

Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Redes de comunicaciones militares Intra-Teatro basadas en tecnología 5G mediante empleo de drones

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa

ALUMNO: Rafael López Lucendo

DIRECTORES: José Pablo González Coma

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universidade Vigo



Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Redes de comunicaciones militares Intra-Teatro basadas en tecnología 5G mediante empleo de drones

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa

Especialidad de Sistemas y Tecnologías de Telecomunicación

Universidade Vigo

RESUMEN

En este trabajo se pretende identificar la aplicabilidad del empleo de una red en malla “MESH” de comunicaciones mediante el despliegue de un “enjambre” de drones con transceptores 5G, con el propósito de suministrar servicios de telecomunicaciones seguros y con un alto ancho de banda y baja latencia para la ejecución de mando y control de un contingente militar desplegado en un escenario alejado del territorio nacional, o cualquier escenario inhóspito en el que no exista una infraestructura que pueda garantizar el adecuado flujo de información de forma inmediata .

La red debe ser capaz de soportar el tráfico de los principales sistemas de mando y control de una fuerza desplegada (en voz y datos), permitiendo el seguimiento en tiempo real (por geolocalización) de cualquier unidad que pueda ser equipada con un emisor, así como la transmisión de audio y video en alta definición. Asimismo, los drones deben poder operar en modo semi-desatendido durante el tiempo de operación, garantizando una permanencia en servicio elevada y con capacidad de interconexión en malla con otros drones para extender el alcance de la red en función de la demanda.

Este modelo de arquitectura de red permite resolver tres problemas actuales de comunicaciones en zonas de operaciones:

- dependencia de sistemas satelitales o de infraestructuras de comunicaciones no propias o inseguras,
- disponibilidad del servicio (ya que la red no se puede establecer hasta que la fuerza despliega el equipamiento de comunicaciones),
- dependencia de conexiones físicas (los puestos de mando tienen que ubicarse en proximidad a los terminales satélite).

PALABRAS CLAVE

5G, dron, drones, UAV, malla, mando y control, infraestructura, ancho de banda, latencia, disponibilidad, seguridad.

AGRADECIMIENTOS

A José González Coma, tutor de este trabajo, por sus acertadas y muy necesarias orientaciones, sin las cuales no hubiese sido posible sacar adelante este proyecto.

A mi mujer, Isabel y a mis hijos Álvaro y Blanca, por ser mi fuente de inspiración y motor y por soportar con fortaleza mis prolongadas ausencias.

A mis padres, por hacer más cómodo el destierro.

A mis compañeros de Máster, por su compañerismo y cercanía.

A Milagros y el resto de docentes del CUD de la ENM, por su paciencia y dedicación permanente.

Al personal de hostelería de la Residencia “Javier Quiroga”, por hacer la estancia reconfortante.

CONTENIDO

Contenido 1

Índice de Figuras 3

Índice de Tablas....5

1 Introducción y objetivos....6

1.1 Exposición inicial....6

1.2 Contexto del modelo de despliegue 7

1.3 Identificación y características de los escenarios de aplicación de los sistemas actuales.....8

1.4 Capacidades y limitaciones de los sistemas C2 actuales 9

1.4.1 Evolución de la capacidad 9

1.4.2 La gestión del dato....10

1.4.3 Modelo de arquitectura de comunicaciones tipo 10

1.4.4 Principales limitaciones de la arquitectura tipo 12

1.5 Mitigación de las limitaciones y propuesta del trabajo....13

2 Estado del arte 16

2.1 El 5G 16

2.1.1 Otras alternativas 17

2.1.2 ¿Qué hace diferente al 5G?....21

2.1.3 Valor estratégico del 5G para las Fuerzas Armadas....22

2.1.4 Desafíos y Riesgos derivados de la tecnología 5G para las Fuerzas Armadas....25

2.2 Relevancia de los drones en las redes de comunicaciones celulares 5G 26

2.2.1 Definición de dron 26

2.2.2 Breve historia de los drones....27

2.2.3 Tipos de drones....28

2.2.4 Interés del empleo de drones en las redes de telecomunicaciones 30

2.3 Estudios sobre empleo de drones en redes de comunicaciones 31

2.3.1 Comunicaciones inalámbricas con vehículos aéreos no tripulados: oportunidades y desafíos....32

2.3.2 Arquitectura multi-nivel de drones para redes celulares 5G y más allá de 5G....35

2.3.3 Estudio sobre comunicaciones 5G de onda milimétrica para redes inalámbricas asistidas por drones. 38

2.3.4 Drones en las redes B5G/6G como estaciones base voladoras....43

2.3.5 Otros estudios de interés en el campo de las redes celulares con estaciones base aéreas.49

3 Aplicación de la tecnología 5g mediante drones en el escenario planteado 51

3.1 Situación de partida 51
3.1.1 La arquitectura C2 51
3.1.2 Servicios C2 53
3.2 Integración de comunicaciones 5G asistidas por drones en la arquitectura C2 54
3.2.1 Arquitectura tipo con drones integrados 58
3.2.2 Desafíos relacionados con la implementación de esta tecnología 61
4 Conclusiones y líneas futuras 63
4.1 Conclusiones 63
4.2 Líneas futuras 63
5 Bibliografía 65
Anexo I: Asignaturas del máster relacionadas 71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Diagrama por capas de un sistema de información C4ISR 7
Figura 1-2 Escenarios más frecuentes en Operaciones Expedicionarias (elaboración propia con imágenes de [1] [2] y [3]) 9
Figura 1-3 Modelo típico de arquitectura CIS en un despliegue.....11
Figura 1-4 Puesto de mando de un contingente en el teatro de operaciones [4] 12
Figura 1-5 Puesto de mando a bordo de un buque de guerra [5].....13
Figura 1-6 Planteamiento de solución al problema 15
Figura 2-1 Evolución de los estándares de telefonía móvil [6].....16
Figura 2-2 Visión de la evolución del 5G y oportunidades según el operador "Orange" [7].....17
Figura 2-3 Mapa de cobertura de los satélites SPAINSAT y XTAR-EUR [8].....18
Figura 2-4 Topología de un sistema LMDS.....19
Figura 2-5 Topología de un sistema MMDS.....20
Figura 2-6 Topología de un sistema óptico de enlace punto a punto 20
Figura 2-7 Topología de una red de datos por radio táctica.....21
Figura 2-8 Modelo de WLAN con varios saltos 21
Figura 2-9 Dron “Predator” del Ejército del Aire (España) [10] 27
Figura 2-10 Drones según su tipo de propulsión (elaboración propia con imágenes de [11], [12] y [13]).....28
Figura 2-11 Drones según el tipo de ala (elaboración propia con imágenes de [14] y [15]) 29
Figura 2-12 Drones según su perfil de uso (elaboración propia con imágenes de [16], [17], [18], [19] y [20]).....30
Figura 2-13 Casos de uso típicos en comunicaciones inalámbricas asistidas por drones [22] 33
Figura 2-14 Modelo de sistema de recarga de drones mediante haces láser.....35
Figura 2-15 Red celular multinivel asistida por drones [24].....36
Figura 2-16 Concepto de comunicaciones por onda milimétrica asistidas por drones [50].....40
Figura 2-17 Modelo de retransmisión de datos en una red de sensores inalámbricos [50].....41
Figura 2-18 Mejora de la cobertura de la red terrestre [35] 45
Figura 2-19 Comunicaciones vehiculares asistidas por drones [56] 45
Figura 2-20 Mitigación de interferencias mediante formación de haces con drones [56] 46
Figura 3-1 Despliegue completo del contingente.....51
Figura 3-2 Despliegue parcial del contingente.....52
Figura 3-3 Proceso de intercambio de baterías [73].....55
Figura 3-4 Dron “VAPOR 55 MX” de “Aerovironment” [74].....56

Figura 3-5 Dron “CAMCOPTER S-100” de “Schiebel” [75].....57
Figura 3-6 Arquitectura tipo en despliegue completo del contingente con drones 5G 59
Figura 3-7 Arquitectura tipo en despliegue parcial del contingente con drones 5G 60
Figura 3-8 Configuración tipo de carga útil en el dron 61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Evolución del modo de gestión de los datos 10
Tabla 2-1 Aplicaciones de drones en redes de comunicaciones [50] 39
Tabla 2-2 Comparativa de tipos de drones [35] 44
Tabla 3-1 Sistemas de comunicaciones disponibles para C2 53
Tabla 3-2 Servicios C2 típicos en operaciones expedicionarias 53
Tabla 3-3 Clasificación de bandas de frecuencia en 5G [72] 55
Tabla 3-4 Características de los diferentes tipos de enlace planteados 61

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Exposición inicial

El éxito de cualquier operación militar radica en el establecimiento y mantenimiento de un adecuado "Mando y Control", definido éste como el "ejercicio de la autoridad y la conducción y seguimiento por parte de un Comandante o Mando Operativo expresamente designado (entendiendo el Mando Operativo como el responsable militar de la conducción de una operación), sobre las fuerzas asignadas para el cumplimiento de una misión"[1]. Para el establecimiento de este "Mando y Control", el Comandante o Mando Operativo debe dotarse de una serie de herramientas que le permitan, por un lado, disponer de la información necesaria para tomar las decisiones adecuadas, y por otro, hacer llegar a todos los elementos implicados en la acción las órdenes precisas con la mayor claridad y en el menor tiempo posible.

"El conocimiento en la forma de un artículo informativo indispensable para el poder productivo, ya es, y seguirá siendo, una gran –quizás la mayor- apuesta en la competición mundial por el poder".[2]

La principal herramienta de la que dispone un Mando Operativo para establecer su mando y control son los "Sistemas de Información". Un aspecto clave en el desarrollo de las operaciones militares actuales es el concepto de "Guerra de la Información" o "Information Warfare" (IW). De acuerdo con la definición del "Defence Education Enhancement Programme" (DEEP) de la OTAN, "Information Warfare" es el conjunto de operaciones llevadas a cabo para obtener una ventaja de información sobre el oponente[3]. Estas operaciones consisten en controlar el dominio de la información propia, protegiendo el acceso a esta, a la vez que se adquiere y utiliza la información del oponente, destruyendo sus sistemas e interrumpiendo su flujo de información. A pesar de que no se trata de un concepto nuevo, el desarrollo exponencial que ha experimentado la tecnología en las últimas décadas supone que, disponer de una capacidad avanzada en el dominio cognitivo de la IW, pueda otorgar una ventaja muy relevante para uno de los contendientes en cualquier tipo de escenario o conflicto. Esta ventaja debe ser provista de manera holística por todos los elementos de mando, control, comunicaciones, computadoras, inteligencia, vigilancia y reconocimiento (acrónimo "C4ISR", por las siglas en inglés de "*Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*").

Para garantizar la explotación de las sinergias entre todos los elementos que integran el C4ISR, es necesario contar con unos sistemas de comunicaciones robustos que sean capaces de proporcionar servicio con altas prestaciones en términos de capacidad y disponibilidad y que permitan recoger y diseminar la información en el menor tiempo posible cumpliendo con los requisitos debidos de confidencialidad, seguridad e integridad de los datos.

[1] Definición de "Mando y Control" para el "*NATO Command and Control Centre of Excellence*" (NATOC2COE).
[2] Jean François Lyotard, 1984. Filósofo francés. *"The Postmodern Condition: A Report on Knowledge"*.
[3] https://deepportal.hq.nato.int/

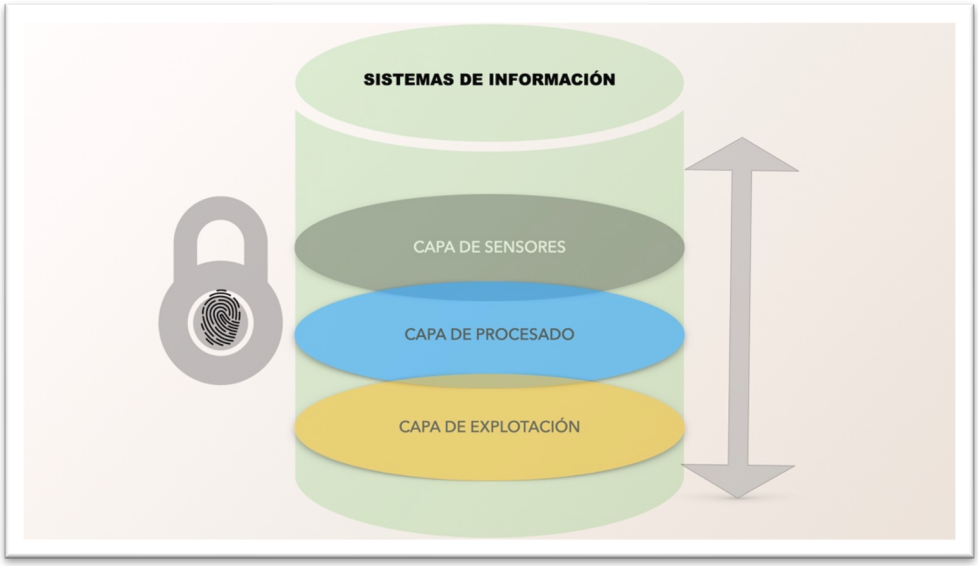


Figura 1-1 Diagrama por capas de un sistema de información C4ISR

De este modo, tal y como se representa en la Figura 1-1, los sistemas de información deberán permitir la perfecta integración de todas las capas de conforman el proceso de decisión en la arquitectura de mando y control:

- Capa de sensores, que integra todos los equipos y sistemas que detectan, generan y transportan la información necesaria para el Mando Operativo (por ejemplo, los sistemas de RADAR, sistemas de geolocalización, detectores de emisiones electromagnéticas, sistemas electroópticos, direcciones de tiro, redes de intercambio de datos tácticos, sistemas de comunicaciones en voz y datos, etc.).
- Capa de procesado, que permite almacenar, procesar, depurar y analizar los datos y presentar el producto de ese análisis a los operadores (se integran en la capa de procesado los servidores de archivos, sistemas y aplicaciones de análisis y presentación de la información, servidores de aplicaciones y cualquier otro equipo que permita a un operador disponer de la información negociada en la capa de sensores).
- Capa de explotación, que sirve como vehículo para ejecutar las órdenes necesarias para alcanzar los efectos deseados (en esta capa se integran de forma genérica los sistemas de armas y cualquier equipamiento o sistema que canalice la ejecución de las decisiones del mando operativo).

1.2 Contexto del modelo de despliegue

La necesidad de contar con sistemas de información robustos, con prestaciones que garanticen el adecuado flujo de información, supone el compromiso de desarrollar redes de comunicaciones capaces de satisfacer la creciente demanda de volumen de tráfico de datos generado por los numerosos sensores y sistemas de procesado, preservando como objetivo prioritario el mantenimiento de la disponibilidad, la integridad y la confidencialidad de la información.

En este estudio se trata de identificar la problemática de las limitaciones a las que se debe enfrentar un contingente militar que despliega para desempeñar una misión de carácter eminentemente expedicionario, entendiendo como operación expedicionaria, la que se desarrolla en el dominio terrestre, marítimo o aéreo de una nación distinta a la del origen del contingente militar, cuando se tiene que

efectuar una implementación rápida de la arquitectura de mando y control, en un escenario inhóspito o en el que no existe una infraestructura de telecomunicaciones propia o confiable en la que apoyarse.

1.3 Identificación y características de los escenarios de aplicación de los sistemas actuales.

Por definición, una fuerza expedicionaria es una "fuerza armada organizada para cumplir un objetivo específico en un país extranjero"[4]. Por tanto, una fuerza expedicionaria puede ser concebida ex profeso con la finalidad de desplegar en cualquier lugar del mundo. No obstante, el perfil de escenario de despliegue puede ser muy variable dependiendo de su naturaleza, especialmente en lo relativo a las condiciones de orden geográfico (lejanía, infraestructuras, clima, orografía, transitabilidad…) y sociopolítico (por el modo en que pueden condicionar la seguridad de la operación).

Atendiendo al carácter sociopolítico, se deben distinguir los siguientes tipos de escenarios:

- escenarios de paz: aquellos en los que se dan condiciones de estabilidad, no existiendo conflictos armados, ni amenazas de seguridad para la población.
- escenarios de crisis: aquellos en los que existe conflicto armado o en los que no se dan las condiciones necesarias de estabilidad. Dentro de los escenarios de crisis se debe distinguir entre escenarios de baja, media o alta intensidad, en función del nivel de amenaza que suponga para la fuerza expedicionaria desempeñar una misión en dicho escenario.
- otros tipos de escenarios: híbridos, zona gris (escenarios ambiguos y transversales en los que el objetivo es una reordenación del statu quo político mediante la influencia en la población) o entornos en los que predominan condiciones de volatilidad, incertidumbre, complejidad y ambigüedad (VUCA).

En la actualidad, los dos perfiles predominantes de misión para una fuerza expedicionaria son el de "Operaciones de Ayuda Humanitaria" y el de "Operaciones de Mantenimiento de la Paz". Las primeras se desarrollan en escenarios de paz, donde no se espera una amenaza ni una oposición a la presencia militar, y que como norma general se desarrollan para atender las necesidades sobrevenidas como consecuencia de catástrofes naturales. El segundo tipo de operación se suele desarrollar en escenarios de crisis de baja y media intensidad, en los que predominan condiciones de inestabilidad, generalmente ocasionadas por disputas de carácter político, étnico o religioso, y donde puede existir una amenaza de seguridad, no sólo para la población local, sino también para una eventual fuerza expedicionaria, así como una posible resistencia contra la presencia de ésta.

En escenarios de este perfil, una fuerza expedicionaria debe contar con medios propios para establecer el mando y control, tanto por las evidentes cuestiones de disponibilidad (al no poder depender de infraestructuras locales), como por seguridad (ya que una posible amenaza podría dificultar el acceso a la información, o explotarla en su beneficio).

[4] Publicación de Doctrina Conjunta "JP 1-02. Department of Defense. Dictionary of Military and Associated Terms".



Figura 1-2 Escenarios más frecuentes en Operaciones Expedicionarias (elaboración propia con imágenes de [1] [2] y [3])

1.4 Capacidades y limitaciones de los sistemas C2 actuales

1.4.1 Evolución de la capacidad

La arquitectura típica de un sistema de mando y control en cualquier despliegue de una fuerza militar requiere satisfacer los requisitos básicos de información del Mando Operativo para el cumplimiento de la misión. En este sentido la continua evolución de los sistemas de telecomunicaciones ha ido permitiendo implementar nuevos modelos de arquitectura de Sistemas de Comunicaciones e información (CIS) a medida que se han desarrollado tecnologías con mayores capacidades.

Antes de la aparición de la tecnología de comunicaciones por radio a principios del siglo XX[5], los buques en la mar se comunicaban entre sí mediante señales visuales, empleando luminarias o banderas, de modo que, la única forma de intercambiar información era mantenerse a una distancia inferior al alcance visual (LoS, o "Line of Sight"). Precisamente los buques eran el vector de transporte transoceánico de la información, actuando como relé físico entre el punto de origen y de destino en intercambios de información cuya latencia se correspondía con la duración del tránsito marítimo. La irrupción de las comunicaciones radio supuso un salto disruptivo en la forma de gestionar el intercambio de información, y de manera concreta en la conducción de operaciones, permitiendo la transmisión de mensajes en tiempo real y a grandes distancias, inicialmente sólo en voz y posteriormente también en datos.

El siguiente cambio de paradigma en la gestión de la información se produjo con la aparición de las comunicaciones vía satélite[6], inicialmente muy limitadas, pero cuya evolución introdujo la capacidad de

[5] A partir de 1912 se empezaron a utilizar receptores y transmisores en los buques civiles y militares para establecer enlaces radio en la mar.

[6] En 1962 fue puesto en órbita el TELSTAR 1, primer satélite activo de comunicaciones, de iniciativa privada, financiado por la compañía norteamericana de telecomunicaciones AT&T.

establecer enlaces de datos con anchos de banda cada vez mayores, lo que permitió implementar redes de ordenadores interconexionadas desde diferentes emplazamientos.

Las capacidades estándar actuales a disposición de una fuerza militar permiten el establecimiento de un sistema de mando y control basado en comunicaciones tácticas de voz y datos en frecuencias HF-VHF-UHF y en enlaces satelitales en bandas X, Ka militar y UHF, mediante el empleo de satélites militares dedicados (en la actualidad, España cuenta con servicio de dos satélites para uso militar dedicado, el Spainsat y el XTAR-EUR, ambos en su último tercio de vida útil, estando prevista su sustitución por satélites de siguiente generación a partir del año 2024), o en su defecto, canales protegidos de comunicaciones a través de satélites comerciales, con unas tasas de transferencia que de forma generalizada no superan los 10 Mbps.

1.4.2 La gestión del dato

La evolución tecnológica no se ha visto limitada únicamente al aspecto de las telecomunicaciones. El desarrollo de los sistemas de información también ha supuesto un cambio radical en el modo en que se gestionan los datos. Un sistema de información se puede definir como un conjunto articulado de hardware, software, datos, personas y redes, cuyas interacciones permiten la colección, almacenamiento, procesado y explotación de la información para un fin determinado. La evolución sufrida desde la década de 1950 ha venido transformando el modo en el que las organizaciones han sacado provecho a la gestión de los datos. Así, tal y como se refleja en la tabla 1-1, los sistemas de información han evolucionado desde el simple almacenamiento de datos a su explotación automatizada tanto para la producción a nivel ejecutivo u operacional, como para el planeamiento a nivel estratégico. En la actualidad se están desarrollando en el dominio de las fuerzas armadas diferentes proyectos de gestión masiva de datos, con ejemplos de relevancia como el "gemelo digital"[7], vehículos no tripulados, sensores integrados, textiles inteligentes, etc.

1950	1960	1970	1980	1990	2000-actualidad
PROCESAMIENTO	INFORMES DE GESTIÓN	APOYO A LAS DECISIONES	GESTIÓN ESTRATÉGICA	GESTIÓN GLOBAL DE LA INFORMACIÓN	GESTIÓN MASIVA DE DATOS
Recopilación, almacenamiento y acceso a los datos	Explotación de las bases de datos mediante informes básicos	Desarrollo de aplicaciones específicas para apoyo a la decisión	Explotación a nivel general de información de cualquier fuente para la definición de la estrategia	Penetración de la información a todos los niveles por el desarrollo de redes	Desarrollo de internet y comunicaciones satélite y explotación de los conceptos cloud, IA, automatización y robótica
COMIENZO DE LA DIGITALIZACIÓN	NIVEL TÁCTICO	NIVEL OPERACIONAL	NIVEL ESTRATÉGICO	TODA LA ORGANIZACIÓN	EVOLUCIÓN EXPONENCIAL

Tabla 1-1 Evolución del modo de gestión de los datos

1.4.3 Modelo de arquitectura de comunicaciones tipo

La arquitectura tipo en un despliegue para una operación expedicionaria explota todos los elementos disponibles para establecer el C2 de la manera más eficiente (optimización en la gestión del recurso). Para ello, durante la fase previa al despliegue se efectúa un meticuloso planeamiento CIS en el que se distribuye el espectro de frecuencias a emplear para cada canal de comunicación, y donde se determina

[7] Término acuñado por la NASA en 2012. Consiste en un modelado virtual de un proceso o sistema a partir del análisis masivo de datos generados por sondas o sensores sobre un sistema real.

la distribución de sistemas de mando y control para todos los flujos de datos, identificando los canales principales, alternativos, de contingencia y de emergencia.

En la actualidad, el establecimiento de las condiciones C2 mínimas durante el despliegue requiere poder dotar a la fuerza expedicionaria de los siguientes servicios:

- Enlace de voz en claro y cifrado entre las fuerzas que despliegan y el Comandante de la Fuerza.
- Enlace de datos para los diferentes sistemas de mando y control (servicio de mensajería formateada, servicio de correo electrónico, acceso a repositorio de archivos, sistemas de posicionamiento y órdenes automatizadas a las unidades que despliegan, enlaces de datos tácticos, etc).
- Servicio de streaming de video para dispositivos de vigilancia y exploración (drones, aeronaves, vehículos acuáticos no tripulados, vehículos terrestres, dispositivos personales, etc.).

El elevado número de sistemas que requieren intercambiar información entre los distintos usuarios con los diferentes puestos de mando, demandan enlaces de muy alta capacidad, siendo esta demanda creciente a medida que se implementan nuevos servicios.

Este servicio se materializa, de acuerdo con las capacidades operativas estándar disponibles en la actualidad, a través de los siguientes medios:

- Enlaces satelitales seguros a través de los satélites de uso militar dedicado (SECOMSAT).
- Enlaces satelitales de respaldo a través de satélites comerciales (COMSATCOM).
- Enlaces radio en voz y datos a través de transceptores de UHF-VHF-HF.
- Dependiendo de las características del escenario y de los requisitos de seguridad de la misión, estas redes se pueden complementar con otros sistemas no securizados, como la red de telefonía móvil.

En la siguiente Figura se detalla un modelo típico de arquitectura C2 conforme a las capacidades actuales, en el que se establece un enlace satélite entre los puestos de mando, complementado con diferentes enlaces tácticos de radio entre las unidades dentro de sus correspondientes radios de alcance.

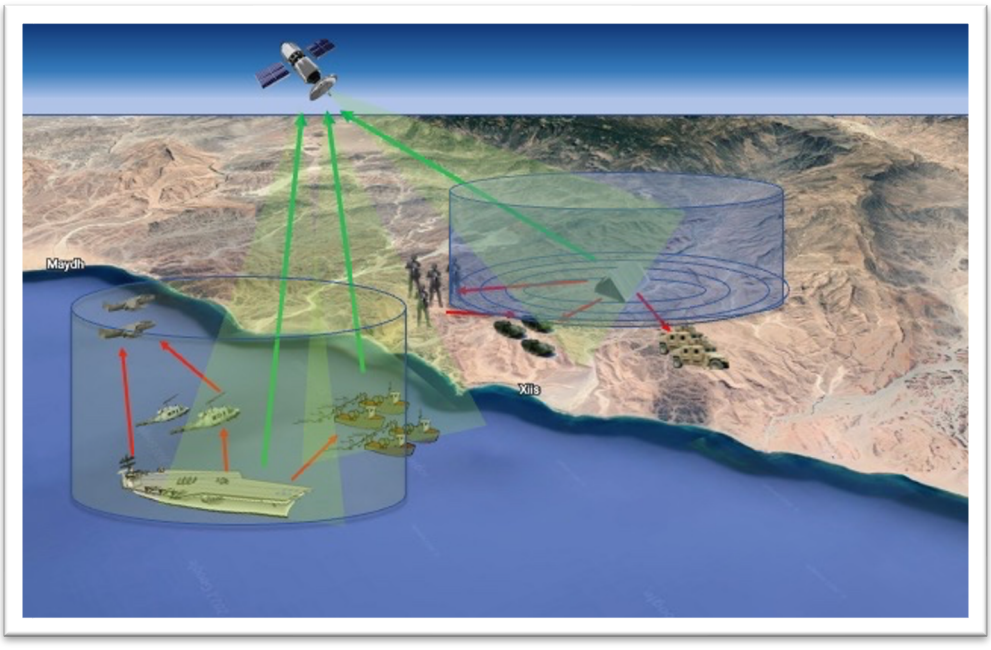


Figura 1-3 Modelo típico de arquitectura CIS en un despliegue

1.4.4 Principales limitaciones de la arquitectura tipo

El modelo de comunicaciones descrito permite el intercambio fluido de información y órdenes entre los diferentes elementos de la fuerza, si bien presenta tres limitaciones importantes:

- El diseño de la arquitectura CIS requiere de un exhaustivo plan de contingencia en caso de fallo de alguno de los canales de comunicación, siendo muy limitada la variedad de alternativas. Por ejemplo, en caso de fallo en el enlace con el satélite militar, la única alternativa para mantener enlace de alta capacidad es redirigir el tráfico a través de un satélite comercial, lo que requiere una configuración especial que no siempre es posible. Del mismo modo, si se produce una pérdida de comunicaciones UHF por pérdida de LoS, puede ser necesario desplegar equipos de retransmisión o emplear equipos en otras bandas de frecuencia. Este diseño debe, por tanto, contemplar un amplio abanico de aspectos como los accidentes geográficos, la disponibilidad de huella satélite, posibles interferencias o perturbaciones en determinadas frecuencias, disponibilidad de infraestructuras locales, etc.
- El despliegue de elementos expedicionarios requiere de un tiempo considerable para establecer la arquitectura de mando y control en tierra, siendo muy limitada la capacidad de comunicaciones entre el mando operativo y las fuerzas que despliegan hasta el momento en que se establece el puesto de mando. Este sería el caso de un despliegue de un contingente de Infantería de Marina que desembarca desde un buque de anfibio.



Figura 1-4 Puesto de mando de un contingente en el teatro de operaciones [4]



Figura 1-5 Puesto de mando a bordo de un buque de guerra [5][8]

- Existe un crecimiento exponencial de aplicaciones de alto valor para el apoyo a la decisión, como las imágenes retransmitidas en tiempo real por drones, las herramientas para el mantenimiento de la COP[9], que permite controlar en tiempo real el posicionamiento de todos los actores presentes en el escenario, las redes de mensajería clasificada, sistemas tácticos de control, videoconferencias, etc. Estas aplicaciones demandan elevadas tasas de transferencia de datos con baja latencia, siendo necesario efectuar un balance dinámico de servicios para optimizar el ancho de banda disponible. Evidentemente, la demanda de capacidad de todos estos servicios podría sobrepasar ampliamente los recursos disponibles, por lo que se hace necesario plantear la implementación de sistemas que permitan cubrir ese déficit de capacidad.

Como resumen, el elevado volumen de datos que es necesario intercambiar durante la conducción de una operación militar puede sobrepasar las capacidades de comunicaciones de las fuerzas participantes, por lo que se hace necesario disponer de sistemas dotados de alta capacidad en lo que a ancho de banda y latencia se refiere para permitir este intercambio de información. Al mismo tiempo existen limitaciones de carácter físico que pueden afectar al planeamiento de la matriz de comunicaciones, como accidentes geográficos que dificulten los enlaces LoS, indisponibilidad de infraestructuras locales, saturación del espectro, huella satélite o averías de equipos. Por último, se ha identificado la necesidad de mantener el mando y control durante todo el proceso de despliegue, habiendo constancia de la dificultad para cubrir el vacío de control con las fuerzas desplegadas hasta el momento en que se establece un puesto de mando en tierra.

1.5 Mitigación de las limitaciones y propuesta del trabajo

Identificadas las limitaciones, se trata de plantear una solución que cubra los siguientes criterios:

- Debe poderse implementar con inmediatez, antes de comenzar el despliegue de la fuerza, garantizando disponibilidad de la información desde el primer momento.

[8] Centro de Información para el Combate del buque de la Armada de Estados Unidos USS ”Midway”.

[9] Common Operational Picture: De acuerdo con la definición OTAN de la publicación JP 3-0, es una representación única de información relevante compartida entre varios mandos. Esta representación facilita el planeamiento colaborativo y contribuye al conocimiento situacional de todos los escalones de mando.

- El sistema debe contar con alta capacidad en transferencia de datos y baja latencia, con el fin de soportar el tráfico de los principales sistemas de información necesarios para la conducción de las operaciones.
- Deben permitir comunicaciones BLoS ("Beyond Line of Sight" o "más allá del alcance visual"), para permitir los enlaces entre los elementos de la fuerza desplegados y los puestos de mando a flote, salvando los posibles accidentes geográficos.
- Debe complementar la tecnología y los sistemas ya disponibles, pudiendo operar como una solución independiente o integrada.
- Además de la disponibilidad, debe garantizar la integridad y confidencialidad de la información.

Para poder satisfacer estos requisitos se plantea complementar la capacidad disponible en la actualidad, dotada de enlaces satélite y redes de radio, con redes basadas en comunicaciones 5G que puedan ser desplegadas ad hoc empleando vectores que permitan cubrir alcances y zonas de cobertura en función de la demanda. La solución más adecuada por tanto es el empleo de drones con transceptores 5G que puedan actuar de forma semiautónoma sorteando las limitaciones mencionadas y dotando a la arquitectura CIS estándar de capacidades ampliadas.

En este trabajo se van a tomar como referencia los escenarios más habituales de despliegue en operaciones expedicionarias, que se corresponden, tal y como se detalló en el punto 1.3, con una Operación de Ayuda Humanitaria y una Operación de Mantenimiento de la Paz en un escenario de media o baja intensidad. Para entenderlos, se emplearán los siguientes ejemplos:

- Un despliegue de una fuerza militar conjunta[10], formada por tropas de diferentes ejércitos y unidades, en un escenario de paz que ha sufrido una catástrofe natural y en el que la misión es aportar ayuda humanitaria, mediante el auxilio sanitario, el tendido de infraestructuras y el refuerzo de la seguridad (un ejemplo de este tipo de despliegue fue la Operación "Hispaniola", en la que participó una fuerza expedicionaria española para prestar ayuda humanitaria a la población haitiana tras el terremoto que devastó Haití en enero de 2010).
- Un despliegue de un contingente naval, en un escenario de baja o media intensidad (entendiéndose la posibilidad de encontrar algún tipo de resistencia al despliegue, pero no una oposición directa a la presencia del contingente), en la que no se puede disponer de las infraestructuras de comunicaciones locales por motivos de disponibilidad y confidencialidad de la información.

Sea cual sea el caso de uso, el Mando Operativo debe contar con un "puesto de mando" desde el que dirigir las operaciones, que será dispuesto bajo una cualquiera de las siguientes premisas:

- el puesto de mando permanece embarcado a bordo de una plataforma naval, la cual dispone de una infraestructura de sistemas de información adecuados para la gestión de la información.
- el puesto de mando se despliega en tierra empleando nodos de mando y control desplegables. Los nodos de mando y control desplegables se componen de todo el equipamiento CIS requerido por el Mando para el intercambio de información y órdenes. El nodo desplegable debe contar con todos los medios físicos que garanticen su correcto funcionamiento (incluyendo contenedores, tiendas de campaña, suministro de energía, cableado, antenas, etc.).

[10] En las Fuerzas Armadas españolas, "La Fuerza Conjunta" la constituyen todos los elementos integrantes de la Fuerza del Ejército de Tierra, de la Armada y del Ejército del Aire, además de los elementos de los mandos subordinados al Jefe de Estado Mayor de la Defensa que se determinen. "*Real Decreto 521/2020, de 19 de mayo, por el que se establece la organización básica de las Fuerzas Armadas".*

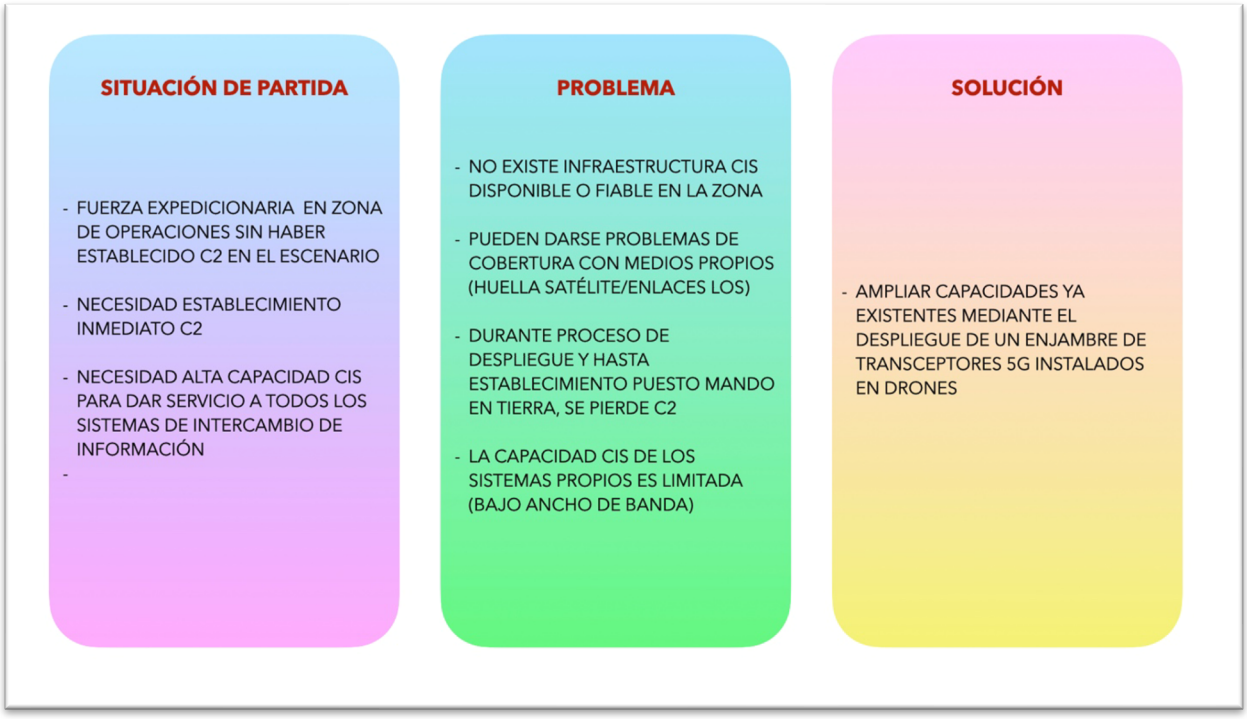


Figura 1-6 Planteamiento de solución al problema

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 El 5G

De acuerdo con el concepto definido por el 3GPP[11], el 5G es la quinta generación de la telefonía móvil. Su característica principal es que permite una velocidad de transferencia de datos hasta 10 Gbps, 100 veces superior al estándar previo más avanzado (4G-LTE), con muy baja latencia (1ms), lo que abre un abanico de posibilidades de aplicación hasta ahora inimaginables.

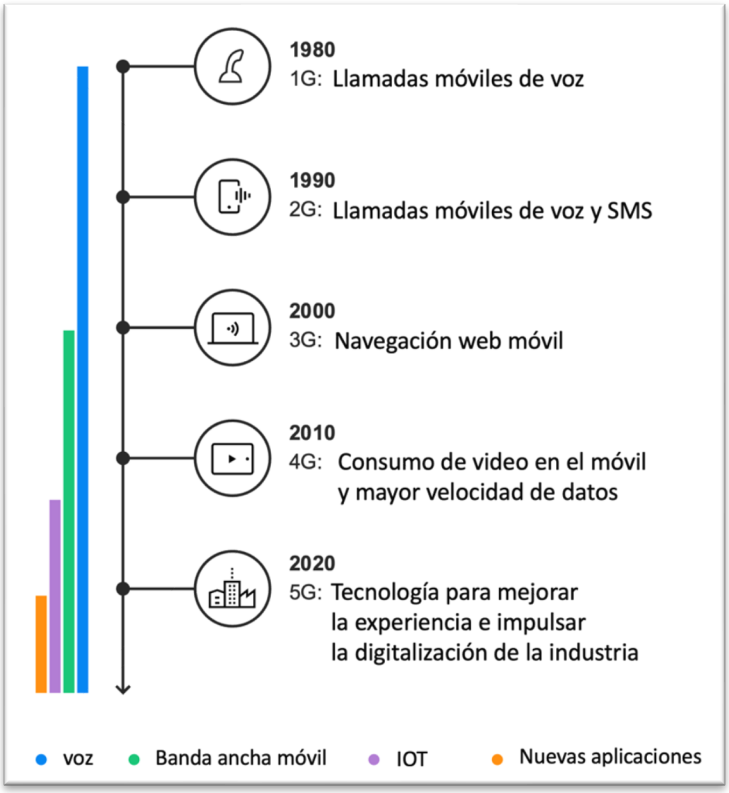


Figura 2-1 Evolución de los estándares de telefonía móvil [6]

Este desarrollo de la tecnología de telecomunicaciones, que ha generado un salto extraordinario en las capacidades en cuanto a velocidades de conectividad, baja latencia y mayor ancho de banda, está motivando una profunda transformación en el modo en que la sociedad interactúa con los sistemas de información en todos los planos, tanto en el ámbito doméstico, como en el empresarial o industrial, permitiendo la ejecución de tareas "críticas en el tiempo", que hace dos décadas eran consideradas prácticamente ciencia ficción. Ejemplos de ello son la telemedicina en tiempo real, con aplicaciones de teleasistencia quirúrgica, la computación de alto rendimiento en la nube, la conducción autónoma (vehículos conectados), las aplicaciones de realidad virtual y realidad aumentada, o la robótica aplicada al "Internet de las Cosas" (IoT).

La compañía sueca de telecomunicaciones "Ericsson", que destaca como uno de los principales proveedores de tecnología de las comunicaciones y la información para proveedores de servicios, detalla

[11] "Third Generation Partnership Project", creado en 1998 con el objetivo inicial de generar las especificaciones técnicas e informes técnicos para el desarrollo del sistema móvil 3G como una evolución de las redes GSM. Este proyecto engloba siete organizaciones de desarrollo de estándares de telecomunicaciones, que ejercen el liderazgo en esta actividad, incluyendo el desarrollo de los estándares LTE y 5G.

en una presentación sobre su concepto del 5G en su página web[12], cómo esta tecnología introduce nuevas posibilidades de innovación que van más allá de las limitaciones empresariales actuales, permitiendo nuevas formas de trabajar, pensar y resolver los desafíos corporativos tradicionales.

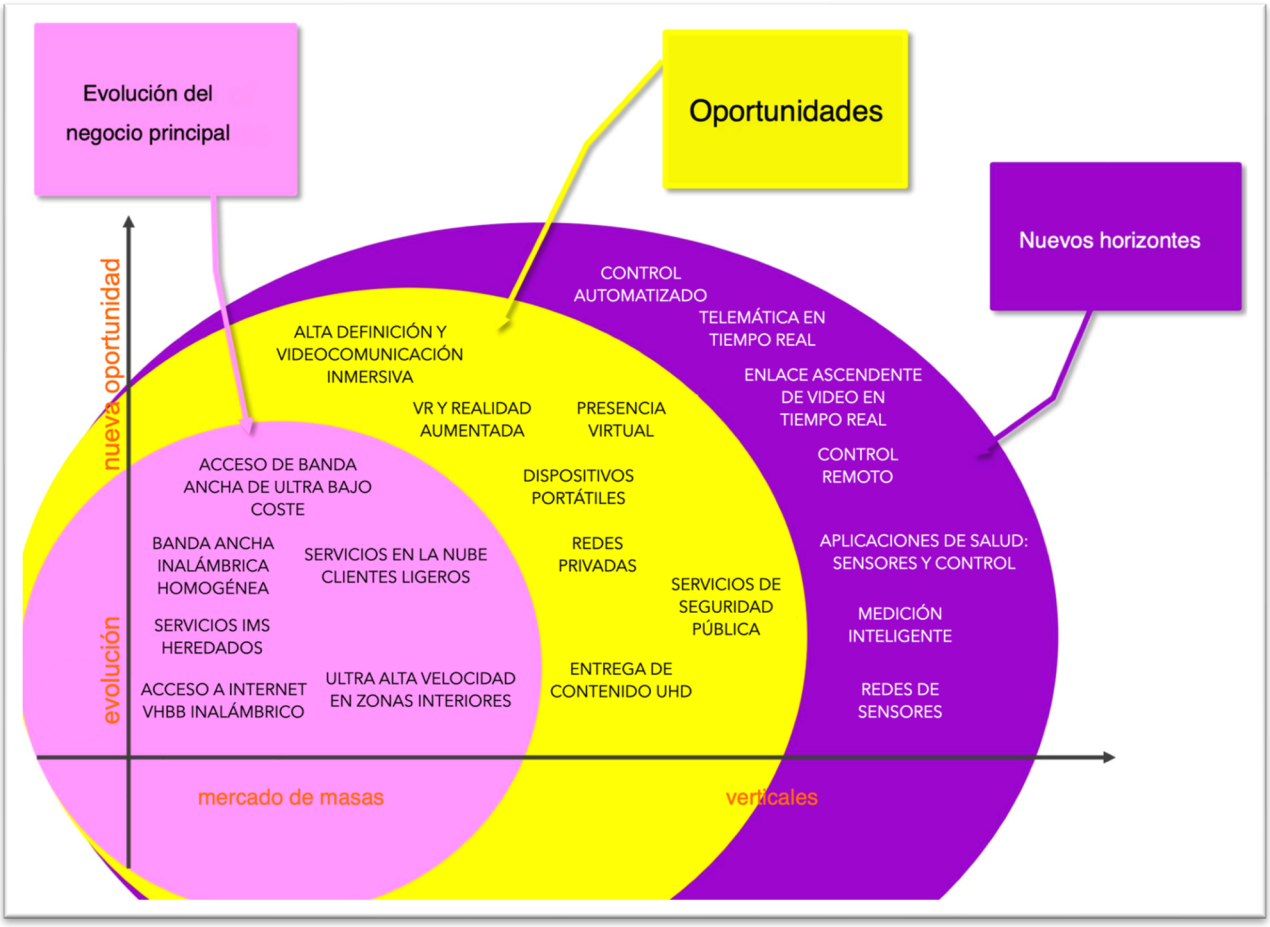


Figura 2-2 Visión de la evolución del 5G y oportunidades según el operador "Orange" [7]

De acuerdo con este modelo conceptual, del análisis detallado del potencial de la tecnología 5G para la transformación de las organizaciones, se pueden observar las siguientes características comunes:

- capacidad de ejecución remota de cualquier tipo proceso, con independencia de su criticidad
- posibilidad de mantener el control en tiempo real de cada proceso de negocio
- capacidad de ejecución de operaciones automatizadas
- capacidad de ejecución de aplicaciones o recursos "en el borde" cuando así se requiera
- mayor seguridad en todos los planos sin déficit de rendimiento del sistema

2.1.1 Otras alternativas

La red de telecomunicaciones celulares de 5ª generación no es la única tecnología capaz de soportar redes de comunicaciones con alta demanda. En este sentido, las alternativas a considerar son aquellas que, por diseño, puedan permitir establecer enlaces a distancias superiores a un kilómetro, teniendo en cuenta los criterios de alta capacidad y baja latencia e independencia de interconexiones físicas (cableado). Este criterio reduce las opciones disponibles a las redes inalámbricas de los tipos WMAN

[12] https://www.ericsson.com/en/5g/5g-for-business

(redes de área metropolitana) y WWAN (redes de área extensa), así como otros sistemas propietarios no basados en estándares.

- Dentro de las redes WMAN, destaca la tecnología WiMAX ("World Wide Interoperability for Microwave Access"), y concretamente la evolución WIMAX2, desarrollada en el año 2011 bajo el estándar "IEEE 802.16m" (del "Institute of Electrical and Electronic Engineers"). Esta tecnología permite establecer enlaces hasta a 70 km con velocidades en movilidad de hasta 100 Mbps, si bien la competencia con otros estándares con capacidades adicionales, y de forma concreta, con la tecnología celular LTE (Long Term Evolution) ha ido conduciéndola paulatinamente al desuso.

- Entre las redes WWAN, se distinguen dos tipos de redes diferentes:

    - Redes celulares: Engloban todas las tecnologías de telefonía móvil, desde el GSM (Global System for Mobile Communications) hasta la actual tecnología 5G.
    - Redes satelitales: En la actualidad existe una gran variedad de operadores prestando servicios de comunicaciones por satélite con muy diferentes capacidades. Los sistemas de comunicaciones vía satélite están ampliamente implementados en las fuerzas armadas, empleando principalmente satélites dedicados a las capacidades militares, si bien también se utilizan satélites comerciales para comunicaciones no seguras y como sistemas de respaldo en caso de fallo en los enlaces con los satélites dedicados. La principal problemática que presenta esta tecnología está relacionada con la capacidad y la disponibilidad de servicio. Como norma general, las fuerzas militares establecen sus enlaces satelitales a través de canales de comunicaciones satelitales seguras con los satélites dedicados. La alta demanda de servicios generada por una gran cantidad de terminales operando simultáneamente, normalmente conlleva una congestión de la red, lo que reduce de manera considerable la tasa de transferencia de datos. Más allá del problema de capacidad, se puede presentar un problema adicional, como es el mapa de cobertura. En el caso concreto de los satélites para comunicaciones militares utilizados por las fuerzas armadas de España, SPAINSAT y XTAR-EUR, la huella de cobertura no abarca todo el globo, por lo que en el caso de necesidad de requerirse un despliegue fuera de la zona de cobertura, se deben negociar contratos de servicios con otros operadores.

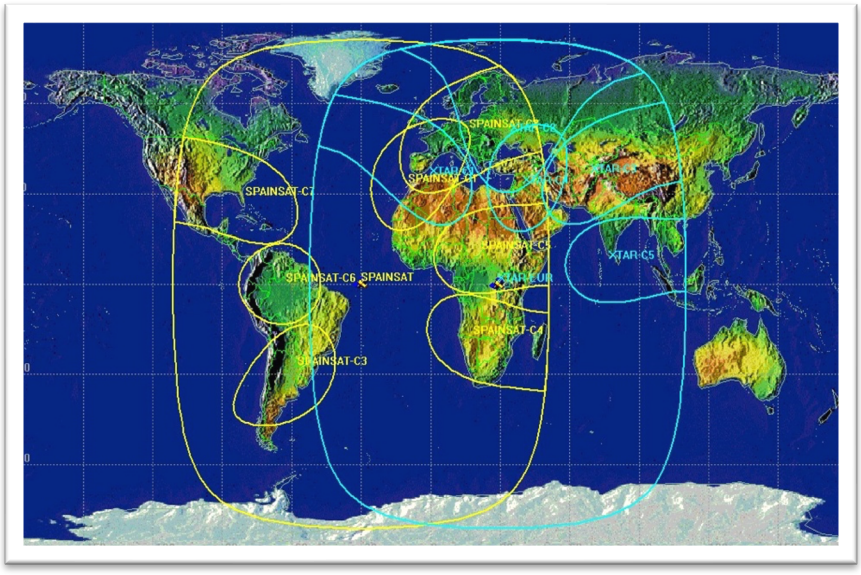


Figura 2-3 Mapa de cobertura de los satélites SPAINSAT y XTAR-EUR [8]

Otros inconvenientes de este tipo de redes son la alta latencia en el enlace y el efecto de las condiciones meteorológicas, ya que la lluvia y las manchas solares pueden afectar de una manera muy significativa a la calidad del enlace.

- Entre los sistemas propietarios para establecer redes inalámbricas, caben mencionar:
  - Sistemas de Distribución Local Multipunto (LMDS): Son redes de datos de topología celular que emplean estaciones fijas para establecer enlaces en voz y datos en frecuencias de microondas (banda Ka). Aunque pueden alcanzar distancias hasta 25km, presentan el inconveniente de que las antenas de las estaciones base son fijas y los enlaces se ven seriamente afectados por los obstáculos en la LoS y por las condiciones meteorológicas (especialmente la lluvia).

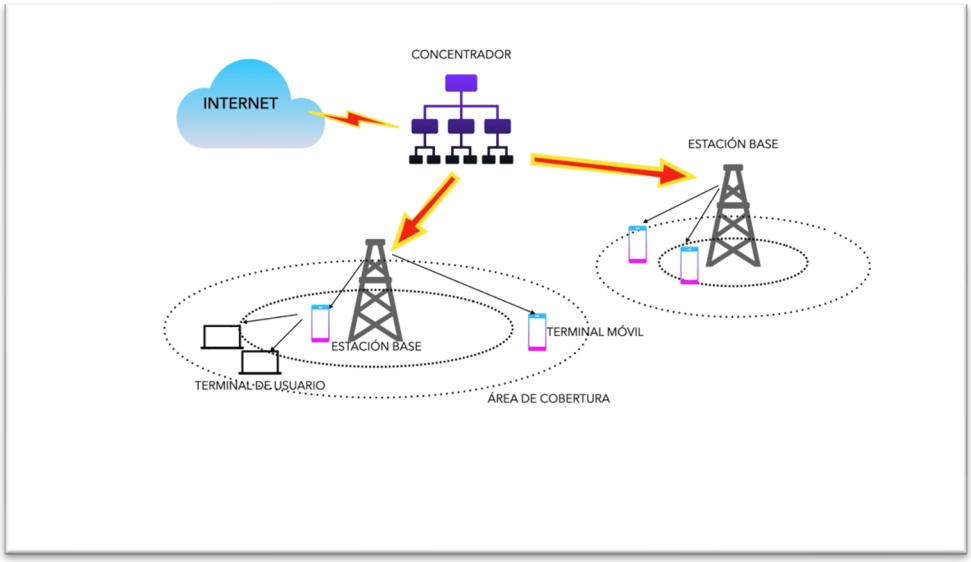


Figura 2-4 Topología de un sistema LMDS

  - Sistemas de Distribución de Microondas Multipunto (MMDS): Inicialmente diseñados para transmisión de video. Utilizan bandas licenciadas de 2-3GHz con canales multiplexados. El alcance de estos sistemas puede llegar a 25 km con velocidades entre 1 y 50 Mbps.

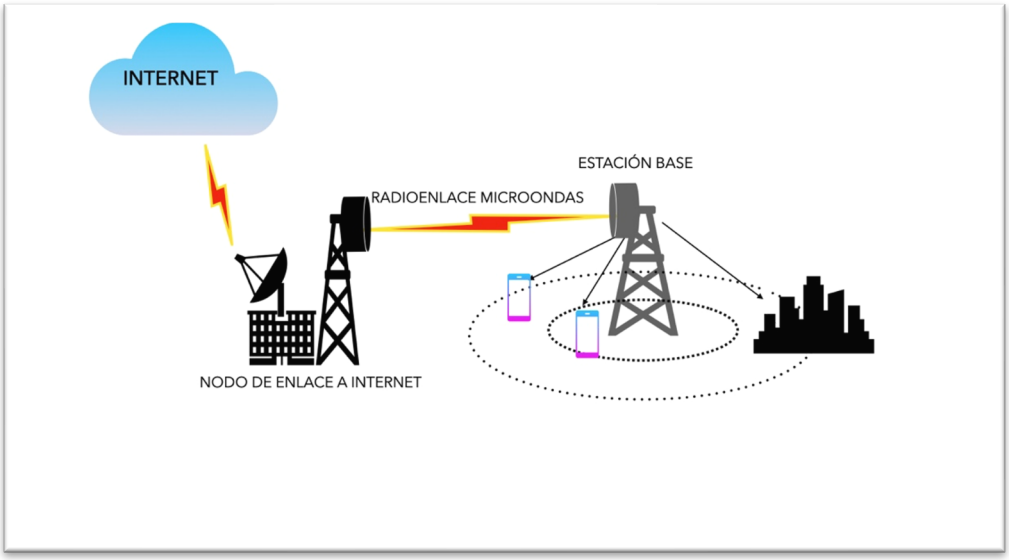


Figura 2-5 Topología de un sistema MMDS

- Sistemas ópticos de enlace punto a punto o punto a multipunto: Son sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas mediante el empleo de transceptores optrónicos, los cuales permiten la comunicación con un rendimiento muy alto, alcanzando tasas de transferencia de hasta 30 Gbps, si bien requieren sistemas de apuntamiento continuo y LoS.

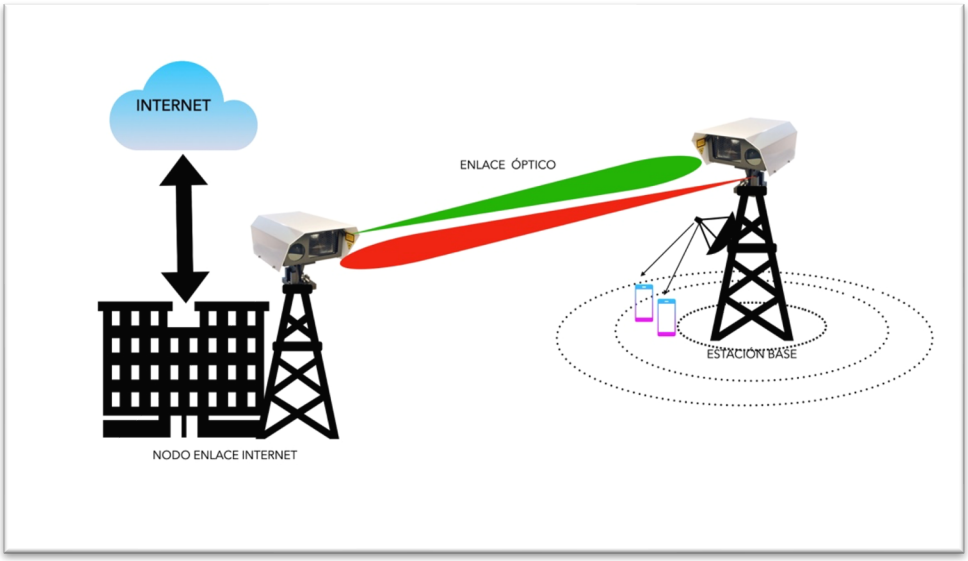


Figura 2-6 Topología de un sistema óptico de enlace punto a punto

- Redes de datos por radio táctica: En este tipo de redes se emplean transceptores de HF, VHF y UHF para establecer enlaces en voz y datos. Si bien pueden permitir grandes alcances, su rendimiento es muy pobre, alcanzando tasas de transferencia relativamente aceptables únicamente mediante enlaces UHF en LoS. Presentan además el inconveniente de ser fácilmente perturbables.

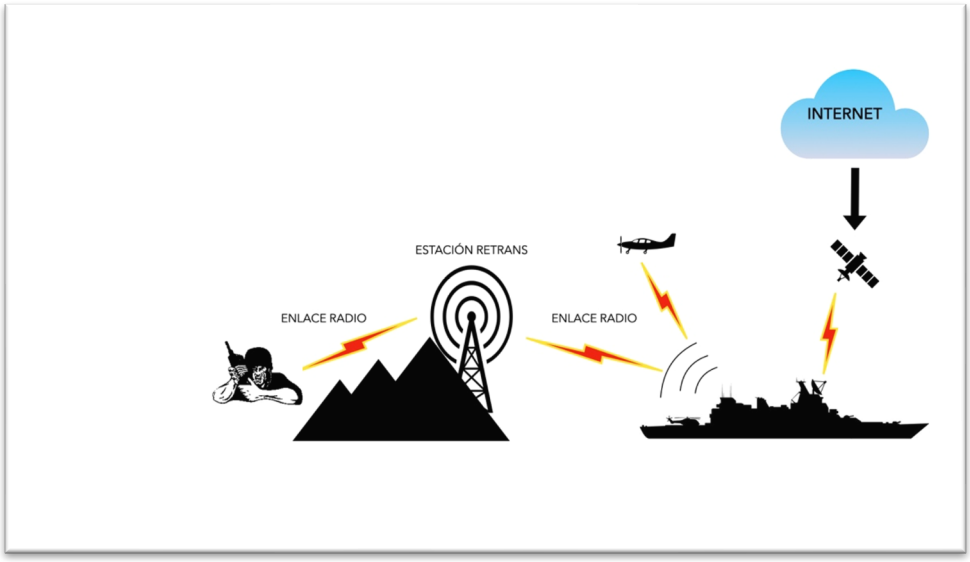


Figura 2-7 Topología de una red de datos por radio táctica

- WLAN (Red de Área Local Inalámbrica) con varios saltos: Se utilizan redes malladas (mesh) con enrutamiento multisalto para interconectar en la misma WLAN, terminales ubicados en diferentes emplazamientos.

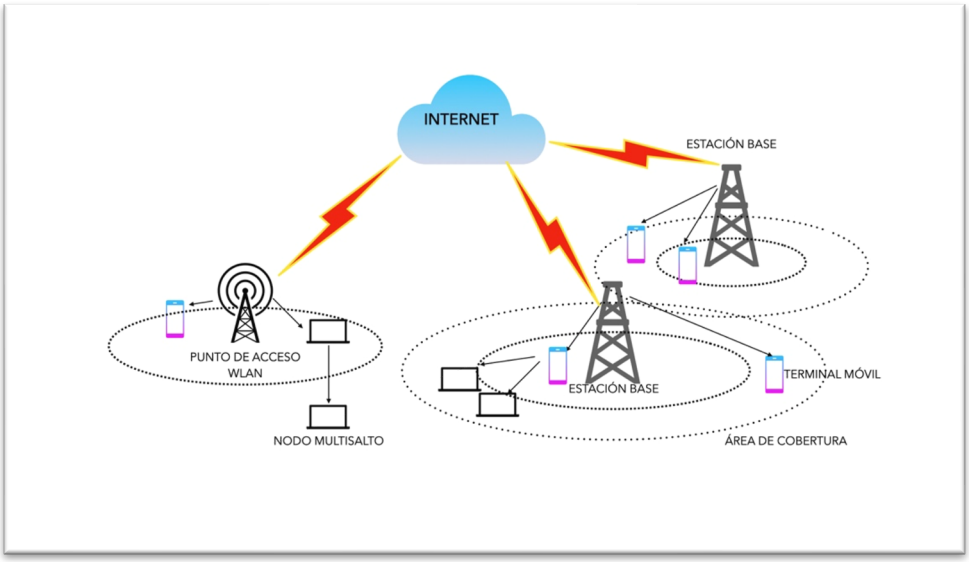


Figura 2-8 Modelo de WLAN con varios saltos

2.1.2 ¿Qué hace diferente al 5G?

De entre todas las características de esta tecnología, son cinco las que combinadas otorgan un valor añadido con respecto a otras tecnologías de telecomunicaciones disponibles:

1. Rapidez: Su tasa de transferencia de datos (hasta 10Gbps) le da un potencial 100 veces mayor que la tecnología celular precedente.

2. Disponibilidad: El empleo de un mayor rango de frecuencias permite reducir la sensación de micro cortes de servicio por el usuario.

3. Seguridad: Esta tecnología incluye por diseño controles de seguridad (principio "Secure by design") que solucionan la exposición a amenazas de las redes celulares precedentes, incluyendo autenticación mutua, protección mejorada de la identidad del suscriptor y cifrado del tráfico.

4. Fiabilidad: Reduce la latencia en un factor de 5, con unos tiempos de respuesta óptimos para aplicaciones tele asistidas.

5. Capacidad de red: La capacidad de conexiones simultáneas y el volumen de datos negociados es mil veces superior a las tecnologías previas.

Por tanto, la conjunción de estas características define una tecnología que permite generar redes con cantidades masivas de dispositivos conectados, los cuales pueden compartir información entre sí en tiempo cuasi-real, con velocidades de transmisión de datos muy elevadas y en unas condiciones de seguridad muy superiores a las de cualquier otra tecnología precedente.

2.1.3 Valor estratégico del 5G para las Fuerzas Armadas[13]

El Ministerio de Defensa del Gobierno de España (MDEF) definió en el año 2021 su "Estrategia de comunicaciones móviles de quinta generación" [9]. De acuerdo con la "visión general de la tecnología 5G" definida en dicho documento, el 5G es considerado como una tecnología disruptiva que constituye un componente tecnológico esencial para la transformación digital del MDEF y de transformación de la Fuerza Conjunta, ya que proporciona soluciones óptimas para habilitar e integrar el empleo de otras tecnologías, como el IoT, la robótica, la realidad mixta (realidad virtual y realidad aumentada), la inteligencia artificial, Big Data o el procesamiento (o computación) en nube.

Se considera que las redes y servicios 5G son un capacitador para potenciar la aplicación de determinados conceptos doctrinales orientados a facilitar el proceso de toma de decisiones a través de la mejora en la fiabilidad y accesibilidad de la información. Estas redes, se articulan como una infraestructura de alto valor para la provisión de servicios de voz, vídeo y datos, permitiendo proporcionar otros servicios como la integración masiva de dispositivos, sensores y servicios fiables y de baja latencia a través de comunicaciones de gran ancho de banda.

Otro de los valores estratégicos del 5G para el MDEF es la capacidad de racionalizar y optimizar la "Infraestructura Integral de Información del Ministerio de Defensa" (I3D), por la posibilidad de configurar una elevada cantidad de redes virtuales, con recursos asociados a cada una de ellas, orientadas a la misión o propósito (seguridad, movilidad, logística, operaciones, etc.) soportadas sobre una infraestructura tecnológica física única.

De esta forma, la tecnología 5G presenta un potencial transformador inmediato para el desarrollo de las misiones y los cometidos del MDEF, y otro mediato, al agilizar e incrementar las posibilidades que ofrecen otras innovaciones tecnológicas.

Para el MDEF, el carácter disruptivo del 5G se basa en la implementación de una serie de funcionalidades y mejoras respecto a tecnologías de comunicaciones móviles previas, haciendo posible:

- Comunicaciones móviles de banda ancha mejoradas, que permiten velocidades iniciales de 1Gbps con descargas superiores a 200 Mbps.
- Comunicaciones ultra fiables y de baja latencia, para el desarrollo de aplicaciones de misión crítica que requieren la obtención de datos en tiempo real necesarios para un conocimiento lo más detallado posible de todas las circunstancias que impactan sobre un escenario operativo (situational awareness) y para la rápida toma de decisiones.
- Comunicaciones masivas entre dispositivos y máquinas, que permitirá a dispositivos inteligentes, vehículos y equipamiento industrial estar permanentemente interconectados para satisfacer las

[13] Basado en [9]. Este apartado contiene citas textuales a dicho documento.

necesidades del IoT. La visión de objetos y dispositivos inteligentes, requiere incorporar sensores e inteligencia para detectar y tomar decisiones de forma automatizada sobre tareas complejas, de ejecución inmediata, basadas en flujos de trabajo complejos. En este dominio, las máquinas tendrán la capacidad de comunicarse en tiempo real con el resto de objetos que conforman el ecosistema tecnológico en proximidad, generando un entorno colaborativo para alcanzar los objetivos que se encomienden.

Considera por tanto el MDEF que, para alcanzar los objetivos de esta estrategia, el 5G debe sustentarse en los siguientes elementos habilitadores:

- Espectro radioeléctrico. El 5G añade nuevas bandas de frecuencia a los rangos del espectro radioeléctrico comunes empleados por generaciones previas de comunicaciones móviles, destacando el empleo de ondas milimétricas soportadas sobre bandas por encima de los 6 GHz, las cuales proporcionas mayor ancho de banda y mejores capacidades y rendimientos (mayores velocidades de transferencia).
- Nueva Interfaz Radio, cuyas principales características son:
  - Establecimiento de celdas de comunicaciones de tamaño reducido.
  - Empleo de la Tecnología Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) masiva.
  - Beam forming. Se trata de una funcionalidad que permite adaptar el diagrama de radiación de las antenas en función del usuario y de su ubicación, con el objeto de concentrar y reducir la potencia de emisión, minimizar el riesgo de interferencias y reducir la probabilidad de intercepción y detección de comunicaciones por usuarios no autorizados.
  - Full dúplex, para mejorar la eficiencia espectral mediante la transmisión y recepción simultánea en las mismas frecuencias.
  - Establecimiento de comunicaciones directas entre terminales de usuario (Sidelink). Permite la comunicación directa entre dos usuarios sin necesidad de que la comunicación pase por una estación base.
  - Mejoras de seguridad con respecto a las anteriores generaciones de comunicaciones móviles.
- Nueva Red de Acceso, integrando las estaciones base de la red y posibilitando el empleo de varias tecnologías de acceso diferente (HSPA, 4G-LTE o Wifi).
- Red de Núcleo de 5G (Core Network), que permite mejorar la capacidad de las redes, la interoperabilidad con Aliados, la protección de las comunicaciones, el mantenimiento predictivo o el establecimiento de bases y emplazamientos inteligentes y cuyas principales características son:
  - Conformación de redes heterogéneas.
  - Virtualización de funciones de Red y redes definidas por software. Permite que las funciones de red se implementen sobre dispositivos basados en software, eliminando la necesidad de equipamiento hardware concreto (routers, firewalls, balanceadores de carga, etc.).
  - Segmentación de Red (Network Slicing). Permite establecer múltiples redes sobre una infraestructura física común.
  - Capacidad de procesamiento y computación perimetral (Edge Computing). Esta tecnología es clave para conseguir latencias muy reducidas, ya que permite que permite que los datos recogidos por los dispositivos se procesen cerca de donde se crean, sin depender de su transmisión a los centros de datos o a la nube.

En el proceso de definición de la estratégica, se identifican dos ámbitos diferenciados de aplicación de la tecnología 5G, el ámbito Operativo, y el resto de ámbitos funcionales y de apoyo al ámbito Operativo:

- *Aplicación de la tecnología 5G en el ámbito Operativo:* Es el área principal de aplicación potencial de esta tecnología. Al aumentar la densidad de comunicaciones y ejercer como

capacidad habilitadora y plataforma integradora de otras tecnologías, 5G proporciona capacidad analítica y predictiva avanzada y permite incrementar el conocimiento de la situación, agilizar, descentralizar y acortar los procesos de toma de decisiones y proporcionar superioridad de información, potenciando, en general todas las capacidades militares identificadas en el proceso de Planeamiento Militar.
Las ventajas potenciales de la tecnología 5G para su uso en el ámbito militar son:

- La disponibilidad de capacidades de comunicaciones móviles, tanto para usuario en entorno permanentes como desplegables.
- El incremento de información disponible y de las capacidades de análisis en los entornos operativos.
- Un continuo y coordinado entendimiento del entorno operativo gracias a la recepción de información y la generación de inteligencia en tiempo real.
- El incremento de las capacidades de las fuerzas desplegadas gracias a la implementación de funcionalidades de movimiento y transporte autónomo, logística inteligente, formación inmersiva o telemedicina.
- Una reducción de los riesgos y vulnerabilidades del personal, frente a amenazas a través de la explotación y el procesamiento de un gran número de sensores y de la posibilidad de seguimiento de fuerzas propias.
- La mejora de la interacción con Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, Organizaciones y Fuerzas Aliadas y Organizaciones No Gubernamentales, durante operaciones. Ésta última ventaja es de gran valor para aplicación en escenarios como los planteados en este trabajo, especialmente en aquellos donde se requiere coordinar con organizaciones no militares en labores de ayuda humanitaria o asistencia sanitaria crítica.

- *Aplicación de la tecnología 5G en el resto de ámbitos funcionales y de apoyo al ámbito Operativo*. Engloba el resto de aplicaciones no implícitamente operativas, pero que aportan valor estratégico en el entorno del MDEF. En este sentido se identifican las siguientes áreas de interés:

  - Procesos Logísticos (incluyendo movimiento de personal y de recursos) y mejora de la eficiencia medioambiental.
  - Monitorización y mantenimiento remoto y predictivo de infraestructura crítica.
  - Enseñanza y Adiestramiento, con la aplicación de técnicas de realidad virtual (VR - Virtual Reality) y realidad aumentada (AR – Augmented Reality), dando lugar a modelos de aprendizaje y formación más personalizados, eficientes, inmediatos, inmersivos e interactivos.
  - Sanidad. En algunas capacidades, como la telemedicina, es especialmente crítica la comunicación de grandes volúmenes de información con latencias muy bajas. Además de posibilitar las funciones e intervenciones en tiempo real, permite la inclusión de capacidades de predicción y tratamiento personalizado.

Identificados los ámbitos de aplicación, el MDEF define los casos de uso reales de las redes y servicios 5G que son de interés estratégico, los cuales se estructuran sobre la base del siguiente esquema:

- *Dominios de aplicación y Escenarios de referencia.*

  - Operaciones Terrestres (componentes permanente y desplegable).
  - Operaciones Marítimas (componentes permanente y desplegable). Contempla la "burbuja táctica para fuerza naval", comunicaciones costa-puerto y comunicaciones entre buques y elementos anfibios desplegados.

- Operaciones Aéreas / Espaciales (componentes permanente y desplegable).
- Operaciones en el Ciberespacio.
- Comunicaciones permanentes no exclusivamente asociadas a operaciones y funciones permanentes de apoyo (logística, sanidad, formación, etc.).

- *Opciones de despliegue y uso.*

  - Uso de redes públicas 5G (de operadores de comunicaciones móviles). Esta opción cuenta con ventajas habituales de empleo de redes comerciales (evitar el coste de un despliegue propio). Además, la posibilidad de establecer segmentaciones de red (network slices) propias para comunidades de usuario específicas hace que estas ventajas sean aún más reseñables. Asimismo, el uso de estas redes podría permitir, por ejemplo, la capacidad de redundancia para la transmisión de información no sensible.
  - Uso de redes privadas 5G. El empleo de redes 5G propiedad del MDEF puede ser adecuado para su uso sobre bandas de frecuencias que ya se encuentran en uso en el ámbito militar (por ejemplo, para comunicaciones móviles tácticas).
  - Uso de tecnología 5G sobre redes militares. Se trata de una opción híbrida, que se basaría en el carácter y uso dual de la tecnología 5G, en la que se integrarían una serie de tecnologías 5G sobre redes militares ya existentes (por ejemplo, usando formas de onda propias de 5G, aprovechando las ventajas que su utilización suponen en términos de eficiencia, ahorro de tiempo y coste).

En todo caso, la estrategia contempla el empleo de la tecnología 5G sólo cuando represente, para cada escenario concreto, una ventaja en términos de operatividad, seguridad o mejora en el empleo de recursos, respecto a otros estándares y tecnologías de comunicaciones inalámbricas.

2.1.4 Desafíos y Riesgos derivados de la tecnología 5G para las Fuerzas Armadas[14]

De acuerdo con las consideraciones estratégicas del MDEF, las capacidades soportadas por la tecnología 5G conllevan una serie de nuevos desafíos y riesgos que deben ser tenidos en cuenta para asegurar las ventajas que proporciona el uso de dicha tecnología. Se identifica como el mayor riesgo de seguridad la interconexión masiva de dispositivos, entre los que se incluyen los de infraestructura crítica, lo que conlleva una exposición relevante de la superficie de ataque de las redes. Considera que, para alcanzar la funcionalidad plena es preciso securizar interfaces de radio, dispositivos conectados, redes y proporcionar protección contra los ataques de denegación de servicio sobre la infraestructura y los dispositivos del usuario final. Para ello se contempla el empleo de controladores de red definidos por software, dispositivos de red y servidores que proporcionan servicios de nube mediante una combinación de servidores, sistemas de almacenamiento de datos, máquinas virtuales, hipervisores o protocolos, como elementos clave para garantizar esta protección.

Se contempla la vulnerabilidad a las amenazas de aplicación originadas en malwares o spywares empleados por el adversario para alcanzar una ventaja en la información, bien buscando la interrupción de las comunicaciones, o bien la obtención de información sensible. Además, se observa el riesgo derivado de las incompatibilidades con sistemas actuales, motivados por el cambio o adaptación de los equipos o terminales que utilizarán la tecnología 5G, lo que puede dar lugar a brechas de seguridad.

[14] Basado en [9]. Este apartado contiene citas textuales a dicho documento.

Estos riesgos, según lo descrito en el documento del MDEF, complican la seguridad porque alargan las cadenas de suministro al incorporar a muchos actores con distintas culturas en ciberseguridad (operadores, fabricantes de equipos TI, proveedores, infraestructuras, servicios de la nube, usuario final...).

Destaca dos riesgos adicionales que tienen una relación directa con la posibilidad de emplear las redes 5G en escenarios combinados, internacionales o expedicionarios:

- los derivados de las limitaciones que establezcan países aliados para su interconexión.
- la ausencia en la actualidad, de un espectro radioeléctrico completamente armonizado a escala mundial en una cierta gama de frecuencias que permita una implantación efectiva de las redes y servicios 5G.

2.2 Relevancia de los drones en las redes de comunicaciones celulares 5G

Los vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicles - UAVs), también conocidos como drones o sistemas aéreos no tripulados (UAS) suponen una solución tecnológica con un enorme potencial para diferentes escenarios en el ámbito de la industria en general, ya sea para la aplicación de tareas logísticas, de transporte, de vigilancia y seguridad, militares, agrícolas, de control y monitorización, o cualquier otra en la que tenga cabida el empleo de estos dispositivos.

Durante el proceso de despliegue de las infraestructuras de telecomunicaciones celulares 5G, se han realizado diferentes estudios (algunos de los más relevantes se detallarán en los siguientes apartados de este trabajo) valorando la posibilidad de emplear drones, o vehículos o sistemas aéreos no tripulados (UAV/UAS) como un componente relevante dentro de la arquitectura de red, donde su empleo puede mejorar la capacidad de transmisión inalámbrica, así como los enlaces punto a punto.

2.2.1 Definición de dron

Los drones o UAVs, son vehículos aéreos no tripulados, es decir, aeronaves sin tripulación que son capaces de mantenerse en vuelo de forma autónoma, bien bajo unos parámetros previamente programados, o bien mediante las órdenes emitidas por un operador desde tierra. Este es un término que se emplea de manera generalizada en los campos de la informática, la robótica, la inteligencia artificial y la industria militar entre otros, siendo en este último campo en el que se ha producido un desarrollo más relevante.



Figura 2-9 Dron "Predator" del Ejército del Aire (España) [10]

2.2.2 Breve historia de los drones

Si bien el concepto de empleo de aeronaves no tripuladas se puede remontar al siglo XIX, cuando se comenzaron a utilizar globos aerostáticos para fines de observación meteorológica, la historia de los drones se ha desarrollado principalmente en las últimas décadas, teniendo un crecimiento disruptivo a partir del comienzo del siglo XXI, coincidiendo con el desarrollo de aeronaves mucho más ligeras, de menor tamaño, con mejores capacidades de aeronavegabilidad y con posibilidad de acoplar otras tecnologías.

El principal vector de evolución de esta tecnología, como suele suceder en muchos otros campos de la investigación, se ha producido en el ámbito del desarrollo de la industria militar. En este sentido, los primeros registros de empleo de aeronaves no tripuladas con fines militares, datan de principios del siglo XX, cuando el ejército del Imperio Austro-Húngaro empleó globos para lanzar bombas contra las fuerzas italianas en la I Guerra Mundial.

El siguiente hito en el desarrollo de esta tecnología se produjo en la década de 1930, cuando irrumpieron los primeros drones propulsados, que se empleaban para labores de reconocimiento y como blancos aéreos. Este perfil de empleo se mantuvo durante varias décadas, con nuevos desarrollos que permitían mayor durabilidad y mayores alcances de los vuelos, pero sin aportar nuevas capacidades.

En la década de los 80 del siglo pasado, se desarrollan modelos diseñados específicamente para labores de vigilancia, y no sólo de reconocimiento. Esta nueva capacidad fue posible gracias a la introducción de materiales ligeros en la construcción de las aeronaves, así como sistemas de propulsión más eficientes y avances en la electrónica y aerodinámica, que permitían a los drones permanecer en vuelo durante periodos más prolongados. Además, se produce la penetración de esta tecnología en el ámbito civil, como una capacidad relevante para la investigación científica.

Ya en la última década del siglo XX, con la proliferación del sistema de posicionamiento global GPS, se empiezan a desarrollar drones con capacidad de navegación de precisión, lo que permite un gran avance en las aplicaciones potenciales de la tecnología.

Pero es a partir del año 2000 cuando se produce una explosión en el desarrollo de estos sistemas, con un gran interés por parte de las comunidades científica, militar, comercial y recreativa, por cuantas ventajas supone el empleo de estos sistemas, que ya permiten integrar una gran variedad de sensores y otras tecnologías, operando con seguridad de forma autónoma, preprogramada, o controlada remotamente, y en un entorno inherentemente peligroso como es el espacio aéreo, sin necesidad de poner en riesgo la vida de un tripulante.

2.2.3 Tipos de drones

La versatilidad de este tipo de vehículos ha propiciado la proliferación de una amplia variedad de aeronaves con diferentes características y configuraciones. Se puede establecer una clasificación de tipos de drones según sus características de propulsión, el tipo de ala y el perfil de uso para el que son diseñados:

Según su tipo de propulsión:

- Drones propulsados por hélices: uno o varios motores (eléctricos o de combustión) transmiten la energía a las hélices que le dan la velocidad o sustentación al dron.
- Drones con turbina: este tipo de drones emplea uno o varios turbopropulsores que le confieren a la aeronave la potencia necesaria para alcanzar grandes velocidades y alturas.
- Drones propulsados por cohetes: Similar a la propulsión con turbina, pero empleando cohetes.



Figura 2-10 Drones según su tipo de propulsión (elaboración propia con imágenes de [11], [12] y [13])

Según el tipo de ala:

- Drones de ala fija: Las alas forman una parte fija del fuselaje del dron. Por sus características de aerodinámica, requieren mantener una velocidad mínima para garantizar su sustentación. Su principal ventaja es que tienen una gran eficiencia aerodinámica, lo que hace que su consumo energético sea muy bajo y que, por tanto, dispongan de una gran autonomía. Como principal inconveniente, no pueden realizar vuelo estacionario y necesitan de una infraestructura mínima para poder despegar y aterrizar, bien sean pistas de despegue, o bien lanzaderas y dispositivos especiales de recogida.
- Drones de ala rotatoria: Las alas están formadas por una o varias hélices, llamadas “rotores” o “multirrotores”, que permiten el desplazamiento del dron en el plano tridimensional. La principal característica de este tipo de drones es que pueden efectuar vuelo estacionario y no necesitan de rodaje en pista para el despegue y aterrizaje. El principal inconveniente de este tipo de drones es

su autonomía, ya que requieren que todos sus rotores se encuentren simultáneamente en funcionamiento para mantener la sustentación y el movimiento del aeronave, por lo que si se pretende disponer de ellos para una actividad que demande una elevada permanencia, será necesario contar con drones de reserva y con elementos de suministro energético intercambiables que permitan volver a poner el aparato en vuelo en el menor tiempo posible una vez consumida su reserva de energía.



Figura 2-11 Drones según el tipo de ala (elaboración propia con imágenes de [14] y [15])

Según su perfil de uso:

- Drones recreativos: Equipos de bajas prestaciones, normalmente empleados para entretenimiento o uso infantil. Apenas se equipan con carga útil, más allá de cámaras de fotografía o video con baja resolución.
- Drones deportivos: Equipos ligeros de alta velocidad y maniobrabilidad empleados en competiciones deportivas de velocidad.
- Drones de uso general: Equipos con prestaciones más avanzadas que los de tipo recreativo, utilizados con múltiples propósitos, de forma más generalizada con fines audiovisuales.
- Drones profesionales: Son equipos diseñados de forma específica para un cometido concreto, destinados principalmente a aplicaciones de carácter industrial, agrícola, de monitorización y seguridad, vigilancia, logística, etc. Se trata de vehículos de alto rendimiento, con capacidad para dotarse de la carga útil necesaria para cumplir su cometido y un coste significativamente superior que los tipos de drones descritos previamente.
- Drones militares: Están específicamente diseñados para su empleo con aplicaciones militares. Sus funciones principales son las de vigilancia, reconocimiento y ataque. Los drones destinados a fines militares pueden ser de muy diversa índole, desde drones sigilosos ultraligeros a drones de gran permanencia en vuelo a gran altitud. Los de mayor capacidad suelen dotarse de equipamiento y sensores de alta precisión, así como de armamento de gran potencia de combate.



Figura 2-12 Drones según su perfil de uso (elaboración propia con imágenes de [16], [17], [18], [19] y [20])

2.2.4 Interés del empleo de drones en las redes de telecomunicaciones

Como en cualquier proyecto de desarrollo tecnológico, el principal motivo de la industria para implementar y mejorar una tecnología es la expectativa de obtener un rendimiento, generalmente de tipo económico, aunque en ocasiones se puede tratar de alcanzar ventajas estratégicas como en el caso del ámbito militar, en el que la inversión en tecnología siempre tiene como objetivo en obtener una ventaja sobre un potencial adversario.

Tal y como citan G. Geraci y otros autores en [21], "las nuevas oportunidades de ingresos derivadas de la proliferación de drones han estado atrayendo a operadores y proveedores de redes móviles, que se han congregado en los foros del 3GPP con el objetivo de integrar drones en redes terrestres existentes (o que pronto se desplegarían), y que han colaborado para proporcionar un soporte celular mejorado para vehículos aéreos. Dicho esfuerzo conjunto ha producido mediciones sistemáticas y un modelo de precisión de canal dependiente de la altura, a la vez que ha definido varios tipos y requisitos de enlace de drones".

Por tanto, el empleo de drones en redes de comunicaciones ya ha sido considerado por la industria como un elemento de inversión estratégica, y ello es debido a su utilidad en escenarios en los que existe dificultad para acceder a la red, donde el empleo de los drones aporta una serie de ventajas de alto valor:

- Permite extender el acceso a la red a zonas remotas donde por las condiciones de accesibilidad no existe la posibilidad de establecer un enlace terrestre o un radioenlace directo. Esta ventaja posibilita el acceso a la red en el entorno rural o en áreas aisladas.

- Permite reducir costes a los operadores, ya que en determinadas circunstancias y para ciertos tipos de enlace, emplear drones puede ser mucho más económico que instalar tendidos físicos de cable (zonas de difícil acceso o áreas remotas).
- Posibilita una configuración de red dinámica, rápida y flexible, permitiendo diseñar una arquitectura de red adaptada a las necesidades que se determinen, con la ventaja añadida de permitir el despliegue del enlace en un periodo de tiempo muy corto.
- Mejoras en la seguridad, ya que, al no depender de una infraestructura física, esta arquitectura de red no está condicionada por interrupciones de servicio derivadas de manipulaciones accidentales o malintencionadas de los tendidos de cable y fibra terrestres o submarinos, siendo relativamente sencillo el reemplazo de un nodo de comunicaciones en caso de avería o siniestro del dron.

Son estas ventajas las que convierten a los drones en una solución rápida, flexible y económica para proporcionar conectividad a áreas remotas o de difícil acceso, si bien es importante tener en cuenta ciertos desafíos e inconvenientes, como pueden ser la gestión del espectro de frecuencias, la exposición a perturbaciones, regulación en materia de aeronavegabilidad, etc.

2.3 Estudios sobre empleo de drones en redes de comunicaciones

La proliferación de dispositivos, el interés de la industria, y las ventajas estratégicas que ofrece esta tecnología, en cualquiera de los ámbitos, pero especialmente en el militar, han impulsado la exploración de una serie de estudios y proyectos de investigación centrados en el empleo de drones para la integración de redes 5G. En estos estudios se han explorado aspectos clave de las redes 5G basadas en drones, incluida su viabilidad técnica, los posibles beneficios y desafíos, y las posibles aplicaciones.

Un área clave de enfoque en estos estudios ha sido el uso de drones para brindar cobertura inalámbrica temporal o de emergencia en áreas de difícil acceso o donde la infraestructura tradicional está dañada o no está disponible. Los drones equipados con antenas 5G y otros equipos pueden brindar acceso a Internet de alta velocidad y otros servicios inalámbricos a los usuarios en tierra, lo que podría llenar los vacíos en la cobertura o aumentar la capacidad en áreas ocupadas o congestionadas.

Otros estudios han analizado el potencial del uso de drones como "torres de telefonía móvil", proporcionando una forma más flexible y rentable de ofrecer cobertura inalámbrica en comparación con la infraestructura terrestre tradicional. En estos escenarios, los drones se desplegarían en ubicaciones estratégicas para brindar cobertura a un área específica o para respaldar aplicaciones específicas, como seguridad pública o respuesta a emergencias.

También, como ya se ha reseñado, existen una serie de desafíos técnicos que deben abordarse para hacer realidad las redes 5G basadas en drones. Estos incluyen problemas relacionados con la potencia, el alcance, la confiabilidad y la seguridad, así como preocupaciones de carácter normativo. El trabajo de los investigadores pretende encontrar soluciones para estos desafíos y desarrollar tecnologías y estrategias que permitan implementar y operar redes 5G basadas en drones en una variedad de entornos y escenarios diferentes.

Existen una gran cantidad de estudios que tratan diferentes aspectos sobre la implementación de redes 5G empelando drones como estaciones base. A continuación, se expone una representación de estudios relevantes que contribuyen al “estado del arte” de la cuestión:

2.3.1 Comunicaciones inalámbricas con vehículos aéreos no tripulados: oportunidades y desafíos

En el trabajo [22] publicado por los investigadores Y. Zeng y otros, se efectuó una descripción general de las comunicaciones inalámbricas asistidas por drones, presentando la arquitectura de red básica y las principales características de los canales de comunicación, destacando los aspectos clave de diseño, así como las nuevas oportunidades a explotar.

Asimismo, trataron aspectos fundamentales de diseño para las comunicaciones con empleo de drones, destacando dos técnicas clave para mejorar el rendimiento mediante la utilización de la movilidad controlada de los drones, las cuales incluyen retransmisión móvil habilitada para drones y difusión de información de drones mejorada con D2D (dispositivo a dispositivo).

En su trabajo, los autores partieron de la premisa de las ventajas del empleo de drones para establecer comunicaciones inalámbricas en zonas sin cobertura por motivo de sombras severas por accidentes montañosos o urbanos, o por infraestructuras de comunicaciones dañadas debido a desastres naturales.

Según destacaron en su estudio, el empleo de esta tecnología presenta una serie de ventajas importantes en comparación con las redes de comunicaciones basadas en plataformas de gran altitud (HAP), o las basadas en sistemas terrestres o satelitales:

- Economía y velocidad de despliegue, lo que los hace idóneos para operaciones de duración limitada o para situaciones no esperadas que requieran una reacción de emergencia.
- Mejora de rendimiento de los enlaces, ya que la movilidad de los drones en altura permite establecer el enlace LoS en prácticamente cualquier escenario.
- Ajuste dinámico del estado y movilidad del dron para adaptarse al entorno.

Los autores plantearon los siguientes casos de uso (Figura 2-13):

a) Cobertura ubicua asistida por drones: Las aeronaves despliegan para complementar la infraestructura existente, con la finalidad de proporcionar continuidad en la cobertura inalámbrica dentro de un área de servicio determinada.

b) Retransmisión asistida por drones: Las aeronaves despliegan para proporcionar conectividad inalámbrica entre dos o más usuarios más distantes o grupos de usuarios sin enlaces de comunicación directos confiables, por ejemplo, entre la línea del frente y el centro de mando para respuestas de emergencia.

c) Diseminación de información y recogida de datos asistida por drones: Las aeronaves despliegan para difundir o recopilar información tolerante a demoras, a o desde una gran cantidad de dispositivos inalámbricos distribuidos, por ejemplo, sensores inalámbricos en aplicaciones de agricultura de precisión.

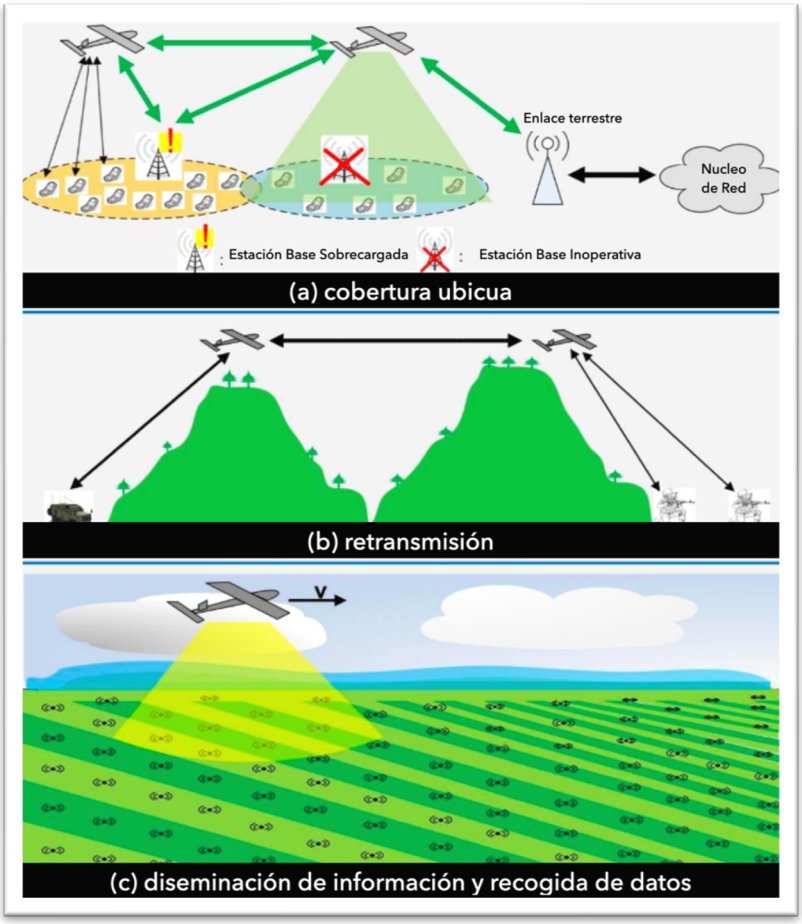


Figura 2-13 Casos de uso típicos en comunicaciones inalámbricas asistidas por drones [22]

En este estudio también se plantearon los desafíos de diseño para este tipo de redes, como los enlaces para control y comunicaciones sin carga útil, con unos requisitos de seguridad y latencia muy estrictos, necesarios para respaldar las funciones críticas de seguridad en vuelo (control en tiempo real, previsión de accidentes y colisiones, etc.). Otros retos críticos para el empleo de este tipo de redes son, la definición de la topología de red, que debe contemplar la coordinación de múltiples drones que garanticen la conectividad, protocolos de comunicación que respondan a situaciones de conectividad intermitente, limitaciones de tamaño, peso y potencia (SWAP) de los drones, que pueden afectar a la autonomía y a las capacidades de comunicación y computación, etc.

La arquitectura de red planteada en este estudio reflejaba dos tipos básicos de enlace:

a) El enlace de comunicaciones de control sin carga útil (CNPC -control and non-payload communications), necesario para garantizar la seguridad de los drones. Este enlace debe ser confiable y de muy baja latencia, debiendo a su vez permitir el mando y control de la aeronave desde la estación de control en tierra, el intercambio de información sobre el estado del dron, y la información relativa al enjambre de dispositivos para evitar colisiones entre estos, debiendo incluir mecanismos de seguridad en la capa física que resulten efectivos para evitar el llamado "escenario de control fantasma", una situación en la que el dron puede ser controlado por un operador no autorizado mediante el empleo de perturbaciones o señales falsas de navegación.

b) El enlace de datos, cuya finalidad es servir de vehículo para las comunicaciones relacionadas con la misión. Tomando como ejemplo la cobertura ubicua asistida por drones que se muestra en la Figura 2-13, los enlaces de datos mantenidos por los drones deben admitir los siguientes modos de comunicación:

    1) Enlace directo dron-terminal de usuario, con el objetivo de descongestionar la estación base o bien para complementar un mal funcionamiento de esta.
    2) Red de retorno inalámbrica dron-BS y dron-enlace terrestre.
    3) Red de retorno inalámbrica dron-dron.

Profundizando en el detalle de este tipo de redes, los autores realizaron un análisis de las características del canal de comunicación, distinguiendo entre el canal entre el dron y los elementos en tierra y el canal entre drones. Una de las principales preocupaciones que detallaron, es el hecho de que los canales entre los drones y los elementos terrestres pueden darse en escenarios afectados por obstáculos que generen bloqueos, como pueden ser edificios, el terreno o la propia estructura del dron, siendo este último un factor crítico que puede generar apantallamientos durante tiempos prolongados en las maniobras de la aeronave. Asimismo, reflejaron que un patrón de vuelo a baja altitud puede generar efectos como interferencias multi-trayecto, dispersión, difracción, etc. Respecto del canal de comunicación entre aeronaves, los autores reseñaron que, si bien se pueden dar desvanecimientos por multi-trayecto (generados por rebotes en el suelo), el impacto en el canal resulta mínimo, ya que predomina la componente LoS. Sí que en este caso puede tener una influencia relevante el efecto Doppler, debido las mayores velocidades relativas entre las aeronaves en vuelo. Con estas características de canal, los autores plantearon la posibilidad de emplear comunicaciones de onda milimétrica -mmWave- (en torno a los 26 GHz), que permitirían un enlace inalámbrico de muy alta capacidad entre las aeronaves.

Para los autores de este estudio, el establecimiento de este tipo de arquitectura de red requiere tener en cuenta tres aspectos clave de diseño: el plan de despliegue, la demanda de energía en el despliegue y las comunicaciones entrada múltiple-salida múltiple (MIMO) en drones.

Respecto del plan de despliegue, destacaron la necesidad de efectuar un planeamiento meticuloso de las rutas a seguir por las aeronaves, con la finalidad de optimizar la eficiencia de los enlaces. Este es considerado un reto particularmente complejo, ya que, por un lado, el número de variables posibles a determinar para definir la ruta óptima es infinito, al mismo tiempo que las rutas también deben definirse en función de una serie de limitaciones como la autonomía del dron, calidad del enlace, accidentes del terreno, prevención de colisiones, etc. Para mitigar este problema, propusieron un perfil de trayectoria basado en una secuencia de estados de posición y velocidad de los drones en un sistema de coordenadas tridimensionales. Cabe reseñar que este modelo se simplifica cuando se emplean drones de ala rotatoria, que pueden mantenerse en un perfil de vuelo estacionario como una estación base estática en el área en que deben aportar la cobertura, siendo necesario definir su patrón de vuelo únicamente para el tránsito entre los puntos de origen y destino. El principal reto de este modelo es determinar las separaciones óptimas entre drones, así como su nivel de vuelo (altitud), para conseguir la máxima cobertura.

Tratando el segundo aspecto clave de diseño, la limitación en la disponibilidad de energía del dron, los autores consideraron la gestión del problema desde dos enfoques, por una parte, el empleo de mecanismos efectivos de despliegue basados en la gestión de la energía con planes definidos de recarga o repostaje, sin que estos supongan una interrupción en las comunicaciones, y por otra una "gestión inteligente" de la energía, para acometer la operación con el menor consumo posible. Una de las soluciones planteadas en el trabajo pasaba por considerar las interacciones entre varios drones en un enjambre, de tal modo que sólo uno de ellos abandone su zona de cobertura durante las operaciones de recarga, asumiendo el resto de aeronaves su carga de trabajo. El plan de recarga se puede establecer de una forma dinámica, dedicando un mayor esfuerzo en momentos en los que se espera una menor demanda de tráfico, contemplando el empleo de tecnologías de recarga como la energía solar, u otras técnicas de transferencia inalámbrica de energía, como la recarga mediante haces láser (Figura 2-14),

para tratar de optimizar las operaciones de repostaje. Y es que la eficiencia energética es considerada el aspecto fundamental en la planificación del despliegue. Para conseguirla es necesario alcanzar eficiencia en la energía dedicada a la movilidad y eficiencia en la energía necesaria para las comunicaciones, siendo necesario en ambos casos no sólo una buena planificación, sino también un control dinámico para mantener el mínimo consumo imprescindible para el cumplimiento de la misión.

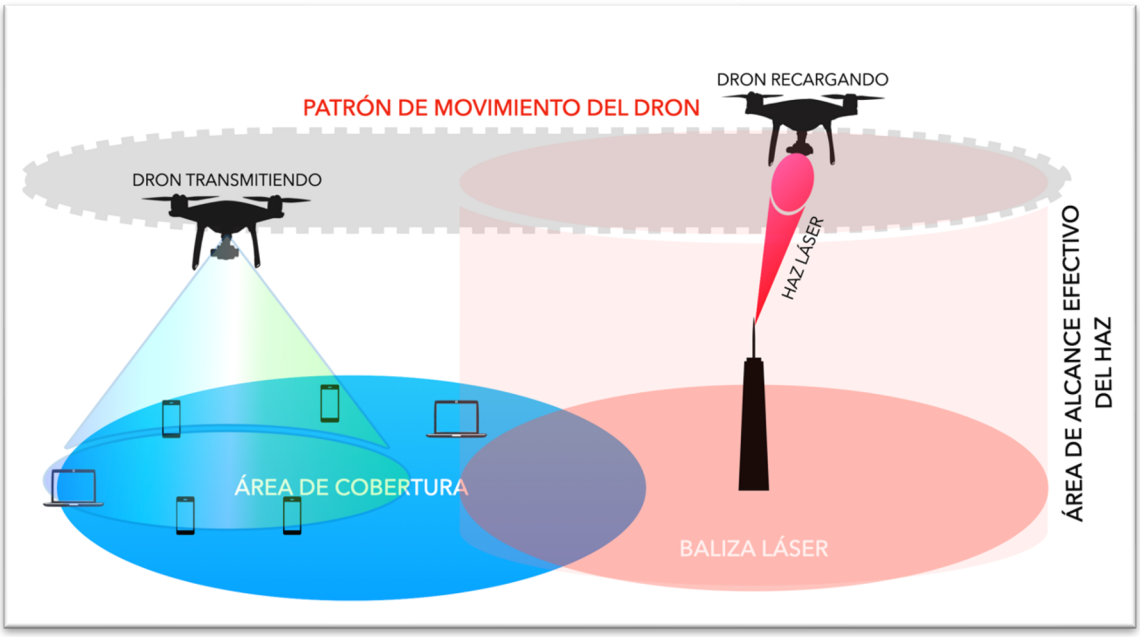


Figura 2-14 Modelo de sistema de recarga de drones mediante haces láser

Respecto del tercer aspecto clave, el empleo de la tecnología MIMO, los autores consideraron que, si bien su aplicación permite mejorar tanto la eficiencia espectral como el rendimiento, existen diversos factores relacionados con su modo de funcionamiento que complican su utilización en drones (por ejemplo, un mayor consumo de energía, necesidad de información precisa del estado del canal, complejidad en el procesado de la señal, etc.). No obstante, destacaron el gran potencial de esta tecnología, especialmente por cuanto puede aportar la ganancia de multiplexación espacial, que, si bien se limita principalmente por el reducido número de caminos que puede adoptar la señal en condiciones LoS, un adecuado diseño de la separación de las antenas permitiría mitigar esta limitación, tal y como se detalla en [23]. También reseñaron otro modo de implementación de MIMO en drones, consistente en el empleo de ondas milimétricas. El empleo de este tipo de ondas permite disponer de un mayor ancho de banda, lo que redunda en un impacto positivo en la ganancia de la matriz MIMO, sin embargo, la señal también se verá afectada negativamente por una mayor atenuación, derivada de las características de propagación de las ondas milimétricas. No obstante, el patrón de navegación de los drones puede generar complicaciones a la hora de alinear los haces de transmisión y recepción, lo cual debe ser tenido en cuenta antes de decidir la aplicación de esta tecnología.

2.3.2 Arquitectura multi-nivel de drones para redes celulares 5G y más allá de 5G

En 2017, S. Sekander y otros autores publicaron el trabajo [24], en el cual, se efectuó un estudio sobre la viabilidad de emplear una arquitectura multinivel (con operación en varios niveles de altitud) de drones en redes celulares 5G. En este trabajo se investigó el impacto de diferentes entornos urbanos

para el cálculo de la proporción óptima de drones a emplear en una red de drones de varios niveles. Los autores, resaltan los siguientes beneficios del empleo de la tecnología de drones:

- Pueden operar en entornos peligrosos o de desastre.
- Pueden reubicarse fácil y rápidamente en función de la necesidad.
- Pueden mejorar la cobertura gracias a mejores conexiones LoS con los usuarios en tierra.
- Se puede ajustar su altitud para mejorar la calidad de servicio (QoS) en función de la intensidad de tráfico, tasa de datos requerida, efectos de bloqueo o interferencia, etc.

Para los autores, este tipo de redes son de especial interés en escenarios en los que por cuestiones de eficiencia económica o impedimentos físicos no es posible instalar una nueva infraestructura de comunicaciones de forma inmediata, como el caso de escenarios con desastres o estaciones base terrestres dañadas o sobrecargadas (éste último escenario es un ejemplo representativo de las grandes concentraciones de usuarios en eventos de afluencia masiva de público, como pueden ser eventos deportivos, conciertos, manifestaciones, congresos, etc.).

En su análisis, consideraron una distinción entre diferentes tipos de drones según sus limitaciones de tamaño, peso y potencia (SWAP), las cuales impactan directamente en la altitud operativa máxima, la comunicación, la cobertura, el cálculo y las capacidades de resistencia de las aeronaves.

Por ejemplo, las plataformas de baja altitud (LAP) tienen poca potencia y capacidad tanto en términos de carga útil (normalmente hasta 7 kilogramos) como de autonomía (hasta 40 minutos dependiendo de la capacidad de la batería, el patrón de movilidad y peso de la carga útil). En estas condiciones, los LAP tienen una capacidad muy limitada de carga, probablemente insuficiente para el transporte de equipos LTE cuyo peso ronda los 10 kilogramos. En comparación con los LAP, las plataformas de mayor altitud (HAP) permiten mayor cobertura y autonomía.

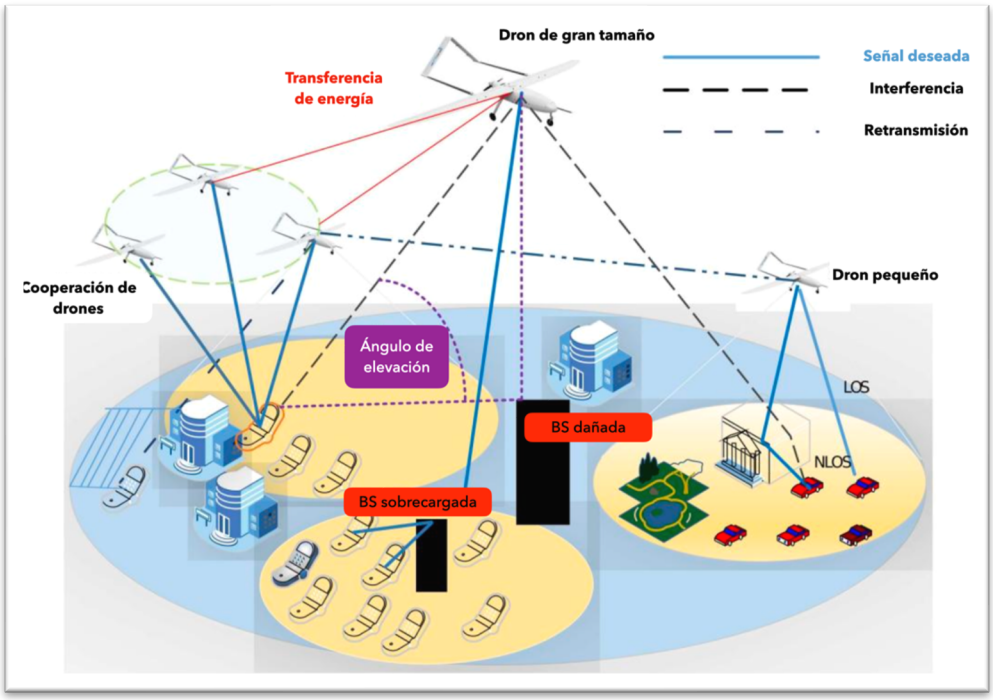


Figura 2-15 Red celular multinivel asistida por drones [24]

En la Figura 2-15, los autores plantean un escenario en que se emplean drones en diferentes niveles para suplir el déficit de cobertura ocasionado por problemas de sobrecarga y mal funcionamiento en las estaciones base terrestres. En su estudio, reseñaron que la demanda creciente de tráfico de datos en las redes celulares, podría conllevar situaciones de sobrecarga de la red. Para solventar este problema, plantearon la conveniencia de la implementación de drones con criterio de oportunidad en función del estado de carga de la red. Entre los aspectos clave que definieron para esta implementación, destacaron la movilidad de las celdas de drones, el estudio de las características de los canales aire-tierra y un sistema de control del tráfico aéreo confiable y eficiente, necesario para el despliegue seguro de las mallas de drones.

En este trabajo, los autores identificaron los siguientes desafíos a la hora de implementar una red de estas características:

- Planificación de la ruta y control de movilidad: Al igual que en [22], los autores consideran un aspecto clave para el despliegue la definición de las rutas óptimas de vuelo de los drones, con el objetivo de garantizar la seguridad, conseguir un uso eficiente de la energía y alcanzar el máximo rendimiento en el canal de comunicación.
- Altitud de operación: Las restricciones SWAP de los drones generalmente condicionarán la altitud operativa del aparato, que en determinados escenarios podría resultar desfavorable. En este sentido es necesario balancear las pérdidas por espacio libre que se producen a mayor altitud de vuelo, con las pérdidas por multitrayecto y apantallamiento que se producen en perfiles de vuelo bajos. Este balance se podría compensar, según los autores, empleando drones en distintos niveles de vuelo.
- Interferencias: La coexistencia de varios drones en uno o diferentes niveles, puede generar interferencias en la comunicación entre un dron y el elemento en tierra con el que esté enlazado. Además, estas interferencias se agravan si se produce efecto Doppler por movimiento de los drones. Para mitigar este problema, los autores plantearon el empleo de diferentes márgenes de frecuencia en función del nivel de vuelo de cada aparato, o una coordinación automatizada entre drones basada en enlaces "backhaul" de alta capacidad.
- Consumo energético de los drones: Se remarca la necesidad de optimizar la eficiencia energética de la red celular asistida por drones, especialmente en lo relacionado con el consumo energético por movilidad de la aeronave, así como la densidad de tráfico asumida por cada dron.
- Autonomía limitada: Este se destaca como uno de los problemas de mayor relevancia. En las plataformas de baja altitud, las condiciones SWAP ocasionan una limitación para la carga de combustible o baterías. Las plataformas HAP, al contar con mayores dimensiones estructurales, pueden dotarse de mayores baterías o depósitos de combustible, e incluso sistemas de carga solar. Una alternativa interesante planteada por los autores es la transferencia inalámbrica de energía desde plataformas HAP a aeronaves LAP. En cualquier caso, los patrones de vuelo y los planes de recarga se deben diseñar para minimizar el impacto de la limitación de autonomía de los aparatos.
- Coste, seguridad y falta de regulación: Según citan los autores, otro importante desafío es el coste del equipamiento y el mantenimiento de los drones, que será mayor cuanto más sofisticado sea el equipo. Respecto de la seguridad y regulación, existen serios condicionantes sobre diferentes regulaciones en la gestión del espacio aéreo en función del perfil de vuelo, el lugar de despliegue, etc.

En su trabajo, los autores añadieron una revisión de las técnicas de vanguardia basada en estudios de investigación que daban soporte a su proyecto. Entre estos se detallan los siguientes:

- Optimización de altitud para drones: basado en el trabajo de A. Al-Hourani y otros [25], en el que analizan la altitud óptima de vuelo de un dron para maximizar la cobertura, teniendo en

cuenta aspectos como los parámetros estadísticos del entorno y las pérdidas por espacio libre, apantallamiento y dispersión.

- Optimización de la ubicación de los drones en el espacio tridimensional: basado en los trabajos de diferentes autores [26], [27], [28] y [29], en los que se definen algoritmos para la ubicación de los drones con la finalidad de alcanzar la calidad en los enlaces más eficientes, así como el rendimiento de los drones en perfiles estático y dinámico.
- Optimización de la densidad de drones: basado en los trabajos [30], en el que se calcula la densidad óptima de drones para lograr el máximo rendimiento de los canales de comunicación, [31] , donde los autores consideran una red de varios drones equipados con antenas direccionales, optimizando el rendimiento de la cobertura en función de la potencia de transmisión mínima requerida para cada dron, y [32], donde se detalla la ubicación tridimensional de los drones para dar cobertura en áreas donde es requerida.
- Descarga del tráfico y asociación de usuarios: basado en los trabajos [33] y [34], en los que se estudia el problema de la descarga de tráfico en una red heterogénea de drones y en una red donde las ubicaciones de los drones están predeterminadas.
- Minimización de energía de los drones: Basado en el trabajo [34], en el que los autores investigan la minimización de potencia en una red de drones en función de la altitud y posicionamiento de estos dentro de unas celdas determinadas.

Como conclusión a este trabajo, los autores determinaron la idoneidad de incorporar drones en diferentes niveles para mejorar la eficiencia espectral de las comunicaciones, identificando algunas consideraciones pendientes de desarrollo, como la optimización de despliegues de drones heterogéneos, el uso de bandas de espectro sin licencia (mmWave y óptica de espacio libre) y modelos de canal aire tierra que incorporen datos ambientales y de entorno para lograr un mejor rendimiento.

2.3.3 Estudio sobre comunicaciones 5G de onda milimétrica para redes inalámbricas asistidas por drones.

En 2019 L. Zhang y otros autores publicaron un estudio sobre comunicaciones 5G de onda milimétrica para redes inalámbricas asistidas por UAVs [50]. En su planteamiento, consideraron que las bandas del espectro de microondas utilizadas por los sistemas heredados no son suficientes para lograr una mejora relevante en la velocidad de datos para aplicaciones emergentes, proponiendo como solución potencial el empleo de ancho de banda desocupado disponible en la banda de frecuencias de onda milimétrica. En su trabajo, establecieron una clasificación sobre las diferentes aplicaciones que pueden desempeñar los drones como elemento integral de las redes de comunicaciones, bien actuando de forma individual, o bien de forma conjunta. Dicha clasificación se resume en la Tabla 2-1.

ENFOQUE DE APLICACIÓN	PAPEL DEL DRON	FUNCIÓN ALCANZADA	REFERENCIA
Redes inalámbricas celulares	BS aérea	Acceso y cobertura ubicua	[24], [51], [52] y [53]
Redes de retransmisión inalámbricas	Relé aéreo	Conectividad inalámbrica	[54], [55]
Redes aire-tierra multinivel	BS aérea	Mayor eficiencia espectral en enlace descendente	[56], [30] y [57]
Redes aéreas ad hoc	Enjambre de drones	Eficiencia de uso mejorada de drones individuales	[58] y [59]
Redes de sensores inalámbricos	Colector de datos aéreo	Colección y diseminación de datos	[60]

Comunicaciones Vehículo a todo (V2X)	Relé/acceso radio aéreo	Aplicaciones V2X	[61]
IoT	Dispositivo IoT aéreo	Aplicaciones inteligentes	[62]
Malla aérea	Relé aéreo	Redes de drones totalmente conectadas	[63]
Redes alimentadas de forma inalámbrica	Fuente de energía aérea	Transferencia de energía inalámbrica	[64]
Redes inalámbricas asistidas por caché	Caché aéreo	Carga de backhaul inalámbrico reducida	[65]
Edge Computing móvil (MEC)	Servidor MEC aéreo	Despliegue dinámico de fronteras	[66] y [67]
Redes de acceso radio en la nube	Caché/acceso radio aéreo	Distribución de caché y conectividad inalámbrica	[68]
Redes de emergencia	BS/relé aéreo	Cobertura y retransmisión de la información	[69]
Comunicaciones D2D	Fuente de energía aérea	Transferencia de energía inalámbrica	[31]
Redes radio cognitivas	Dispositivo cognitivo aéreo	Acceso a espectro dinámico	[70]

Tabla 2-1 Aplicaciones de drones en redes de comunicaciones [50]

Según detallaron en su trabajo, la longitud de onda mucho más corta de las ondas milimétricas, permite el diseño de circuitos y antenas más pequeños, con lo que se pueden construir conjuntos de antenas formadoras de haces con muchas antenas integradas en un chip diminuto, lo que supone una ventaja para la instalación en drones con limitación en su carga útil. Además, según los autores, el haz de onda milimétrica, por sus características de direccionalidad y tamaño (haz estrecho), permite reducir las interferencias y aumenta la seguridad. Por el contrario, la absorción atmosférica es perjudicial en las comunicaciones con este tipo de onda para redes inalámbricas asistidas por UAV, lo que restringe el alcance de la transmisión, requiriendo perfiles de vuelo bajos y proximidad de los relés de enlace. Del mismo modo, los autores plantearon un problema adicional, consistente en el bloqueo producido al encontrarse las ondas milimétricas con obstáculos físicos en su trayectoria de propagación. En la Figura 2-16 se representa en concepto de red asistida por drones planteado por los autores.

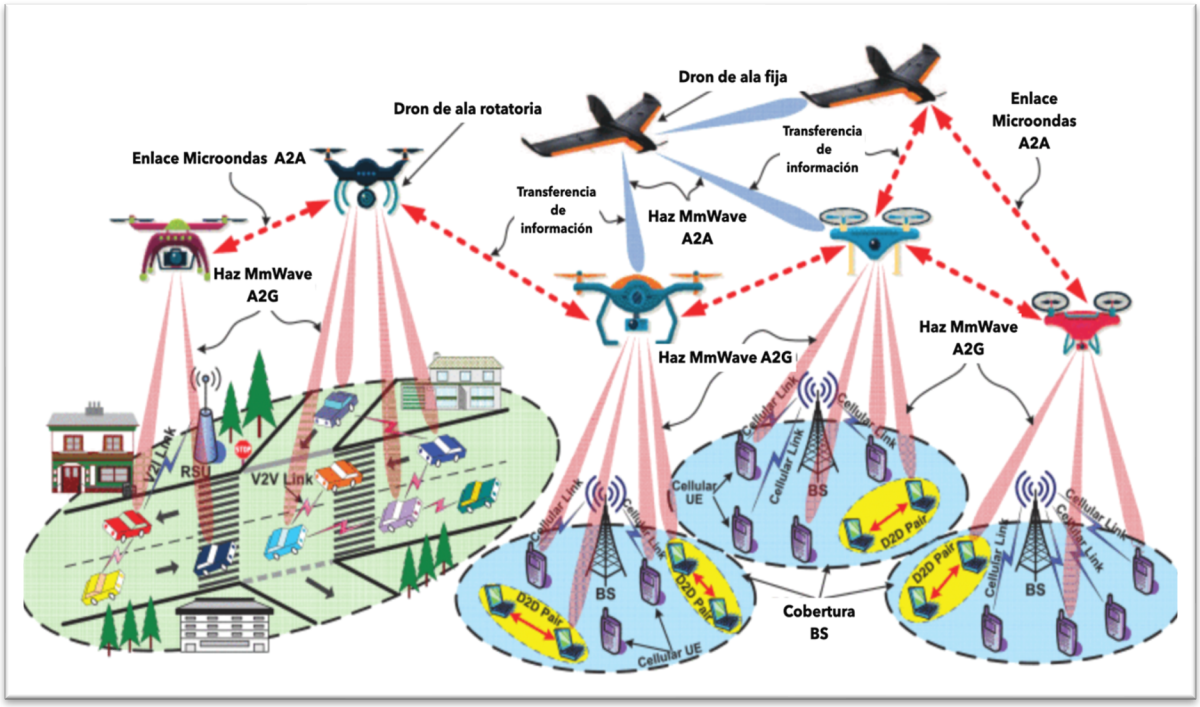


Figura 2-16 Concepto de comunicaciones por onda milimétrica asistidas por drones [50]

En su estudio, los investigadores plantearon las siguientes ventajas e inconvenientes relacionados con el empleo de ondas milimétricas en las comunicaciones 5G.

Ventajas:

- Mayor disponibilidad de ancho de banda: Debido a la gran cantidad de espectro disponible.
- Longitud de onda más corta. Al emplear frecuencias más altas, la longitud de onda es más corta, por lo que se puede transmitir una mayor cantidad de datos por unidad de tiempo. Al tratar con longitudes de onda menores, los componentes y antenas requieren dimensiones más reducidas. De este modo, al disponer de antenas más pequeñas, se pueden integrar conjuntos de antenas en el mismo espacio que requerirían las antenas para frecuencias más bajas, lo que permite multiplicar la ganancia del sistema.
- Haz estrecho: con la integración de tecnología MIMO, se pueden formar haces estrechos altamente direccionales para las antenas de onda milimétrica, lo cual permite enviar y recibir cantidades mayores de energía para compensar la atenuación de propagación y la pérdida de espacio libre de la señal.
- Mayor seguridad: los haces estrechos de señales de ondas milimétricas permiten emisiones altamente direccionales y mayores resoluciones, por lo que un posible intruso necesitaría estar dentro del haz de cobertura para poder interceptar la señal.

Inconvenientes:

- Pérdida por espacio libre: es la atenuación de la señal al viajar entre dos puntos de dos antenas a través del espacio libre. Cuanto mayor es la frecuencia, mayor es esta atenuación, por lo que en las ondas milimétricas es un factor a considerar.
- Atenuación atmosférica: Se produce por la absorción de energía de las moléculas atmosféricas en forma de oxígeno, vapor de agua, lluvia, etc. Este tipo de atenuación aumenta significativamente cuanto mayor sea la frecuencia.
- Efecto de bloqueo: las bandas de ondas milimétricas no son lo suficientemente robustas y el rendimiento del sistema se degrada significativamente debido a la sensibilidad de los enlaces a bloqueos producidos al enfrentarse con obstáculos físicos.

- Desalineación del haz: el haz estrecho de las señales de onda milimétrica supone una dificultad a la hora de mantener la alineación con los elementos terrestres, especialmente si estos están en movimiento.

Otro de los ejes de su estudio fue la definición de aplicaciones potenciales del empleo de las ondas milimétricas en comunicaciones asistidas por drones, de las que destacaron las siguientes:

- Acceso aéreo a través de enlaces Aire-Tierra/Tierra-Aire: Se puede facilitar el acceso a la red para los terminales en tierra en un área de interés concreto, a través de enlaces directos con los drones, o para la retransmisión directa de datos entre dos puntos (Figura 2-17).
- Relé aéreo e interconexión mediante enlaces Aire-Aire: Se pueden emplear los drones como repetidores para dar conectividad a la red a los terminales terrestres sin enlaces de transmisión directos. En este escenario, el terminal en tierra envía sus datos a un primer dron mediante el acceso Tierra-Aire, y posteriormente estos se transmiten en varios saltos a otros drones hasta el punto de destino.
- Backhaul aéreo a través de enlaces Aire-Tierra/Tierra-Aire: Para establecer backhaul directo inalámbrico entre las BS y la red central.

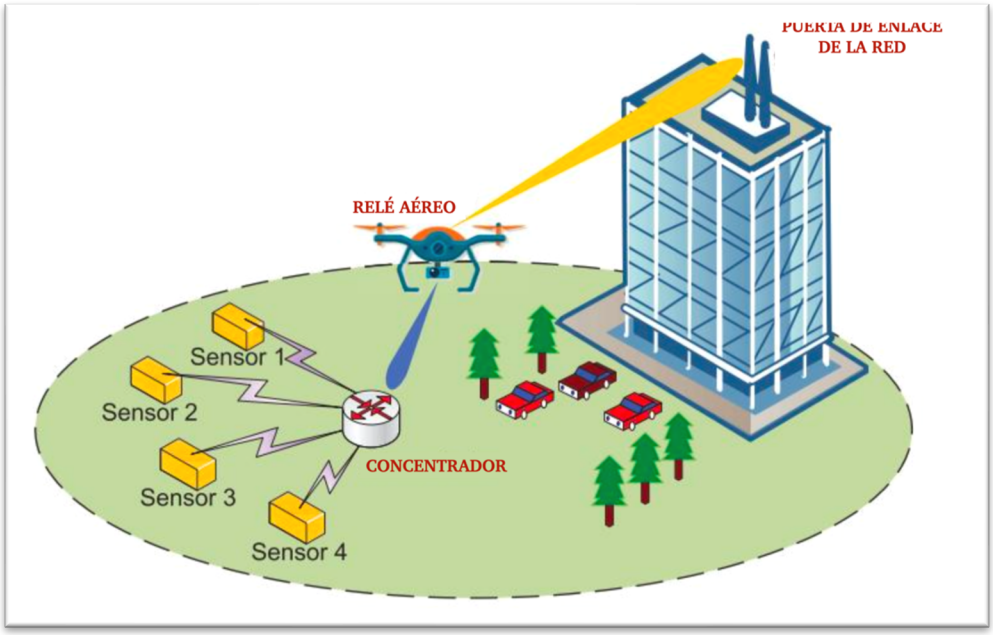


Figura 2-17 Modelo de retransmisión de datos en una red de sensores inalámbricos [50]

En su trabajo, además desarrollaron conceptos muy interesantes como el diseño de arrays de antenas, forma, seguimiento y optimización del haz, modelado del canal de propagación, estimación y seguimiento del canal, detección y mitigación de bloqueos, optimización de la posición y trayectoria de los drones y control del despliegue de aeronaves.

Finalmente, plantearon una serie de desafíos que requieren una atención especial:

- Alineación y cambio del haz: Tal y como se ha detallado, el haz estrecho de ondas milimétricas y la movilidad de los terminales generan la necesidad de mantener una alineación continua de los haces. Una buena alineación en combinación con la direccionalidad del haz contribuye significativamente al aumento de ganancia de la señal, lo cual permite compensar la pérdida de espacio libre y la atenuación atmosférica. Los autores propusieron técnicas avanzadas para la alineación de los haces, como seguimiento de haces, estimación precisa del canal, búsqueda de

haces, etc. Además, contemplaron la necesidad de una solución para la conmutación de haces cuando la alineación por barrido de haz no es eficaz.

- Asignación dinámica de recursos: Los usuarios en tierra y los drones mantienen patrones de movimiento continuo. A priori, será más eficiente efectuar una programación de recursos de la red en función de la instantánea en el escenario dinámico, es decir, que la asignación de recursos se vaya adaptando de manera continua a la situación en el área de cobertura.
- Optimización de capas transversales para enrutamiento y asignación de recursos distribuidos: El empleo de enjambres de drones formando una malla permite una mayor escalabilidad y una mejor tolerancia a fallos que utilizar drones individuales o conjuntos de estos gestionados de forma individual. Este tipo de arquitectura permite la interconexión de la malla a través de enlaces Aire-Aire. No obstante, este modelo requiere el estudio del problema de enrutamiento en la capa de red.
- Optimización conjunta de Beamforming 3D y modulación direccional: La modulación direccional (MD) se utiliza como técnica de seguridad del lado del transmisor para proyectar la señal confidencial modulada en la dirección deseada. En el escenario planteado por los autores, al formar los haces 3D con un conjunto de antenas multihaz, el dron hace la función de transmisor MD para proporcionar comunicaciones seguras en la capa física para los receptores legítimos en tierra. Según estos, solo se puede transmitir un haz de ondas milimétricas generado por el transmisor MD en la dirección deseada. El desafío consiste en extender el número de receptores legítimos mediante la proyección de múltiples señales moduladas a lo largo de varias direcciones espaciales simultáneamente.

Como consecuencia de los planteamientos analizados, los autores identificaron una serie de líneas potenciales de investigación que podrían ser necesarias para la explotación óptima de la tecnología:

- Transferencia inalámbrica de energía asistida por drones: En el escenario considerado, por un lado, los drones se emplean como transmisores de energía móviles para entregar energía de forma inalámbrica hacia los UE terrestres. Por otro lado, los drones pueden recargarse con otra fuente de energía, por ejemplo, la energía solar mediante la instalación de paneles solares en el fuselaje, o mediante transferencia de energía inalámbrica habilitada por RF realizada por otros drones o emisores fijos en tierra.
- Comunicaciones de onda milimétrica para redes de acceso aéreo: según los autores, para lograr la superconectividad ubicua 3D a escala global, la arquitectura de red terrestre tradicional debe estar completamente integrada con varias plataformas no terrestres, incluidos vehículos aéreos no tripulados, globos, aeronaves, vehículos terrestres y satélites de muy baja órbita (VLEO). La integración de estas plataformas ha impulsado sustancialmente la perspectiva de implementar las redes de acceso aéreo (AAN) al extender la escala espacial de los drones en altitudes bajas a altitudes más altas. Se necesita más investigación en esta dirección para abordar los desafíos técnicos clave, como, modelos de canales 3D, optimización de altitud híbrida, despliegue de múltiples plataformas aéreas heterogéneas, control de acceso cooperativo, etc.
- Virtualización de funciones de red (NFV) para redes inalámbricas asistidas por drones: De acuerdo con los autores, la NFV proporciona un paradigma eficiente para optimizar la utilidad de los recursos de red al virtualizar los servicios de red. Dicha virtualización permite implementar nuevos servicios y un escalado elástico de la red, que conllevan menores costes de mantenimiento y mayor flexibilidad, escalabilidad y rentabilidad.
- Integración de aplicaciones de gran alcance para redes inalámbricas asistidas por drones centradas en el usuario: Tal y como citan los autores, los logros actuales al vincular las redes inalámbricas asistidas por drones se centran principalmente en servicios y aplicaciones convencionales. Con la irrupción del Internet de todo (IoE), se ha producido una proliferación de aplicaciones emergentes, como, realidad extendida móvil sin límites (XR), conducción autónoma, háptica, etc. Se requiere una mayor investigación para abordar el problema de cómo integrar estas aplicaciones de largo alcance con comunicaciones para redes inalámbricas asistidas por drones centradas en el usuario.

- Machine learning: Según los investigadores, las redes inalámbricas asistidas por drones no solo tienen un potencial sustancial para lograr una mayor eficiencia de transmisión con cobertura y capacidad mejoradas, sino que también admiten una amplia variedad de aplicaciones inalámbricas 5G y B5G. Se espera que estas aplicaciones innovadoras den rienda suelta a un ecosistema IoT masivo con un enorme rendimiento de datos, alto ancho de banda inalámbrico, velocidades súper rápidas, latencia ultrabaja y mayor conectividad.

2.3.4 Drones en las redes B5G/6G como estaciones base voladoras

En el año 2022, G. Amponis y otros autores publicaron el trabajo [35], en el que se desarrolla una investigación sobre la posibilidad de emplear drones como estaciones base aéreas para redes celulares de próxima generación (5G y más allá de 5G). En él, trataron el empleo de redes voladoras ad hoc (FANET), como grupos de repetidores desplegables para la extensión bajo demanda de la conectividad de banda ancha, analizando aspectos clave de este tipo de arquitectura, como movilidad, eficiencia de traspaso, disponibilidad de energía, posicionamiento óptimo y localización de nodos, así como las respectivas optimizaciones multiobjetivo. Desde dicho análisis trataron de identificar mejoras para nuevas aplicaciones de la red celular existente, con una mejor eficiencia operativa.

Según los autores, las características de seguridad mejorada, mejor calidad del servicio (QoS), reducción de la latencia y mayores tasas de datos, tienen una relación directa con el empleo de frecuencias más altas, que a su vez exigen más potencia e introducen dependencias y mayor demanda a nivel de hardware y software. Las comunicaciones de onda milimétrica (mmWave), la tecnología de "entrada múltiple-salida múltiple" (MIMO) y el acceso múltiple no ortogonal (NOMA) son algunos ejemplos de las novedades tecnológicas incluidas en el 5G tratadas en su trabajo.

Los autores consideran que las comunicaciones celulares de próxima generación (-NG- incluyendo el 5G y tecnologías futuras, como el 6G, ya en desarrollo) suponen un catalizador para la implementación de tecnologías basadas en IoT de próxima generación (NG-IoT), al permitir un aumento muy relevante del número de dispositivos interconectados, con elevadas tasas de transferencia de datos en tiempo casi real. Para ellos, las FANET son un elemento crucial para la implementación de esta tecnología, por su capacidad de proveer conexiones de banda ancha en áreas aisladas.

Reseñando el trabajo desarrollado en [36], los autores prevén que gracias a la flexibilidad y movilidad de las estaciones base de comunicaciones aerotransportadas, estas constituyan un componente fundamental de la arquitectura celular NG. La mayor facilidad para establecer un enlace LoS directo con usuarios terrestres y otras infraestructuras celulares puede ayudar a las redes NG a formular enlaces más confiables y ofrecer mayores áreas de cobertura, inmunes a las pérdidas de espacio libre o a las inducidas por reflexión.

Citan los autores que estas ventajas de las BS aerotransportadas combinadas con los requisitos establecidos por las próximas redes NG han llevado a la investigación de un espectro de redes de comunicación específicas para celulares y habilitadas para drones, a saber, las características del canal aire-tierra, el posicionamiento óptimo de los drones (ya sea como relevos únicos o partes de un enjambre), así como optimizaciones de trayectoria de vuelo.

En su trabajo, los autores analizan en profundidad el empleo de drones como estaciones base. Para ellos, citando los resultados del estudio [37], los drones representan una solución de bajo coste que permite extender de manera eficiente la conectividad NG en áreas que normalmente son inalcanzables a través de la infraestructura tradicional o momentáneamente inalcanzables debido, por ejemplo, a interrupciones de la red. Del mismo modo, consideran que las estaciones base de drones pueden aumentar la calidad de una conexión entre un nodo remoto y una estación base celular determinada.

Asimismo, consideran que estas estaciones base suponen una solución atractiva para proporcionar conectividad inalámbrica temporal confiable, de banda ancha y de área extensa durante eventos especiales o escenarios hostiles, a saber, desastres naturales [38], agricultura inteligente, eventos deportivos y muchos más escenarios donde la instalación permanente de la infraestructura celular es innecesaria y conlleva una inversión económica considerable. También citan los autores, que tal y como se afirma en [39], se espera que las BS de drones en altitudes elevadas proporcionen conectividad rentable y a largo plazo para las zonas rurales. La integración de BS de drones con otras técnicas de capa física como ondas milimétricas y MIMO masivo, así como radios cognitivas, supone una solución prometedora para proporcionar servicios intensivos en datos. El posicionamiento óptimo de las BS de drones es uno de los desafíos críticos que se deben superar en escenarios de despliegue denso. Para ese propósito, el posicionamiento óptimo de las BS de drones es un problema que debe abordarse.

Según citan los autores, la ventaja de utilizar drones como estaciones base respecto de las bases terrestres convencionales, radica en su capacidad para reajustar dinámicamente su altitud y su facilidad para establecer enlaces LoS directos con los elementos en tierra. Gracias a sus características de movilidad y adaptación en altitud, las estaciones base de drones pueden respaldar de manera efectiva los sistemas celulares existentes, proporcionando capacidad adicional y ampliando la cobertura a áreas de difícil acceso. Dada la gran variedad de tipos de drones existentes, los autores presentan la siguiente tabla comparativa con los tres tipos principales:

TIPO DE DRON	VUELO ESTACIONARIO (SÍ/NO)	DURACIÓN TÍPICA DE LA BATERÍA (min)	VELOCIDAD TÍPICA (m/s)	CARGA ÚTIL TÍPICA (kg)
Multirrotor	SÍ	<=15	<=11	<=2,5
Ala Fija	NO	<=60	<=22	<=14
Globo	SÍ	<=60	<=2,5	<=4,5

Tabla 2-2 Comparativa de tipos de drones [35]

Como base para el desarrollo de su estudio, los autores presentaron los siguientes casos de uso:

- CASO DE USO 1 - Mejoras en la cobertura y la capacidad de la red terrestre: Plantean este escenario en torno a las mejoras de la red celular terrestre. En este escenario, se supone que los drones con capacidad celular funcionan como proveedores de servicios; los nodos aéreos que funcionan como estaciones base celulares pueden proporcionar mejoras fundamentales a las redes de celdas pequeñas ultradensas. Con respecto a las comunicaciones de onda milimétrica NG, las estaciones base sobre drones pueden establecer con facilidad enlaces LoS con los elementos terrestres. Además, las técnicas basadas en MIMO permiten formular una red celular mejorada completamente nueva y dinámicamente reconfigurable, capaz de proporcionar servicios de alta capacidad. Los autores plantean como ejemplo el establecimiento de enlaces de alto rendimiento en escenarios de emergencia y de primera respuesta, en los que la infraestructura existente está dañada o es inadecuada; en este caso, las estaciones base aéreas se pueden utilizar para aliviar la carga en la red celular terrestre o proporcionar conectividad de banda ancha donde no había infraestructura disponible. En la Figura 2-18, representan un ejemplo de aplicación para mejorar la cobertura terrestre bajo demanda en un incendio forestal, donde no existe una cobertura adecuada debido a la deficiente LoS entre la antena 5G y la zona de despliegue de los bomberos. Tal y como se representa en la ilustración, el despliegue temporal de una BS de drones permite mitigar el problema, estableciendo un enlace temporal pero directo y confiable entre el usuario final y la infraestructura celular. Más allá, este concepto es aplicable a cualquier escenario en el que no exista una infraestructura o esta sea deficiente, no sólo para situaciones de emergencia, sino para cualquier necesidad de oportunidad bajo demanda, como pueden ser zonas aisladas o áreas remotas.

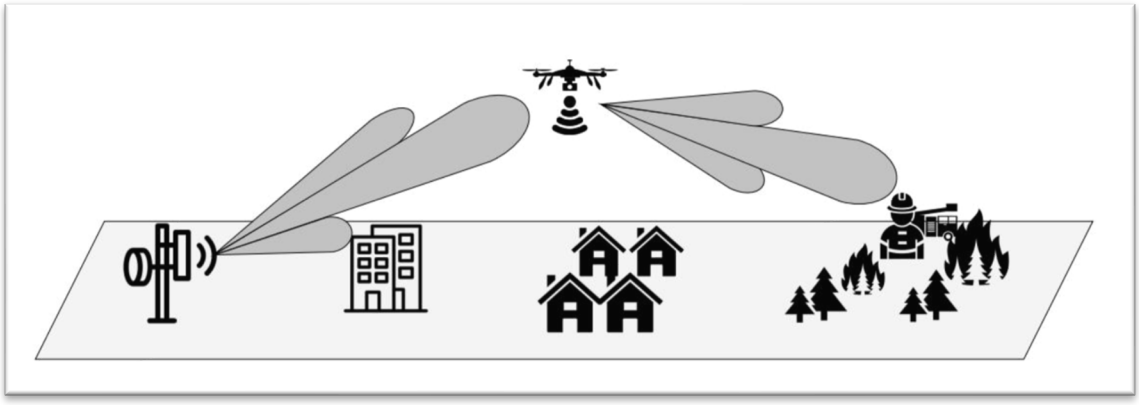


Figura 2-18 Mejora de la cobertura de la red terrestre [35]

- CASO DE USO 2 - Redes móviles ad hoc asistidas por BS aéreas: En este caso de uso, los autores plantean el empleo de drones para la creación de redes móviles ad hoc (MANET), dada su movilidad y su capacidad para establecer enlaces LoS. Reseñan que, el empleo de este tipo de BS permite mejorar la calidad de los enlaces entre dispositivos (D2D), al mitigar los problemas causados por las interferencias generadas por un mayor número de retransmisiones. En la Figura 2-19 se representa un escenario en el que una serie de BS aéreas montadas sobre drones dan servicio a las comunicaciones entre vehículos. Reseñan que las BS aerotransportadas ofrecen un nuevo espectro de posibilidades de redes para aumentar la confiabilidad y la conectividad de última milla en las redes disponibles. Destacan un enfoque particular relativo a la generación de redes ad hoc móviles a partir de la agrupación de terminales de usuario terrestres en enjambres, de tal modo que las BS aéreas establezcan el enlace con un único elemento terrestre que funcione como baliza o "representante" del clúster terrestre, recayendo sobre este la responsabilidad de transmisión de los mensajes, así como de proporcionar servicios de puerta de enlace a todos los nodos del clúster. Este enfoque se puede optimizar aún más explotando las características de movilidad de los drones.

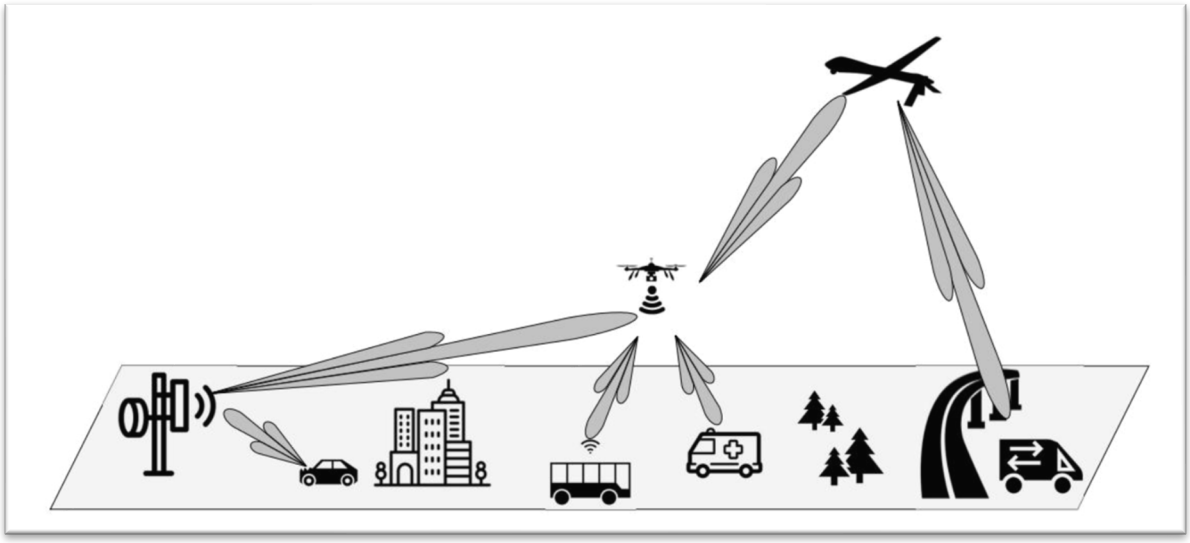


Figura 2-19 Comunicaciones vehiculares asistidas por drones [56]

- CASO DE USO 3 - Formación de haces asistida por BS aéreas: En este tercer caso de uso, los autores plantean que los drones sean interpretados como elementos de antena aerotransportados, que pueden utilizarse de forma conjunta para realizar comunicaciones masivas. Esta técnica de formación de haces con drones permite reducir las interferencias entre celdas al formar haces individuales para cubrir los segmentos de cuadrícula que requieren servicio. Tal y como citan, las soluciones de formación de haces tridimensionales muestran un gran potencial al ofrecer un rendimiento del sistema significativamente mayor, al mismo tiempo que admiten una mayor cantidad de instancias de elementos conectados, abordando de manera efectiva los problemas asociados con la alta densidad de red en entornos masificados. Reseñan los autores las conclusiones del trabajo [61], destacando que las BS aéreas habilitadas para celulares pueden ser facilitadores clave de redes celulares de alta densidad al admitir la mitigación y gestión de interferencias entre celdas mediante la formación de haces en los planos de canal horizontal y vertical. Así, en la Figura 2-20 se muestra la capacidad de mitigación de interferencias entre celdas mediante el empleo de drones como BS aéreas.

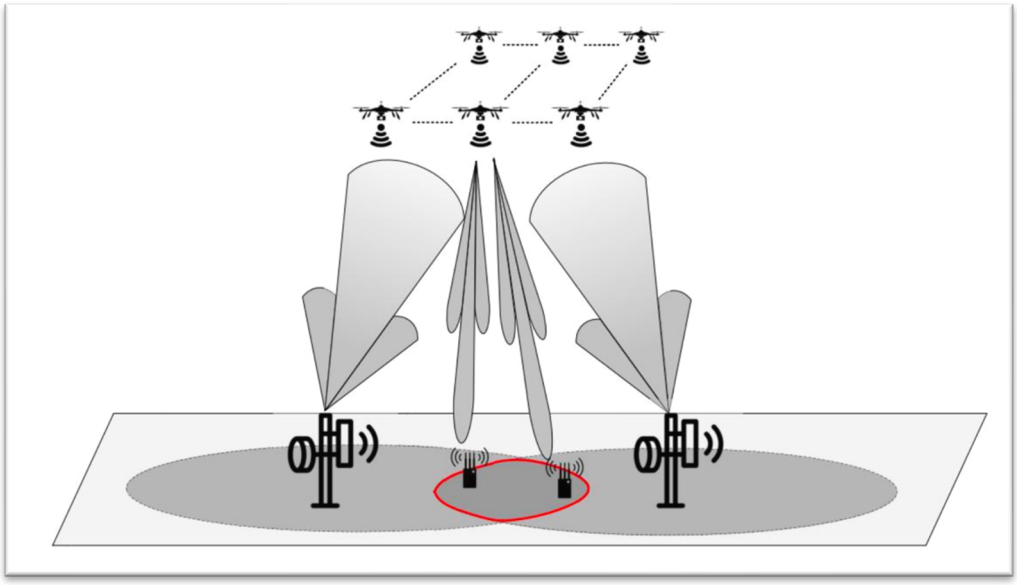


Figura 2-20 Mitigación de interferencias mediante formación de haces con drones [56]

Los autores consideran que, en comparación con los sistemas de conjuntos de antenas convencionales (anclados al suelo), un conjunto de antenas equipadas en drones ofrece las siguientes ventajas:

- El número de elementos de antena no está limitado por restricciones espaciales (si bien una limitación en este sentido podría determinarse por el número de drones a emplear en la red y la cantidad de elementos de antena que pudiera soportar cada aeronave).
- La ganancia de formación de haces se puede aumentar a demanda ajustando la posición de los drones.
- La movilidad de los drones permite un direccionamiento eficaz del haz en prácticamente cualquier dirección en las tres dimensiones.
- La utilización de enjambres de drones en una formación, puede brindar la capacidad de formar una matriz de antena masiva que puede generar haces virtuales adaptados a cualquier forma.
- La optimización de energía puede aproximar la confiabilidad a los niveles de los nodos terrestres.

En relación con este caso de uso, los autores citan [62], donde se efectuó un análisis exhaustivo del uso potencial de la dispersión basada en enjambres de drones para la formación de haces adaptativos para retransmitir de manera eficiente flujos de datos a ubicaciones que normalmente no están dentro del alcance de comunicación o LoS del nodo de transmisión. La metodología propuesta de formación de haces basada en enjambres gira en torno a un transmisor terrestre que irradia hacia un enjambre de drones, donde cada "elemento de antena" (dron individual) lleva un cable resonante de media longitud de onda que funciona como un objeto de dispersión, que a su vez funciona como una antena reflectora que irradia la señal transmitida por la BS. En dicho trabajo, los autores además destacaron la ventaja de utilizar cuadricópteros como elementos de la matriz para la formación de haces, ya que el cambio de fase de la señal se produce mediante el ajuste de la posición de los drones, de modo que no se requiere un circuito de cambio de fase adicional. El algoritmo de optimización de los investigadores pudo formar un haz compuesto por dos lóbulos principales, con un bajo nivel de lóbulos laterales, que podía orientarse en la dirección deseada para diferentes patrones.

Revisados los casos de uso reseñados por los autores en [56], éstos también plantean los siguientes desafíos relacionados con el empleo de drones como BS aéreas:

- DESAFÍO 1 - Disponibilidad de energía: Al igual que en otros estudios realizados por diferentes investigadores, una de las principales limitaciones del empleo de drones como BS es la disponibilidad de energía. El consumo energético de los drones que funcionan como relés está asociado principalmente a:

  • Energía consumida para la propulsión y sustentación;

  • Energía consumida para comunicación y procesamiento a bordo;

  Dado que la energía de propulsión es significativamente mayor que la energía de la carga útil, el consumo dedicado a unas comunicaciones energéticamente eficientes no tendrá un impacto relevante en la autonomía. En cualquier caso, los autores reseñan la necesidad de optimizar el consumo energético en todos los aspectos, tanto en cuestiones de movilidad, como en potencia de transmisión.
  Tal y como citan los investigadores, los autores de [63] analizaron sistemas de suministro de energía específicos para drones híbridos que combinan baterías con otros tipos de fuentes de energía (celdas de combustible, celdas solares, supercondensadores, anclaje y recarga en vuelo habilitada por láser).
  En el contexto de suprimir el gasto energético innecesario, se reseña el trabajo llevado a cabo en [64], en el que como citan los autores, se propuso una solución para eliminar el movimiento redundante de BS aéreas. El marco de ahorro de energía que propusieron se basa en derivar nuevas posiciones para las estaciones base considerando la movilidad general y los patrones de movimiento de los elementos conectados desde tierra. Los autores consideraron que existen escenarios de movilidad de usuarios, en los que no es necesario reposicionar la BS, siempre y cuando la QoS se mantengan en unos márgenes aceptables.
  Otra solución planteada son las técnicas de anclaje. Se cita como modelo el trabajo desarrollado en [65], en el cual los investigadores propusieron un nuevo sistema de retransmisión móvil basado en drones, en el que se emplea una baliza láser para cargar de forma inalámbrica la batería de la BS aérea.
  Consideran los autores que este enfoque de conservación de energía y aumento del tiempo de vuelo es de gran interés, ya que potencialmente puede ayudar a resolver el dilema de elegir entre movilidad y disponibilidad de energía.

- DESAFÍO 2 - Movilidad y planificación de rutas: En este caso, los autores plantean la gran importancia de la capacidad de movilidad de los nodos y la planificación de rutas en todo el enjambre para la retransmisión efectiva de comunicaciones celulares para los tres escenarios examinados (cobertura de red terrestre y móvil y mejoras de capacidad y aplicaciones de formación de haces). Reseñan a su vez la complejidad de definir el posicionamiento óptimo de las BS aéreas, que depende de un espectro completo de parámetros muy volátiles, entre los que incluyen:
    - El número de BS aéreas que participan en la retransmisión.
    - El tipo de interfaces entre estos nodos participantes (retransmisión entre drones, formación de conjuntos de antenas).
    - La elevación, ángulo, posición y velocidad de cada nodo con respecto al respectivo nodo terrestre.
    - Disponibilidad de energía, consumo esperado y tiempo de actividad estimado para nuevos enlaces.
    - La topología del terreno y posibles bloqueos en LoS.

- DESAFÍO 3 - Posicionamiento optimo: Para la definición de este desafío, los autores se apoyan en los resultados de [66], donde se efectuó un análisis del posicionamiento óptimo de las BS aéreas junto con la asignación de potencia de transmisión, la agrupación de usuarios y las redes NOMA-NG. En dicho estudio, y tal y como reflejan los autores, se buscaba obtener un medio para agrupar de manera óptima los elementos terrestres y posicionar las BS aéreas para garantizar una QoS superior a un umbral mínimo aceptable, empleando la mínima potencia de transmisión requerida para establecer el enlace. Con ese método de optimización se podría aumentar significativamente la autonomía de las BS aéreas, mejorando por tanto la duración de la cobertura en un área terrestre determinada.
  Además, citan el trabajo [67], en el que los autores plantearon la mejora de la conectividad en el caso de implementaciones de redes celulares ad hoc bajo demanda. Para ello, los investigadores consideraron el posicionamiento óptimo de los drones en despliegues de enjambre para mitigar las interferencias y ofrecer servicios de extensión de comunicación bajo demanda a una cantidad sustancial de terminales.
  Citan los autores otra solución relacionada con el mismo trabajo, para la cual los investigadores se centraron en la QoS ofrecida, proponiendo un algoritmo capaz de, por un lado, asociar los terminales de usuario conectados con la BS aérea más adecuada, y por otro, la búsqueda de posiciones óptimas para todas las BS aéreas.
  Finalmente, reseñan la técnica de uso de múltiples cabezales de radio montados en drones, desarrollada en el trabajo [68], en el que los autores diseñaron un mecanismo de posicionamiento de drones óptimo para abordar el requisito de minimización de la potencia de transmisión. Los investigadores dividieron el problema de optimización multiobjetivo en dos distintos, uno por cada eje de movimiento:
    - Posicionamiento horizontal de drones (minimización de la suma de distancias).
    - Posicionamiento vertical de drones (maximización de cobertura).

  El algoritmo resultante ofrecía la potencia de transmisión mínima requerida manteniendo un umbral de rendimiento aceptable predefinido en términos de conectividad del usuario final.

- DESAFÍO 4 – Seguridad y QoS: Esta es otra preocupación relevante planteada por los autores. Según citan, el advenimiento de nuevos casos de uso sensibles al tiempo está aumentando exponencialmente la dependencia de comunicaciones de baja latencia y casi en tiempo real, lo que conlleva una necesidad de mantener la red estable, garantizando un umbral mínimo de QoS. La seguridad y la QoS en las redes celulares NG están estrechamente relacionadas, ya que están asociadas con las interfaces establecidas entre los nodos de retransmisión y el núcleo celular (es decir, el núcleo 5G). El uso de drones como medio de extensión de la conectividad plantea

una amenaza considerable para la seguridad. Los drones, al igual que los terminales de usuario, están directamente expuestos (tanto físicamente como desde el punto de vista de la red) a los usuarios finales. Por tanto, es necesario crear una capa de abstracción para asegurar QoS y seguridad, la cual debe contemplar funciones de seguridad adicionales y mecanismos de orquestación que mejoren la arquitectura de las comunicaciones celulares.

Conclusiones sobre el trabajo: El estudio presentado por los investigadores en este trabajo, se puede considerar como uno de los más completos y modernos, pues recoge el estado del arte de los desarrollos más recientes relacionados con el empleo de tecnología 5G y B5G en estaciones base aéreas para extender la cobertura de acceso celular a áreas en las que, por condiciones de difícil accesibilidad, aislamiento o déficit o inexistencia de infraestructura de telecomunicaciones, no es posible materializar la conectividad mediante técnicas convencionales de infraestructura terrestre. Se plantean en él tres casos de uso que son de aplicación para el estudio de redes de comunicaciones militares intra-teatro mediante el empleo de drones. Es de especial interés el planteamiento de los desafíos, y particularmente lo relacionado con el consumo energético, la seguridad y la planificación de despliegue, que suponen elementos críticos en el proceso de planeamiento de la arquitectura CIS en un despliegue militar.

Asimismo, el estudio sienta la base para futuras investigaciones relacionadas con despliegues predictivos automatizados, en los que, mediante técnicas de inteligencia artificial, un enjambre de drones pueda gestionarse de forma autónoma tanto en el posicionamiento de las aeronaves (bien por cuestiones de eficiencia y optimización, o bien por seguridad de la aeronavegabilidad), como en los parámetros de transmisión, formación de lóbulos, patrones de reemplazo o recarga, seguridad de las comunicaciones, etc.

Una de las conclusiones más interesantes es el hecho de que el empleo de los drones como estaciones base aéreas se puede representar como una función directa de localización y eficacia óptima de posicionamiento relativo, de tal modo que a priori, se podría definir un algoritmo de ubicación tridimensional para los drones, que permitiese garantizar la cobertura al mayor número de elementos conectados desde tierra con el menor consumo energético, empleando sólo la potencia de transmisión imprescindible.

Como reto de planteamiento para desarrollos futuros, los autores consideran que se debe profundizar en el estudio de asignaciones óptimas de anchos de banda, teniendo en cuenta además el impacto de condiciones de alta movilidad de terminales que puedan conectarse a la red, así como la mitigación de interferencias en tiempo real entre diferentes BS aéreas.

2.3.5 Otros estudios de interés en el campo de las redes celulares con estaciones base aéreas.

- En el año 2014, J. Košmerl y A. Vilhar, presentaron el trabajo [69] sobre optimización del emplazamiento de estaciones base en redes inalámbricas para comunicaciones de emergencia. En dicho trabajo plantearon un método para situar las estaciones base de redes inalámbricas en operaciones de asistencia ante catástrofes, estableciendo una distinción entre estaciones base terrestres y estaciones base aéreas de baja altitud (LAP). El objetivo del método planteado era maximizar el área de cobertura empleando el menor número posible de estaciones base, para lo que era necesario tener en cuenta tanto la demanda de ancho de banda en cada sector del área a cubrir, como el radio de cobertura de las plataformas aéreas. Para ello desarrollaron un algoritmo ligero, cuyos principios pudieran ser utilizados para el planeamiento de infraestructuras de comunicaciones inalámbricas en casos de catástrofes reales. Una de las conclusiones de su trabajo fue que, en un escenario típico, el empleo de plataformas aéreas no debería superar el 40% del total de las estaciones bases de la red, ya que por encima de estos parámetros se podrían producir interferencias que

degradarían la calidad del servicio. Además, dada la relevancia para la operatividad de la red que supondrían esas posibles interferencias, su modelo recomendaba no ubicar LAPs en el centro de áreas críticas, sino en los bordes, de tal modo que se podrían cubrir los vacíos de cobertura sin generar interferencias que degradasen la calidad de la señal donde más necesaria fuese.

En el momento en que se desarrolló este trabajo, los estudios sobre redes inalámbricas apoyadas por estaciones base aéreas se encontraban en una fase embrionaria y aún no se habían planteado las capacidades aumentadas que ofrecen tecnologías como 5G, MIMO, NOMA, Beamforming, que en estudios posteriores han demostrado solventar el problema de las interferencias al emplear LAPs.

- En 2019, H. Dai y otros autores publicaron el trabajo [70], en el que desarrollaron un algoritmo para determinar el posicionamiento conjunto y la potencia de transmisión para cada uno de los drones en una malla de estaciones base aéreas, tomando como referencia un escenario en el que las infraestructuras de comunicaciones terrestres no estuvieran disponibles. La premisa de su estudio se basaba en que inicialmente, los drones no disponen de información relacionada con los terminales terrestres, por lo que requieren efectuar un patrón de vuelo para recopilar información hasta determinar su posicionamiento óptimo. Para resolver el problema, los autores aprovecharon la teoría de juegos, proponiendo un algoritmo de aprendizaje robusto y distribuido para recopilar información útil de los terminales terrestres y así optimizar la asignación de energía y movilidad de cada uno de los drones.

- En 2020, I. Shayea y otros autores publicaron el trabajo [71] sobre desafíos clave relacionados con la gestión de la movilidad en redes 5G. Según reflejaron en su investigación, estiman que en los sistemas de comunicaciones móviles que irrumpirán en un futuro próximo, los desarrolladores deberán afrontar una serie de factores que generarán dificultades para la movilidad, como el empleo de bandas de frecuencias de ondas milimétricas, conectividad dual, agregación de portadora, crecimiento masivo de los dispositivos conectados y la aparición de drones como estaciones base aéreas, entre otros. Respecto de este último factor, efectuaron una revisión de las capacidades potenciales del empleo de drones como estaciones base, en el sentido de introducir mejoras considerables en la conectividad de áreas remotas, reflejando no obstante la necesidad de comunicaciones estables para el control y la gestión de los aparatos en vuelo. En este sentido, identificaron un posible desafío relacionado con el proceso de transferencia de BS desde los equipos de usuario, debido principalmente al gradiente de movimiento entre los equipos terrestres y las estaciones voladoras, que pueden llegar a ocasionar degradaciones significativas en la calidad de la señal, forzando la transferencia a otra celda con mejor calidad. Ese proceso de transferencia, a juicio de los autores puede ocasionar interrupciones en las comunicaciones con mayor frecuencia de la habitual en BS terrestres.

3 APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA 5G MEDIANTE DRONES EN EL ESCENARIO PLANTEADO

3.1 Situación de partida

3.1.1 La arquitectura C2

Tal y como se ha planteado en el apartado primero de este trabajo, un contingente militar desplegado para una operación expedicionaria en un escenario alejado de su país y donde no dispone de una infraestructura local adecuada para establecer su capacidad C2, necesita dotarse de medios propios para garantizar el intercambio seguro y a tiempo casi real de información. Esta capacidad C2, precisa la integración de una gran variedad de sistemas que garanticen el mayor flujo de información posible al mando para mantener un "situational awareness"[15] muy preciso desde el primer momento del despliegue.

En el escenario planteado, las fuerzas militares deben establecer un "Puesto de Mando" (CP), que tendrá características diferentes en función de si el contingente despliega al completo sobre el teatro de operaciones, o si sólo una parte de este despliega desde un buque:

- Despliegue completo (Figura 3-1): Puesto de Mando en tierra. Todos los servicios C2 alimentan al CP. Al no existir infraestructuras en el terreno, el CP despliega servidores para todas las aplicaciones de C2, así como los equipos para la transmisión y recepción de la información. Debe incluir estaciones de retransmisión para dar servicio a unidades que se encuentran aisladas. Puede incluir enlaces satélite convencionales y enlaces UHF-SATCOM, si bien, debe tener capacidad para disponer de todos los servicios sin contar con estos enlaces.



Figura 3-1 Despliegue completo del contingente

- Despliegue parcial (Figura 3-2): Puesto de Mando embarcado. Se establece un "Puesto de Mando Avanzado" (ACP) en tierra. El buque de mando cuenta con sistemas de comunicaciones de alta capacidad, incluyendo comunicaciones por satélite. Los servicios C2 desplegados tienen mayores limitaciones y pueden requerir de un tiempo considerable para estar operativos desde el

[15] Es la "consciencia de la situación" que nos permite responder a las preguntas: ¿Qué está ocurriendo? ¿Por qué ocurre? ¿Qué va a ocurrir a continuación? ¿Qué debo hacer?

momento en que se inicia su desembarco. El ACP establece el mando control a nivel local en el segmento terrestre del escenario y establece enlace con el CP embarcado.

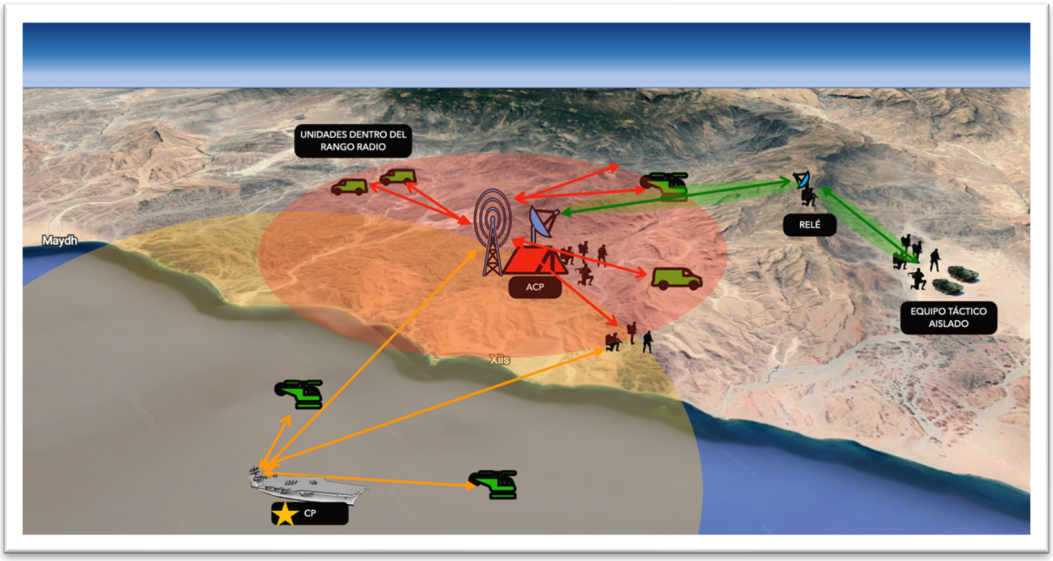


Figura 3-2 Despliegue parcial del contingente

Si bien las figuras representan modelos simplificados de una arquitectura C2, para ambos modelos de despliegue se requiere definir un plan complejo que contemple el rango de todos los enlaces, la extensión de la cobertura, emplazamientos de estaciones retransmisoras (relés), limitaciones de cualquier índole, planes de contingencia y emergencia en caso de pérdida o no disponibilidad de los enlaces, etc.

Toda la arquitectura C2 se debe apoyar en las capacidades de comunicaciones del contingente. En la Tabla 3-1 se detallan los sistemas en los que se podrán apoyar los diferentes enlaces:

SISTEMA	SERVICIO	OBSERVACIONES
Satélite dedicado militar (SECOMSAT)	Voz y Datos – Cifrado. Alta capacidad. Sin limitaciones de alcance (dentro de la huella de cobertura).	Disponibilidad limitada por huellas de cobertura, capacidad de los satélites o averías en equipamiento.
Satélite comercial (COMSATCOM)	Voz y Datos – Securizado. Alta capacidad. Sin limitaciones de alcance (dentro de la huella de cobertura).	Generalmente como sistema alternativo. Menor nivel de seguridad que SECOMSAT.
Enlace UHF-SATCOM	Voz y Datos - Cifrado. Capacidad limitada. Sin limitaciones de alcance (dentro de la huella de cobertura).	Dependiente de proveedores del servicio. España no cuenta en la actualidad con este tipo de satélites.
Radioenlaces microondas	Datos. Alta capacidad. Sólo LoS.	Consistentes en estaciones fijas que se pueden desplegar en tierra.
Radioenlace táctico UHF	Voz y Datos. Cifrado o claro. Baja capacidad. Corto alcance (LoS).	Esencial para las comunicaciones seguras de voz con elementos desplegados.
Radioenlace táctico VHF	Voz. Alcance medio.	Esencial en comunicaciones de seguridad y enlaces con aeronaves.
Radioenlace táctico HF	Voz y Datos. Cifrado o claro. Muy baja capacidad. Alto alcance.	Esencial en enlaces BLoS.
Enlaces WIFI	Voz y Datos. Cifrado o claro. Capacidad limitada. Muy corto alcance.	Para servicios locales, redes de moral y bienestar y puntualmente enlaces tácticos.

Telefonía celular	Voz y Datos. Seguridad básica. Capacidad limitada. Alcance limitado a disponibilidad servicio.	Solo para comunicaciones no seguras, principalmente enlaces con elementos ajenos al contingente.

Tabla 3-1 Sistemas de comunicaciones disponibles para C2

Como se detalla en las observaciones de la Tabla 3-1, existen limitaciones para cada tipo de enlace, siendo especialmente relevantes las relacionadas con los sistemas de alta capacidad. La creciente demanda de ancho de banda relacionada con la implementación de servicios que negocian cantidades masivas de datos en tiempo real, indica que, en caso de producirse una interrupción o falta de disponibilidad en los sistemas de alta capacidad, la capacidad C2 se puede ver limitada de forma crítica.

3.1.2 Servicios C2

En cualquier operación militar, la garantía de un adecuado C2 pasa por la integración óptima de todos los servicios que aporten información al ciclo de decisión. Para comprender el impacto que suponen las limitaciones de los sistemas C2 descritas en el punto anterior, sobre el perfil de operaciones expedicionarias contempladas en este trabajo, es necesario identificar los servicios esenciales integrados en un despliegue de este tipo:

SERVICIO	DEMANDA DE RECURSOS	IMPACTO OPERATIVO	OBSERVACIONES
Comunicaciones de voz en claro y cifrado	Muy baja	Crítico	Las comunicaciones de voz son críticas en la conducción de operaciones militares.
Mensajería formateada	Muy baja	Muy alto	Medio de intercambio de información y órdenes en texto.
Correo electrónico	Media	Bajo	Intercambio de información ampliada y documentos.
Data link	Baja	Crítico	Sistemas de intercambio de datos tácticos entre unidades.
Common Operational Picture (COP)	Alta	Alto	Esencial para el control en tiempo real de las unidades desplegadas y de otros actores en el teatro.
Acceso a servidores de ficheros	Alta	Medio	Acceso a documentación operativa, manuales, procedimientos, etc.
Navegación WEB en sistemas de mando y control	Alta	Medio	Acceso a documentos y aplicaciones relacionados con la operación.
Aplicaciones de sistemas de mando y control	Muy alta	Medio	Aplicaciones para alimentar el planeamiento operativo, gestión de servicios logísticos, operaciones, etc.
Sistemas de control específicos	Media	Alto	Aplicaciones específicas a nivel táctico para la conducción de las operaciones (Sistema de Control de Embarcaciones, TALOS, TAK, etc.).
Videoconferencia	Alta	Bajo	Reuniones telemáticas incluyendo presentaciones.
Streaming de video de drones	Muy alta	Alto	Esencial para la vigilancia y descubierta en zonas inaccesibles.
Streaming de video de equipos tácticos.	Muy alta	Alto	Seguimiento de las operaciones de equipos tácticos en tiempo real.
Telemedicina	Alta	Alto	Muy importante en escenarios de catástrofes con necesidades sanitarias.

Tabla 3-2 Servicios C2 típicos en operaciones expedicionarias

Como se puede deducir de los detalles en la Tabla 3-2, si bien los servicios que tienen un impacto operativo crítico o muy alto para el C2, generan una baja demanda de recursos, la mayoría de los servicios requieren sistemas de alta capacidad para garantizar el intercambio fluido de información. Teniendo en cuenta que los únicos sistemas que permiten unas tasas de transferencia de datos de alta capacidad son los satélites, la mayoría de los servicios C2 están condicionados a la disponibilidad de dichos sistemas. Como detalle adicional, la capacidad de transferencia de los enlaces satelitales, tiene dos limitaciones relevantes: la tasa de transferencia, que como norma general no será superior a 10Mbps, y la latencia, que en condiciones normales supera los 500 ms. Bajo estas circunstancias, se considera que la capacidad de los sistemas es insuficiente para garantizar la gestión óptima de todos los servicios, imposibilitando además la integración de nuevos servicios y aplicaciones de gran utilidad en el teatro de operaciones, como pueden ser sensores biométricos de las tropas o sensores de estado de vehículos y equipos, sistemas automatizados de control logístico, empleo de minidrones y de otros vehículos terrestres y acuáticos no tripulados, etc.

3.2 Integración de comunicaciones 5G asistidas por drones en la arquitectura C2

La tecnología de comunicaciones móviles de quinta generación permite una tasa de transferencia hasta 1.000 veces superior a la velocidad media que ofrecen los enlaces satélite militares disponibles en la actualidad (10 Gbps vs 10 Mbps), con una latencia 500 veces menor (1 ms vs 500 ms). La integración de dicha capacidad en la arquitectura C2 planteada en este estudio, supondría, no solo eliminar las limitaciones de capacidad para la gestión de los servicios de mando y control, sino mejorar de una manera muy significativa su funcionamiento, al mismo tiempo que permitiría implementar nuevos servicios y aplicaciones como los descritos en el apartado anterior, los cuales contribuirían de forma muy relevante al “situational awareness”.

Para evitar la dependencia de infraestructuras no propias, el contingente debe disponer de equipos transceptores 5G que permitan establecer una red privada dedicada en exclusiva al C2. A su vez, el empleo de drones con esta capacidad permite establecer patrones de cobertura dinámicos y a demanda, solventando las limitaciones relativas a zonas aisladas o de difícil accesibilidad, así como aquellas ocasionadas por obstáculos físicos o de cualquier índole.

La ventaja de emplear estaciones base 5G radica en el empleo de frecuencias en la banda de 3 hasta 300 GHz, lo que permite utilizar antenas diminutas que constituyen células pequeñas, las cuales se pueden instalar en pequeñas aeronaves. La modulación OFDM se efectúa en canales entre 100 y 800 MHz, a diferencia de los 20 MHz empleados en 4G, lo que permite una densidad muy elevada de usuarios por cada celda (incluso más de 20.000, 100 veces superior a la capacidad 4G) [72]. El ancho de banda disponible para el 5G es considerablemente amplio, por lo que se debe discriminar entre el empleo de frecuencias bajas, medias o altas (ondas milimétricas). Las más elevadas permitirán mayores transferencias de datos por unidad de tiempo, empleando antenas más reducidas, si bien es necesario considerar que el alcance será más limitado que para frecuencias de la parte baja de la banda.

El fabricante de componentes electrónicos “Essentra Components” establece la siguiente clasificación en su página web [72]:

Banda alta 5G (ondas milimétricas)	• Ofrece las frecuencias más altas, desde 24 GHz hasta alrededor de 100 GHz • Corto alcance: las altas frecuencias no pueden viajar a través de obstáculos • Cobertura limitada de ondas milimétricas • Requiere más infraestructura celular
Banda media de 5G	• Funciona dentro del rango de 2-6 GHz • Diseñado como una capa de capacidad

	• Tasas máximas de datos en cientos de Mbps
Banda baja de 5G	• Funciona por debajo de 2 GHz • Permite una amplia cobertura • Utiliza el espectro en uso hoy en día para 4G LTE

Tabla 3-3 Clasificación de bandas de frecuencia en 5G [72]

Por las características físicas del teatro de operaciones en los escenarios planteados, el tipo de aeronave que cumpliría con los requisitos idóneos para la integración en la arquitectura de red, sería un dron de ala rotatoria. Como ya se ha detallado en este trabajo, este tipo de drones no requieren de una pista de rodadura para despegar, por lo que pueden desplegarse de forma inmediata desde cualquier plataforma, ya sea terrestre o naval. Si bien su autonomía es más limitada que la de los drones de ala fija, generalmente se trata de equipos más económicos, por lo que se puede disponer de terminales de reserva para diseñar planes de reabastecimiento. Además, su capacidad de vuelo estacionario permite su ubicación fija en un emplazamiento concreto para facilitar cobertura de datos a demanda, optimizando el empleo de haces direccionales.

Para mitigar las limitaciones de autonomía por energía, se podrían considerar técnicas como las comentadas en los capítulos previos, de intercambio de baterías o "battery swap" (Figura 3-3), recarga inalámbrica aérea mediante haces láser, o bien otras como el empleo de drones "atados" o "filoguiados", que se pueden mantener enlazados a una fuente de energía terrestre que les transmite la electricidad a través de un cable umbilical. Evidentemente, esta última opción limita considerablemente la movilidad y el alcance del dron, pero podría ser una solución interesante para drones que deben desplegarse como relés en una zona de vuelo estacionaria.

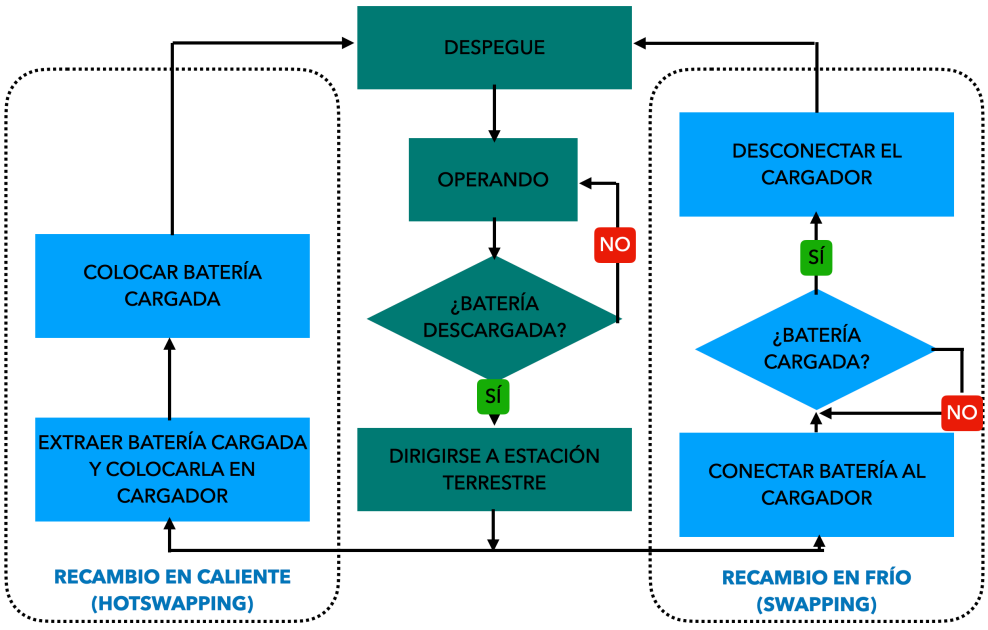


Figura 3-3 Proceso de intercambio de baterías [73]

Además de estas opciones, existen otras soluciones como los drones con pilas de combustible y los drones híbridos, que utilizan las baterías convencionales en combinación con otras fuentes de energía, como combustibles líquidos, placas solares o supercondensadores.

En la actualidad, existen diferentes soluciones de drones en el mercado que podrían cumplir con los requisitos necesarios para el empleo como soporte de estación base aérea. El objetivo es contar con una aeronave que permita disponer de una carga útil suficiente para albergar el conjunto transceptor, es decir, el módulo transmisor, la electrónica de control de la red, las antenas para el enlace con los elementos en tierra y con otros drones o estaciones base terrestres y la fuente de alimentación para suministrar energía al conjunto, ofreciendo una autonomía de vuelo suficientemente amplia para garantizar la eficacia del sistema. De entre las diferentes opciones disponibles en el mercado, el fabricante de drones "Aerovironment" oferta un amplio catálogo de aeronaves no tripuladas para uso eminentemente militar, con una gran variedad de características y capacidades [73]. Dentro de este catálogo, presentan el modelo "VAPOR 55 MX" (Figura 3-4), un dron de ala rotatoria eléctrico de alrededor de 25 kg de peso, con un rotor principal de 2,2 metros de diámetro, hasta 32 km de alcance, 75 minutos de autonomía en navegación y 60 minutos en estacionario, y con una capacidad de carga de hasta 10kg. Este dron presenta por tanto unas características adecuadas para su empleo como estación base aérea con capacidad de vuelo estacionario.



Figura 3-4 Dron "VAPOR 55 MX" de "Aerovironment" [74]

Si fuera necesario disponer de mayor capacidad de proyección con mayores autonomías y mayores capacidades de carga útil, existen otras soluciones similares, dotadas con propulsores alimentados por fuel, como el modelo "CAMCOPTER S-100" del fabricante austriaco "Schiebel" (Figura 3-5), que está diseñado para desplegar desde cualquier superficie, incluida una plataforma naval, con una autonomía superior a 6 horas de vuelo con carga útil de 34 kg, que puede ampliarse hasta más de 6 horas instalando depósitos de combustible auxiliares.



Figura 3-5 Dron "CAMCOPTER S-100" de "Schiebel" [75]

Respecto de los requisitos de carga útil para el módulo 5G, se debe contemplar una capacidad de carga que habilite el transporte del transceptor, las antenas y la fuente de alimentación del equipo, así como de la electrónica de gestión para la formación de haces. Considerando un transceptor de ondas milimétricas tipo, existen en el mercado soluciones como el modelo "M1740A" del fabricante "Keysight" [76], con un peso de 2,2 Kg y una potencia de funcionamiento de 34 W alimentados a 36V DC. Este equipo puede funcionar en los márgenes de frecuencias de 24.25 a 29.5 GHz, y de 37 a 43.5 GHz, con anchos de banda de 800 MHz y 1.4 GHz respectivamente. Otra solución posible pasa por el empleo de transceptores multibanda, que permiten trabajar de forma simultánea en la banda de ondas milimétricas, así como en la banda media de 5G, por debajo de 6GHz, lo que permite establecer enlaces LoS de corto alcance entre los usuarios en tierra y el transceptor, y al mismo tiempo enlaces de largo alcance entre drones o entre el dron y una estación base terrestre. Un ejemplo de este tipo de equipos es el modelo "S9101A 5G" del fabricante "Keysight" [77], si bien su empleo viene condicionado por una mayor carga útil, que deberá ser tenida en cuenta a la hora de determinar el tipo de dron a emplear.

Se debe considerar que, por motivos de seguridad y control del espacio aéreo, la altitud de vuelo de los drones en el tipo de escenarios planteados no será superior a los 1000 pies de altura sobre la superficie, es decir, por debajo de 300 metros (este es uno de los requisitos derivados de los procedimientos estándar de operación con aeronaves en escenarios tácticos, donde además de establecer los límites y techo de vuelo, se deberán definir los canales de navegación de los drones, rutas de entrada y salida en la zona de operación, etc.). Teniendo en cuenta que el alcance en LoS de los enlaces 5G en la banda de onda milimétrica (26 GHz) pueden alcanzar hasta los 7 Km de distancia [78], tanto el perfil de vuelo como la banda de frecuencias a utilizar, deberían garantizar unas condiciones de enlace dron-usuario óptimas.

Atendiendo a las necesidades de la antena, se debe contar con un dispositivo que pueda operar en los márgenes de frecuencia deseados, con capacidad de MIMO masivo y formación de haces. En el trabajo [77], los autores desarrollan un array de antenas de estas características para funcionamiento en el entorno de los 28 GHz. En su diseño presentan un módulo de antena de 2 puertos, con unas dimensiones muy reducidas (no superiores a 4x5 cm^2) que permiten su instalación en un conjunto transceptor-antena de pequeño tamaño.

La red C2 establecida estará basada en IP, y deberá securizarse con equipos criptográficos en los extremos (CP/ACP y usuarios en tierra) y con el establecimiento de túneles VPN. Además, las técnicas de "Network Slicing" permitirán establecer canales individuales para los diferentes servicios y agregar balances de QoS para los servicios que se consideren críticos.

Con equipamientos de las características descritas, cualquiera de los 2 tipos de drones especificados puede cumplir con el perfil de uso para los escenarios detallados en este trabajo, si bien, determinar el más idóneo requerirá un estudio adicional sobre ventajas e inconvenientes relacionados con la gestión de los recursos (disponibilidad de aeronaves, capacidad de almacenamiento y transporte, requisitos de mantenimiento, etc.).

3.2.1 Arquitectura tipo con drones integrados

La arquitectura de red idónea para cualquiera de los dos perfiles de despliegue considerados en este trabajo (despliegue completo y despegue parcial desde plataforma naval), deberá contar con las siguientes características:

- Robustez: La arquitectura debe poderse definir en un plan de despliegue que permita soportar todos los enlaces necesarios para el funcionamiento óptimo de los servicios requeridos para el cumplimento de la misión. Deberá garantizar unos límites mínimos de calidad de servicio y seguridad.
- Flexibilidad: Debe ser suficientemente flexible para adaptarse a cualquier cambio en la situación que requiera una modificación de la arquitectura, como pueden ser la implementación de nuevos servicios, el establecimiento de nuevas zonas de cobertura no contempladas en el plan de despliegue, balanceo de servicios, etc.
- Escalabilidad: Debe permitir incrementar la capacidad en función de la demanda.
- Interoperabilidad: Debe integrarse en la red de comunicaciones del contingente, operando de modo complementario con el resto de sistemas de la arquitectura que se consideren (radio táctica, enlaces satelitales, etc.).

La arquitectura C2 deberá contemplarse de la forma más explícita posible en el plan de despliegue. En un modelo tipo de arquitectura con drones 5G integrados, se dispondrá de al menos un UAV enlazado con el puesto de mando, y que facilite cobertura 5G a todos los elementos desplegados fuera del radio de alcance de los enlaces de voz y datos del contingente, si bien, uno de los objetivos principales de emplear esta tecnología en las operaciones militares, es facilitar la extensión de la cobertura a aquellas zonas donde por cuestiones físicas no sea posible establecer el enlace con el puesto de mando, por lo que lo ideal será disponer de una cantidad suficiente de drones para formar una malla que permita extender los rangos de cobertura.

En la Figura 3-6 se detalla el estado final para el caso planteado de despliegue completo de un contingente en un teatro de operaciones en el que no se dispone de una infraestructura local propia, pero donde se cuenta con acceso a servicios satélite, capacidad para radio táctica y drones con capacidad 5G. Para alcanzar dicho estado, antes de comenzar el despliegue se debe desarrollar el concepto CIS, es decir, el plan que contempla todos los detalles de la arquitectura de mando y control, donde se incluirán todos los sistemas y servicios a cubrir y el modo en que se utilizarán. Al comienzo del despliegue se establece el puesto de mando "CP", momento en el que no se dispone de arquitectura C2. Una vez establecido el CP, se van implementando los diferentes servicios de forma secuencial, primero estableciendo el enlace satélite, para permitir el enlace del CP con el mando superior, así como el acceso a servicios de red centralizados (sistemas de mando y control, correo electrónico, internet, intranet, etc.). De forma simultánea se establecen los enlaces radio tácticos necesarios para dar servicios básicos a los elementos en tierra. Del mismo modo, tan pronto como sea necesario desplegar equipos tácticos, se procederá a incorporar los drones para prestar el servicio.



Figura 3-6 Arquitectura tipo en despliegue completo del contingente con drones 5G

En el estado final planteado en la Figura 3-6, el CP establece un enlace satélite y un servicio de radio táctica. Asimismo, despliega un dron para dar servicio de alta capacidad a los elementos dentro del rango de cobertura del enlace radio táctico, un segundo dron para dar servicio a las unidades fuera del rango del enlace radio táctico, y un tercer dron para extender la red a un equipo táctico desplegado en una zona aislada desde donde no existe capacidad para establecer otro tipo de enlace. Con esta arquitectura, en caso de producirse una interrupción en el servicio de las comunicaciones satélite o el enlace radio táctico, se garantiza el flujo de información entre todos los elementos desplegados a través de la red 5G.

Para establecer los enlaces, el dron dispone de una carga útil compuesta por un módulo transceptor 5G multibanda y doble módulo de antena (omnidireccional para enlaces de banda media 5G, y directiva con capacidad MIMO masivo y formación de haces para enlaces de onda milimétrica), lo que le permite establecer enlaces de relé con otros drones o estaciones base, así como los enlaces de datos con los elementos terrestres.

En la Figura 3-7 se detalla el estado final para el caso de un contingente que despliega parcialmente desde una plataforma naval, donde permanece el puesto de mando principal. En este modelo, la plataforma a flote mantiene el enlace satélite y sus enlaces radio tácticos y despliega un primer dron en el momento en que comienza el desembarco, con el objetivo de garantizar servicio continuo C2 al puesto de mando avanzado, así como al resto de elementos desplegados. Una vez establecido el puesto de mando avanzado en tierra, continúa la implementación de la arquitectura, con el establecimiento del enlace satélite del ACP y sus enlaces radio tácticos. El dron dedicado al enlace principal para servicio 5G entre el CP y el ACP, proporciona a su vez conexión a los elementos dentro de su rango de alcance. Según se vaya requiriendo ampliar el rango de alcance, a medida que se despliegan elementos en tierra, se implementan nuevos drones en vuelo para atender las necesidades sobrevenidas, en este caso el enlace a elementos fuera del rango de cobertura de los enlaces radio tácticos, así como el relé con elementos desplegados en zonas aisladas o de difícil accesibilidad.

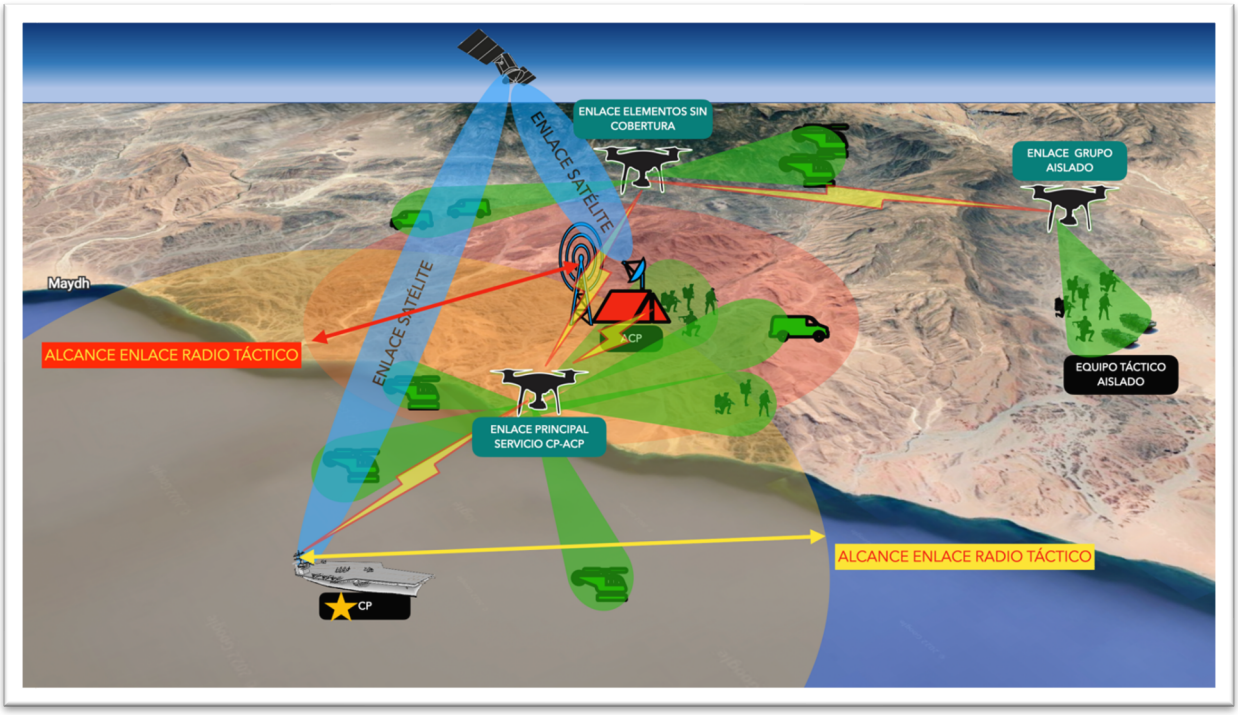


Figura 3-7 Arquitectura tipo en despliegue parcial del contingente con drones 5G

Al igual que en el caso de uso anterior, los drones disponen de un módulo de comunicaciones que les permite establecer dos tipos de enlace simultáneamente, el enlace en la banda media del 5G entre drones y con los puestos de mando, y el enlace de banda alta con los elementos desplegados.

En ambos casos, el estado final cumple con el objetivo principal de la implementación de esta tecnología para las comunicaciones intrateatro: Todos los elementos de la red, están conectados al "Sistema de Mando y Control", disponiendo de prestaciones de muy alta capacidad desde el primer momento del despliegue, sin depender de infraestructuras de telecomunicaciones locales o que no sean propias.

Para habilitar esta implementación, la configuración ideal de la carga útil del dron, tal y como se detalla en la Figura 3-8, debería incluir:

- 1 módulo transceptor multibanda (380-6000 MHz y 22,7-43,5 GHz) con doble entrada y salida para gestionar los enlaces del dron con otras BS y con los elementos terrestres
- 1 antena omnidireccional 5G para establecer enlaces entre drones o enlaces entre el dron y una estación base terrestre.
- 1 antena direccional 5G, con capacidad de MIMO masivo y formación de haces, para establecer el enlace entre el dron y los elementos desplegados en tierra.
- 1 módulo de control con la electrónica necesaria para gestionar los enlaces de datos.
- 1 fuente de alimentación para suministrar energía al módulo transceptor y al módulo de control.

En el caso de la configuración representada en la ilustración, se ha considerado el empleo del dron "VAPOR 55 MX". El peso en conjunto de todos los componentes no debe superar la capacidad de carga útil utilizable de acuerdo con las especificaciones técnicas del dron.

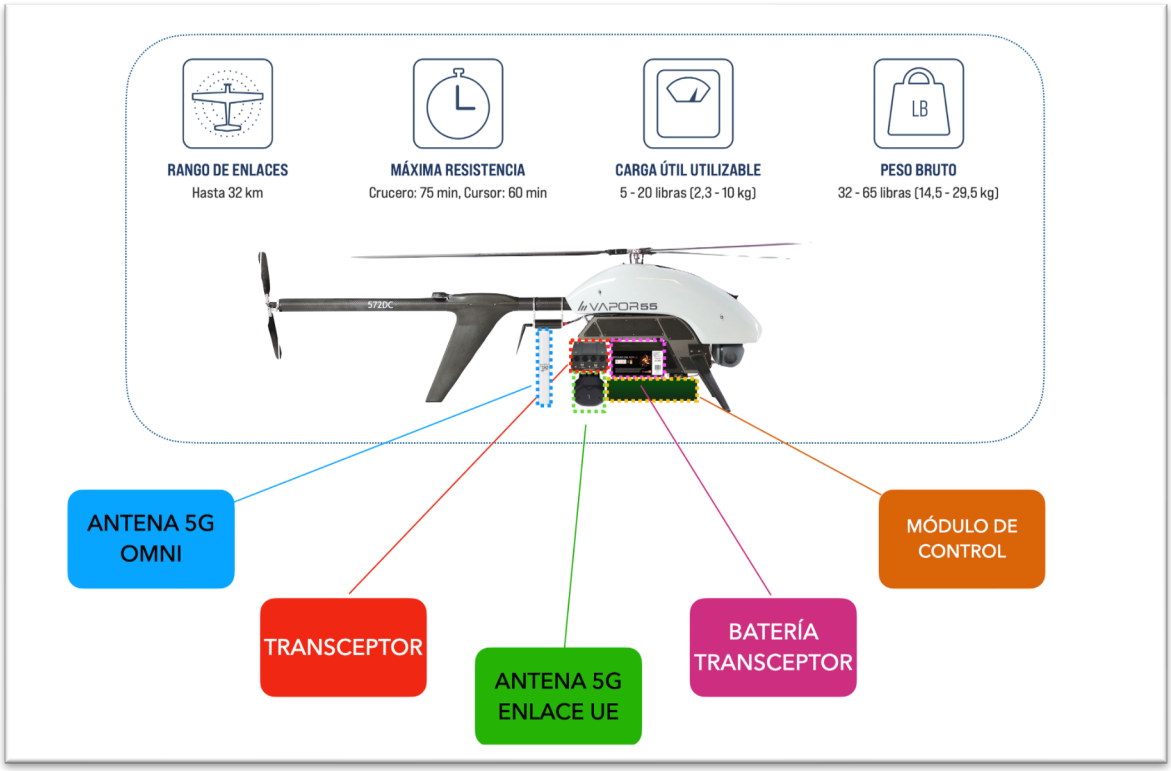


Figura 3-8 Configuración tipo de carga útil en el dron

Con las características del equipamiento planteado para el establecimiento de los canales de comunicación en cualquiera de los escenarios, se podrían establecer los tres tipos de enlace que se detallan en la Tabla 3-4, parametrizados para condiciones óptimas de transmisión conforme a los detalles facilitados por el fabricante de infraestructuras de telecomunicaciones "Dgtl Infra" en su página web [81]:

Enlace	Frecuencia de operación	Alcance máximo del enlace	Altitud de operación	Tipo de enlace	Carga útil
Enlace dron-dron	380 MHz - 6 GHz	Entre 16 y 40 Km	Inferior a 300 m	LoS	Inferior a 10 Kg
Enlace CP/ACP-dron	380 MHz - 6 GHz 24,25 GHz-43,5 GHz	Hasta 40 Km (en banda baja)			
Enlace dron-elemento en tierra	24,25 GHz-43,5 GHz	Entre 15 y 600 m			

Tabla 3-4 Características de los diferentes tipos de enlace planteados

3.2.2 Desafíos relacionados con la implementación de esta tecnología

Tal y como se deduce de los análisis efectuados en los trabajos reseñados en el "estado del arte", así como de la propia estrategia del Ministerio de Defensa [9], la implementación de esta tecnología conlleva una serie de riesgos y desafíos que deben contemplarse para garantizar la integración eficiente y segura en la arquitectura de mando y control de una operación militar.

Los riesgos más relevantes son los relacionados con la seguridad de las comunicaciones y con la disponibilidad del servicio, en cuestiones relacionadas con la autonomía de los drones, el impacto de las

condiciones meteorológicas, bloqueos de señal, pérdidas de espacio libre, interferencias, multitrayecto, etc.

La interconexión masiva de dispositivos conlleva un aumento de la superficie de ataque, que va a generar un mayor riesgo de intrusión, si bien es un problema que debe solucionarse mediante el establecimiento de contramedidas en las diferentes capas del sistema.

Otro desafío para el empleo de esta tecnología en escenarios expedicionarios es la gestión del espectro radioeléctrico y la normativa específica sobre aeronavegabilidad de drones en el país en el que se desarrolle la operación. Ambas cuestiones deben dirimirse con las autoridades locales y otros actores involucrados antes de definir el concepto CIS del despliegue.

Además, se deben contemplar los desafíos relacionados con el enlace de control y comunicaciones sin carga útil de los drones, con características de latencia y seguridad específicas para garantizar la navegación segura de las aeronaves. Para el caso de empleo de mallas formadas por enjambres de drones, se debe contemplar la coordinación entre equipos y un protocolo que permita resolver situaciones de conectividad intermitente.

Respecto de la autonomía, se debe definir un modelo de control de la movilidad que contemple un plan de reabastecimiento robusto, que permita mantener la continuidad del servicio, estableciendo circuitos de entrada y salida de los drones con los recorridos más cortos posibles. Además, una correcta identificación del perfil de vuelo idóneo y del balance de energía de operación de los transmisores, permitirá aumentar el tiempo de operación de los drones sin necesidad de repostar.

4 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

4.1 Conclusiones

En este trabajo se ha planteado el modelo típico de arquitectura de telecomunicaciones para el establecimiento del C2 en una operación expedicionaria que se desarrolla en un escenario de paz o en un escenario de crisis de baja o media intensidad, reseñando las capacidades CIS actuales, así como las limitaciones relacionadas con la creciente demanda de servicios para el mando y control con alto consumo de ancho de banda.

Se ha planteado la necesidad de contar con un sistema que permita mantener el mando y control durante la operación, sin depender de infraestructuras locales o que no sean propias o no puedan garantizar la continuidad del servicio (como en el caso de las comunicaciones satelitales, que siendo uno de los pilares de la arquitectura típica actual, presentan limitaciones relevantes tanto de disponibilidad, como de latencia y capacidad).

Se ha efectuado una revisión de sistemas disponibles en la actualidad que podrían implementarse en la arquitectura CIS para mejorar su capacidad, tratando de eliminar o mitigar las limitaciones planteadas, determinando que la tecnología idónea para satisfacer esa demanda es un sistema basado en comunicaciones inalámbricas celulares de quinta generación sobre estaciones base aéreas.

Se ha efectuado una revisión del estado del arte con los estudios más relevantes relacionados con las redes de comunicaciones 5G basadas en drones, identificando las capacidades potenciales, así como los principales desafíos y riesgos que conlleva el empleo de esta tecnología.

Como resultado del análisis desarrollado, se ha definido para los escenarios considerados un modelo de arquitectura de mando y control en el que se implementa la tecnología de comunicaciones inalámbricas 5G mediante el empleo de drones como estaciones base aéreas. Este modelo permite resolver las tres principales limitaciones de la arquitectura típica actual:

- Dependencia de sistemas satelitales o de infraestructuras de comunicaciones no propias o inseguras. Si bien se requerirá una pasarela en el puesto de mando para conectar la red a internet o a emplazamientos de red privada remotos, los elementos desplegados en el teatro no requerirán de ningún otro sistema para acceder a la red C2.
- Disponibilidad del servicio desde el primer momento del despliegue. Con este modelo, no será necesario esperar a establecer enlaces satelitales o desplegar infraestructuras físicas en el terreno. El acceso a la red estará disponible en el instante en el que el dron sobrevuele la zona de cobertura.
- Dependencia de conexiones físicas. El puesto de mando avanzado tendrá conectividad directa de alta capacidad desde el momento en que comience su desembarco, incluso antes de desplegar sus medios sobre el terreno. Cualquiera de los elementos terrestres tendrá acceso a la red, independientemente de si se encuentra en una zona aislada, alejada o de difícil accesibilidad.

4.2 Líneas futuras

En línea con lo desarrollado en los estudios que se han mencionado en este trabajo, existen una serie de aspectos que deben desarrollarse para optimizar el empleo de esta tecnología. Los desarrollos pendientes más significativos:

- Aumento de la autonomía de los drones: Se han descrito los desafíos relacionados con la gestión óptima de la energía y con las limitaciones relacionadas con la durabilidad de los sistemas de alimentación, que en el caso de los drones de ala rotatoria contemplados en este trabajo se basan

en baterías cuya capacidad de carga media ronda los 60 minutos de autonomía en modelos de gran capacidad. Se debe prestar una atención especial a la posibilidad de implementar sistemas híbridos, que combinen las baterías con otras fuentes de alimentación, como paneles solares, transferencia inalámbrica de energía, o células de combustible. Sería de especial interés la posibilidad de integrar mecanismos de carga mediante haces láser direccionales, por ser una tecnología actualmente en desarrollo.

- Gestión automatizada de las mallas de drones: Se deben desarrollar algoritmos predictivos de inteligencia artificial que permitan el despliegue automatizado de las mallas de drones, de tal modo que, una vez definida un área de cobertura, sean las propias aeronaves las que determinen la composición óptima del enjambre, con el posicionamiento ideal para la gestión más eficiente de los datos, y con los planes automatizados de tráfico aéreo para evitar colisiones y de rotación para el reabastecimiento de energía.
- Escalabilidad a nuevas tecnologías: Algunos de los estudios tratados ([24] y [56]), contemplan la implementación de tecnologías más allá del 5G. Este concepto de empleo debe permitir la integración con futuras redes FANET que puedan mejorar las capacidades actuales. Asimismo, se debe contemplar la posibilidad de exportar este modelo a otros escenarios en los que exista disponibilidad de esta tecnología, y evaluar los condicionantes de integración, seguridad de la información, gestión del espectro (interferencias) y seguridad física (colisiones).

5 BIBLIOGRAFÍA

[1] O. Hispaniola, «Ministerio de Defensa,» [En línea]. Available: https://www.defensa.gob.es/Galerias/misiones/ayudahaiti/red-260-operacion-hispaniola.pdf. [Último acceso: Diciembre 2022].

[2] «NATO,» [En línea]. Available: https://nato.int. [Último acceso: Diciembre 2022].

[3] Poland Seeks NATO Force In Ukraine On Peacekeeping Mission, «NDTV,» 16 Marzo 2022. [En línea]. Available: https://www.ndtv.com/world-news/poland-seeks-nato-force-in-ukraine-on-peacekeeping-mission-2825363. [Último acceso: Diciembre 2022].

[4] [En línea]. Available: https://apgnews.com/inside-the-innovation/c5isr/commanders-weigh-expeditionary-command-post-specs/. [Último acceso: Noviembre 2022].

[5] T. @USSMidwayMuseum. [En línea]. Available: Twitter: @USSMidwayMuseum. [Último acceso: Noviembre 2022].

[6] 5G por Ericsson, «Ericsson,» [En línea]. Available: https://www.ericsson.com/en/5g. [Último acceso: Diciembre 2022].

[7] 5G: a major enabler for the industry of the future, «Orange,» Noviembre 2016. [En línea]. Available: https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2016/11/02_10-Nov_Session-4_Philippe-Lucas.pdf. [Último acceso: Diciembre 2022].

[8] Coberturas, «HISPASAT,» [En línea]. Available: https://www.hispasat.com/es/flota-de-satelites/satelites-gubernamentales/. [Último acceso: Noviembre 2022].

[9] Resolución 307/08135/21, de 17 de mayo de 2021, de la Secretaría de Estado de Defensa, *Estrategia de comunicaciones móviles de quinta generación,* 2021.

[10] Predator, «Ejército del Aire,» [En línea]. Available: https://ejercitodelaire.defensa.gob.es/EA/ejercitodelaire/es/.galleries/anexos/noticias/Predator.jpg. [Último acceso: Diciembre 2022].

[11] "Dron propulsado por hélice", [En línea]. Available: https://www.elradar.es/innovacion-uav-cuales-los-nuevos-conceptos/.

[12] "Dron propulsado por turbina", [En línea]. Available: https://www.wired.com/2014/02/avenger/.

[13] "Dron propulsado por cohete", [En línea]. Available: https://www.thedrive.com/the-war-zone/30121/chinas-high-speed-recon-drone-is-rocket-powered-and-all-about-doing-what-satellites-cant.

[14] "Dron de ala fija", [En línea]. Available: https://topesdegama.com/listas/gadgets/drones-ala-fija.

[15] "Dron de ala rotatoria", [En línea]. Available: https://www.aerial-insights.co/blog/tipos-de-drones/.

[16] "Dron recreativo", [En línea]. Available: https://www.jugueteseideas.com/drones-esto-no-es-un-juguete-de-ninos/.

[17] "Dron deportivo", [En línea]. Available: https://www.xataka.com/especiales/siete-drones-de-competicion-listos-para-sacarlos-a-hacer-carreras.

[18] "Dron de uso general", [En línea]. Available: https://www.dronesbaratosya.com/mejores-drones-profesionales-camara-baratos/.

[19] "Dron profesional", [En línea]. Available: https://revistaseguridad360.com/destacados/drones-agricolas/.

[20] "Dron militar", [En línea]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=aakym6PQjzw.

[21] G. Geraci, A. Garcia-Rodriguez y X. Lin, «Preparing the ground for drone communications,» Junio 2019. [En línea]. Available: https://www.comsoc.org/publications/ctn/preparing-ground-drone-communications. [Último acceso: Diciembre 2022].

[22] Y. Zeng, R. Zhang y T. Joon Lim, «Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges,» *IEEE Communications Magazine,* vol. 54, nº 5, pp. 36-42, 2016.

[23] F. Bohahen, P. Orten y G. Oien, «Design of optimal high-rank line-of-sight MIMO channels,,» *EEE Trans. Wireless Commun,* vol. 6, nº 4, p. 1420–1425, 2007.

[24] S. Sekander, H. Tabassum y E. Hossain, «Multi-tier Drone Architecture for 5G/B5G Cellular Networks: Challenges, Trends, and Prospects,» *arXiv,* vol. arXiv:1711.08407, 2017.

[25] A. Al-Hourani, S. Kandeepan y S. Lardner, «Optimal LAP altitude for maximum coverage,» *IEEE Wireless Communications Letters,* vol. 3, nº 6, p. 569–572, 2014.

[26] R. I. Bor Yaliniz, A. El-Keyi y H. Yanikomeroglu, «Efficient 3-d placement of an aerial base station in next generation cellular networks,» 2016. [En línea]. Available: https://arxiv.org/abs/1603.00300. [Último acceso: Diciembre 2022].

[27] R. I. Bor-Yaliniz y H. Yanikomeroglu, «The new frontier in RAN heterogeneity: Multi-tier drone-cells,» *IEEE Communications Magazine,* vol. 54, nº 11, pp. 48-55, 2016..

[28] V. Sharma, R. Sabatini y S. Ramasamy, «UAVs assisted delay optimization in heterogeneous wireless networks,» *IEEE Wireless Communications Letters,* vol. 20, nº 12, p. 2526–2529, 2016.

[29] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis y M. Debbah, «Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: Performance and tradeoffs,» *IEEE Transactions on Wireless Communications,* vol. 15, nº 6, p. 3949–3963, 2016.

[30] C. Zhang y W. Zhang, «Spectrum sharing for drone networks,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications,* vol. 35, nº 1, p. 136– 144, 2017.

[31] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis y M. Debbah, «Efficient Deployment of Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Optimal Wireless Coverage,» *IEEE Communications Letters,* vol. 20, nº 8, pp. 1647-1650, 2016.

[32] E. Kalantari, H. Yanikomeroglu y A. Yongacoglu, «On the number and 3d placement of drone base stations in wireless cellular networks,» *IEEE VTC,* 2016.

[33] V. Sharma, M. Bennis y R. Kumar, «UAV-assisted heterogeneous networks for capacity enhancement,» *IEEE Communications Letters,* vol. 20, nº 6, pp. 1207-1210, 2015.

[34] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis y M. Debbah, «Optimal transport theory for power-efficient deployment of unmanned aerial vehicles,» *IEEE International Conference on Communications (ICC), Kuala Lumpur,* pp. 1-6, 2016.

[35] L. Zhang, H. Zhao, S. Hou, Z. Zhao, H. Xu, X. Wu, Q. Wu y R. Zhang, «A Survey on 5G Millimeter Wave Communications for UAV-Assisted Wireless Networks,» *IEEE Access,* vol. 7, pp. 117460-117504, 2019.

[36] H. Hellaoui, O. Bekkouche, M. Bagaa y T. Taleb, «Aerial control system for spectrum efficiency in UAV-to-cellular communications,» *IEEE Communications Magazine,* vol. 56, nº 10, pp. 108-113, 2018.

[37] V. Sharma, K. Srinivasan, H.-C. Chao, K.-L. Hua y W.-H. Cheng, «Intelligent deployment of UAVs in 5G heterogeneous communication environment for improved coverage,» *Journal of Network and Computer Applications,* vol. 85, pp. 94-105, 2017.

[38] H. Wu, X. Tao, N. Zhang y X. Shen, «Cooperative UAV cluster-assisted terrestrial cellular netwo,» *IEEE Journal on Selected Areas Communications,* vol. 36, nº 9, pp. 2045-2058, 2018.

[39] Y. Zeng, R. Zhang y T. Lim, «Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges,» *IEEE Communications Magazine 36-42, mayo de 2016.,* vol. 54, nº 5, pp. 36-42, 2016.

[40] H. Wang, J. Wang, G. Ding, L. Wang, T. Tsiftsis y P. Sharma, «Resource allocation for energy harvesting-powered D2D communication underlaying UAV-assisted networks,» *IEEE Transactions on Green Communications and Networking,* vol. 2, nº 1, pp. 14-24, 2018.

[41] R. Sun y D. Matolak, «Air–ground channel characterization for unmanned aircraft systems—Part II: Hilly and mountainous settings,» *IEEE Trans. Veh. Technol,* vol. 66, nº 3, pp. 1913-1925,, 2017.

[42] S. Jeong, O. Simeone y J. Kang, «Mobile edge computing via a UAV-mounted cloudlet: Optimization of bit allocation and path planning,» *IEEE Trans. Veh. Technol.,* vol. 67, nº 3, pp. 2049-2063, 2018.

[43] S. Yin, J. Tan y L. Li, «UAV-assisted cooperative communications with wireless information and power transfer,» 2017. [En línea]. Available: https://arxiv.org/abs/1710.00174.

[44] F. Baccelli y B. Blaszczyszyn, «Stochastic Geometry and Wireless Networks: Theory,» *USA:Now,* vol. 1, 2009.

[45] X. Wang, M. Chen, T. Taleb, A. Ksentini y V. Leung, «Cache in the air: Exploiting content caching and delivery techniques for 5G systems,» *IEEE Commun. Mag,* vol. 52, nº 2, pp. 131-139, 2014.

[46] Z. Ding, P. Fan y H. Poor, «Random beamforming in millimeter-wave NOMA networks,» *IEEE Access,* vol. 5, pp. 7667-7681, 2017.

[47] G. Lee, Y. Sung y J. Seo, «Randomly-directional beamforming in millimeter-wave multiuser MISO downlink,» *IEEE Trans. Wireless Commun,* vol. 15, nº 2, pp. 1086-1100, 2016.

[48] M. Ding, P. Wang, D. López-Pérez, G. Mao y Z. Li, «Performance impact of LoS and NLoS transmissions in dense cellular networks,» *IEEE Trans. Wireless Commun,* vol. 15, nº 3, pp. 2365-2380, 2016.

[49] P.-S. Yu, J. Lee, T. Quek y Y.-W. Hong, «Traffic offloading in heterogeneous networks with energy harvesting personal cells-network throughput and energy efficiency,» *IEEE Trans. Wireless Commun.,* vol. 15, nº 2, pp. 1146-1161, 2016.

[50] H. Wu, X. Tao, N. Zhang, D. Wang, S. Zhang y X. Shen, «On base station coordination in cache- and energy harvesting-enabled HetNets: A stochastic geometry study,» *IEEE Trans. Commun.,* vol. 66, nº 7, pp. 3079-3091, 2018.

[51] J.-S. Ferenc y Z. Néda, «On the size distribution of Poisson Voronoi cells,» *Phys. A Stat. Mech. Appl.,* vol. 385, nº 2, pp. 518-526, 2007.

[52] T. Kiang, «Random fragmentation in two and three dimensions,» *Zeitschrift Astrophysik,* vol. 64, p. 433, 1966.

[53] H. Dhillon y J. Andrews, «Downlink rate distribution in heterogeneous cellular networks under generalized cell selection,» *IEEE Wireless Commun. Lett,* vol. 3, nº 1, pp. 42-45, 2014.

[54] B. Błaszczyszyn y A. Giovanidis, «Optimal geographic caching in cellular networks,» *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC),* pp. 3358-3363, 2015.

[55] W. Heath, M. Kountouris y T. Bai, «Modeling heterogeneous network interference using Poisson point processes,» *IEEE Trans. Signal Process.,* vol. 61, nº 16, pp. 4114-4126, 2013.

[56] G. Amponis, T. Lagkas, M. Zevgara, G. Katsikas, T. Xirofotos, I. Moscholios y P. Sarigiannidis, «Drones in B5G/6G Networks as Flying Base Stations,» *MDPI,* 2022.

[57] M. Kishk, A. Bader y M. Alouini, «Aerial Base Station Deployment in 6G Cellular Networks Using Tethered Drones: The Mobility and Endurance Tradeoff,» *IEEE Veh. Technol. Mag. ,* vol. 15, nº 4, pp. 103-111, 2020.

[58] L. Bariah, L. Mohjazi, S. Muhaidat, P. Sofotasios, G. Kurt, H. Yanikomeroglu y O. Dobre, «A Prospective Look: Key Enabling Technologies, Applications and Open Research Topics in 6G Networks,» *IEEE Access,* vol. 8, pp. 174792-174820, 2020.

[59] M. Selim y A. Kamal, «Post-Disaster 4G/5G Network Rehabilitation Using Drones: Solving Battery and Backhaul Issues,» *Proceedings of the 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Abu Dhabi, United Arab Emirates,* pp. 1-6, 2018.

[60] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y. Nam y M. A. Debbah, «A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems,» *IEEE Commun. Surv. Tutorials,* vol. 21, p. 2334–2360, 2019.

[61] N. Seifi, J. Zhang, R. Heath, T. Svensson y M. Coldrey, «Coordinated 3D Beamforming for Interference Management in Cellular Networks,» *IEEE Transactions on Wireless Communications,* nº 13, pp. 5396-5410, 2014.

[62] N. Egarguin, D. Jackson, D. Onofrei, J. Leclerc y A. Becker, «Adaptive Beamforming Using Scattering From a Drone Swarm,» *2020 IEEE Texas Symposium on Wireless and Microwave Circuits and Systems (WMCS),* pp. 1-6, 2020.

[63] M. Boukoberine, Z. Zhou y M. Benbouzid, «Power Supply Architectures for Drones - A Review,» *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society,* 2019.

[64] Z. Becvar, P. Mach y M. Nikooroo, «Reducing Energy Consumed by Repositioning of Flying Base Stations Serving Mobile Users,,» *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC),* pp. 1-7, 2020.

[65] M. Zhao, Q. Shi y M. Zhao, «Efficiency Maximization for UAV-Enabled Mobile Relaying Systems With Laser Charging,» *IEEE Transactions on Wireless Communications,* vol. 19, nº 5, p. 3257–3272, 2020.

[66] M. Nikooroo y Z. Becvar, «Optimal Positioning of Flying Base Stations and Transmission Power Allocation in NOMA Networks,» *IEEE Transactions on Wireless Communications,* vol. 21, nº 2, pp. 1319-1334, 2022.

[67] J. Plachy, Z. Becvar, P. Mach, R. Marik y M. Von, «Joint Positioning of Flying Base Stations and Association of Users: Evolutionary-Based Approach,» *IEEE Access,* vol. 7, pp. 11454-11463, 2019.

[68] D. Pliatsios, P. Sarigiannidis, S. Goudos y K. Psannis, «3D Placement of Drone-Mounted Remote Radio Head for Minimum Transmission Power Under Connectivity Constraints,» *IEEE Access,* vol. 8, pp. 200338-200350, 2020.

[69] J. Košmerl y A. Vilhar, «Base stations placement optimization in wireless networks for emergency communications,» *2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC),* pp. 200-205, 2014.

[70] H. Dai, H. Zhang, M. Hua, C. Li, Y. Huang y B. Wang, «How to Deploy Multiple UAVs for Providing Communication Service in an Unknown Region?,» *IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS LETTERS,* vol. 8, nº 4, pp. 1276-1279, 2019.

[71] I. Shayea, M. Ergen, M. Hadri Azmi, S. Aldirmaz Çolak, R. Nordin y Y. Ibrahim Daradkeh, «Key Challenges, Drivers and Solutions for Mobility Management in 5G Networks: A Survey,» *IEEE Access,* vol. 8, pp. 172534-172552, 2020.

[72] Essentra Components, «https://www.essentracomponents.com/en-gb/news/industries/telecoms-data/what-is-5g-base-station-architecture,» 2021.

[73] M. Boukoberine, Z. Zhou y M. Benbouzid, «Power Supply Architectures for Drones - A Review,» *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon,* pp. 5826-5831, 2019.

[74] Aerovironment, «Product Catalog,» 2022. [En línea]. Available: https://www.avinc.com/images/uploads/product_docs/2022_Product_Catalog.pdf. [Último acceso: Enero 2023].

[75] AEROVIRONMENT, «VAPOR 55 MX,» [En línea]. Available: https://www.avinc.com/media_center/assets/unmanned-aircraft-systems/vapor. [Último acceso: Enero 2023].

[76] Schiebel, «Dron CAMCOPTER S-100,» 2022. [En línea]. Available: https://schiebel.net/products/camcopter-s-100/. [Último acceso: Enero 2023].

[77] M1740A mmWave Transceiver for 5G - Datasheet, «Keysight,» 2020. [En línea]. Available: https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06652/data-sheets/5992-4041.pdf. [Último acceso: Enero 2023].

[78] S9101A 5G Multi-Band Vector Transciever, «Keysight,» [En línea]. Available: https://www.keysight.com/us/en/assets/7120-1254/data-sheets/S9101A-5G-Multi-Band-Vector-Transceiver.pdf. [Último acceso: Enero 2023].

[79] Levaraging the potential of 5G milimeter wave, «Ericsson,» [En línea]. Available: https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/further-insights/leveraging-the-potential-of-5g-millimeter-wave. [Último acceso: Enero 2023].

[80] M. Singh Mandloi, P. Gupta, A. Parmar, P. Malviya y L. Malviya, «Beamforming MIMO array antenna for 5G-millimeter-wave application,» 2021. [En línea]. Available: https://assets.researchsquare.com/files/rs-1698818/v1_covered.pdf?c=1654294791. [Último acceso: Enero 2023].

[81] Dgtl Infra, «Cell Tower Range: How Far Do They Reach?,» 5 Octubre 2022. [En línea]. Available: https://dgtlinfra.com/cell-tower-range-how-far-reach/. [Último acceso: Enero 2023].

[82] M. Kishk, A. Bader y M.-S. Alouini, «Aerial Base Station Deployment in 6G Cellular Networks Using Tethered Drones: The Mobility and Endurance Tradeoff,» *IEEE Vehicular Technology Magazine,* vol. 15, nº 4, pp. 103-111, 2020.

[83] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis y M. Debbah, «Mobile internet of things: Can UAVs provide an energy-efficient mobile architecture?,» *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM),* pp. 1-6, 2016.

[84] UNDERSTANDING MMWAVE SPECTRUM FOR 5G NETWORKS, «5G Americas,» 2020. [En línea]. Available: https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2020/12/InDesign-Understanding-mmWave-for-5G-Networks.pdf. [Último acceso: Enero 2023].

ANEXO I: ASIGNATURAS DEL MÁSTER RELACIONADAS

El presente trabajo tiene relación directa con las siguientes asignaturas del Máster:

- **TEL 1.** "Sistemas de comunicaciones ópticos e inalámbricos".
- **TEL 2.** "Redes de banda ancha".
- **TEL 3.** "Sistemas de comunicaciones vía satélite, de posicionamiento, teledetección y radionavegación".
- **TEL 4.** "Seguridad en sistemas de telecomunicaciones".
- **COM 1.** "Gobierno, dirección y gestión TIC".
- **COM 6.** "Transformación digital e innovación".
- **COM 7.** "Planificación y gestión de infraestructuras TIC".
- **COM 8.** "Redes y sistemas de telecomunicación".
- **COM 11.** "Gestión de la seguridad y análisis de riesgos".