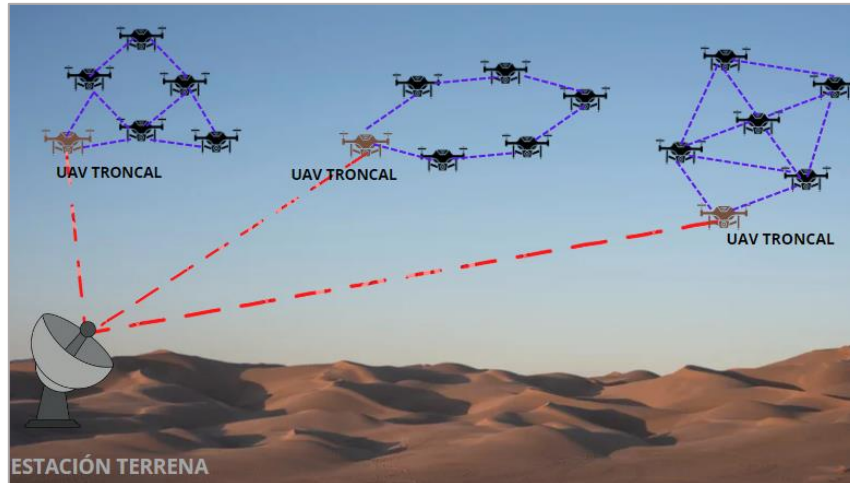


Figura 2.9. Red Ad-Hoc UAV Multi-grupo, basada en [23].

- **Red Ad-hoc UAV Multi-capa**

Este tipo de redes Ad-hoc, está conformada por una red de múltiples grupos de UAVs heterogéneos, en la cual, solo un UAV de la red, denominado UAV troncal de un grupo específico está conectado directamente a estación tierra formando la capa superior de esta arquitectura de red [31]. Mientras que, la red Ad-hoc formada por UAV miembros de un grupo específico corresponde a la capa inferior de la arquitectura de red de múltiples capas.

De igual manera, los UAVs de la columna vertebral (UAVs troncales) de cada grupo están conectados entre sí y se encuentran debajo de la capa superior. Esta arquitectura es adecuada para misiones que involucran una gran cantidad de UAV de múltiples tipos [14]. En la Figura 2.10, se muestra un ejemplo de Red Ad-Hoc UAV de múltiples capas.

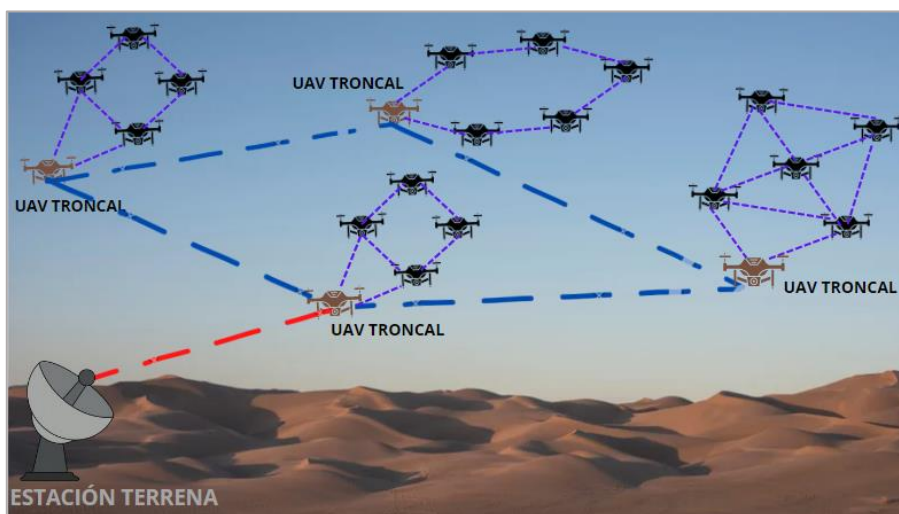


Figura 2.10. Red Ad-Hoc UAV Multi-capa, basada en [23].

2.2.3. ARQUITECTURA DE COMUNICACIÓN DE UAVs EN REDES FANET

La comunicación de red basada en UAV utiliza una serie de enlaces para la transmisión o recopilación de datos. Esta red se caracteriza por sus nodos de alta movilidad y topología dinámica; debido a su constante movimiento, estos nodos cambian de ubicación aleatoriamente. Por consiguiente, el uso de una tecnología de comunicación adecuada es un tema primordial para este tipo de redes [11]. La Figura 2.11 muestra una red básica basada en UAV.

Las interfaces de comunicación representan un tipo diferente de información y datos de comunicación. A continuación, se describe cada una de estas.

2.2.3.1. UAV – UAV

Los UAV pueden comunicarse con otros UAV directa o indirectamente mediante la construcción de rutas de comunicación de múltiples saltos. Este enlace permite compartir información con otros UAV de la red mediante comunicación inalámbrica [1] utilizando bandas de microondas y mmWave con frecuencias que van desde cientos de MHz, unos pocos GHz para 4G (700 MHz 6 GHz) y en tecnologías LTE [35],[36] y hasta decenas de GHz (más de 20 GHz) para redes 5G. La comunicación aire-aire es el modelo más común utilizado en las redes basados en UAVs, permite establecer un enlace de retorno entre los vehículos aéreos no tripulados, generalmente tiene condiciones de movilidad y velocidad constantes [11].

2.2.3.2. UAV – Estación Base Terrestre

En la comunicación de enlace directo que existe entre el UAV y la estación terrestre es fundamental considerar una tecnología adecuada para permitir conexiones fiables y sin inconvenientes para enlaces de datos y control en varias aplicaciones de UAV. Por ejemplo, comunicación por radio, es decir, graba y transmite lecturas de un dispositivo de audio y video. Este tipo de comunicación aire-tierra requiere una conexión con línea de vista (LoS), además de operar en una banda sin licencia (2.4 GHz). Este tipo de enlaces no es apto para despliegues a gran escala en áreas amplias y tampoco para comunicaciones en dónde existen obstáculos como construcciones, árboles entre otros en regiones urbanas densas.

Para hacer frente a estos desafíos, la próxima tecnología 5G emplea una solución prometedora como lo es una red de UAV con capacidad celular, en dónde la velocidad de datos esperada de esta res es aproximadamente 10 Gbits/seg, con una latencia [37] de ida y vuelta de menos de 1 ms [11]. De esta manera, la velocidad de datos puede satisfacer

los requisitos de una aplicación en tiempo real. Es así como, la tecnología 5G y mmWave proporcionan novedosas soluciones de radio y permiten oportunidades de gestión inteligente del espectro.

El espectro 5G puede ayudar en la preservación de tiempo y frecuencia en la banda celular. Es así como la red celular puede proporcionar el control y el enlace de datos para los UAV, también proporciona cobertura de control en todas partes para UAV.

2.2.3.3. UAV - Receptores Terrestres

Los vehículos aéreos no tripulados logran usarse de manera eficiente para brindar cobertura inalámbrica a usuarios terrestres. El enlace UAV – Receptor terrestre usa el modelo de canal aire-tierra y permite establecer una conexión entre la estación base aérea y usuarios terrestres [12].

Para establecer este tipo de comunicación se pueden clasificar según la tecnología de comunicación y las frecuencias operativas como 4G/LTE (opera sobre las bandas de frecuencia de microondas), 5G (opera sobre las bandas de mmWave) y Wi-Fi (usa estándares IEEE 802.11). El modelo óptimo para este tipo de enlaces opera en la banda de 4G en tres bandas de frecuencia diferentes de 700, 2000 y 500 MHz.

Este modelo brinda cobertura inalámbrica utilizando vehículos aéreos no tripulados para situaciones de desastres, misiones de búsqueda y rescate, eventos concurridos y permite a la estación terrestre brindar cobertura para usos diversos.

2.2.3.4. UAV – Wi-Fi

Una red Wi-Fi equipada con antenas direccionales u omnidireccionales montada sobre un UAV es una solución prometedora para proporcionar cobertura aire-tierra [38] y conexiones en tiempo real para los usuarios cuando la red terrestre queda completamente fuera de servicio durante escenarios desastrosos.

2.2.3.5. UAV – Sistema Satelital

El enlace entre un UAV y satélite se conoce como comunicación por satélite y permite transportar información meteorológica, climática y de GPS. Los enlaces de comunicación por satélite se pueden usar para condiciones NLoS (Sin Línea de Vista).

La comunicación por satélite es una prometedora solución para proporcionar control y comunicación de carga útil para enlaces NLoS en regiones remotas y fuera de cobertura. La órbita terrestre baja (LEO) es un enlace óptimo para este tipo de comunicación ya que

opera en bandas estrechas y tiene un tiempo de latencia bajo, admitiendo funciones autónomas de UAV para áreas de gran cobertura (cientos de km), con un solo salto entre la estación terrestre y el UAV [11].

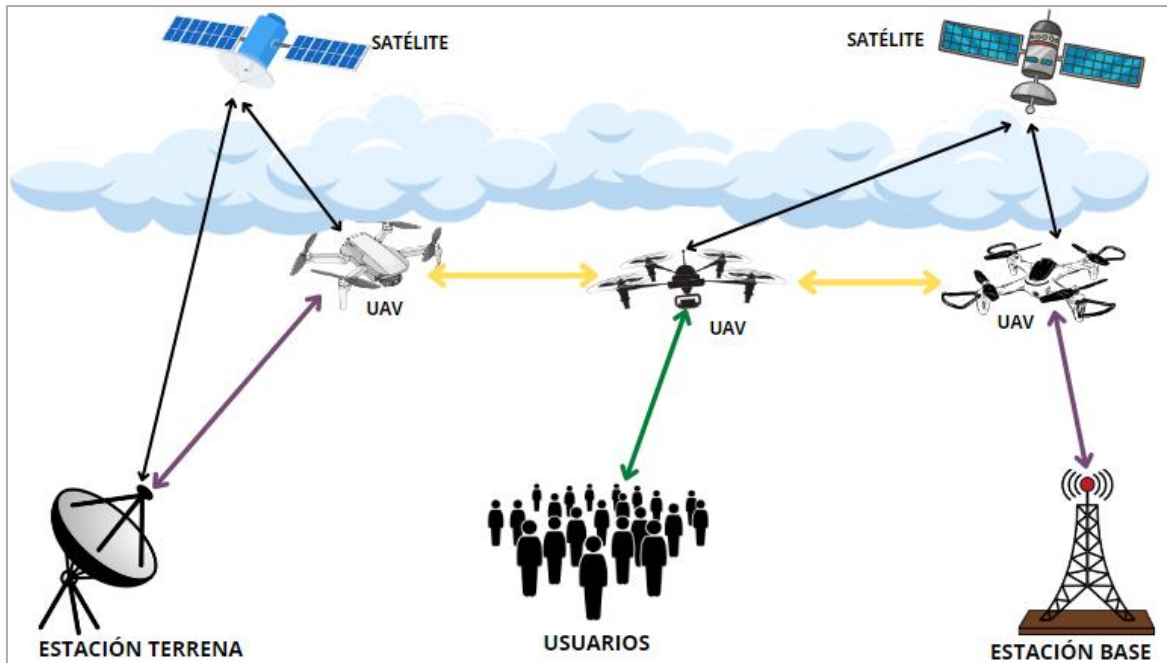


Figura 2.11. Arquitectura de red básica de comunicación inalámbrica con UAV, basada en [8].

2.2.4. Diferencia entre FANET y las redes Ad-hoc existente

Las redes Ad-Hoc inalámbricas se clasifican según su utilización, despliegue, comunicación y objetivos de la misión. Las redes FANET comparte características comunes con las redes MANET y VANET.

2.2.4.1. Movilidad de Nodos

Esta característica es la diferencia más notable entre las redes FANET y las demás redes Ad-Hoc. En las redes FANET el grado de movilidad de un nodo mucho es mayor que en MANET Y VANET, teniendo una velocidad de 30 a 460 km/h [4].

2.2.4.2. Modelo de Movilidad

En redes MANET los nodos se mueven en un terreno determinado, implementando generalmente modelo de movilidad de puntos de referencia aleatorios al igual que la dirección y la velocidad. En redes VANET sus nodos se mueven en autopistas o carreteras, por lo que, los modelos de movilidad en estas redes son predecibles [4]. En sistemas multi-UAV el plan de vuelo no está predeterminado debido a los cambios ambientales o actualizaciones en dichas misiones, por cambios bruscos en el plan de vuelo, movimientos

rápidos de los UAV y las diferentes topologías de UAV afectan directamente el modelo de movilidad de los sistemas multi-UAV [39].

En redes FANET, debido al rápido movimiento de los UAV es fundamental la elección de un modelo de movilidad adecuado para obtener resultados con la máxima precisión y conformidad. Para esto, se proponen algunos modelos de movilidad, tales como:

- El modelo de movilidad de movimiento circular semi-aleatorio (SRCM) [4], [40].
- El modelo de movimiento aleatorio de UAVs en la cual se mueven de forma independiente y deciden la dirección de su movimiento.
- En un tercer modelo, los UAVs mantienen un mapa de nodos las cuales guían los movimientos de los mismos marcando las áreas que el UAV escanea en el mapa compartiendo un mapa de nodos con la transmisión [4] y [41].

La Tabla 2.1 muestra las características que diferencian las redes MANET y VANET de las redes FANET.

Tabla 2.1. Características MANET, VANET y FANET.

| Características | MANET | VANET | FANET |
|-------------------------------|--|---|---|
| Descripción | Comunicación entre nodos en un rango de transmisión | Comunicación entre vehículos y unidades de carretera | Comunicación entre UAV's de forma autónoma o con estaciones de control. |
| Energía | Baja | Alta | Alta |
| Movilidad del nodo | Bajo | Alto | Muy alto |
| Velocidad de los nodos | Muy baja | Muy alta | Muy alta |
| Densidad de nodos | Bajo | Alto | Muy bajo |
| Modelo de movilidad | Random 2-D | Regular- Trayectoria lineal 2-D | 2-D, 3-D Nodo de movilidad realista. Modelos especiales de movilidad para sistemas autónomos UAV. |
| Modelo de propagación | Los nodos móviles se comunican en tierra, no requiere línea de vista (NLoS). | Los nodos vehiculares se comunican en tierra. Está basado en los criterios de aplicaciones. Puede ser necesario LOS o NLoS. | Los nodos UAV realizan operaciones en el aire, pueden ser LOS y NLoS, según la aplicación. |

| Características | MANET | VANET | FANET |
|-----------------------------------|--------------------|---|---|
| Topología | Aleatoria / Ad-Hoc | Estrella con RSU y estrella con estación de control | Ad-hoc /Malla entre UAV y estrella con estación de control. |
| Cambio de topología | Lenta | Rápida | Rápida |
| Actualización de topología | Infrecuente | Frecuente | Muy Frecuente |
| Potencia de cálculo | Limitada | Alta | Alta |
| Localización | GPS | GPS, AGPS, DGPS | GPS, AGPS, DGPS, IMU |

2.2.5. Ventajas de operar con redes FANET

- Las redes FANET abordan los problemas de gestión de recursos que pueden surgir del uso de recursos satelitales para respaldar la comunicación a bordo de los UAV.
- Afrontan los problemas de aprovisionamiento de aplicaciones sensibles a retrasos como una ventaja sobre los enlaces satelitales.
- Los sistemas de redes FANET requieren menos tiempo y costo para su implementación, en comparación con los sistemas de estaciones terrenas o estaciones satelitales.
- Brinda al operador de red móvil una solución factible para el aprovisionamiento de datos de banda ancha.

2.3. TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

Gracias al avance significativo de tecnologías inalámbricas, muchas de estas pueden ser consideradas como opciones potenciales en comunicaciones inalámbricas [42] para proporcionar enlaces de comunicación confiables y flexibles para el rápido despliegue de redes FANET [14]. La adecuada selección de una tecnología depende del tipo de aplicación y del tipo de misión al que están destinadas y deben ser capaces de incluir una amplia gama de aplicaciones de UAV, independientemente de las diferencias significativas de altura y orientación, admitiendo conexiones aire - aire y aire – tierra. A continuación, la Tabla 2.2 muestra características como la movilidad, velocidad de datos, rango de comunicación, latencia y topología de la red de las diferentes tecnologías de comunicación inalámbricas [43] que son adecuadas para un despliegue confiable y flexible de FANETS.

Tabla 2.2. Resumen Análisis de Tecnologías.

| Tecnología de comunicación | Estándar IEEE | Frecuencia/ Medio | Tipo de Espectro | Dispositivo de movilidad | Tasa de datos teórica | Rango Interiores - Exteriores | Topología de red | Latencia | Ventajas | Limitaciones | Cobertura celular (Km) |
|----------------------------|---------------|-------------------|------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------------|---|------------|--------------------------|----------------------------|------------------------|
| Wi-Fi | 802.11 | 2.4GHz | Sin Licencia | SI | Hasta 2 Mbps | 20 m – 100 m | Ad-hoc, estrella, malla, híbrido | < 5ms | Alta velocidad Barato | Rango limitado | <0.3 |
| | 802.11a | 5 GHz | Sin Licencia | SI | Hasta 54 Mbps | 35 m – 120 m | Ad-hoc, estrella, malla, híbrido | < 5ms | Alta velocidad Barato | Rango limitado | <0.3 |
| | 802.11b | 2.4 GHz | Sin Licencia | SI | Hasta 11 Mbps | 35 m – 140 m | Ad-hoc, estrella, malla, híbrido | < 5ms | Alta velocidad Barato | Rango limitado | <0.3 |
| | 802.11n | 2.4/5 GHz | Sin Licencia | SI | Hasta 600 Mbps | 70 m – 250 m | Ad-hoc, estrella, malla, híbrido | < 5ms | Alta velocidad Barato | Rango limitado | <0.3 |
| | 802.11g | 2.4 GHz | Sin Licencia | SI | Hasta 54 Mbps | 38 m – 140 m | Ad-hoc, estrella, malla, híbrido | < 5ms | Alta velocidad Barato | Rango limitado | <0.3 |
| | 802.11ac | 5 GHz | Sin Licencia | SI | Hasta 3466 Mbps | 35 m – 120 m | Ad-hoc, estrella, malla, híbrido | < 5ms | Alta velocidad Barato | Rango limitado | <0.3 |
| Bluetooth 5 | 802.15.1 | 2.4 GHz | Sin Licencia | SI | Hasta 2 Mbps | 40 m – 200 m | Ad-hoc, piconet | 2 ms | Energía eficiente | Baja tasa de datos | - |
| ZigBee | 802.15.4 | 2.4 GHz | Sin Licencia | SI | 250 kbps | 10 m – 100 m | Ad-hoc, estrella, malla, árbol, grupo | 15 ms | Bajo costo | Baja tasa de datos | <0.1 |
| WiMAX | 802.16a | 2 a 11 GHz | Licenciado | SI | Hasta 75 Mbps | Hasta 48 K m | Área amplia, Red de retorno inalámbrica | 30 ms | Alto rendimiento | Problemas de interferencia | 50 |
| LTE | LTE | Hasta 20 MHz | Licenciado | SI | Hasta 300 Mbps | Hasta 100 Km | Plano, basado en IP | 5 ms | Alto Ancho de banda | Alto costo | - |
| 5G | 5G (eMBB) | 28GHz | Licenciado | SI | Hasta 20 Gbps | Área amplia | Basado en IP | 1 ms | Alta tasa de datos | Alto costo | - |
| SATELITE | Satélite | Hasta 40 GHz | Licenciado | SI | Hasta 1 Gbps | Todo el mundo | - | 550 ms | Amplia cobertura | Alto retraso Alto costo | 4000 |
| Lora | - | 915 MHz | Sin Licencia | SI | - | 15 Km | - | 56-1400 ms | Bajo consumo de potencia | | <15 |

Estos atributos son importantes al momento de elegir una tecnología adecuada para diferentes enlaces de comunicación UAV-UAV y UAV a infraestructura dependiendo de la naturaleza de aplicación y el tipo de misión en dónde son requeridos.

Así, las tecnologías inalámbricas enlistadas anteriormente se dividen en dos grandes grupos: tecnologías de comunicación de largo alcance (WiMAX, LTE, 5G, SATCOM) y corto alcance (Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee).

2.3.1. Wi-Fi (IEE 8002.11)

Wi-Fi o *Wireless Fidelity* [14], esta tecnología se enfoca en el diseño de redes WLAN (*Wireless Local Area Network*). Las bandas de radio principales son: 2.4 GHz, 3.6 GHz, 5 GHz, Y 60 GHz. Wi-Fi tiene sus variantes (IEEE 8002.11 a/b/g/n/ac) las cuales son adecuadas para aplicaciones FANET [44], permitiendo transmitir datos de gran tamaño tales como imágenes y video. En redes Ad-hoc los UAV tienen un alcance de rango de transmisión puede alcanzar hasta varios kilómetros. Un enlace inalámbrico IEEE 802.11a es sugerido para aplicar en redes basadas en UAV, así como las estaciones base. Wi-Fi no es recomendado para enlaces aire-aire por la gran cantidad de controles remotos que funcionan en la misma banda de 2.4 GHz.[12]

2.3.2. Bluetooth (IEEE 802.15.1)

Esta tecnología es apropiada para la implementación de redes FANET, con un bajo costo y bajo consumo de energía. Ya que Bluetooth 5 está enfocada principalmente en dar mejoras a la velocidad alcanzando los 24 Mbps, rango de transmisión de 10 a 200 metros, eficiencia energética además de coexistir con otras tecnologías siempre y cuando estas sean de corto alcance. Mediante Bluetooth 5 [14] se proporciona una comunicación confiable y conlleva a empleos prácticos de la red UAV utilizando esta tecnología.

2.3.3. Zigbee (IEEE 802.15.4)

Esta tecnología se basa en un sistema de localización, el cual es viable, efectivo y fácil de implementar. Debido a sus características como la distancia que va desde os 10 a 100 metros [12], su rango de frecuencia es de 2.4 GHz, con una tasa de datos de 250 Kbps, esta tecnología es un candidato potencial para aplicaciones FANET de baja tasa de datos.

2.3.4. WiMAX (IEEE 802.16)

El principal objetivo de esta tecnología es brindar acceso de banda ancha a largas distancias, especialmente para redes FANET. Debido a sus características principales como admitir una tasa de datos de 30 Mbps para aplicaciones móviles esta tecnología se

considera la más adecuada para sistemas de rescate basados en UAV en entornos hostiles. Además de determinar la posición y altitud de cada UAV garantizando siempre calidad de servicio (QoS). Tiene la capacidad de proporcionar grandes tasas de cobertura de hasta 50 km con 78 Mbps para el enlace de bajada y 30 Mbps para el enlace de subida[12]. WiMAX es una tecnología que puede ser prácticamente útil para aplicaciones como agricultura, seguridad pública y ayuda en caso de desastres. WiMAX permite la conexión de vehículos aéreos no tripulados en misiones de rescate y vigilancia en entornos alpinos.

2.3.5. Quinta Generación (5G)

Esta tecnología se caracteriza por una alta velocidad de datos, reducida latencia, ahorro de energía, sistema con capacidad mejorada y conectividad ubicua [45]. Estas características son adecuadas para desempeñar un papel fundamental en sistemas de comunicación de UAV, conllevando a ser primordial en aplicaciones novedosas. Esta tecnología se enfoca en la prestación de servicios como la transmisión multimedia de vigilancia [46].

2.3.6. Comunicación por Satélite (SATCOM)

Este tipo de comunicación inalámbrica tiene como objetivo enviar señales electromagnéticas desde estaciones terrestres a satélites o estaciones espaciales y viceversa. A continuación, la Tabla 2.3 presenta bandas de frecuencia utilizadas por satélites.

Tabla 2.3. Bandas de frecuencia satelital y características para usos civiles [12].

| Banda de frecuencia | Enlace ascendente (GHz) | Enlace descendente (GHz) | Espectro disponible | Tipo de antena | Diámetro (m) |
|---------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------|--------------|
| L | 2 | 1 | 15 | Omnidireccional | < 0.2 - 0.6 |
| S | 4 | 2 | 70 | Omnidireccional | < 0.2 - 0.6 |
| C | 6 | 4 | 500 | Direccional | > 1.8 |
| X | 8 | 7 | 500 | Direccional | >1.8 |
| Ku | 14 | 11 - 12 | 500 | Direccional | 0.9 - 1.2 |
| Ka | 30 | 20 | 3500 | Direccional | 0.25 - 1.2 |
| Q/V | 75 | 40 | >5000 | Direccional | 0.8 - 1.2 |

En una retransmisión de datos de UAV por satélite, se logra un mayor rango de superposición y transmisión de imágenes de gran cobertura con imágenes de alta calidad gracias a las especificaciones de los enlaces descendentes y a la potencia de transmisión del enlace ascendente de los UAV.

2.3.7. Lora (Long Range)

Esta tecnología permite la transmisión de datos en un rango de 10 km con una potencia de transmisión de 0 dBm, lo cual es una tasa de transmisión energéticamente eficiente para cubrir dicha distancia. Lora es una tecnología que tiene como características principales la baja potencia y baja velocidad, brinda comunicación entre una alta densidad de UAV y proporciona mayor cobertura que la tecnología Wi-Fi. Para tener una comunicación confiable, estricta y segura entre UAV se recomienda la combinación de módems Lora con módems 3G.

Para resumir el vínculo entre las tecnologías de comunicación de drones con los avances tecnológicos recientes y diversas aplicaciones combinadas, se muestra la Figura 2.12 en la cual se puede observar cómo pueden establecer la comunicación entre estas tres partes fundamentales [7]. Por ejemplo, si nos enfocamos en la comunicación entre un dron y una ambulancia a través de un sistema de comunicación vehicular y un algoritmo de inteligencia artificial, este puede proporcionar la mejor ruta para brindar ayuda de emergencia.

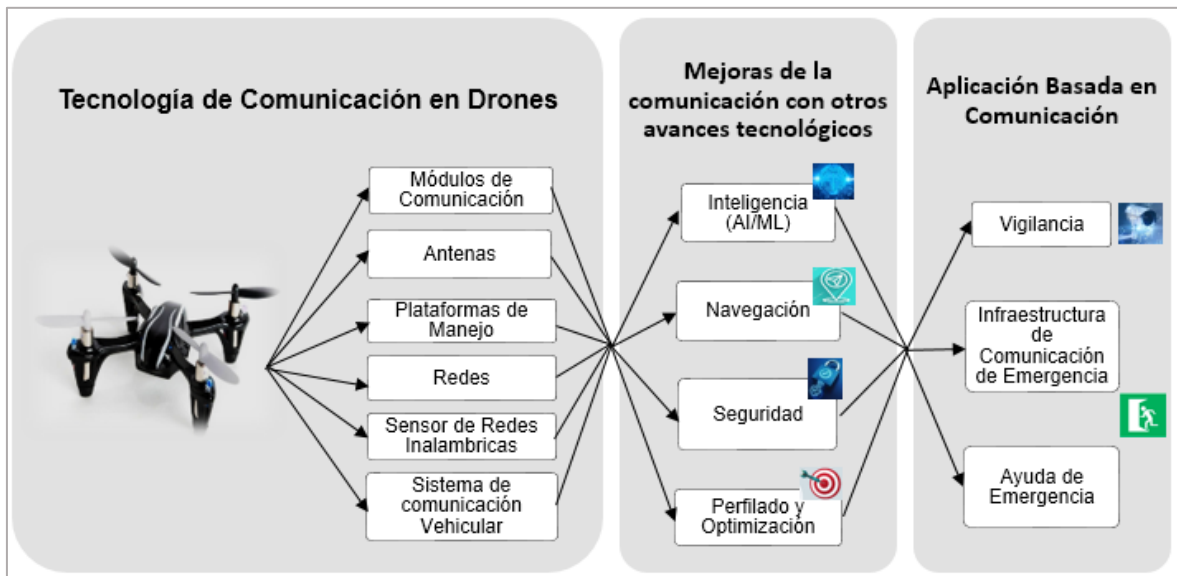


Figura 2.12. Alcance de la Tecnología de Comunicación con Drones [7].

2.3.8. PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO EN REDES FANET

Un sistema de comunicación inalámbrica es utilizado para controlar los dispositivos y analizar datos. Es generalmente aplicado en sistemas remotos (UAV) ayudando al humano a llegar a lugares en dónde es complicado el ingreso.

Los protocolos de comunicación que se utilizan en sistemas de comunicación de UAVs en redes FANET tienen la siguiente estructura [1].



Figura 2.13. Protocolos de comunicación UAVs, basado en [1].

2.3.8.1. Capa Física

El protocolo de capa física IEEE802.11 e utiliza para el sistema de comunicación de UAV y su versión mejorada 802.11p agrega acceso inalámbrico en el entorno vehicular, permitiendo el traspaso de datos sin pérdidas.

- **Protocolo IEEE 802.11:** Utilizado para el sistema de comunicación de UAV. Es utilizado en LAN inalámbricas, transmitiendo 1 Mbps o 2 Mbps en una banda ancha de 2,4 GHz.
- **Protocolo IEEE 802.11p:** Es una versión mejorada de protocolo IEEE 802.11. Este tipo de protocolo incluye acceso inalámbrico vehicular, permitiendo la conectividad de UAVs en entornos vehiculares.

2.3.8.2. Capa MAC

Esta capa de control de acceso al medio utiliza un protocolo MAC adaptativo para UAV llamado AMUAV [1], el cual permite una comunicación bidireccional y está adaptado a la altitud de los UAVs. Este protocolo proporciona un mejor retardo de extremo a extremo, rendimiento y baja interferencia. De igual manera el protocolo de misión de búsqueda de

UAV (USMP) mejora la eficiencia de búsqueda en término de la distancia entre los UAV y cambio de dirección de los mismos. El protocolo de enrutamiento es vital para enviar paquetes de reenvío en su decisión de búsqueda más específica.

- **Protocolo AMUAV (*Adaptative Mac for UAV*):** Es un tipo de protocolo MAC adaptativo para UAVs. Su característica principal es que maneja antenas bidireccionales y se adapta a la altitud de un UAV, además de mejorar el rendimiento de UAV, tiene baja interferencia y mejora el retardo de extremo a extremo.
- **Protocolo USMP (*UAV Scanning Mission Protocol*):** Es un tipo de protocolo de misión de búsqueda en términos de distancia entre UAV al tiempo que mejora la eficiencia en la búsqueda de cambio de dirección de los UAVs.

2.3.8.3. Capa de red

En esta capa de red se utiliza un protocolo de enrutamiento, que es de vital importancia para un sistema de comunicación de UAVs en caso de emergencia para soluciones posteriores a un desastre

- **Protocolo de enrutamiento:** Es utilizado en el sistema de comunicación de UAV y se enfoca en soluciones posteriores a un desastre, es decir, es un protocolo aplicado en emergencias. Cada UAV es capaz de proporcionar información acerca de la comunicación extremo a extremo, navegación autónoma y control de formación.

2.3.8.4. Capa de aplicación

Esta capa utiliza un protocolo de comunicación entre módulos (IMC) para la comunicación entre UAVs en sistemas submarinos y laboratorios de tecnología.

- **Protocolo de comunicación entre módulos (IMC – *Integrity Measurement Collector*):** Módulo recopilador de medidas de integridad, es utilizado principalmente en la comunicación de UAV en sistemas submarinos y laboratorios tecnológicos. Busca información en tiempo real mediante la interconexión de vehículos, sensores y operadores humanos.

2.3.8.5. Otros protocolos para comunicación de UAV en redes FANET

- **Protocolo Zigbee:** Es aplicado para la comunicación de telemetría entre vehículos aéreos no tripulados. Este tipo de protocolo permite alta integración, portabilidad y

aplicabilidad. Sus principales características son: ultra bajo consumo de energía, bajo costo y fácil de diseñar.

- **Protocolo LoWPAN:** Permite un comunicación confiable y dual entre vehículos aéreos no tripulados y las estaciones base. Sus ventajas principales son: confiabilidad, transparencia, escalabilidad y servicio para flujo de extremo a extremo.
- **Protocolo MAVLink (*Micro Air Vehicle Link*):** Este protocolo permite el intercambio de información entre UAVs y UGVs. Es utilizado en casos de comunicación bidireccional entre UAVs y estaciones base terrestres.

2.3.9. TEORÍA DE OPTIMIZACIÓN PARA SISTEMAS DE COMUNICACIÓN UAV

La optimización juega un papel fundamental en la comunicación de UAV permitiendo el ahorro de energía y la disminución de la latencia dentro de lo posible. Para reducir la carga de las plataformas a bordo de los UAV que transmiten las imágenes a una estación de control terrestre (GCS) [7] para su procesamiento se utiliza la técnica conocida como descarga computacional. Esto permite que un sistema de drones de descarga computacional adaptativa elija inteligentemente entre el procesamiento y la transmisión a bordo, preservando de esta manera la energía en el proceso. Para conservar esta energía se sugiere el uso de IoT con UAV para minimizar la necesidad de una alta capacidad computacional a bordo.

Además, se introduce el concepto de un “internet de drones de energía neutral” enfocándose en el problema de capacidad limitada de la batería, operando una gran cantidad de drones utilizando recursos de energía renovable.

Un esquema de comunicación óptima de transferencia de energía inalámbrica proporciona energía recolectada hacia los drones. Debido a la formulación de un problema de optimización, se realizó un análisis en el que se estudia un sistema de comunicación inalámbrica habilitado para UAV en el que los usuarios envían datos al dron mediante la energía recolectada del entorno.

La optimización de la trayectoria de los UAV debe ser una preocupación crítica para su diseño, ya que afecta en gran medida el rendimiento de las redes de comunicación del UAV, abordando varios límites y parámetros para optimizar la trayectoria de los UAV. Esta trayectoria de UAV se determina sobre la base de las especificaciones de calidad de servicio (QoS) del usuario, el uso de energía del UAV, el tamaño y forma del UAV y la ubicación de las barreras ambientales.

2.4. DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES

El desarrollo de nuevas tecnologías de comunicación como 5G está permitiendo que las redes de comunicación sean más resistentes, confiables y robustas [47]. Aún falta el estudio de una tecnología inalámbrica confiable la cual mantenga un alto rendimiento en una cobertura extendida como lo tienen los UAV, la cual aproveche de mejor manera los recursos energéticos existentes. Para trabajos futuros es importante mencionar que, independientemente del desarrollo investigativo de las tecnologías de drones aún existe vulnerabilidad en el ámbito de las comunicaciones y grabaciones de video que se suscitan en misiones importantes o críticas permitiendo la violación de la privacidad y secuestro de canales de comunicación. Para esto se pueden proponer técnicas de encriptación con menor grado de dificultad, que sean seguras y tengan fácil implementación en los UAV.

2.4.1. FUTUROS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN UAV CON TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL.

Las técnicas de Inteligencia Artificial (IA) aplicadas en sistemas de comunicación de UAV han demostrado ventajas favorables con el paso del tiempo. Por tal razón, investigaciones futuras aprovecharán las redes neuronales artificiales [48], el aprendizaje profundo y las técnicas de aprendizaje automático [49]. Al plantear técnicas con un enfoque basado en inteligencia artificial para sistemas de comunicación de drones, se tiene como primer desafío elegir una técnica de IA adecuada, dado que, un sistema de comunicación de UAV es considerado como una red multidimensional por lo que necesita una exhaustiva investigación la cual permita la construcción de un sistema de comunicación UAV basado en inteligencia artificial eficiente y confiable [7].

2.4.2. REDES UAV EN EL FUTURO

El análisis realizado en este trabajo de investigación es fundamental al momento de elegir la correcta tecnología inalámbrica para la interacción y buen desempeño de los UAV. Las tecnologías potenciales que han surgido en estos tiempos son LoRa y 6LoWPAN para comunicación con distancias cortas. Es importante recalcar que los desafíos relacionados a la frecuencia de operación, al ajuste de velocidad, el rendimiento en las alturas y la movilidad puede ser fundamentadas y tomadas como referencia de las tecnologías de comunicación y redes que son estudiadas en este presente documento.

Las especificaciones SWaP (*Sice, weight and Power*) [12] de las partes integradas en un sistema de comunicación cumplen un papel importante en la eficiencia general de los UAV. Debido al espacio disponible limitado que tienen los UAV, los requisitos de tamaño se han

vuelto un desafío ya que mientras más pesado sea el UAV, consumirá mayor combustible y, por lo tanto, tendrá un mayor costo operativo. De igual manera la energía es un parámetro importante debido al tamaño de la batería que tienen los UAV, y el consumo de energía que producen los procesadores integrados influyen directamente en el tiempo de vuelo alcanzable [50]. Por lo tanto, para optimizar las especificaciones SWaP, de los elementos integrados en un UAV es necesario desarrollar sistemas integrados unificados que puedan operar diferentes tecnologías inalámbricas al mismo tiempo.

Otro desafío que surge de este estudio es la optimización de la potencia, mejora de la conectividad, tiempo de vuelo óptimo, un funcionamiento invariable de los UAV ya sea que estos operen a cortas o largas distancias, tener un mejor control en áreas geográficas densas las cuales no permiten tener línea de vista [51] y tener una mejor predicción de fallas al momento de comprimir los datos.

2.4.3. REDES UAV CONECTADAS A CELULARES

La futura comunicación de UAV tratará abiertamente temas como el uso de la conexión celular, la mejora de las características del canal para los UAV de gran altitud y características del enlace de comunicación. La integración de 5G [46] compone de métodos como el acceso múltiple no ortogonal han manifestado resultados esperados en base a el ahorro de energía, integración rápida y fácil adopción de los UAV al medio ambiente. En la Figura 2.14, se muestra un modelo propuesto para conectar redes UAV con celulares mediante diferentes técnicas.

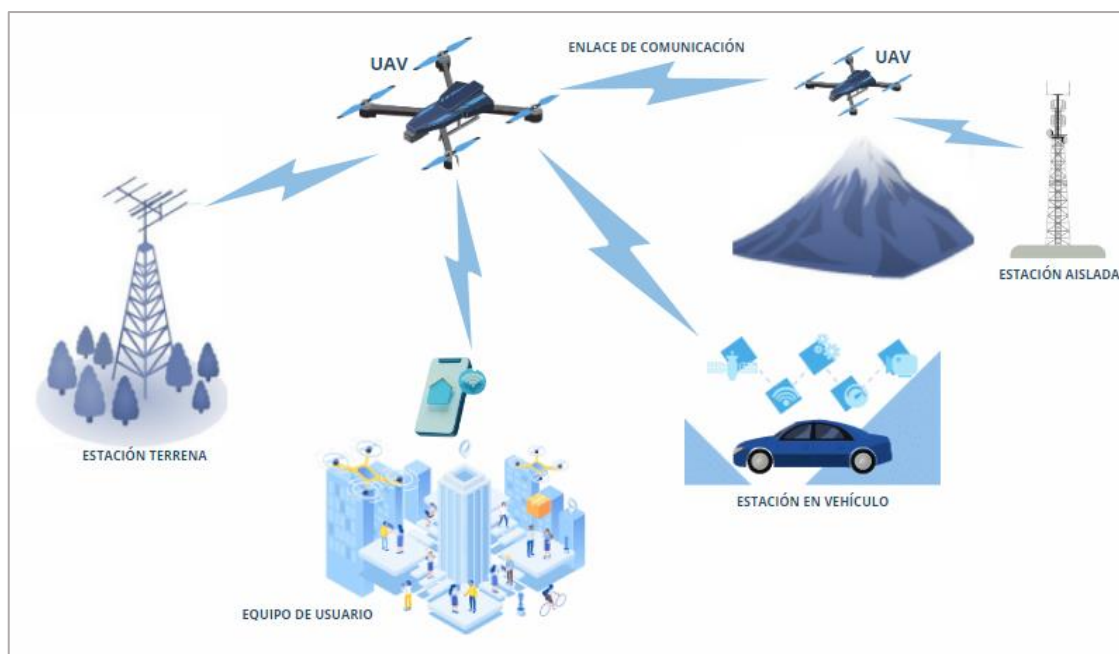


Figura 2.14. Redes UAV conectadas a redes celulares, basado en [7].

El desafío de los investigadores a nivel mundial en el ámbito académico como industrial es encontrar un modelo preciso que esté enfocado en redes UAV conectadas a redes celulares utilizando distintas técnicas que faciliten su implementación.

2.4.4. COMUNICACIÓN DE UAV EN EL MUNDO FUTURO.

Las tecnologías 5G e IoT se encuentran en pleno auge de la investigación y desarrollo, por tal razón, en la implementación de los futuros UAV se integrarán este tipo de tecnologías y tendrán fuertes implicaciones en ciudades inteligentes con fines comerciales y de seguridad. Al ser la comunicación de UAV un tema de mejor cognición, esta desempeñará un papel de vital importancia en el futuro de los UAV, al igual que la inteligencia artificial, las tecnologías de comunicación y la seguridad [52]. No obstante, es fundamental tener en cuenta las normas y reglamentos relacionados con el uso de UAV según las aplicaciones al que van a ser destinados. La comunicación UAV podrá ser más sólida, estable y confiable gracias al continuo desarrollo de ciudades inteligentes en conjuntos con estas recientes tecnologías.

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta sección se presenta los resultados obtenidos del presente Trabajo de Integración Curricular. De igual manera se presentan conclusiones y algunas recomendaciones.

3.1. RESULTADOS

Después del análisis realizado, y de la información recolectada, se puede observar que, los UAV en conjunto con una adecuada tecnología inalámbrica, pueden trabajar adecuadamente, permitiendo ser implementados para operar en aplicaciones en el ámbito militar, civil y comercial.

La Tabla 2.4 muestra un resumen de las características más relevantes que debe poseer un dron en función de su tamaño y peso. Estas características son: modelo, peso, carga útil, mecanismo de vuelo, rango, altitud, tiempo de vuelo, velocidad, suministro y consumo de energía que deben presentar los drones. Además, se puede observar en qué tipo de aplicación pueden ser operados cada uno de estos tipos de UAV.

Tabla 2.4. Tipos de drones para diferentes aplicaciones.

| Tamaño | Micro (peso < 100 Kg) | Muy pequeño (100g<peso< 2kg) | Pequeño (2kg<peso<25kg) | Mediano (25kg<peso<150kg) | Grande (peso>150kg) |
|------------------------------|---|---|--|---|--|
| Modelo | Kogan Nano Drone | Parrot Disco | DJI Spreading Wings S900 | Scout B-330 UAV helicopter | Predator B |
| Peso | 16 g | 750 g | 3.3 kg | 90 kg | 222.3 kg |
| Carga útil | NA | NA | 4.9 kg | 50 kg | 1700 kg |
| Mecanismo de vuelo | Multi-rotor | Ala Fija | Multi-rotor | Multi-rotor | Ala Fija |
| Rango | 50 – 80 m | 2 km | N/A | 3 N/A | 185.2 km |
| Altitud | N/A | N/A | N/A | 3 km | 15 km |
| Tiempo de vuelo | 6 – 8 min | 45 min | 18 min | 180 min | 1800 min |
| Velocidad | N/A | 80 km/h | 57.6 km/h | 100 km/h (Horizontal) | 482 km/h |
| Suministro de energía | 3.7V / 160 mAh Batería de Li | 2700 mAh/25 A 3-cell Batería LiPo | LiPo Battery (6S, 10000mAh~15000mAh, 15C (Min)) | Gasolina (Combustible pesado opcional) | 950-eje-caballos de fuerza Motor Turbohélice |
| Consumo de energía | N/A | N/A | Máximo: 3kW Flotando: 1kW | Motor: 21 kW Generador de energía a bordo para carga útil: 1.5 kW | Motor: 712 kW |
| Aplicación | Adecuado para llevar sensores que recolectan datos inalámbricos en interiores | Adecuado para transportar UE (Equipos de Usuario) celular | Aerofotografía y cinematografía profesional. Adecuado para transportar BSs (Estación Base) o UE. | Encuestas (adquisición de datos). Transmisión de video HD en vivo. Actúan como fuente de energía motora en transferencia inalámbrica de energía. Actúan como escondites aéreos. Puede transportar BS o UE celulares. | Adaptado para vigilancia aérea de reconocimiento armado y adquisición de objetivos |

3.2. CONCLUSIONES

En el presente Trabajo de Integración Curricular se estudia los vehículos aéreos no tripulados (UAV), observando que en la actualidad existe una amplia gama de modelos para diferentes propósitos, estos en un inicio fueron utilizados netamente para fines militares como ataque y vigilancia, limitadas a un solo dispositivo cuyo objetivo era preservar la vida humana. Más adelante fueron utilizados para fines civiles y comerciales, todo esto debido al gran desarrollo tecnológico enfocado en UAV y la integración de muchas industrias en la fabricación de estos vehículos aéreos no tripulados, lo cual permitió ir mejorando su robustez, capacidad, escalabilidad entre otras. De modo que, su evolución a través del tiempo se puede evidenciar en la Figura 1.1 en la cual se puede observar los diferentes modelos y procesos que ha tenido durante los últimos años, gracias a este

conjunto de sucesos hoy por hoy es factible que el uso de una red de UAV y ya no sea una idea futurista.

Una arquitectura de red UAV puede ser centralizada o descentralizada. Una red UAV centralizada tiene su enfoque en la estación terrestre requiriendo una comunicación de larga distancia entre esta y cada UAV que conforman la red. Este tipo de arquitectura es más adecuada para un grupo de múltiples UAV similares o de un solo tipo. Mientras que, una arquitectura de comunicación descentralizada además de que proporciona cobertura extendida y ofrecer mayor eficiencia de comunicación en el intercambio oportuno de información aire-aire y aire-tierra, es la más adecuada para el rápido despliegue de redes FANET. Esto debido a que la arquitectura descentralizada permite la interconexión de una gran cantidad de UAV de múltiples tipos permitiendo una adecuada transmisión de los datos. La arquitectura de red Ad-Hoc descentralizada más adecuada es la red Ad-Hoc multi-capas ya que, esta es robusta y no contiene puntos de falla.

En referencia a las tecnologías de comunicación inalámbricas, se concluye que las tecnologías de corto alcance (Bluetooth, Zigbee o Wi-Fi) son consideradas para aplicaciones FANET de alcance medio según estos sean sus requerimientos de banda ancha, frecuencia, potencia y aplicación en dónde es requerida. Además, se puede tener en cuenta que Bluetooth, Zigbee o Wi-Fi pueden operar en un espectro no licenciado, no requieren LOS (Línea de Vista) estrictos, tienen la capacidad de proporcionar tasa de datos y cobertura razonable llegando a ser integrados fácilmente en UAV de reducido tamaño.

Por otro lado, si el área de cobertura es grande, se consideran las tecnologías de largo alcance (WMAX, LTE, 5G, SATCOM, LORA) para sus aplicaciones. De lo antes mencionado y con base a los datos de características enlistadas en la sección 2.2, Tabla 2.3, se concluye que Bluetooth 5 es la tecnología inalámbrica de corto alcance más adecuada en ambientes de comunicación de UAV y para largos alcances la tecnología más adecuada es LORA.

Se concluye que cuanto más autónomo es un dispositivo UAV, se requerirá una menor participación de un operador humano y mayor será el tamaño del dron. Así mismo, se espera que el despliegue de una misión sea más eficaz si este se lleva a cabo con un solo dispositivo UAV, reduciendo significativamente el costo operativo al transferir el modo de operación de muchos a uno (muchos operadores controlan un solo equipo UAV) a uno a muchos (es decir, un operador controla muchos dispositivos UAV), de igual, se minimizan las pérdidas de misión causadas por errores humanos al tener una cooperación, y control de múltiples UAV mejorando la confiabilidad de dichas misiones.

En el futuro se debe considerar la combinación de varias tecnologías de comunicación inalámbricas, las cuales deben ser adecuadas para el desarrollo de redes aéreas como redes FANET, que permitan tener calidad de servicio para el usuario y que admitan nuevos cambios en parámetros tales como ancho de banda, frecuencia, potencia, etc. Considerando que el potencial de esta industria es enorme, y el crecimiento exponencial durante los últimos años no es nada para lo que nos espera en el futuro.

3.3. RECOMENDACIONES

Después de haber realizado un análisis exhaustivo acerca de los drones y de las tecnologías inalámbricas que pueden ser utilizadas en diferentes aplicaciones. Se recomienda guiarse de las tablas resumen que se encuentran en este Trabajo de Integración Curricular, las cuales contienen la información necesaria para adquisición de drones especialmente en caso de emergencias en dónde los dispositivos deben ser pequeños y con menos carga útil para que pueda durar mucho más tiempo en el aire transmitiendo información al operador.

Es importante que el operador de un UAV o una flota de UAV tenga en cuenta características primordiales al momento de elegir con qué tipo de dispositivos se va a operar dependiendo del área de aplicación, es decir, si el ambiente tiene obstáculos o cuenta con línea de vista para que puedan operar en conjunto.

Para la correcta elección de una tecnología inalámbrica se recomienda basarse en parámetros que se encuentran en la Tabla 2.3, la cual contiene características sobresalientes como ancho de banda, latencia, potencia, licenciado o no licenciado, rango de frecuencia, entre otros; de cada una de las tecnologías que son útiles al momento de realizar una correcta comunicación inalámbrica entre vehículos aéreos no tripulados.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Aggarwal y N. Kumar, «Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges», *Computer Communications*, vol. 149, pp. 270-299, 2020.
- [2] «Goodrich, UAV video coverage quality maps and prioritized indexing for wilderness search and rescue», *Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Conference on Human–Robot Interaction, HRI '10, Piscataway, NJ, USA*, pp. 227-234, 2010.
- [3] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y.-H. Nam, y M. Debbah, «A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems», *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, vol. 21, n.º 3, pp. 2334-2360, THIRD QUARTER 2019.
- [4] I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, y S. Temel, «Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey», *Ad Hoc Networks*, vol. 11, pp. 1254-1270, 2013.
- [5] P. RUIPÉREZ, «DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN DRON», UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, 2016.
- [6] G. Militaru, D. Popescu, y L. Ichim, «UAV-to-UAV Communication Options for Civilian Applications», *26th Telecommunications forum TELFOR*, nov. 2018, doi: 978-1-5386-7171-9/18/\$31.00.
- [7] A. Sharma *et al.*, «Communication and networking technologies for UAVs: A survey», *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 168, oct. 2020, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102739>.
- [8] «Drones, una tecnología con impacto social | CONtexto ganadero». <https://www.contextoganadero.com/reportaje/drones-una-tecnologia-con-impacto-social> (accedido 11 de junio de 2022).
- [9] A. Fotouhi *et al.*, «Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges», *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, vol. 21, n.º 4, pp. 3417-3442, FOUR QUARTER 2019.
- [10] H. Price, *Federal Aviation Administration (FAA) Forecast Fiscal Years 2017–2038*. 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.faa.gov/news/fact_sheets/news_story.cfm?newsId=22594/

- [11] M. Jasim, H. Shakhathreh, N. Siasi, A. Sawalmeh, A. Aldalbahi, y A. Al-Faquha, «A Survey on Spectrum Management for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)», *IEEE Access*, vol. 10, pp. 11443-11499, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3138048.
- [12] A. Bltaci, E. Dinc, M. Ozger, A. Alabbasi, C. Cavdar, y D. Schupke, «A Survey of Wireless Networks for Future Aerial Communications (FACOM)», *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, vol. 23, n.º 4, FOURT QUARTER 2021.
- [13] J. Kim, H. Moon, y H. Jung, «Drone-Based Parcel Delivery Using the Rooftops of City Buildings: Model and Solution», *Applied Scences*, n.º 12, p. 4362, jun. 2020.
- [14] M. Asghar, I. Mansoor, y F. Khanzada, «A Hybrid Communication Scheme for Efficient and Low-Cost Deployment of Future Flying Ad-Hoc Network (FANET)», *DRONES 2019*, 3, 16, feb. 2019, doi: 10.3390/drones3010016.
- [15] N. Neji y T. Mostfa, «Communication technology for Unmanned Aerial Vehicles: a qualitative assessment and application to Precision Agriculture», *The 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, jun. 2019, [En línea]. Disponible en: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02129442>
- [16] «Best Drones For Agriculture 2020: The Ultimate Buyer's Guide», *Best Drone for the Job*, 10 de enero de 2020. <https://bestdroneforthejob.com/drone-buying-guides/agriculture-drone-buyers-guide/> (accedido 13 de agosto de 2022).
- [17] V. Mayor, R. Estepa, A. Estepa, y G. Madinabeitia, «Deploying a Reliable UAV-Aided Communication Service in Disaster Areas», *Wireless Communications and Mobile Computing*, abr. 2019, doi: <https://doi.org/10.1155/2019/7521513>.
- [18] «About Scopus - Abstract and citation database | Elsevier», *ELSEVIER*. <https://www.elsevier.com/solutions/scopus> (accedido 1 de julio de 2022).
- [19] Y. Zeng, Q. Wu, y R. Zhang, «Accessing From The Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and Beyond», *Electrical Engineering and Systems Science, Signal Processing*, mar. 2019.
- [20] H. Chao, Y. Cao, y Y. Chen, «Autopilots for small fixed-wing unmanned air vehicles: a survey.», *International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 3144-3149, ICMA 2007.
- [21] E. Yanmaz, C. Costanzo, C. Bettstetter, y W. Elmenreich, «A discrete stochastic process for coverage analysis of autonomous UAV networks.», *Proceedings of IEEE Globecom-WiUAV, IEEE*, 2010.

- [22] «Networking issues for small unmanned aircraft systems», *Journal of Intelligent and Robotics Systems* 54 (1–3), pp. 21-37, 2009.
- [23] L.-C. Wang, C.-C. Lai, H.-H. Shuai, H.-P. Lin, y C.-Y. Li, «Communications and Networking Technologies for Intelligent Drone Cruisers», *IEEE Xplore*, sep. 2019, doi: 10.1109/GCWkshps45667.2019.9024679.
- [24] E. Pastor, J. Lopez, y P. Royo, «UAV Payload and Mission Control Hardware/Software Architecture», *IEEE A&E SYSTEMS MAGAZINE*, pp. 3-8, jun. 2007, doi: 0885/8985/07/.
- [25] A. Al-Hourani y K. Gomez, «Modeling cellular-to-UAV path-loss for suburban environments», *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 7, n.º 1, pp. 82-85.
- [26] «Proposed Special Condition for Light UAS», *EASA, Cologne, Germany, Rep. SC Ligh-UAS*, jul. 2020, [En línea]. Disponible en: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/special_condition_light_uas.pdf
- [27] K. Geon-Hwan, N. Jae-Choong, I. Mahmud, y C. You-Ze, «Multi-Drone Control and Network Self-Recovery for Flying Ad Hoc Networks», *ICUFN*, pp. 148-150, 2016, doi: 978-1-4673-9991-3/16/\$31.00.
- [28] J. Elston, E. Frew, y B. Argrow, «Networked UAV Command, Control and Communication», *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, ago. 2006, doi: 10.2514/6.2006-6465.
- [29] M. Bani y N. Alhuda, «Flying Ad-Hoc Networks: Routing Protocols, Mobility Models, Issues», (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 7, n.º 6, pp. 162-168, 2016.
- [30] H. Nawaz, H. Mansoor Ali, y A. Ali Laghari, «UAV Communication Networks Issues: A Review», *Computational Methods in Engineering*, n.º 28, pp. 1349-1369, 2021.
- [31] J. Li, Y. Zhou, y L. Lamont, «Communication Architectures and Protocols for Networking Unmanned Aerial Vehicles», *Globecom 2013 Workshop - Wireless Networking and Control for Unmanned Autonomous Vehicles*, pp. 1415-1420, 2013.
- [32] J. Wu y I. Stojmenovic, «Ad Hoc Networks», pp. 29-31, 2004.
- [33] M. Molina y R. Silva, «Arquitectura de las Redes Ad-Hoc», *Polibits*, vol. 36, pp. 8-13, 2007.

- [34] V. Sanchez-Aguero, F. Valera, B. Nogales, L. Gonzales, y I. Vidal, «VENUE: Virtualized Environment for Multi-UAV Network Emulation», *VENUE: Virtualized Environment for Multi-UAV Network Emulation*, vol. 7, pp. 154659-154671, oct. 2019, doi: Identifier 10.1109/ACCESS.2019.2949119.
- [35] M. Zulkifley, M. Behjati, R. Nordin, y M. Zakaria, «Mobile Network Performance and Technical Feasibility of LTE Powered Unmanned Aerial Vehicle», *Sensors*, vol. 21, n.º 8, abr. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/s21082848>.
- [36] G. Yang, X. Lin, Y. Li, H. Cui, y M. Xu, «A Telecom Perspective on the Internet of Drones: From LTE Advanced to 5G», *Networking and Internet Architecture (cs.NI)*, mar. 2018, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.11048> Focus to learn more.
- [37] I. Donevski, C. Raffelsberger, M. Sende, A. Fakhreddine, y J. Jessen, «An Experimental Analysis on Drone-Mounted Access Points for Improved Latency-Reliability», *Networking and Internet Architecture*, jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.16051>.
- [38] C. Barrado, R. Meseguer, J. Lopez Rubio, y E. Pastor, «Wildfire Monitoring Using a Mixed Air-Ground Mobile Network», *IEEE Pervasive Computing*, pp. 24-32, jun. 2014, doi: 10.1109/MPRV.2010.54.
- [39] X. Lin, R. Wiren, S. Euler, A. Sadam, y H.-L. Maattanen, «Mobile-Network Connected Drones: Field Trials, Simulations, and Design Insights», *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, n.º 3, sep. 2019, doi: 10.1109/MVT.2019.2917363.
- [40] W. Wang, X. Guan, B. Wang, y Y. Wang, «A novel mobility model based on semi-random circular movement in mobile ad hoc networks.», *Information Sciences 180(3)*, pp. 399-413, 2010.
- [41] E. Kuiper y S. Nadjam-Tehrani, «Mobility models for UAV group reconnaissance applications.», *Proceedings of International Conference on Wireless and Mobile Communications, IEEE Computer Society.*, p. 33, 2006.
- [42] A. Vegni, V. Loscri, C. Calafate, y P. Manzoni, «Communication Technologies Enabling Effective UAV Networks: a Standards Perspective», *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 20, n.º 10, abr. 2021, [En línea]. Disponible en: <https://hal.inria.fr/hal-03190494>

- [43] J. Ding, H. Mei, C.-L. I, H. Zhang, y W. Liu, «Frontier Progress of Unmanned Aerial Vehicles Optical Wireless Technologies», *Sensors Review*, vol. 20, doi: 10.3390/s20195476.
- [44] A. Guillan-Perez, R. Sanchez-Iborra, M. Cano, J. C. Sanchez-Asrnoutse, y J. Garcia-Haro, «WiFi NETWORKS ON DRONES», *IEEE Xplore.*, 2016, doi: 978-92-61-20431-0/CFP1668P-ART.
- [45] Victor Sanchez-Aguero, I. Vidal, F. Valera, B. Nogales, y L. Mendes, «Deploying an NFV-Based Experimentation Scenario for 5G Solutions in Underserved Areas», *Sensors Review*, vol. 21, mar. 2021.
- [46] Q. Wu, J. Xu, Y. Zeng, D. Wing, y N. Al-Dhahir, «5G-and-Beyond Networks with UAVs: From Communications to Sensing and Intelligence», *IEEE Xplore*, oct. 2020.
- [47] Y. Zeng, R. Zhang, y T. J. Lim, «Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges», *IEEE Communications Magazine*, pp. 36-42, may 2016, doi: 0163-6804/16/\$25.00.
- [48] A. SHAMSOSHOARA, F. AFGHAH, E. BLASCH, J. ASHDOWN, y M. BENNIS, «UAV-Assisted Communication in Remote Disaster Areas Using Imitation Learning», *IEEE Communications Society*, vol. 2, pp. 738-753, mar. 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3067001.
- [49] B. Taha y A. Shoufan, «Machine Learning-Based Drone Detection and Classification: State-of-the-Art in Research», *IESS ACCESS*, vol. 7, pp. 138669-138682, sep. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2942944.
- [50] L. Gonzalez, I. Vidal, F. Valera, y V. Sanchez, «A Comparative Study of Virtual Infrastructure Management Solutions for UAV Networks», *Dronet' 21, Virtual, WI, USA*, jun. 2021, doi: 10.1145/3469259.3470486.
- [51] R. MIURA, F. ONO, T. KAGAWA, L. SHAN, H. TSUJI, y H.-B. LI, «Wireless Communication Technology for Small Unmanned Aircraft Systems. Towards the deployment of IoT in the Sky», *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, vol. 64, n.º 2, pp. 57-70, 2017.
- [52] N. Vanitha y G. Padmavathi, «A Comparative Study on Communication Architecture of Unmanned Aerial Vehicles and Security Analysis of False Data Dissemination Attacks», *IEEE Xplore*, 2018, doi: 978-1-5386-3702-9/18.

[53] M. Nguyen, H. Nguyen, L. Truong, T. Le, T. Tran. «UAV Communications Networks: Benefits, Research Challenges and Opening Issues», *ICSES Transactions on Computer Networks and Communications*, vol. X, n.o Y, sept. 2021.