

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**GRADO EN INGENIERÍA DE
TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS DE
TELECOMUNICACIÓN**

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED 5G
BASADA EN ESTACIONES BASE AÉREAS
CON UAV EN ENTORNOS URBANOS**

MARIO COLMENERO PINA

2024

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

Título: Diseño y simulación de una red 5G basada en estaciones base aéreas con UAV en entornos urbanos
Autor: D. Mario Colmenero Pina
Tutor: D. José Manuel Riera Salís
Departamento: Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Presidente: D.

Vocal: D.

Secretario: D.

Suplente: D.

Los miembros del tribunal arriba nombrados acuerdan otorgar la calificación de:
.....

Madrid, a de de 20...

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**GRADO EN INGENIERÍA DE
TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS DE
TELECOMUNICACIÓN**

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED 5G
BASADA EN ESTACIONES BASE AÉREAS
CON UAV EN ENTORNOS URBANOS**

MARIO COLMENERO PINA

2024

RESUMEN

Las redes móviles futuras suponen implementaciones ultradensas de estaciones base (BS) en su mayoría estáticas, representadas típicamente por celdas pequeñas, para satisfacer las demandas de comunicación de un número creciente y una diversidad de equipos de usuario. Se espera que se implementen decenas de BS por kilómetro cuadrado en áreas con mucho tráfico. Es probable que los despliegues ultradensos de celdas pequeñas estáticas destinados a cumplir tales requisitos sean costosos e ineficientes en términos de costes, ya que muchas de estas BS recién construidas estarán desaprovechadas (en términos de carga de comunicación) la mayor parte del tiempo, mientras que en otros periodos pueden tener una carga de tráfico muy elevada, de forma puntual.

Una posible solución es el uso de estaciones base aéreas mediante UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*). Las características notables de los UAV, como la movilidad, la flexibilidad en el espacio tridimensional y altitud adaptativa, hace que sean capaces de proporcionar una alta calidad de servicio, alta capacidad y baja interferencia. En los últimos años, varios experimentos han constatado que una sola estación base aérea ofrece un mejor servicio que varias estaciones base terrestres en términos de calidad de señal, cobertura, rendimiento y capacidad de canal.

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el estudio y diseño de una red 5G mediante la implementación de estaciones base aéreas con UAV. Concretamente, se ha realizado el estudio en las cercanías del estadio Santiago Bernabéu, donde, de forma puntual existe una congestión en la red debida al alto número de usuarios activos por la celebración de eventos temporales.

En primer lugar, se ha realizado un estudio teórico tanto de la tecnología 5G como de los UAV y su uso como estaciones base aéreas, donde se analizan sus prestaciones, funcionamiento, casos de uso y los desafíos que suponen. Tras este estudio, se procede al diseño y a la simulación de la red utilizando la herramienta de planificación radioeléctrica Xirio-Online, que proporciona cálculos basados en estudios de cobertura, considerando variables como la distribución geográfica de los puntos de acceso, la densidad de dispositivos conectados y los posibles obstáculos o interferencias. Se ha llevado a cabo una búsqueda de los equipos necesarios, así como una serie de cálculos relevantes y parametrización previa a la simulación. A continuación, se han realizado dos estudios de cobertura que han ofrecido resultados como el nivel de señal recibida, nivel de solapamiento y nivel de interferencia existente en la red.

Tras analizar los resultados obtenidos, se concluye que estos son muy favorables y justifican la viabilidad de una red 5G basada en estaciones base aéreas con UAV. Sin embargo, algunos desafíos como la recarga de las baterías de los drones o su posicionamiento óptimo se abordarán en investigaciones futuras.

PALABRAS CLAVE

5G, NR, UAV, BS, BS UAV, 3GPP, backhaul, MIMO, onda milimétrica, dron, FSO, cobertura, Xirio-Online.

SUMMARY

Future mobile networks entail ultra-dense deployments of mostly static base stations (BS), typically represented by small cells, to meet the communication demands of a growing number and diversity of user equipment. Tens of BS per square kilometer are expected to be deployed in high-traffic areas. Ultra-dense deployments of static small cells aimed at meeting such requirements are likely to be expensive and cost inefficient, as many of these newly built BSs will be unutilized (in terms of communication load) most of the time, while in other periods they may have a very high traffic load, occasionally.

A possible solution is the use of aerial base stations using UAVs (Unnamed Aerial Vehicles). The notable characteristics of UAVs, such as mobility, flexibility in three-dimensional space and adaptive altitude, make them capable of providing high quality of service, high capacity and low interference. In recent years, several experiments have found that a single aerial base station offers better service than several ground base stations in terms of signal quality, coverage, performance and channel capacity.

The objective of this Final Degree Project is the study and design of a 5G network through the implementation of aerial base stations with UAVs. Specifically, the study has been carried out in the vicinity of the Santiago Bernabéu stadium, where occasionally there is congestion in the network due to the high number of active users due to the celebration of temporary events.

Firstly, a theoretical study of both 5G technology and UAVs and their use as aerial base stations has been carried out, where their performance, operation, use cases and the challenges they pose are analyzed. After this study, we proceed to the design and simulation of the network using the Xirio-Online radio planning tool, which provides calculations based on coverage studies, considering variables such as the geographical distribution of access points, the density of connected devices and possible obstacles or interferences. A search for the necessary equipment has been carried out, as well as a series of relevant calculations and parameterization prior to the simulation. Next, two coverage studies have been carried out that have offered results such as the level of received signal, level of overlap and level of interference existing in the network.

After analyzing the results obtained, it is concluded that these are very favorable and justify the viability of a 5G network based on aerial base stations with UAVs. However, some challenges such as recharging the drones' batteries or their optimal positioning will be addressed in future research.

KEYWORDS

5G, NR, UAV, BS, BS UAV, 3GPP, backhaul, MIMO, millimeter wave, drone, FSO, coverage, Xirio-Online.

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AC	Alternating Current
ATP	Acquire-Track-Pointing
BS	Base Station
BS UAV	Base Station Unnamed Aerial Vehicle
CF-OFDM	Cyclic Prefix-Orthogonal Frequency Division Multiplexing
DC	Direct Current
DL	Downlink
DRX	Discontinuous Reception
E2O	Electrical to optical
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
FDD	Frequency Division Duplex
FSO	Free Space Optical
GHz	Gigahertz
HAP	High Altitude Platform
IAB	Integrated Access and Backhaul
IoT	Internet Of Things
LAP	Low Altitude Platform
LDPC	Low Density Parity Check
LoS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
MBS	Macro Base Station
MIMO	Multiple Inputs Multiple Outputs
mMTC	Massive Machine Type Communications
mmw	Millimeter Waveband
MU-MIMO	Multiuser-Multiple Inputs Multiple Outputs
NLoS	Non-Line of Sight
NR NEW	New Radio
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OH	Overhead
PAPR	Peak To Average Power Ratio
PIRE	Potencia Isótropa Radiada Equivalente
PRB	Physical Resource Block
QAM	Quadrature Amplitude Modulation

QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RB	Resource Block
RDU	Rapid Deployment Unit
RF	Radiofrecuencia
RRH	Remote Radio Head
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SCS	Subcarrier Separation
SINR	Signal to Noise to Interference Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
Tbps	Terabits per Second
TDD	Time Division Duplex
THz	Terahertz
UAV	Unnamed Aerial Vehicle
UE	User Equipment
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UL	Uplink
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
WUS	Wake-Up Signal

INDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos y estructura	1
2. SISTEMAS 5G NR	3
2.1. Introducción a los sistemas 5G NR.....	3
2.2. Características de los sistemas 5G NR.....	4
3. SISTEMAS CELULARES CON UAV	6
3.1. Introducción a los UAV	6
3.2. Características de los UAV	7
3.2.1. Carga útil.....	7
3.2.2. Mecanismo de vuelo	7
3.2.3. Alcance y altitud	8
3.2.4. Velocidad y tiempo de vuelo	9
3.2.5. Fuente de alimentación	9
3.3. Casos de uso de las estaciones base aéreas con UAV.....	10
3.3.1. Mejora de la cobertura y la capacidad en redes celulares 5G	10
3.3.2. UAV como estaciones base aéreas para escenarios de seguridad pública	11
3.3.3. MIMO 3D y comunicaciones de onda milimétrica.....	12
3.3.4. UAV para comunicaciones IoT.....	13
3.4. Desafíos y posibles soluciones de las BS UAV	14
3.4.1. Eficiencia energética	14
3.4.2. Movilidad y trayectoria.....	15
3.4.3. Conexión con el <i>backhaul</i>	15
3.5. Estudios sobre el terreno con BS UAV.....	18
4. PLANTEAMIENTO PRELIMINAR DEL ESTUDIO	22
4.1. Análisis del área de estudio seleccionada	22
4.2. Equipamiento	23
4.2.1. Dron	23
4.2.1. Equipo Tx/Rx.....	24
4.2.2. Antenas	24
4.2.3. Equipo para el <i>backhaul</i> FSO	26
4.3. Planificación de la red.....	28
5. DISEÑO Y SIMULACION DE LA RED 5G BASADA EN BS UAV.....	31
5.1. Parametrización previa al estudio	31
5.2. Simulación de la red en Xirio-Online	33

5.2.1.	Coberturas individuales: Nivel de señal.....	34
5.2.2.	Cobertura multitransmisor: Nivel de señal, mejor servidor y solapamiento.....	36
5.2.3.	Cobertura multitransmisor: Interferencia.....	37
5.2.4.	Segundo estudio de cobertura.....	38
5.3.	Evaluación de los resultados.....	41
6.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	42
6.1.	Conclusiones.....	42
6.2.	Líneas futuras.....	43
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	44
	ANEXO A: ASPECTOS ÉTICOS, ECONÓMICOS, SOCIALES Y AMBIENTALES	49
A.1	INTRODUCCIÓN.....	49
A.2	DESCRIPCIÓN DE IMPACTOS RELEVANTES RELACIONADOS CON EL PROYECTO	49
A.3	ANÁLISIS DETALLADO DE ALGUNO DE LOS PRINCIPALES IMPACTOS.....	50
A.4	CONCLUSIONES.....	50
	ANEXO B: CÁLCULO DEL ÁREA Y DEL PERÍMETRO DE LA ZONA DE COBERTURA.....	51
	ANEXO C: PRESUPUESTO ECONÓMICO.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Escenarios de uso de la tecnología 5G. Fuente: [1].....	3
Figura 3.1. Comunicaciones móviles con UAV [3].....	6
Figura 3.2. Diferentes tipos de UAV (a) <i>Parrot Swing</i> (vista frontal). (b) <i>Kogan Nano Drone</i> . (c) <i>Parrot Disco</i> . (d) <i>DJI Spreading Wings S900</i> . (e) <i>Scout</i>	8
Figura 3.3 Diferentes escenarios de aplicación de los HAP. Fuente [7].....	9
Figura 3.4. Dron en una situación de seguridad pública [12]	12
Figura 3.5. Conformación de haces usando un dron. [12]	13
Figura 3.6. Escenario de ejemplo implementando BS UAV incluyendo la conexión con el <i>backhaul</i> [25].....	15
Figura 3.7. Red multi-UAV incluyendo enlace con el <i>backhaul</i> y el enlace de acceso [26]	16
Figura 3.8. Red multi-UAV que incluye conexión con el <i>backhaul</i> vía satélite [27]	16
Figura 3.9. Red basada en BS UAV incluyendo FSO como enlace con el <i>backhaul</i> [30].....	17
Figura 3.10. Arquitectura de una red móvil implementando BS UAV [33]	18
Figura 3.11. Despliegue de <i>small cells</i> para dar cobertura a una multitud [33].....	18
Figura 3.12. Despliegue de BS UAV para dar cobertura a una multitud [33]	19
Figura 3.13. Rendimiento de cada tipo de BS en la red en función del número de UE [33]	20
Figura 3.14. Función de distribución de la SINR experimentada por los UE para 10 UE (trazo continuo) y para 10000 (trazo discontinuo) [33].....	20
Figura 3.15. Ratio del rendimiento de BS UAV y el número de <i>small cells</i> desplegadas a lo largo de la calle [33]	20
Figura 3.16. Eficiencia energética de los UE, asumiendo que la mitad del tiempo está transmitiendo y la otra recibiendo [33].....	20
Figura 3.17. 40 UE moviéndose de un punto ‘A’ a un punto ‘B’ en zona rural [37].....	21
Figura 3.18. Capacidad de canal media en los 3 escenarios para 40 UE [37].....	21
Figura 3.19. Función de distribución de la capacidad de los UE [38]	21
Figura 3.20. Función de distribución de la SNR/SINR [38]	21
Figura 4.1. Estadio Santiago Bernabéu (2024) [39].....	22
Figura 4.2. Skyfront Tailwind en vista isométrica [8]	23
Figura 4.3. Skyfront Tailwind visto desde arriba [8].....	23
Figura 4.4. RDU OpenRANGE28 Air5G 7200 de Airspan [40]	24
Figura 4.5. Fujikura’s 28 GHz mmWave Wireless Communications Module [42].....	25
Figura 4.6. Beamforming performance de la Fujikura 28 GHz [42].....	26
Figura 4.7. Transmisor FSO en el nodo de acceso [30]	27
Figura 4.8. Receptor FSO en el BS UAV [30].....	27
Figura 4.9. Receptor FSO utilizando dos rayos ópticos distintos para transmisión de energía y datos [30].....	28
Figura 5.1. Diagrama de radiación vertical de la antena transmisora	32
Figura 5.2. Diagrama de radiación horizontal de la antena transmisora	32
Figura 5.3. Parámetros de la banda n258	32
Figura 5.4. Localizaciones de los UAV	33
Figura 5.5. Coberturas individuales	35
Figura 5.6. Nivel de señal de la cobertura multitransmisor	36
Figura 5.7. Mejor servidor de la cobertura multitransmisor	36
Figura 5.8. Nivel de solapamiento de la cobertura multitransmisor	37
Figura 5.9. Nivel de señal RSSI de la cobertura multitransmisor	38
Figura 5.10. Localizaciones de los UAV (2° Estudio)	38
Figura 5.11. Nivel de señal de la cobertura multitransmisor (2° Estudio)	39
Figura 5.12. Nivel de solapamiento de la cobertura multitransmisor (2° Estudio)	40
Figura 5.13. Mejor servidor de la cobertura multitransmisor (2° Estudio)	40
Figura 5.14. Nivel de señal RSSI de la cobertura multitransmisor (2° Estudio).....	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Diferencias entre estaciones base con UAV y estaciones base terrestre [12]	11
Tabla 4.1. Especificaciones técnicas de la Fujikura 28 GHz [42]	25
Tabla 4.2. Parámetros de transmisión en función de la numerología (μ) [44]	29
Tabla 4.3. Numero de RB en función de la SCS y el ancho de banda del canal [45]	29
Tabla 5.1. Coordenadas de los UAV.....	33
Tabla 5.2. Coordenadas y alturas de los UAV (2º Estudio).....	39

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Desde la primera generación de comunicaciones móviles se han sucedido diversos cambios, todos ellos suscitados por las necesidades de los usuarios y los nuevos equipos y dispositivos de telecomunicaciones disponibles en el mercado. Cambios y mejoras como el aumento de la tasa de datos, el aprovechamiento de nuevas bandas de frecuencia, menor latencia, mayor fiabilidad y seguridad y mayor eficiencia espectral, han servido para cumplir las expectativas de los usuarios y ofrecer un servicio lo más optimizado posible. A pesar del éxito de la tecnología 4G LTE (*Long Term Evolution*) y su evolución LTE-A, uno se podría preguntar por qué es necesaria otra generación. La respuesta sigue el mismo patrón que en generaciones anteriores: cuando su rendimiento alcanza un límite a efectos prácticos, parece sensato ofrecer servicios más eficientes y con mejor rendimiento en lugar de mejorar las plataformas existentes.

Hoy en día contamos con la tecnología 5G NR (*New Radio*) para hacer frente a estas nuevas necesidades de incrementar la capacidad, la fiabilidad y la cobertura, al tiempo que se provee de una experiencia de usuario más fluida que en cualquiera de las generaciones anteriores. Su diseño no solo se centra en ofrecer un mejor servicio que LTE, sino en satisfacer tres importantes casos de uso eMBB (*enhanced Mobile Broadband*), uRLLC (*ultra-Reliable and Low Latency Communications*) y mMTC (*massive Machine-Type Communications*). Cada grupo se enfoca en ofrecer altas tasas de datos, comunicaciones de alta fiabilidad y baja latencia y conectividad a un gran número de usuarios y dispositivos, respectivamente [1].

Al tiempo que organizaciones como el 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) han ido estandarizando y optimizando la tecnología 5G, la industria ha ido desarrollando nuevos dispositivos y tecnologías que se ajusten a los casos de uso mencionados anteriormente. De entre todos ellos quiero destacar los UAV (*Unnamed Aerial Vehicles*). Comúnmente conocidos como drones, las aplicaciones de los UAV en las comunicaciones móviles han ganado mucha popularidad en los últimos años. Las más destacables son mejora de la cobertura y la capacidad en las redes celulares 5G existentes, UAV como estaciones base aéreas para escenarios de seguridad pública y comunicaciones en redes de dispositivos IoT (*Internet of Things*).

Haciendo uso de estas aplicaciones podemos asegurar las prestaciones del estándar 5G en términos de cobertura y tasa de datos, ya que, en ocasiones, las redes terrestres ya existentes no son capaces de proporcionar el mejor servicio debido a la alta demanda de usuarios simultáneos.

1.2. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es la planificación y el diseño de una red 5G basada en la implementación de estaciones base aéreas con UAV en entornos urbanos. En concreto, queremos centrarnos en la aplicación de los UAV como estaciones base en escenarios con una alta afluencia de usuarios donde las redes terrestres se vean saturadas. Para ello el estudio será realizado en una zona donde se celebran eventos con bastante frecuencia, como es el estadio Santiago Bernabéu.

En primer lugar, en el capítulo 2 se presenta la tecnología 5G NR. Se hace una introducción al estándar, así como de los escenarios de uso y las principales características del mismo.

A continuación, en el capítulo 3 se realiza una introducción y análisis detallado de los UAV, pasando por sus principales características y los distintos tipos de drones existentes en el mercado en función del mecanismo de vuelo empleado, alcance y altitud. Seguidamente, se presentan los UAV como estaciones base aéreas y sus diferentes casos de uso. Después se ponen de manifiesto los desafíos y problemas que conlleva el uso de esta tecnología prematura e innovadora, además de proponer soluciones a los mismos. Como cierre de este capítulo, se analizan tres estudios sobre el terreno implementando estaciones base con UAV en escenarios similares a los de este Trabajo de Fin de Grado, presentando y comentando los resultados de los mismos.

El capítulo 4 se basa en el análisis del área de estudio seleccionada, detallando su localización, perímetro y área. También concretamos los equipos necesarios para diseñar la red, siendo estos los drones, las antenas, los equipos de transmisión/recepción y el sistema de conexión con el *backhaul*. Al final del capítulo se incluye una planificación de la red, donde se realiza una estimación del número de BS UAV necesarios para el diseño teniendo en cuenta la tasa binaria de cada UAV, la tasa binaria ofertada por usuario, el área de la zona de cobertura y el número de usuarios.

Seguidamente, en el capítulo 5 se incluye toda la parametrización introducida en el programa Xirio-Online para poder realizar la simulación correctamente, así como el balance de potencias de la red. Se presentan y comentan los resultados del estudio de cobertura, así como la realización de un segundo estudio en el cual se demuestra la gran ventaja que supone el uso de BS UAV en términos de libertad de movimiento y trayectoria.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de este Trabajo de Fin de Grado, así como una serie de líneas futuras de investigación en las que sería interesante trabajar en un futuro.

2. SISTEMAS 5G NR

2.1. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS 5G NR

En este apartado haremos un repaso de los conceptos básicos de la quinta generación de comunicaciones móviles. Esta ofrece notables mejoras con respecto a la anterior generación, como tasas de velocidad más altas, menor latencia, mayor eficiencia espectral, mayor cobertura y la capacidad de atender una gran densidad de usuarios simultáneamente [1]. Los principales escenarios de uso del 5G, mostrados en la **figura 2.1** se pueden dividir en los siguientes:

- **Banda ancha móvil mejorada (eMBB):** se corresponde con una evolución de los servicios de ancho de banda móvil de hoy en día, lo que permite volúmenes de datos aún mayores y una experiencia de usuario mejorada, por ejemplo, al admitir velocidades de datos de usuario final aún más altas. Debido a su uso amplio y ubicuo, cubre una gama de casos de uso con diferentes desafíos, incluidos puntos de acceso y cobertura de área amplia. Todo esto permite altas velocidades de datos, alta densidad de usuarios y una necesidad de muy alta capacidad, al tiempo que se enfatiza la movilidad y una experiencia de usuario perfecta, con menores requisitos en cuanto a velocidad de datos y densidad de usuarios.
- **Comunicaciones ultra fiables de baja latencia (URLLC):** se corresponde con casos de uso con requisitos estrictos de latencia, fiabilidad y alta disponibilidad. Los ejemplos incluyen comunicación entre vehículos (V2X) que involucra seguridad, control inalámbrico de equipos industriales, cirugía médica remota y automatización de la distribución en una red inteligente.
- **Comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC):** se corresponde con servicios que se caracterizan por una gran cantidad de dispositivos conectados que normalmente realizan transmisiones muy escasas de pequeños volúmenes de datos que no requieren de un tráfico de datos elevado. Debido a la posibilidad de implementación remota de este tipo de dispositivos, también se requieren una duración de batería muy larga.

Estas necesidades no quedan cubiertas con los sistemas 4G LTE de la generación anterior. Para satisfacer estos requerimientos, el 3GPP inició la estandarización de una nueva red de acceso radio para los sistemas 5G, conocida como NR.

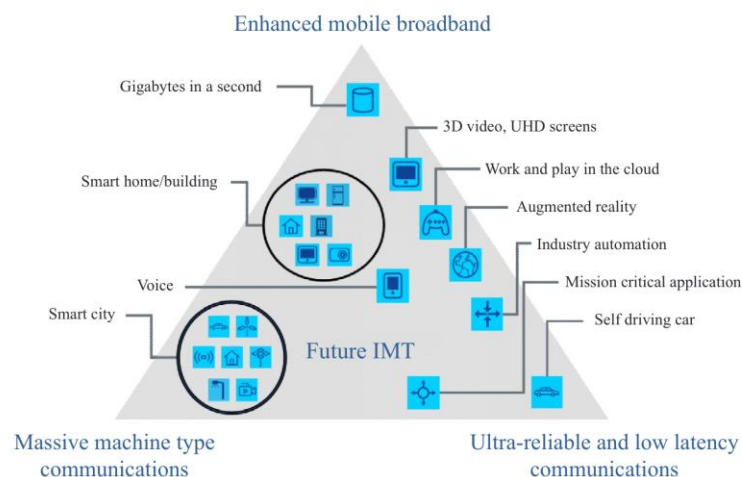


Figura 2.1 Escenarios de uso de la tecnología 5G. Fuente: [1]

2.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS 5G NR

Para atender los casos de uso presentados anteriormente, se implementaron las siguientes técnicas introducidas en la *Release* 15 y 16 del 3GPP, el cual supervisa las actividades de normalización para redes celulares [2]:

- **Aprovechamiento de nuevas bandas de frecuencia:** Una característica clave del 5G NR es una expansión sustancial en términos del rango de espectros en los que la tecnología de acceso por radio se puede implementar. Se incorporan las bandas que van desde los 24 GHz hasta los 71 GHz, conocidas como bandas milimétricas. Las ondas milimétricas tienen un ancho de banda significativamente mayor, lo que permite tasas de datos mucho más rápidas. Sin embargo, estas ondas tienen un alcance más limitado y pueden ser más susceptibles a la absorción por parte de obstáculos físicos, lo que requiere la instalación de más antenas para una cobertura efectiva. También se aprovechan las ya conocidas bandas de frecuencia sub-6 GHz. Estas frecuencias, que incluyen espectros como 700 MHz, 2.6 GHz y 3.5 GHz, ofrecen un equilibrio entre velocidad y alcance. Son capaces de penetrar obstáculos físicos con mayor facilidad que las ondas milimétricas, lo que les permite proporcionar una cobertura más amplia y una experiencia de usuario más consistente en interiores y áreas urbanas densamente pobladas.
- **MIMO masivo:** es una tecnología fundamental en el estándar 5G que permite mejorar significativamente el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas al utilizar un gran número de antenas tanto en el transmisor como en el receptor. Las mejoras introducidas en la *Release* 16 consisten en el aumento del rango de MIMO multiusuario (MU-MIMO), soporte multi-TRP (*Multi Transmission and Reception*), optimización de la eficiencia a través de la mejora de la señal de referencia de la relación de potencia pico a promedio (PAPR) y mejora de la fiabilidad del enlace a través de una gestión multihaz evolucionada. La *Release* 16 también permite la transmisión *Uplink* (UL) de potencia completa de dispositivos MIMO para ampliar la cobertura en el borde de celda.
- **Agregación de portadoras (*Carrier Aggregation*):** técnica utilizada en el estándar 5G para combinar múltiples bandas de frecuencia y aumentar el ancho de banda disponible. Esto resulta en un aumento significativo de la velocidad de transmisión y mejora la experiencia del usuario al proporcionar conexiones más rápidas y estables.
- ***Integrated access and backhaul* (IAB):** integrado para soportar el *backhaul* inalámbrico, como una alternativa a, por ejemplo, el *backhaul* por fibra. Esto permite el uso de 5G para un enlace inalámbrico desde ubicaciones centrales hasta nodos distribuidos y entre nodos. Por ejemplo, se pueden simplificar los despliegues de células pequeñas en redes urbanas densas o se puede habilitar el despliegue de sitios temporales utilizados para eventos especiales. IAB se puede utilizar en cualquier banda de frecuencia en la que pueda funcionar NR. Sin embargo, se anticipa que las bandas de ondas milimétricas serán el más relevante para IAB debido a la cantidad de espectro disponible.
- **Estructura de transmisión en el dominio del tiempo y la frecuencia:** esta depende de la asignación de espectro en cuestión. Para las bandas de frecuencias más bajas, las asignaciones suelen estar emparejadas, lo que implica dúplex por división de frecuencia (FDD). En las bandas de frecuencias más altas, las asignaciones de espectro no emparejadas son cada vez más comunes, lo que requiere duplexación por división en el tiempo (TDD). NR puede operar tanto en espectros emparejados como no emparejados

usando una estructura de trama única, a diferencia de LTE donde se usan dos estructuras de cuadros diferentes. La estructura básica de la trama NR está diseñada de manera que pueda soportar operaciones semidúplex y dúplex. En semidúplex, el dispositivo no puede transmitir y recibir al mismo tiempo. Ejemplos de esto son TDD y FDD semidúplex. Por el contrario, en el funcionamiento dúplex es posible la transmisión y recepción simultáneas con FDD como ejemplo típico.

- **Modulación y codificación de canal:** con el objetivo de tener un único esquema de transmisión para ambos sentidos de la comunicación y tener receptores más sencillos y adaptados para la multiplexación espacial, se utiliza la técnica de modulación CF-OFDM (*Cyclic Prefix-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) tanto en el enlace descendente como en el ascendente. Opcionalmente, se puede emplear DFT-s-OFDM (Discrete Fourier Transform-spread-OFDM) en el enlace ascendente en UE (*User Equipment*) con restricciones energéticas. Los formatos de modulación de las subportadoras utilizados son QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*), 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), 64-QAM, 256-QAM y 1024-QAM. De entre todas estas, QPSK es el esquema más robusto, que proporciona una cobertura extensa, pero tasas de datos más reducidas. Por otro lado, los esquemas 256-QAM y 1024-QAM son más sensibles a interferencias y están pensados para usarse en escenarios de área reducida en los que se necesita tasas de datos muy elevadas. Para la codificación de canal, se emplean códigos LDPC (*Low Density Parity Check*) cuasi-cíclicos para transmitir bloques de transporte, que ofrecen un rendimiento cercano al límite teórico de Shannon, pero no son adecuados para mensajes cortos. Para la información de control y el canal físico de transmisión se utilizan códigos polares. Además, los sistemas 5G NR cuentan con una separación entre subportadoras que se extiende desde los 15 kHz hasta los 240 kHz. Con ello, en 5G existen anchos de banda de portadora de 50, 100, 200 y 400 MHz para una separación entre subportadoras de 15, 30, 60 y 120 kHz respectivamente.
- **Ahorro de energía:** algunas de las herramientas introducidas en la *Release 16* para ahorrar energía son configuraciones optimizadas de bajo consumo, mecanismos de control de energía mejorados, reducción de energía de la capa MIMO adaptativa, programación mejorada entre ranuras y control de agregación de portadoras de bajo consumo. La *Release 16* también introduce una señal de activación (WUS) para informar al dispositivo sobre posibles transmisiones pendientes. Optimiza los períodos de monitoreo de recepción discontinua (DRX) de baja potencia del terminal, lo que reduce el consumo general de energía.

3. SISTEMAS CELULARES CON UAV

3.1. INTRODUCCIÓN A LOS UAV

Desde la fotografía aérea hasta la búsqueda y rescate y el servicio de paquetería, los casos de uso de UAV, también conocidos como drones, se están disparando. Se espera que sigan surgiendo nuevos casos de uso, lo que impulsará el crecimiento de los UAV. Dado que muchos de estos casos de uso se beneficiarían de la conexión de los UAV a las redes celulares para un mejor control y comunicaciones, se espera que el crecimiento en el mercado de los UAV brinde nuevas oportunidades comerciales prometedoras para los operadores móviles [3].

El 3GPP ha llevado a cabo varios artículos para explorar los desafíos y oportunidades para utilizar los UAV como un nuevo tipo de equipo de usuario (UE), denominado UE aéreo. Un hallazgo interesante de estos estudios es que la línea de visión (LoS) mejorada entre los UE aéreos y las estaciones base terrestres (BS) aumentaría significativamente la interferencia en el sistema, lo que exige nuevas estrategias para acomodar sin problemas los UE aéreos y terrestres en el mismo sistema [4]. Ya se han propuesto diversas técnicas para abordar este problema de interferencia, que muestran resultados prometedores. Si bien el 3GPP se ocupa principalmente de conectar vehículos aéreos no tripulados a las redes celulares, la industria y la academia están avanzando hacia el siguiente nivel de investigación y desarrollo que promete aprovechar todo el potencial de las comunicaciones con UAV. Como se ilustra en la **figura 3.1**, están explorando la oportunidad de realizar repetidores voladores y BS montados en UAV que pueden reubicarse dinámicamente para aumentar la cobertura, la eficiencia espectral, y calidad de experiencia del usuario. Algunos proveedores como Nokia y Huawei ya han probado en el campo sus prototipos para demostrar la eficacia de tales BS voladoras montados en vehículos aéreos no tripulados [4], [5].

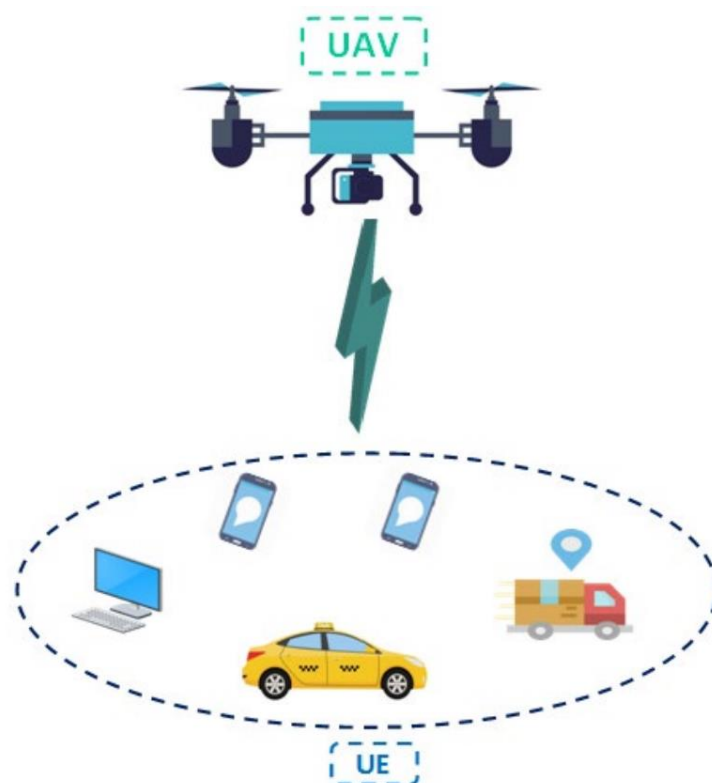


Figura 3.1. Comunicaciones móviles con UAV [3]

3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS UAV

Los UAV, comúnmente conocidos como drones, están disponibles en diferentes tamaños y especificaciones, como se ilustra en la **figura 3.2**. Pueden desplegarse rápidamente cuando sea necesario, lo que los convierte en candidatos prometedores para proporcionar conectividad celular. En este apartado, se resumen y explican las características de algunos drones típicos, con especial atención en su impacto en las comunicaciones móviles asistidas por UAV.

3.2.1. CARGA ÚTIL

La carga útil se refiere al peso máximo que puede transportar un dron. Las cargas útiles de los drones varían desde decenas de gramos hasta cientos de kilogramos [6]. Cuanto mayor sea la carga útil, más equipos y accesorios se puede transportar a expensas de un tamaño de dron más grande, mayor capacidad de la batería y menor duración en el aire. Las cargas útiles típicas incluyen cámaras de vídeo y todo tipo de sensores, que podrían utilizarse con fines comerciales, de reconocimiento y de vigilancia. Al ayudar en las comunicaciones móviles, los drones pueden transportar UE celulares como teléfonos móviles o tabletas, cuyo peso suele ser inferior a 1 kilogramo. Los drones también pueden transportar o montar BS o cabezales de radio remotos (RRH) para proporcionar servicios celulares. En este caso, la carga útil de los drones debe pesar al menos unos pocos kilogramos.

3.2.2. MECANISMO DE VUELO

Dependiendo del mecanismo de vuelo empleado, los drones se pueden clasificar en tres tipos:

- **Los drones multirrotor** permiten el despegue y el aterrizaje vertical y pueden flotar sobre una ubicación fija para proporcionar cobertura continua en determinadas áreas. Esta alta maniobrabilidad los hace adecuados para ayudar en las comunicaciones móviles, ya que pueden desplegar una BS en los lugares deseados con alta precisión o volar en una trayectoria designada mientras transportan una BS. Sin embargo, los drones multirrotor tienen una movilidad limitada y consumen una gran cantidad de energía, ya que tienen que luchar contra la gravedad todo el tiempo.
- **Los drones de ala fija** pueden deslizarse por el aire, lo que los hace significativamente más eficientes energéticamente y capaces de transportar carga útil pesada. El planeo también ayuda a los drones de ala fija a viajar a mayor velocidad. Las desventajas de estos drones son que requieren una pista para despegar y aterrizar ya que el despegue y aterrizaje vertical no son posibles, y no pueden flotar sobre una ubicación fija, además de ser más caros que los multirrotor.
- **Los drones híbridos de ala fija/rotatoria** han llegado recientemente al mercado para ofrecer un compromiso entre los dos tipos de drones mencionados anteriormente. Un ejemplo ilustrativo de un dron híbrido de ala fija/rotativa es el *Parrot Swing* que se muestra en la **figura 3.1(a)**, que puede despegar verticalmente, llegar rápidamente a su destino deslizándose por el aire y luego pasar a modo estacionario utilizando cuatro rotores.

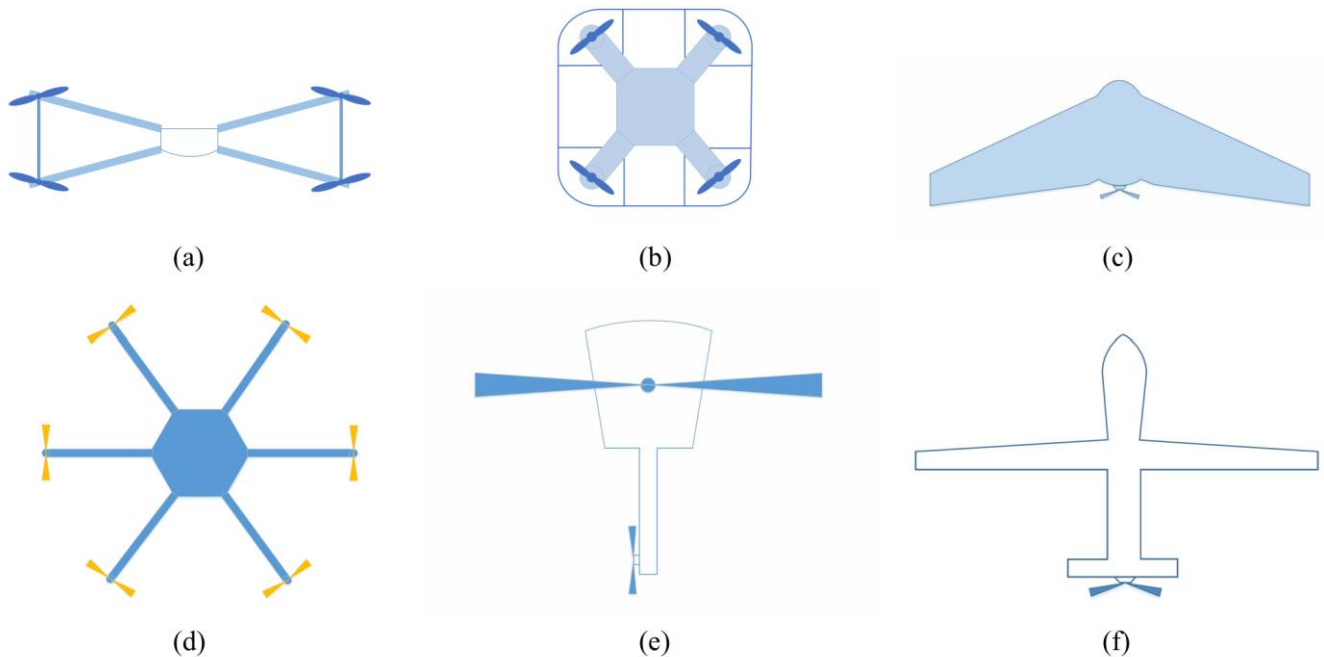


Figura 3.2. Diferentes tipos de UAV (a) *Parrot Swing* (vista frontal). (b) *Kogan Nano Drone*. (c) *Parrot Disco*. (d) *DJI Spreading Wings S900*. (e) *Scout B-330 UAV helicopter*. (f) *Predator B*. Fuente: [3]

3.2.3. ALCANCE Y ALTITUD

El alcance de un dron se refiere a la distancia desde la que se puede controlar de forma remota. El alcance varía desde decenas de metros para los drones pequeños hasta cientos de kilómetros para los grandes. La altitud aquí se refiere a la altura máxima que puede alcanzar un dron independientemente de las regulaciones específicas del país. La altitud máxima de vuelo de un dron determinado es un parámetro crítico para las comunicaciones celulares asistidas por UAV, ya que una BS UAV necesita variar su altitud para maximizar la cobertura terrestre y satisfacer diferentes requisitos de calidad de servicio (QoS). En general, las plataformas aéreas se pueden clasificar en dos tipos dependiendo de su altitud:

- **Las plataformas de baja altitud (LAP)** generalmente se emplean para ayudar en las comunicaciones celulares, ya que son más rentables y permiten un despliegue rápido. Además, los LAP suelen proporcionar enlaces de línea de visión de corto alcance que pueden mejorar significativamente el rendimiento de la comunicación.
- **Las plataformas de gran altitud (HAP)**, como el que se ilustra en la **figura 3.3**, también pueden proporcionar conectividad celular [7]. En comparación con los LAP, los HAP tienen una cobertura más amplia y pueden permanecer mucho más tiempo en el aire. Sin embargo, el despliegue de HAP es más complejo y se consideran principalmente como un vehículo para proporcionar conectividad a Internet a grandes fracciones de la población mundial que actualmente no cuentan con redes celulares. Es más, el uso de HAP en comunicaciones celulares puede provocar una interrupción total de la red debido a una interferencia entre células extremadamente grande. De manera que rara vez se consideran en la literatura sobre redes celulares asistidas por UAV.

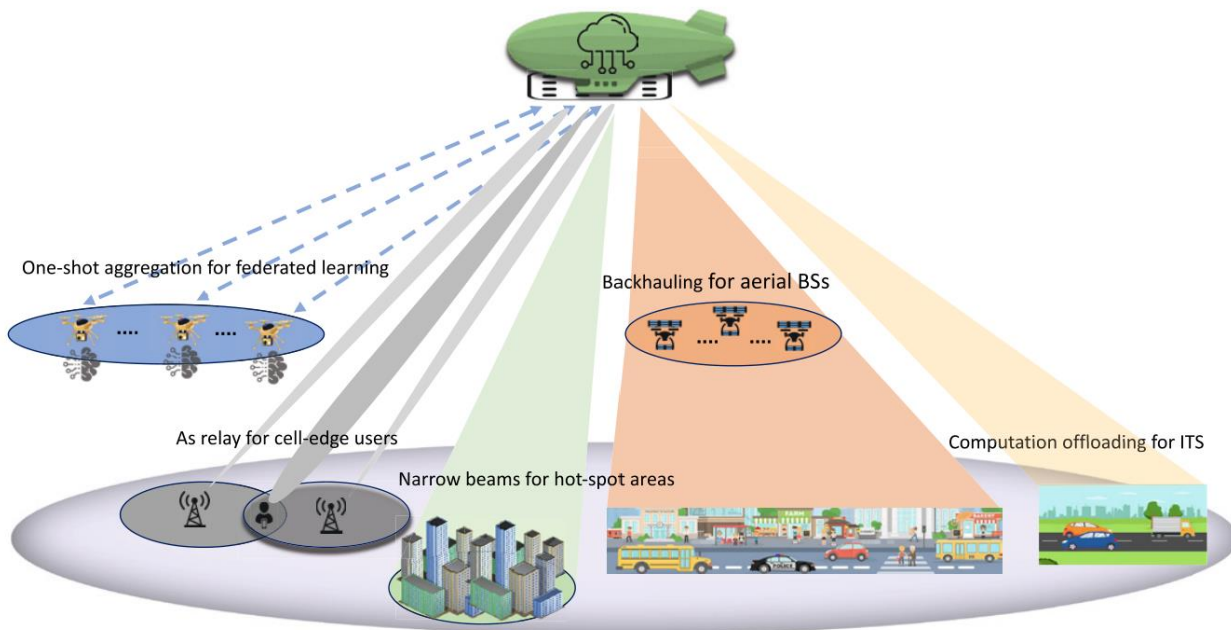


Figura 3.3 Diferentes escenarios de aplicación de los HAP. Fuente [7]

3.2.4. VELOCIDAD Y TIEMPO DE VUELO

Los drones pequeños pueden alcanzar velocidades por debajo de los 15 m/s, mientras que los más grandes pueden alcanzar los 100 m/s. Cuando una BS UAV vuela en una trayectoria designada para maximizar su energía y eficiencia espectral, su velocidad debe considerarse cuidadosamente si la trayectoria requiere giros frecuentes. El tiempo máximo que un dron puede pasar en el aire sin recargar ni repostar combustible se denomina tiempo de vuelo. Los drones comerciales pequeños suelen tener un tiempo de vuelo de 20 a 30 minutos, mientras que algunos drones grandes pueden durar horas. Las tecnologías emergentes han prolongado el tiempo de vuelo de los pequeños drones. Por ejemplo, el dron *Skyfront Tailwind* puede alcanzar una autonomía de hasta 4,5 horas con fuentes de energía híbridas-eléctricas [8]. Sin embargo, el tiempo de vuelo limitado de los UAV disponibles en el mercado es actualmente uno de los principales factores prácticos que restringen su despliegue a gran escala en las redes móviles.

3.2.5. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La batería de un dron condiciona significativamente su tiempo de vuelo. Si bien las baterías recargables alimentan la mayoría de los drones comerciales, algunos drones grandes pueden funcionar con combustibles como el gas para tiempos de vuelo más prolongados [9]. El empleo de energía solar para alimentar drones también es una técnica prometedora [10]. Para las BS montadas en drones, la fuente de alimentación debe soportar la funcionalidad tanto del dron como de su equipo a bordo, conjunto de antenas, amplificadores, circuitos, etc. Por ejemplo, una BS aérea típica requiere 5 W como potencia máxima de transmisión [11] que debe ser alimentado por su fuente de energía a bordo.

3.3.CASOS DE USO DE LAS ESTACIONES BASE AEREAS CON UAV

Con el objetivo de clarificar la viabilidad de los UAV como estaciones base aéreas, en esta sección vamos a ver distintos casos de uso en los que su aplicación es conveniente [12].

3.3.1. MEJORA DE LA COBERTURA Y LA CAPACIDAD EN REDES CELULARES 5G

La necesidad de acceso radio de alta velocidad ha crecido incesantemente, impulsada por la rápida proliferación de dispositivos móviles de alta capacidad, como teléfonos inteligentes, tabletas y, más recientemente, drones UE y dispositivos estilo IoT (*Internet of Things*). Como tal, la capacidad y cobertura de las redes celulares inalámbricas existentes se han visto muy sobrecargadas, lo que llevó al surgimiento de una gran cantidad de tecnologías inalámbricas que buscan superar este desafío. Estas tecnologías, que incluyen comunicaciones de dispositivo a dispositivo (D2D), redes de células pequeñas (*small cells*) ultradensas y comunicaciones de ondas milimétricas, se consideran colectivamente como el nexo de los sistemas celulares 5G de próxima generación.

Sin embargo, a pesar de sus beneficios, esas soluciones tienen sus propias limitaciones. Por ejemplo, la comunicación D2D sin duda requerirá una mejor planificación de frecuencias y un uso de recursos en las redes celulares. Mientras tanto, las redes de células pequeñas ultradensas enfrentan muchos desafíos en términos de *backhaul*, interferencia y modelado general de la red. De manera similar, la comunicación *mmW* está limitada por el bloqueo y la alta dependencia de la comunicación LoS para cumplir de manera efectiva la promesa de comunicaciones de alta velocidad y baja latencia.

Por todo esto, se prevé que las estaciones base aéreas con UAV son un complemento casi obligatorio de las redes 5G futuras, que permitirá resolver algunos de los desafíos de las tecnologías existentes.

La implementación de LAP-UAV puede ser un enfoque rentable para proporcionar conectividad inalámbrica en áreas geográficas con infraestructura celular limitada. Además, el uso de estaciones base aéreas con UAV es una alternativa prometedora a las *small cells* cuando se pretende dar servicio a eventos temporales. Esto se debe al corto período de tiempo durante el cual estos eventos requieren acceso inalámbrico.

Mientras tanto, los HAP-UAV pueden proporcionar una solución sostenible a más largo plazo para la cobertura en entornos rurales. Los UAV pueden proporcionar conectividad bajo demanda, servicio inalámbrico de alta velocidad de datos y oportunidad de descarga de tráfico en puntos de acceso y durante eventos temporales como partidos de fútbol o conciertos. Claramente, las estaciones base aéreas pueden proporcionar un complemento importante a las redes de células pequeñas ultradensas. A pesar de considerar otros casos de uso a continuación, este TFG se centrará en esta aplicación en concreto.

Además, las comunicaciones de ondas milimétricas son una aplicación que los UAV pueden aprovechar para establecer enlaces de comunicación LoS con los usuarios. Además, la combinación de UAV con *mmW* y MIMO masivo puede crear un tipo completamente nuevo de red celular dinámica y aérea para brindar servicios inalámbricos de alta capacidad, si está bien planificada y operada.

Para los escenarios de redes celulares antes mencionados, está claro que el uso de UAV es bastante adecuado debido a sus características clave que figuran en la **tabla 3.1**, como agilidad, movilidad, flexibilidad y altitud adaptativa. De hecho, al explotar estas características únicas y establecer enlaces de comunicación LoS, los UAV pueden mejorar el rendimiento de las redes inalámbricas terrestres existentes en términos de cobertura, capacidad, latencia y calidad general del servicio. Estos escenarios son claramente prometedores y se puede considerar que los UAV son una parte integral de las redes celulares 5G y futuras, a medida que la tecnología evoluciona aún más y surgen nuevos escenarios operativos. Naturalmente, cosechar estos beneficios requerirá superar numerosos desafíos, que serán abordados en apartados posteriores.

Tabla 3.1. Diferencias entre estaciones base con UAV y estaciones base terrestre [12]

Estación base aérea con UAV	Estación base terrestre
El despliegue es tridimensional	El despliegue es bidimensional
Despliegues frecuentes y a corto plazo	Despliegues permanentes y a largo plazo
Ubicaciones sin restricciones	Ubicaciones fijadas
Libertad de movimiento	Estática y fija

3.3.2. UAV COMO ESTACIONES BASE AÉREAS PARA ESCENARIOS DE SEGURIDAD PÚBLICA

Durante desastres naturales de gran escala y eventos inesperados, las redes de comunicaciones terrestres existentes pueden resultar sobrecargadas significativamente, dañadas o incluso destruidas por completo. En particular, las estaciones base y la infraestructura de comunicaciones terrestres a menudo pueden verse comprometidas durante los desastres naturales. En tales escenarios, existe una necesidad vital de comunicaciones de seguridad pública entre las fuerzas de seguridad y las víctimas para las operaciones de búsqueda y rescate. En consecuencia, se necesita un sistema de comunicación de emergencia sólido, rápido y capaz para permitir comunicaciones efectivas durante las operaciones de seguridad pública. En escenarios de seguridad pública, un sistema de comunicación tan fiable no sólo contribuirá a mejorar la conectividad, sino también a salvar vidas.

De manera que el uso de redes aéreas basadas en UAV, como se muestra en la **Figura 3.4**, es una solución prometedora para permitir comunicaciones inalámbricas rápidas, flexibles y fiables en escenarios de seguridad pública. Dado que los UAV no requieren una infraestructura costosa y muy limitada (por ejemplo, cableado), pueden volar fácilmente y cambiar dinámicamente sus posiciones para proporcionar redes de comunicación de seguridad pública bajo demanda. Además, los UAV pueden moverse continuamente para proporcionar una cobertura total a un área determinada en el mínimo tiempo posible. Por lo tanto, el uso de estaciones base montadas en vehículos aéreos no tripulados puede ser una solución adecuada para proporcionar una conectividad rápida y ubicua en aplicaciones de seguridad pública.

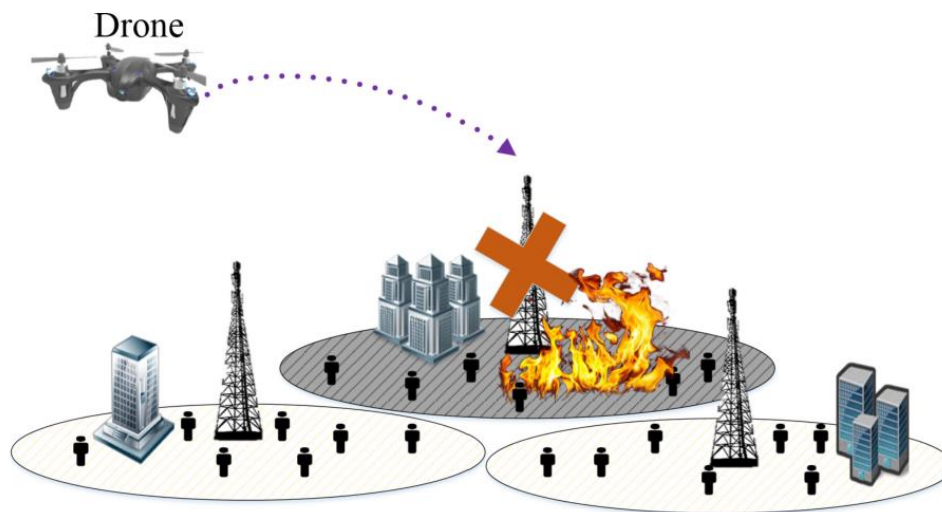


Figura 3.4. Dron en una situación de seguridad pública [12]

3.3.3. MIMO 3D Y COMUNICACIONES DE ONDA MILIMÉTRICA

Debido a sus posiciones aéreas y su capacidad de desplegarse en ubicaciones específicas, los UAV pueden verse como sistemas de antenas voladoras que pueden explotarse para realizar comunicaciones MIMO masivas, MIMO de red 3D y *mmW*. Por ejemplo, en los últimos años ha habido un interés considerable en el uso de 3D MIMO, también conocido como MIMO de dimensión completa, mediante la explotación de las dimensiones vertical y horizontal en redes celulares terrestres. En particular, como se muestra en la **figura 3.5**, la formación de haces 3D permite la creación de haces separados en el espacio tridimensional al mismo tiempo, reduciendo así la interferencia entre células. En comparación con el MIMO bidimensional convencional, las soluciones 3D MIMO pueden generar un mayor rendimiento general del sistema y pueden admitir una mayor cantidad de usuarios. En general, 3D MIMO es más adecuado para escenarios en los que el número de usuarios es alto y están distribuidos en tres dimensiones con diferentes ángulos de elevación con respecto a su estación base de servicio. Debido a la gran altitud de las estaciones base aéreas con UAV, los usuarios terrestres pueden distinguirse fácilmente en diferentes altitudes y ángulos de elevación medidos con respecto al UAV. Además, las condiciones del canal LoS en las comunicaciones UAV-tierra permiten una formación de haz eficaz tanto en el dominio de acimut como de elevación (es decir, en 3D). Por lo tanto, los UAV-BS son candidatos adecuados para emplear 3D MIMO.

Los UAV también pueden ser un elemento clave para las comunicaciones *mmW*. Por un lado, los UAV equipados con capacidades *mmW* pueden establecer conexiones LoS con usuarios terrestres, reduciendo así las pérdidas de propagación mientras operan a altas frecuencias. Por otro lado, con el uso de antenas de pequeño tamaño (en frecuencias de *mmW*) en los UAV, se pueden explotar técnicas MIMO avanzadas, como la MIMO masiva, para operar comunicaciones de *mmW*.

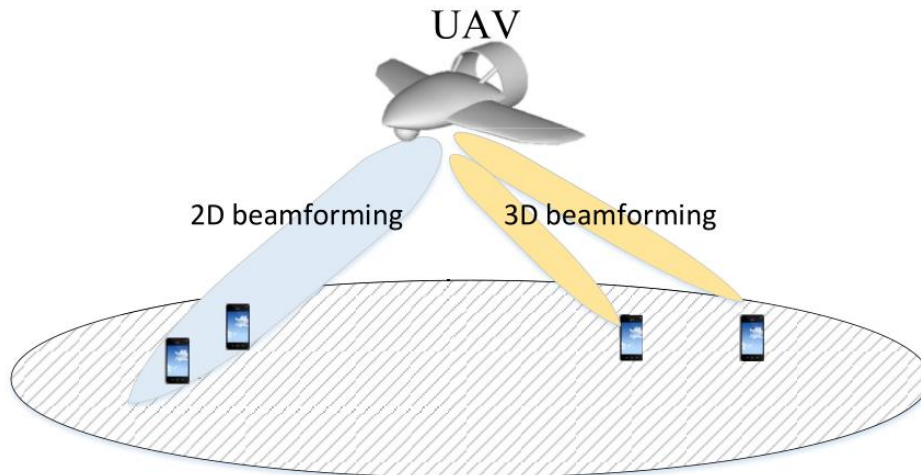


Figura 3.5. Conformación de haces usando un dron. [12]

3.3.4. UAV PARA COMUNICACIONES IOT

Las tecnologías de redes inalámbricas están evolucionando rápidamente hacia un entorno de IoT masivo que debe integrar una combinación heterogénea de dispositivos que van desde teléfonos inteligentes y tabletas convencionales hasta vehículos, sensores, dispositivos portátiles y, por supuesto, drones. Hacer realidad las aplicaciones de IoT, como la gestión de infraestructuras de ciudades inteligentes, la atención sanitaria, el transporte y la gestión de la energía, requiere una conectividad inalámbrica eficaz entre una gran cantidad de dispositivos de IoT que deben entregar sus datos de forma fiable, normalmente a altas velocidades de datos o latencia ultra baja.

Por ejemplo, en un entorno de IoT, la eficiencia energética, la latencia ultra baja, la fiabilidad y las comunicaciones de enlace ascendente de alta velocidad se convierten en desafíos importantes que no suelen ser tan críticos en los casos de uso de redes celulares convencionales. En particular, los dispositivos de IoT tienen una batería muy limitada y, por lo general, no pueden transmitir a larga distancia debido a sus limitaciones de energía.

En este sentido, el uso de UAV es una solución prometedora para una serie de desafíos asociados con las redes de IoT. De hecho, debido a la naturaleza aérea de los UAV y su gran altitud, pueden desplegarse eficazmente para reducir los efectos de sombra y bloqueo como la principal causa de atenuación de la señal en enlaces inalámbricos. Posteriormente, los dispositivos IoT con batería limitada necesitarán una potencia significativamente menor para transmitir sus datos a los UAV. En otras palabras, los UAV se pueden posicionar en función de las ubicaciones de los dispositivos IoT, lo que permite que esos dispositivos se conecten con éxito a la red utilizando una potencia de transmisión mínima. Además, los UAV también pueden servir a sistemas masivos de IoT actualizando dinámicamente sus ubicaciones en función del patrón de activación de los dispositivos.

3.4.DESAFÍOS Y POSIBLES SOLUCIONES DE LAS BS UAV

3.4.1. EFICIENCIA ENERGÉTICA

Un problema importante con los BS basados en drones es la disponibilidad de energía [13]. Como repetidores en 5G y en el futuro 6G se espera que las redes celulares transmitan mayores volúmenes de información y proporcionen QoS fiable, buen rendimiento y latencia mínima, de forma que el gasto de energía de los repetidores aumenta exponencialmente. El gasto energético de las BS UAV está principalmente asociado con:

- El consumo de energía asociado con la tarea de sobrevolar sobre una localización concreta
- El consumo de energía para la comunicación y el procesado de señales

Los autores en [14] analizaron sistemas híbridos de suministro de energía específicos para drones que combinan baterías con otros tipos de fuentes de energía como pilas de combustible, células solares, supercondensadores, anclaje a red y recarga en vuelo habilitada por láser.

En el contexto de eliminar el gasto energético innecesario, los autores en [15] propusieron una solución para la eliminación del movimiento redundante de BS aéreas. La solución que propusieron se basa en derivar nuevas posiciones para las estaciones base considerando la movilidad general y los patrones de movimiento de los UE. Los autores consideraron que existen escenarios de movilidad de UE, en los que no es necesario reposicionar la estación base, principalmente debido a ligeras variaciones de QoS dentro de un espectro aceptable. Este problema de optimización multiobjetivo se puede resumir como reducir la energía de vuelo de la BS UAV consumida, manteniendo al mismo tiempo una capacidad de red que se aproxima a la asociada con las posiciones óptimas de los nodos. Se sugiere que, para maximizar la disponibilidad de energía de las BS UAV, los drones no sigan con precisión la mejor posición que permita la QoS, sino que permanezcan a una distancia previamente calculada de la óptima. Siguiendo este enfoque no centrado en la QoS, la energía consumida para volar se puede mantener al mínimo.

Otro tema importante es considerar puntos de recarga de baterías para los UAV. Esta solución es más costosa y complicada, ya que requiere desplegar puntos de recarga en zonas urbanas. Además, el nivel de batería de los UAV debe estar monitorizado. A lo largo de los años han ido surgiendo diferentes soluciones a este problema:

- Monitorear la batería de los UAV con Macro Estaciones Base (MBS) de manera que cuando la batería alcanza un estado crítico, los UAV vuelven a la MBS y se reemplazan las baterías por otras totalmente cargadas [16] [17].
- Los autores en [18] proponen un algoritmo para el reemplazo automático de los UAV, el cual ofrece servicio ininterrumpido a los usuarios.
- Los autores en [19] y [20] proponen la instalación de pequeñas estaciones de recarga en torres de BS y líneas eléctricas de zonas urbanas, respectivamente.

3.4.2. MOVILIDAD Y TRAYECTORIA

Se puede suponer que las capacidades de movilidad y la planificación de rutas para todo el enjambre de UAV es de suma importancia para el despliegue de una red celular con UAV. La movilidad y el posicionamiento óptimo de las estaciones base aéreas es una tarea compleja y bastante complicada, siendo su complejidad una función directa de un espectro completo de parámetros altamente volátiles:

- El número de BS UAV que participan en el despliegue.
- El tipo de interfaces entre estos nodos participantes.
- La elevación, ángulo, posición y velocidad de cada UAV.
- Disponibilidad de energía y gasto energético previsto.
- La topología del terreno y posibles obstáculos que ocasionen la pérdida de visión directa.

Existen diversos estudios que tienen en cuenta estos parámetros a la hora de encontrar un posicionamiento óptimo de los UAV [21] – [24]. La principal contribución de estos artículos es investigar el despliegue 3D óptimo de múltiples UAV para maximizar el rendimiento de la cobertura del DL utilizando la mínima potencia de transmisión. Dada una zona geográfica determinada, los requisitos de cobertura de los UE y una serie de UAV que utilizan antenas direccionales, desarrollan un estudio para determinar las ubicaciones 3D óptimas de los BS UAV.

3.4.3. CONEXIÓN CON EL *BACKHAUL*

Una de las principales diferencias entre las BS y las BS UAV es que en las terrestres la conexión con el *backhaul* se suele realizar mediante fibra, lo que genera una gran capacidad y ancho de banda. Sin embargo, en las BS UAV este enlace debe ser inalámbrico lo que afecta considerablemente a la QoS de los usuarios. En la mayoría de los trabajos relacionados con estaciones base aéreas con UAV, se suele tener en cuenta solamente el enlace de acceso entre el UAV y el UE, dejando de lado el enlace entre el UAV y el núcleo de red, conocido como *backhaul*. Como vemos en la **figura 3.6**, en este TFG vamos a abordar el problema del *backhaul* de forma teórica intentando dar con una solución eficiente, considerando varias posibilidades:

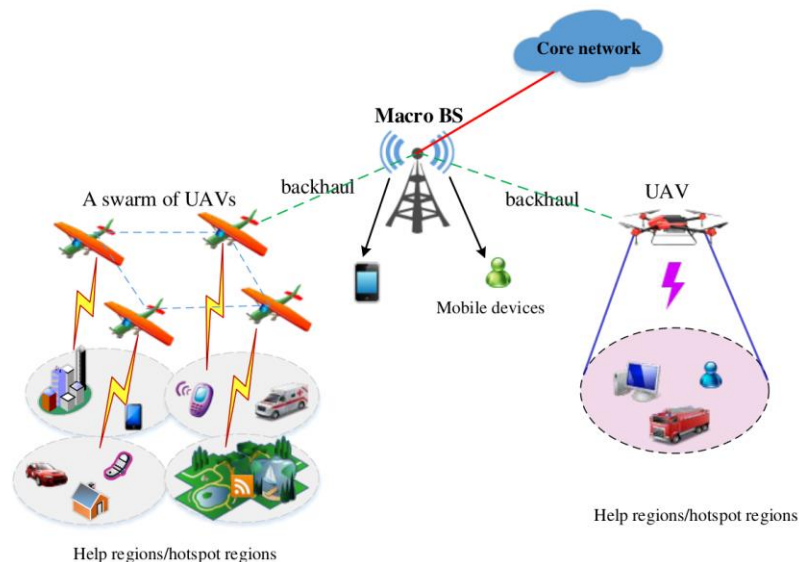


Figura 3.6. Escenario de ejemplo implementando BS UAV incluyendo la conexión con el *backhaul* [25]

- Mediante enlaces de Radiofrecuencia (RF):** esta es la solución más utilizada en los últimos años. Se trata de utilizar una red interconectada de UAV para dar cobertura a un número de UE. Al ser una red interconectada, tan solo es necesario que un UAV esté en visión directa con una MBS para enlazarse con el *backhaul*, ya que los UAV adyacentes actúan como repetidores de dicho enlace [26]. Por lo tanto, los UAV deberían ser desplegados lo más cerca posible unos de otros para asegurar la calidad del enlace UAV-UAV con el *backhaul*, como se aprecia en la **figura 3.7**. Además, consideramos que los UAV adyacentes de nuestra red utilizan canales ortogonales de frecuencia para que no exista interferencia entre ellos, de manera que dos UAV pueden reutilizar la misma banda de frecuencia siempre que no sean adyacentes. Para el enlace de acceso podemos utilizar TDD y FDD para asegurarnos que no existe interferencia cocanal. Sin embargo, esto no evita que ambos enlaces puedan experimentar interferencias, desvanecimiento y bloqueos que produzcan pérdidas de visibilidad entre las estaciones.

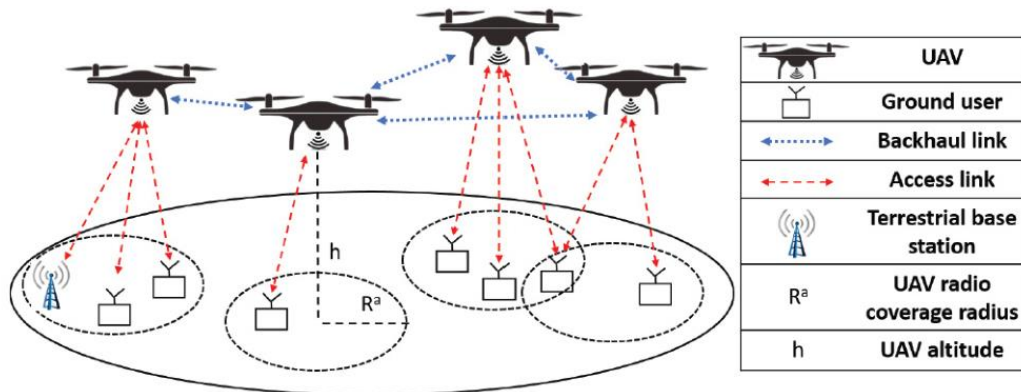


Figura 3.7. Red multi-UAV incluyendo enlace con el *backhaul* y el enlace de acceso [26]

- Vía satélite:** los autores en [27] ofrecen una conexión con el *backhaul* vía satélite, ilustrado en la **figura 3.8**. Esta opción no es muy convincente, ya que los enlaces satelitales son muy costosos y es posible que no ofrezcan un rendimiento suficiente para este tipo de comunicaciones. En el estudio previamente mencionado, no existen BS terrenas, lo cual hace lógico el uso de un enlace satelital. Pero al no ser el escenario de este TFG, se descartaría a priori.

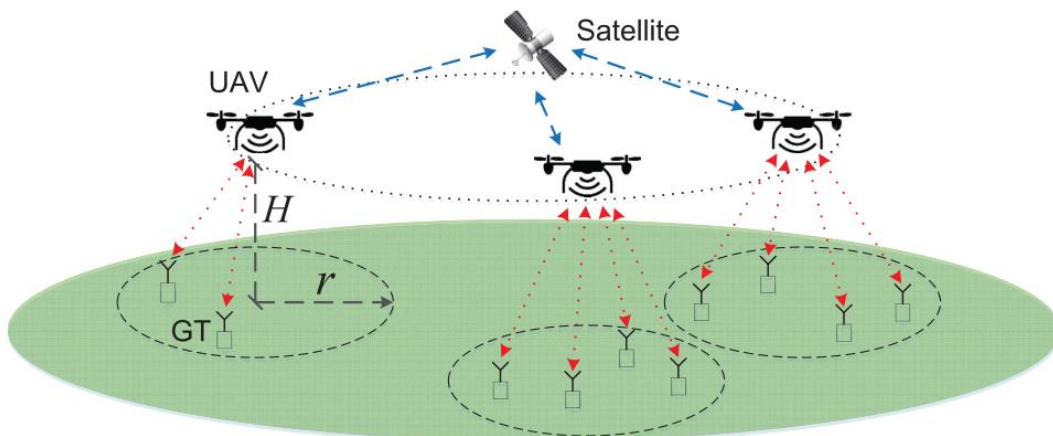


Figura 3.8. Red multi-UAV que incluye conexión con el *backhaul* vía satélite [27]

- **Mediante *Free Space Optical (FSO)*:** los autores en [28] investigaron el uso de FSO para la conexión con el *backhaul* y además cargar la batería del UAV, de manera que se incrementa el tiempo de vuelo y la capacidad del enlace. Resultados numéricos en este estudio verifican un aumento del 25% en el tiempo de vuelo del dron, como se aprecia en la **figura 3.9**. En comparación con un enlace clásico de RF, la comunicación con FSO alcanza mayor capacidad con distancias más largas. Se ha demostrado de forma experimental, que un enlace FSO alcanza 1.28 Tbps de tasa de datos a una distancia de 210 metros [29]. Sin embargo, esto implica que siempre debe haber LoS entre la BS terrena y la BS UAV, lo cual puede suponer un gran inconveniente dependiendo del entorno.

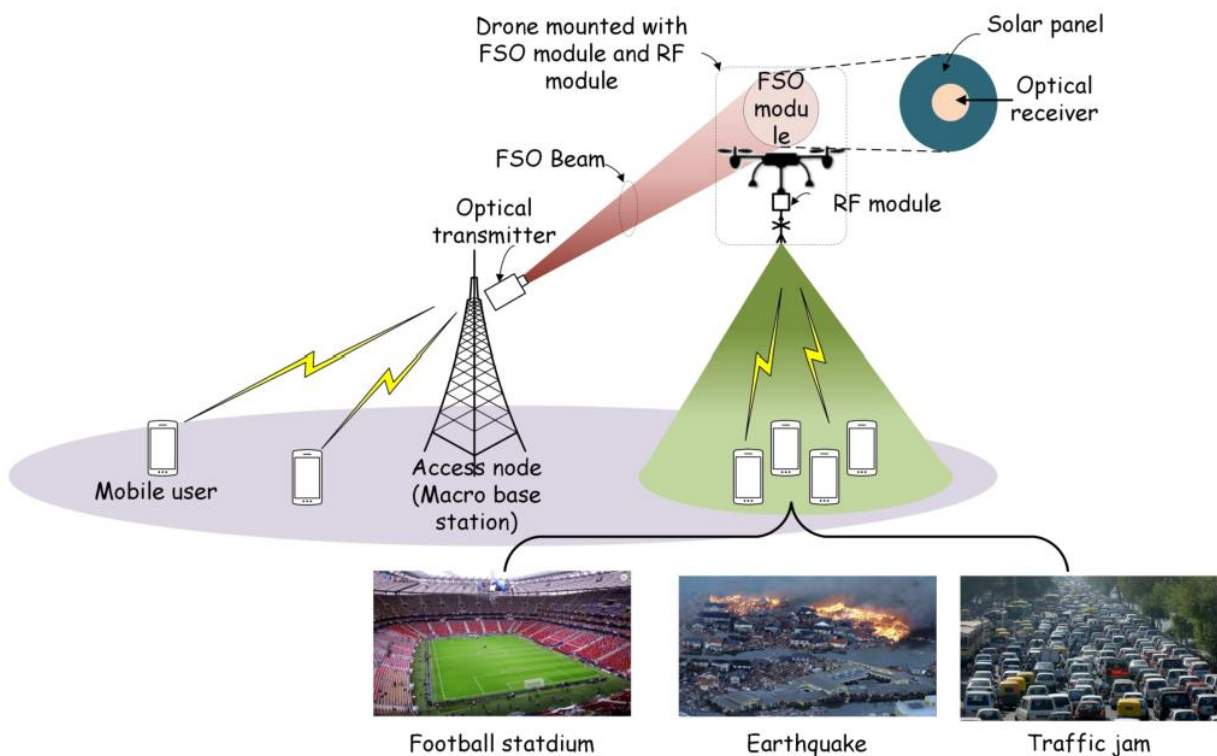


Figura 3.9. Red basada en BS UAV incluyendo FSO como enlace con el *backhaul* [30]

- **Mediante un híbrido entre FSO y THz:** las comunicaciones de Terahercios (THz) existen entre las *mmW* y la banda infrarroja, desde los 100 GHz hasta los 10 THz de frecuencia. Cuentan con ventajas como alta ganancia, seguridad y una gran cantidad de espectro disponible [31]. Sin embargo, estas comunicaciones son muy sensibles a bloqueos y desvanecimiento. La idea que proponen los autores de [32] es combinar FSO con las bandas de THz, ya que se complementan. Un enlace de FSO es sensible a la niebla y demás turbulencias, mientras que un enlace de THz es muy sensible a la lluvia, de manera que un paradigma híbrido podría ser una solución eficiente para el enlace con el *backhaul*. No obstante, este esquema híbrido no es adecuado para el enlace de acceso debido a su necesidad de visión directa, sensibilidad a los bloqueos y la movilidad de los usuarios. Con esto en mente, una comunicación más robusta y fiable para el enlace de acceso sería mediante bandas milimétricas.

3.5. ESTUDIOS SOBRE EL TERRENO CON BS UAV

Este estudio desarrollado por Zdenek Becvar *et al* [33], trata sobre el rendimiento de las BS UAV en comparación las BS terrenas. A pesar de datar del año 2017, es un artículo muy ilustrativo sobre el funcionamiento de las BS UAV, como se aprecia en la **figura 3.10**. Por eso mismo vamos a analizarlo para entender correctamente su funcionamiento.

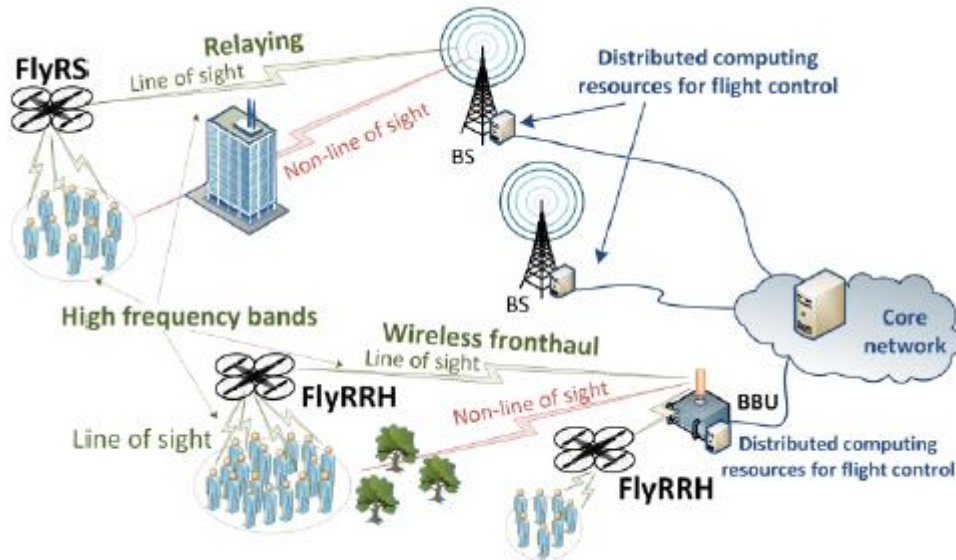


Figura 3.10. Arquitectura de una red móvil implementando BS UAV [33]

El escenario trata de una multitud moviéndose a lo largo de una calle, como si estuviesen abandonando un estadio después de un partido de fútbol o un concierto.

El estudio se basa en comparar dos tipos de cobertura:

- a) La primera consiste en el escenario convencional con un despliegue de *ultra-dense small cells*, como se muestra a continuación en la **figura 3.11**.

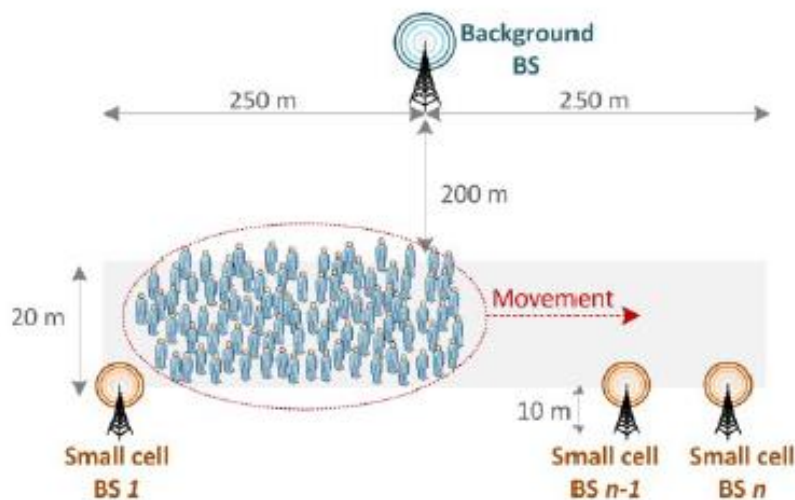


Figura 3.11. Despliegue de *small cells* para dar cobertura a una multitud [33]

- b) La segunda consiste en el uso de una BS UAV para dar cobertura a la misma multitud, como vemos en la **figura 3.12**.

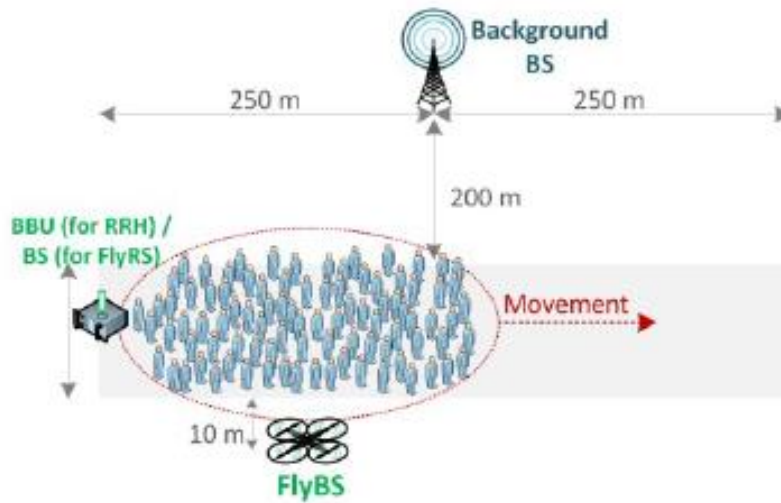


Figura 3.12. Despliegue de BS UAV para dar cobertura a una multitud [33]

En ambos escenarios, los usuarios se mueven linealmente como una multitud en una calle con una longitud de 500 m. El número de usuarios activos varía entre 10 y 1000. Los usuarios que ingresan a la calle se distribuyen en el tiempo siguiendo el movimiento real de los usuarios modelado de acuerdo con el "escenario de cuello de botella" descrito en [34]. Los usuarios permanecen en la zona de simulación hasta llegar al final de la calle (en el escenario real, representada, por ejemplo, por la entrada a una estación de metro). Además, en ambos escenarios, se despliega una única MBS a 200 m del centro de la calle y su altura es de 5 m. Esta MBS introduce interferencias en el sistema y también puede servir a usuarios en segundo plano, no atendidos por la BS UAV.

En el primer escenario, las *small cells* están distribuidas uniformemente en posiciones fijas a lo largo de la calle a 10 metros unas de otras. En el segundo, las BS UAV siguen el centro de gravedad de la multitud considerando una altura de 10 metros del suelo por razones de seguridad. Para determinar esta posición, nos servimos de las coordenadas de los UE $[x_i, y_i]$, las cuales se ponderan con el rendimiento requerido de los UE. De manera que, en cada instante temporal la BS UAV navega a coordenadas $[x_d, y_d]$ con las siguientes fórmulas (3.1) y (3.2):

$$x_d = \frac{1}{n_u} \sum_i \alpha_i x_i \quad (3.1)$$

$$y_d = \frac{1}{n_u} \sum_i \alpha_i y_i \quad (3.2)$$

Donde n_u es el número de UE administrado por la BS UAV y $\alpha_i \in < 0, 1 >$ es el rendimiento relativo requerido por el UE.

Se modelan canales de radio entre los UE y todos los tipos de BS y para el *backhaul* inalámbrico según [35] para la banda de 38 GHz. Suponemos un ancho de banda de 500 MHz y la potencia de transmisión de todas las BS (aéreas o no) es igual a 32 dBm. Según [35], asumimos además un enlace parcialmente obstruido sin visión directa (exponente de pérdidas de propagación = 2,21) y antenas omnidireccionales sin ganancia entre los UE y todas las BS. Para el *backhaul*, asumimos visión directa (exponente de pérdidas de propagación = 1,92) y antenas direccionales con una ganancia de 20 dBi. Con respecto a la BS UAV, el ancho de banda es compartido entre los enlaces UE-BS UAV y BS UAV-BS para maximizar el rendimiento general. Además, asumimos modulaciones y codificación adaptativas de acuerdo con los estándares 3GPP para redes celulares (modulaciones que van desde QPSK a 256 QAM y velocidades de código de 78/1024 a 948/1024). Para el análisis de la eficiencia energética de los UE, utilizamos los modelos de consumo de energía definidos en [36]. Todos los resultados se promedian con movimiento aleatorio de usuarios. En las siguientes **figuras** se presentan los resultados obtenidos:

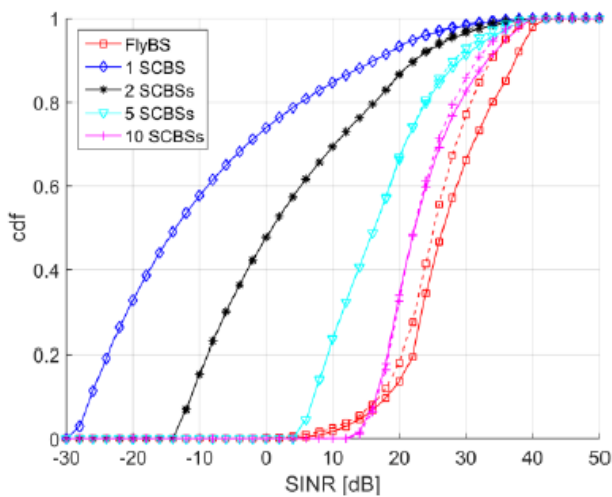


Figura 3.14. Función de distribución de la SINR experimentada por los UE para 10 UE (trazo continuo) y para 10000 (trazo discontinuo) [33]

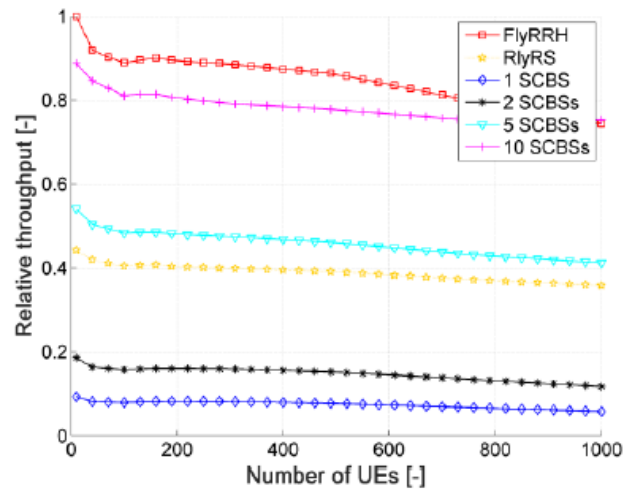


Figura 3.13. Rendimiento de cada tipo de BS en la red en función del número de UE [33]

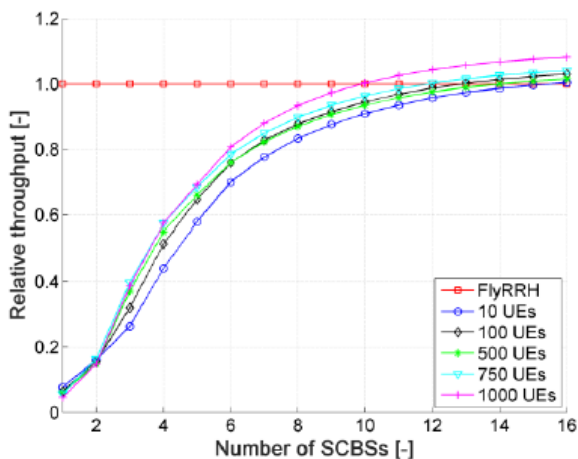


Figura 3.15. Ratio del rendimiento de BS UAV y el número de *small cells* desplegadas a lo largo de la calle [33]

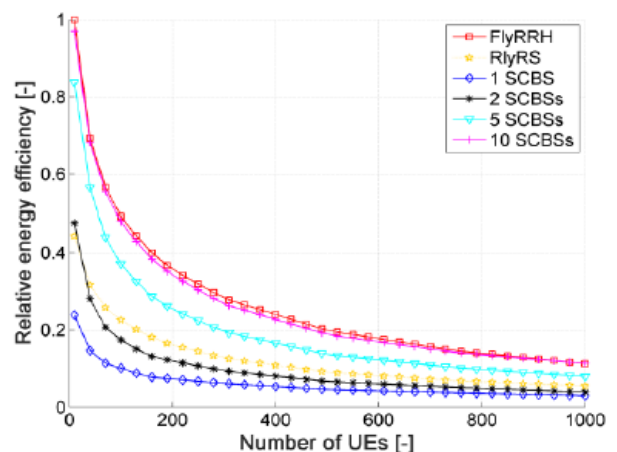


Figura 3.16. Eficiencia energética de los UE, asumiendo que la mitad del tiempo está transmitiendo y la otra recibiendo [33]

Como se aprecia en los resultados obtenidos, podemos concluir que la BS UAV introducen un aumento de la QoS en términos de rendimiento. Se ha demostrado que una sola BS UAV puede sustituir a 10 *small cells* distribuidas a lo largo de la calle y el rendimiento se mantiene. Es más, la eficiencia energética de los UE se incrementa por 5, lo que prueba el gran potencial de las BS UAV en las redes móviles.

Otros estudios interesantes y más actuales que presentan simulaciones con BS UAV se pueden encontrar en [37] y [38]. En el primero los resultados sugieren que una sola estación base aérea puede superar a 5 estaciones base fijas en términos de capacidad de canal, simulando el movimiento de una multitud a lo largo de una calle en un entorno rural. En el segundo, se presentan mejoras en cuando a SNR y rendimiento de los UE al implementar BS UAV en vez de estaciones base terrenas en un entorno urbano. A continuación, se muestran los resultados de estos dos estudios:

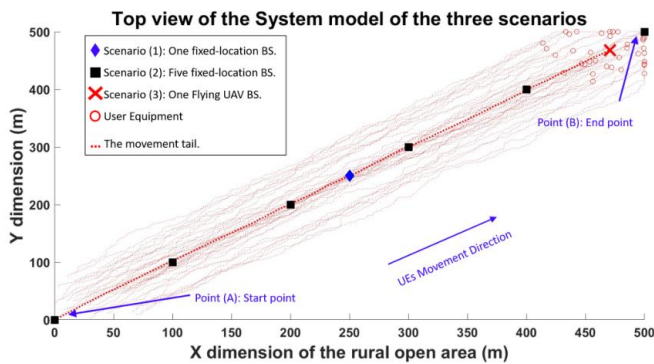


Figura 3.17. 40 UE moviéndose de un punto 'A' a un punto 'B' en zona rural [37]

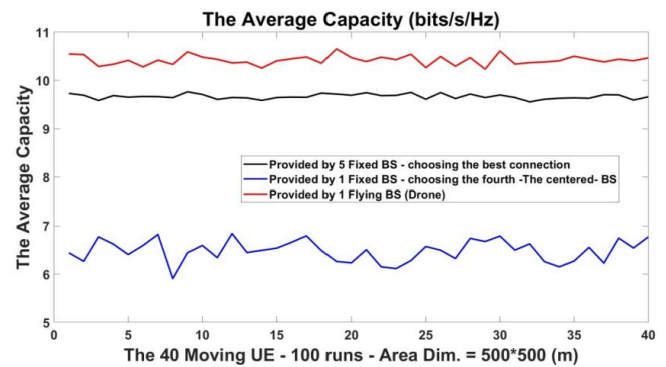


Figura 3.18. Capacidad de canal media en los 3 escenarios para 40 UE [37]

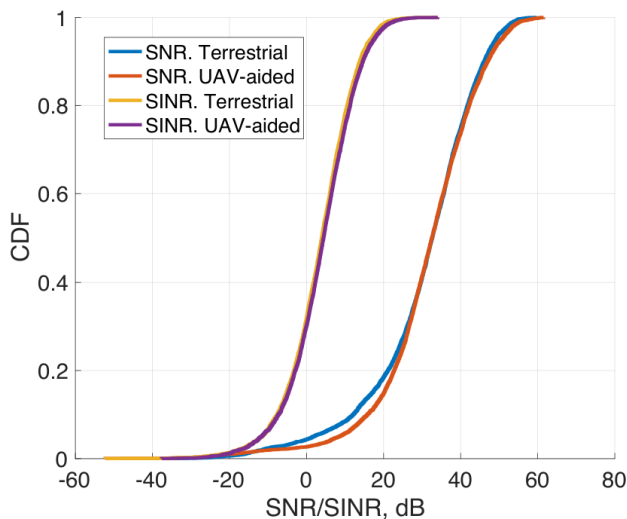


Figura 3.20. Función de distribución de la SNR/SINR [38]

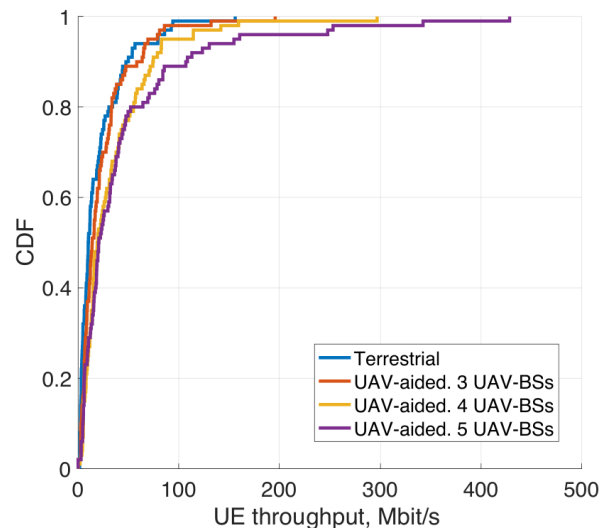


Figura 3.19. Función de distribución de la capacidad de los UE [38]

4. PLANTEAMIENTO PRELIMINAR DEL ESTUDIO

En esta sección vamos a tratar las bases del diseño de una red 5G basada en BS UAV con el propósito de implementarla en un entorno urbano, siendo este el principal objetivo de este TFG. De todas las aplicaciones expuestas anteriormente en el **punto 3.3**, la que vamos a implementar es la mejora de cobertura y capacidad de una red que se encuentre congestionada con frecuencia.

4.1. ANÁLISIS DEL ÁREA DE ESTUDIO SELECCIONADA

Como se ha mencionado anteriormente en múltiples ocasiones, este TFG busca ofrecer cobertura en zonas urbanas donde tengan lugar eventos temporales con frecuencia, ya que la red se puede congestionar debido a la alta afluencia de UE activos. Después de sopesar varias opciones, el lugar elegido es el estadio Santiago Bernabéu al ser un lugar de Madrid en el que se producen eventos casi todas las semanas, ya sean partidos de fútbol o conciertos. En concreto, vamos a priorizar las calles que rodean dicho estadio, focalizando las entradas al mismo, ya que en estas zonas es donde más personas se aglomeran.

Haciendo uso de la herramienta Google Earth, se ha conseguido medir el perímetro y el área de estudio con gran facilidad, además de obtener imágenes aéreas muy detalladas que se pueden consultar en la **figura B.1** del **anexo B**. El perímetro del área de estudio es de aproximadamente 2.665 km, mientras que el área abarca 0.44 km². El hecho de que el área de estudio sea más bien pequeña nos beneficia, ya que de esta forma el número de drones necesario es menor.

Otro factor de interés es la altura de los edificios, así como del propio estadio. Los más altos miden entre 45 y 60 metros de altura, siendo el más alto de unos 60 metros aproximadamente, mientras que el resto ronda los 30 metros. La altura del estadio ronda los 57 metros. Las edificaciones menos elevadas no se consideran relevantes, ya que los edificios que más pueden afectar a la propagación son los más altos.



Figura 4.1. Estadio Santiago Bernabéu (2024) [39]

4.2.EQUIPAMIENTO

4.2.1. DRON

Podemos considerar el dron como la parte más importante de este proyecto. Su elección de entre todos los modelos disponibles en el mercado es muy importante, ya que debe reunir una serie de requisitos clave como alta durabilidad, capacidad de transporte, resistencia a condiciones adversas, etc....

El modelo que he escogido para este proyecto es el *Skyfront Tailwind* [8], cuyas características son más que notables:

- Cuenta con una fuente de alimentación híbrida que convierte gasolina en electricidad para el vuelo.
- 5 horas de vuelo con el tanque de serie, entendibles hasta 13 con un tanque auxiliar.
- Puede transportar una carga útil de 10 kilos por 1 hora, y una de 5 kilos por 3 horas.
- Puede operar entre los -10 y los 50 °C.
- El tiempo de despliegue no supera los 5 minutos.

Una estación base comercial ligera no suele pesar más de 4 kilos, lo cual es aceptable para el *Skyfront*. Por lo tanto, teniendo en cuenta el tipo de servicio que se quiere ofertar y las características mencionadas, el *Skyfront Tailwind* es un modelo más que suficiente para esta misión.



Figura 4.3. *Skyfront Tailwind* visto desde arriba [8]



Figura 4.2. *Skyfront Tailwind* en vista isométrica [8]

4.2.1. EQUIPO TX/RX

Con el objetivo de encontrar un equipo transmisor/receptor que forme parte de la estación base acoplada al UAV se han considerado distintos modelos de fabricantes como Amarisoft, Rohde & Schwarz, Huawei, Ericsson o Airspan. De entre todos los fabricantes, finalmente se ha seleccionado la RDU (*Rapid Deployment Unit*) *OpenRANGE28 Air5G 7200* de Airspan [40], mostrada en la **figura 4.4**. Idónea para despliegues en zonas urbanas, esta compacta RDU trabaja en bandas de ondas milimétricas y cuenta con un ancho de banda de hasta 800 MHz. Hace uso de un array de antenas MIMO masivo de 128×128 elementos radiantes para ofrecer una cobertura amplia con alto rendimiento. Además, soporta conformación de haces híbrido con capacidades avanzadas de gestión de haces, lo que garantiza una cobertura amplia y fiable.



Figura 4.4. RDU OpenRANGE28 Air5G 7200 de Airspan [40]

Sin embargo, la información aportada por el fabricante es bastante limitada, ya que no está disponible su hoja de especificaciones. De manera que los parámetros de la antena de esta RDU se han estimado a partir de un modelo similar, en concreto la antena *28 GHz Phased Array Antenna Module* de Fujikura, presentada en siguiente apartado.

4.2.2. ANTENAS

Con el objetivo de encontrar una antena adecuada a la implementación que se pretende llevar a cabo en este TFG, se han contrastado varios tipos de antenas, en especial aquellas utilizadas en *small cells* [41]. Finalmente, la antena escogida es la *28 GHz Phased Array Antenna Module* de Fujikura [42], mostrada en la **figura 4.5**. Esta es capaz de trabajar en las bandas n257 (28 GHz), n258 (26 GHz), y n261 (27 GHz). De todas ellas hemos escogido la n258 (26 GHz) ya que es la que se usará en España.

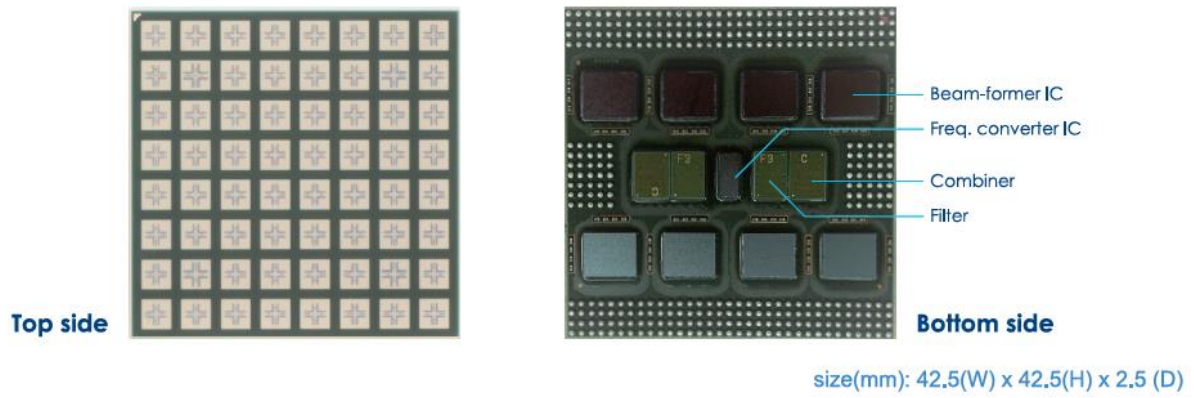


Figura 4.5. Fujikura's 28 GHz mmWave Wireless Communications Module [42]

Sus especificaciones se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 4.1. Especificaciones técnicas de la Fujikura 28 GHz [42]

Dimensiones	42,5 x 42,5 x 2,5 (mm)
Banda de frecuencias	24.25 – 29.5 GHz
PIRE	45 dBm
Polarización	Vertical, horizontal
Rango de exploración de haces	$\pm 60^\circ$ (acimut y elevación)
Consumo de potencia	Tx: 30 W Rx: 16 W
Ganancia	22 dBi
Factor de ruido en TX	4 dB
Tensión de alimentación	1,2 V / 1,5 V / 1,8 V / 2,7 V

En la siguiente figura se aprecia el diagrama de radiación de la antena Fujikura 28 GHz:

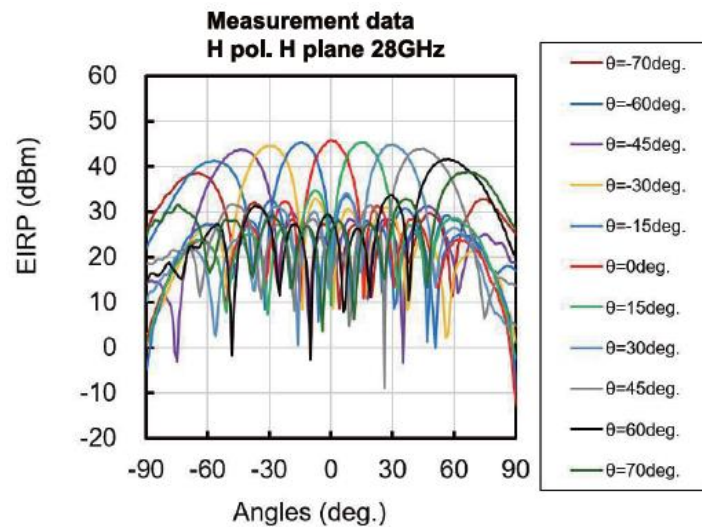


Figura 4.6. Beamforming performance de la Fujikura 28 GHz [42]

4.2.3. EQUIPO PARA EL BACKHAUL FSO

De entre todas las opciones presentadas en el **punto 3.4.3** para la conexión con el *backhaul*, finalmente nos hemos decantado por la tecnología FSO. El esquema híbrido FSO y THz, aunque muy prometedor introduce una complejidad técnica que escapa a los objetivos de este TFG. Además, no he conseguido encontrar trabajos que relacionen esta tecnología híbrida con los UAV. La tecnología FSO por sí sola debería ser suficiente para cumplir con los requisitos mínimos necesarios de conexión con el *backhaul*, gracias a sus características mencionadas anteriormente. Los equipos necesarios para una arquitectura FSO son:

Transmisor FSO en el nodo de acceso: es necesario que el nodo de acceso está equipado con un transmisor FSO que emite un haz óptico, que transporta flujos de datos de gran volumen, a una BS UAV [30]. Como se muestra en la **figura 4.7**, el transmisor FSO comprende un convertidor eléctrico a óptico (E2O), utilizado para un transmisor óptico y un módulo *Acquire-Track-Pointing* (ATP). El convertidor E2O convierte la señal eléctrica de la red móvil en señal óptica. El transmisor óptico se utiliza para transmitir la señal óptica emitiendo un haz óptico al UAV, teniendo en cuenta que también se encarga de ajustar la potencia de transmisión y el ángulo de divergencia del haz. El módulo ATP se utiliza para reducir las pérdidas de apuntamiento, es decir, el ATP puede ajustar automáticamente la dirección del haz óptico en función de la ubicación del UAV para garantizar la recepción del haz óptico por parte de este.

Por otro lado, el haz óptico también se puede utilizar para recargar el UAV, es decir, el haz óptico transporta no sólo los flujos de datos sino también energía. El transmisor FSO puede programar la transmisión de datos y la transmisión de energía ajustando la potencia de transmisión y el ángulo de divergencia para alterar la velocidad de datos y la velocidad de carga, respectivamente.

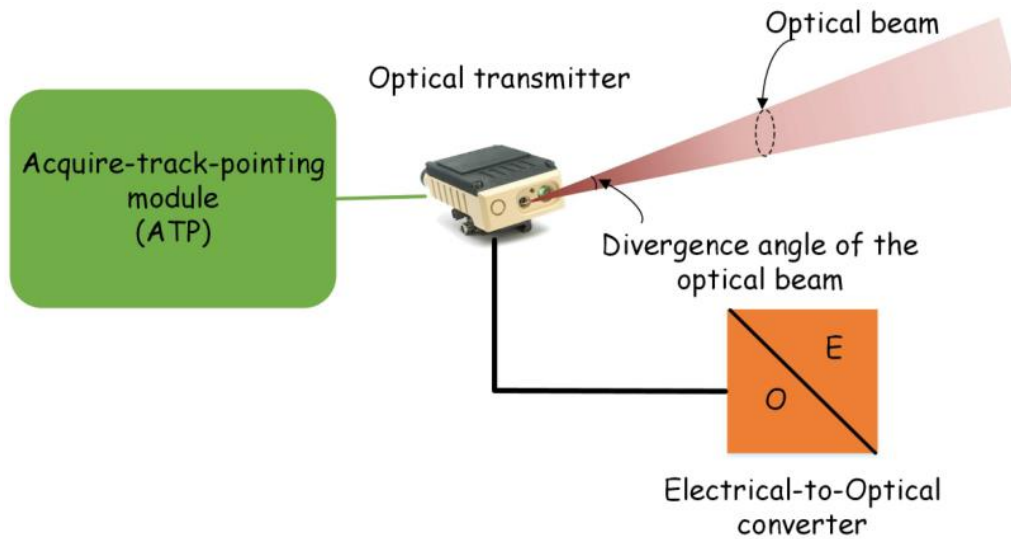


Figura 4.7. Transmisor FSO en el nodo de acceso [30]

Receptor FSO en la BS UAV: El sistema receptor FSO se instala en una BS UAV para recibir el flujo de datos y la energía, que son transportados por el haz óptico enviado desde el nodo de acceso. Como se muestra en la **figura 4.8**, el sistema receptor FSO comprende dos subsistemas, es decir, el sistema de retransmisión de datos y el sistema de recarga. El sistema de recarga consta de un panel solar, un controlador de recarga, un convertor A/D y una batería portátil. El panel solar absorbe la mayor parte del haz óptico recibido y lo convierte en energía eléctrica, el controlador de carga regula la energía eléctrica del panel solar, y la energía eléctrica se convierte de AC a DC mediante el inversor. El sistema de retransmisión de datos consta de un receptor óptico, un fotodiodo y un transmisor de RF. En el centro del panel solar hay un pequeño orificio de modo que una pequeña parte del haz óptico recibido puede atravesar el panel solar y llegar al receptor óptico. El fotodiodo se utiliza para convertir la señal óptica en señal eléctrica, que luego el transmisor de RF convierte en señal de RF y la transmite a los usuarios.

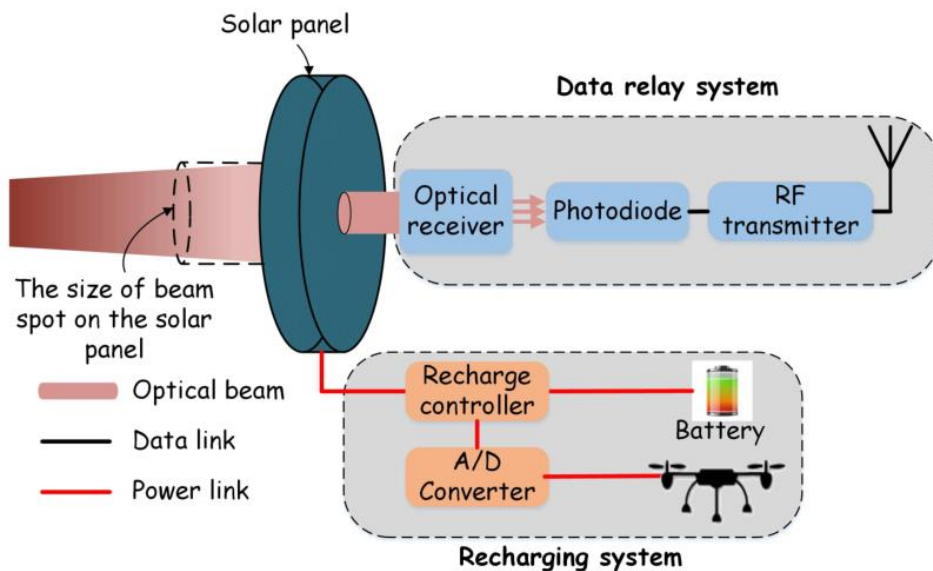


Figura 4.8. Receptor FSO en el BS UAV [30]

Al ser un enlace bidireccional, ambos extremos deben contar con transmisor y receptor. Sin embargo, en el receptor del nodo de acceso podemos omitir el panel solar que absorbe la energía del haz óptico, ya que en el nodo no es necesaria energía extra. En la **figura 4.9** se muestra un receptor dividido en la parte de energía y la de señal, de manera que el nodo de acceso requiere tan solo la segunda parte.

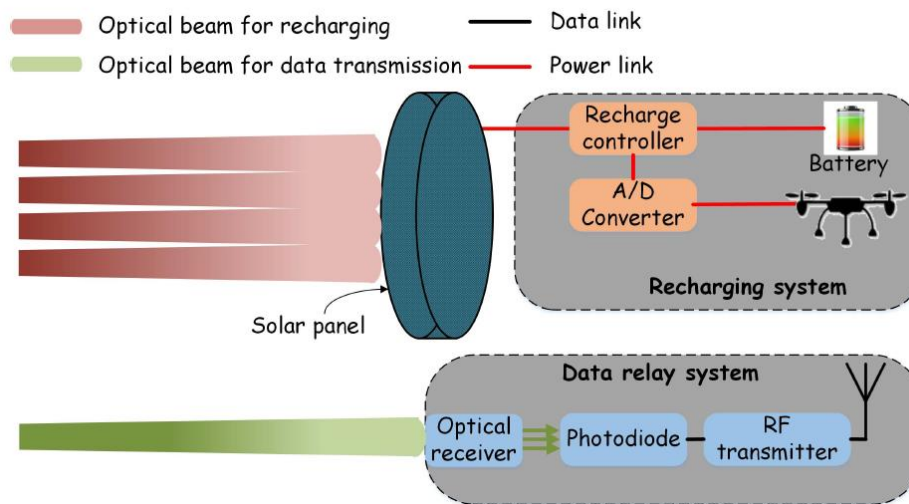


Figura 4.9. Receptor FSO utilizando dos rayos ópticos distintos para transmisión de energía y datos [30]

4.3. PLANIFICACIÓN DE LA RED

En este apartado vamos a hacer una estimación de la red, en términos de número de usuarios y número de UAV activos, así como la velocidad en UL y DL que puede requerir cada UE.

Para ello vamos a estimar la velocidad de datos que puede aportar cada BS UAV. El documento TS 38.306 del 3GPP [43] proporciona la siguiente estimación de la tasa binaria máxima (4.1), dependiendo de la configuración:

$$\text{data rate (in Mbit/s)} = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^J \left(v_{\text{Layers}}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{\text{max}} \cdot \frac{N_{\text{PRB}}^{BW(j),\mu} \cdot 12}{T_s^\mu} \cdot (1 - OH^{(j)}) \right) \quad (4.1)$$

El factor 10^{-6} permite pasar de bit/s a Mbit/s. El resto de parámetros tienen el siguiente significado [44]:

- J es el número de portadoras agregadas. Si no se usa agregación de portadoras se tiene $J = 1$.
- $R_{\text{max}} = 948/1024$ es la tasa más alta de codificación de canal.
- $v_{\text{Layers}}^{(j)}$ es el número máximo de flujos MIMO soportados.
- $Q_m^{(j)}$ es el orden máximo de la modulación. 8 para 256-QAM
- $f^{(j)}$ es un factor de escala. Se puede tomar 1.

- μ identifica la numerología, que permite adaptar la separación entre subportadoras SCS (*Subcarrier Separation*), a veces denominada Δf , a las características de las diferentes bandas de frecuencias y a las anchuras de banda de los canales.
- T_s^μ es la duración media del símbolo OFDM, para esa numerología, tal y como se muestra en la **tabla 4.2**
- $N_{PRB}^{BW(j), \mu}$ es el número máximo de RB (*Resource Blocks*) en el ancho de banda, para esa numerología. En la **tabla 4.3** se especifican el número de RB en función de la SCS para los anchos de banda de FR2.
- OH es la tara (*overhead*) con valores para DL: 0,14 en FR1 y 0,18 en FR2. En el UL es algo menor: 0,08 para FR1 y 0,10 para FR2.

Tabla 4.2. Parámetros de transmisión en función de la numerología (μ) [44]

μ	SCS (kHz)	Tiempo útil (μs) T_u (1/SCS)	Prefijo cíclico T_{CP} (μs)	Duración de símbolo T_s (μs)	Símbolos por slot	Slot (μs)
3	120	8,33	0,59	8,92	14	125
4	240	4,17	0,29	4,46	14	62,5

Tabla 4.3. Numero de RB en función de la SCS y el ancho de banda del canal [45]

SCS (KHz)	N_{RB}			
	50 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz
60	66	132	264	No aplicable
120	32	66	132	264

Centrándonos en nuestro caso concreto, los parámetros tomarían los siguientes valores:

- $J = 1$.
- $R_{max} = 948/1024$
- $\nu_{Layers}^{(j)} = 128$, ya que nuestra antena consiste en un array MIMO masivo de 128 elementos radiantes
- $Q_m^{(j)} = 8$, tomamos la modulación 256-QAM
- $f^{(j)} = 1$
- $BW = 400$ MHz, ya que trabajamos en la banda de 26 GHz (FR2)
- $\mu = 3$
- $T_s^\mu = 8.93 \mu s$
- $N_{PRB}^{BW(j), \mu} = 264$
- $OH = 0,18$ (DL) y 0.10 (UL)

Tasa binaria máxima (DL): 275,775 Gbit/s

Tasa binaria máxima (UL): 302,68 Gbit/s

Esta tasa binaria es la que puede aportar cada BS UAV, y será repartida entre todos los UE a los que atienda. Sin embargo, el 3GPP establece el uso de TDD en estas frecuencias, de manera que el canal queda conformado por el 80% del *downstream* y el 20% del *upstream*. Esto nos deja con una tasa binaria de 220.62 Gbit/s para DL y de 60.536 Gbit/s para UL.

Teniendo esto en mente, vamos a calcular a cuantos UE puede atender cada UAV. Estimando que un terminal con conectividad 5G requiere un mínimo de 100 Mbit/s de bajada y teniendo en cuenta que un BS UAV tiene una tasa total de 220.62 Gbit/s, cada UAV puede dar cobertura a aproximadamente 2206 usuarios proporcionando el servicio mínimo. A priori parece un número muy elevado, de manera que podríamos aumentar la calidad de servicio ofrecido, pero antes de precipitarnos vamos a calcular el número de usuarios totales que estarían dentro de nuestra zona de cobertura.

El área de cobertura seleccionada cuenta con un total de 0.44 km², de los cuales aproximadamente 0.15 km² son zonas peatonales. Para más información sobre el cálculo de esta área se puede consultar el **Anexo B**. Vamos a estimar que en un día de evento hay una persona por cada 3 m². Esta medida es una media de peatones por metro cuadrado, ya que la densidad de personas será más alta cuanto más nos acerquemos al estadio y viceversa. Con esto en mente, tendríamos un total de 50000 peatones en nuestra zona de cobertura. Vamos a estimar que un 25% de los mismos contratan nuestro servicio. Esto nos dejaría con 12500 clientes a los que atender, y como hemos visto antes, cada BS UAV es capaz de ofrecer 100 Mbit/s a 2206 usuarios. Esto nos indica que con aproximadamente 7 BS UAV bastaría para cubrir toda el área de cobertura con un servicio suficiente.

Estos resultados nos muestran que en esta red el factor limitante es el número de usuarios, el cual es bastante elevado teniendo en cuenta que el área de cobertura es más bien reducida.

5. DISEÑO Y SIMULACION DE LA RED 5G BASADA EN BS UAV

Una vez han quedado especificados todos los equipos que conforman nuestra red, es momento de realizar el estudio de cobertura. Esto es posible gracias a la herramienta de planificación radioeléctrica Xirio-Online, un programa desarrollado por la empresa Aptica que permite llevar a cabo cálculos precisos basados en la creación de estudios de cobertura.

El objetivo de este apartado es evaluar el rendimiento de la red diseñada mediante la simulación de dos estudios de cobertura, así como la calidad y el alcance de la señal en la zona de servicio concretada con el fin de identificar posibles interferencias que puedan surgir entre los transmisores que componen la red.

5.1. PARAMETRIZACIÓN PREVIA AL ESTUDIO

Este subapartado incluye todo lo referente a cálculos y parametrización introducidas en el estudio de cobertura previos a la simulación.

En primer lugar, se ha realizado el balance de potencias de la red a partir de la **fórmula (5.1)**, con el objetivo de obtener la distancia de cobertura de cada dron. De esta forma podemos estimar la distancia de separación entre los drones dentro de la zona de estudio.

$$P_r = P_t + G_t - L_{tt} + G_r - L_{tr} - L_b \quad (5.1)$$

Siendo P_r la potencia recibida, es decir, la sensibilidad del terminal del usuario. Tomando como referencia el documento TS.38 101-2 del 3GPP [47], vemos que la potencia umbral de un terminal 5G en el caso peor es de -79.3 dBm para QPSK. Al ser nuestra modulación 256-QAM, sumamos al anterior valor 20 dB para ajustarlo y por último dividimos esta potencia entre el número de subportadoras en unidades naturales. Este último paso se debe a que el valor de umbral que debemos introducir en Xirio-Online está en términos de RSRP, parámetro referido a la potencia recibida por subportadora. Teniendo en cuenta que en nuestra transmisión tenemos una separación entre subportadoras de 120 kHz y 400 MHz de ancho de banda de canal, tenemos 264 RB y, como 1 RB implica 12 subportadoras:

$$P_r = -79.3 + 20 - 10 \log(264 * 12) = -94.3 \text{ dBm} \quad (5.2)$$

La potencia de transmisión, P_t , ha sido calculada a partir de la PIRE (45 dBi) y la ganancia (22 dBi) de la antena transmisora. Para hacer el cálculo manual del balance de potencia es necesario calcular también la potencia de transmisión por subportadora:

$$P_t = 23 - 10 \log(264 * 12) = -12 \text{ dBm} \quad (5.3)$$

No obstante, en los parámetros de transmisión de la simulación en Xirio-Online, es necesario poner la potencia de transmisión total, es decir, 23 dBm. Se han tomado las pérdidas por conectores, L_{tt} y L_{tr} , como 2 dB tanto en transmisión como en recepción. La ganancia del terminal se ha fijado en 2 dBi.

Por último, se ha estimado que la pérdida básica de propagación, L_b , se compone tan solo de la pérdida básica en espacio libre, L_{bf} , para calcular la distancia máxima de cobertura que se tendría en ausencia de obstáculos.

$$L_b = L_{bf} = 92.45 + 20 \log(f(\text{GHz})) + 20 \log(d(\text{km})) \quad (5.4)$$

Con todos estos datos solo queda despejar la distancia en kilómetros:

$$-94.3 = -12 + 22 - 2 + 2 - 2 - 92.45 - 20 \log(26.05) - 20 \log(d(\text{km})) \quad (5.5)$$

La distancia calculada es de 0.119 km, es decir, 119 metros aproximadamente. Más tarde verificaremos que esta es la distancia máxima de cobertura de los UAV cuando realicemos la simulación. Al ser la distancia del orden de 100 metros no se ha tenido en cuenta la atenuación por gases, ya que esta sería del orden de unos 0.1 dB/km. Por el mismo motivo no se ha tenido en cuenta la atenuación en presencia de lluvia.

A continuación, hemos creado los diagramas de radiación de la antena. Debido a que la Fujikura 28 GHz no existe en el catálogo de Xirio-Online, hemos creado su diagrama de radiación tanto horizontal como vertical a partir de la **figura 4.7** dando valores para los distintos ángulos en azimut y elevación, tal y como vemos en las siguientes figuras:

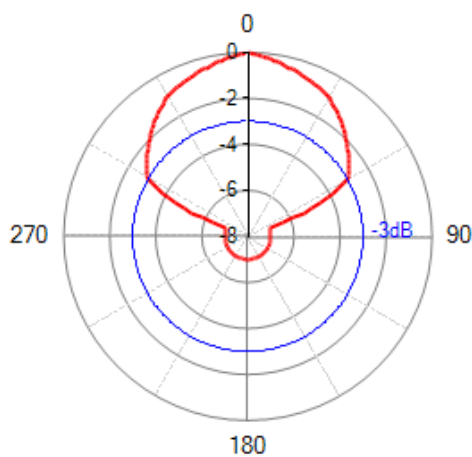


Figura 5.2. Diagrama de radiación horizontal de la antena transmisora

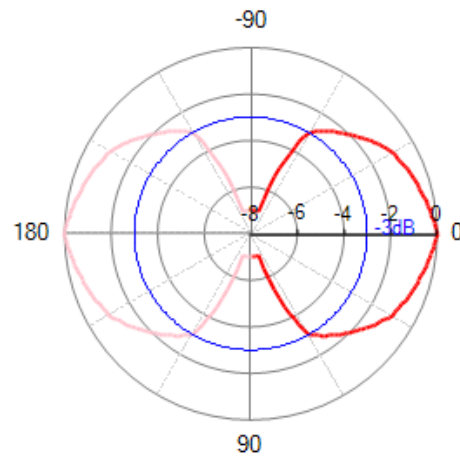


Figura 5.1. Diagrama de radiación vertical de la antena transmisora

El siguiente paso ha sido definir la banda de frecuencias n258 (26 GHz). Los parámetros se adjuntan en la **figura 5.3**:

Parámetros de la banda	
Ancho de canal / Separación entre portadoras:	400 MHz
Ordinal del primer canal:	1
Tramo inferior:	
Frecuencia inicial:	24.25 GHz
Frecuencia final:	27.5 GHz
Frecuencia primera portadora:	24.45 GHz

Figura 5.3. Parámetros de la banda n258

En cuanto al método de cálculo se ha escogido el Rec. UIT-R P.526-15, por ser adecuado para bandas milimétricas ya que es un método determinístico basado en difracción, fijando un margen de desvanecimiento de 2 dB.

5.2.SIMULACIÓN DE LA RED EN XIRIO-ONLINE

EL programa Xirio-Online permite hacer dos tipos de simulación: una gratuita con una resolución de 400 m/píxel, la cual ha sido utilizada para realizar pruebas y poder concretar así la posición y altura de los drones, y otra de pago con una resolución de 4 m/píxel. A continuación, en la **figura 5.4** se muestra el emplazamiento de cada UAV dentro del área de estudio.

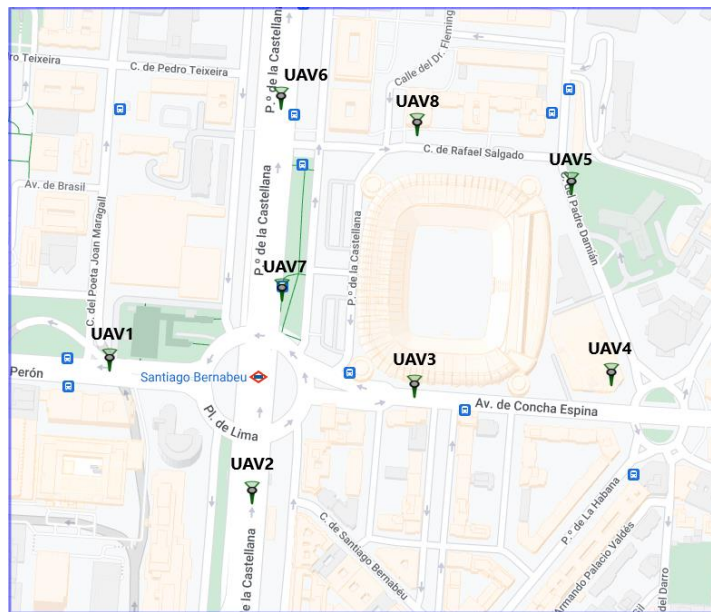


Figura 5.4. Localizaciones de los UAV

En la **tabla 5.1** tenemos las coordenadas exactas de los UAV. Todos ellos están a una altura de 50 metros sobre el nivel del terreno y todas sus antenas cuentan con una inclinación mecánica de 90°, es decir, se orientan hacia el suelo.

Tabla 5.1. Coordenadas de los UAV

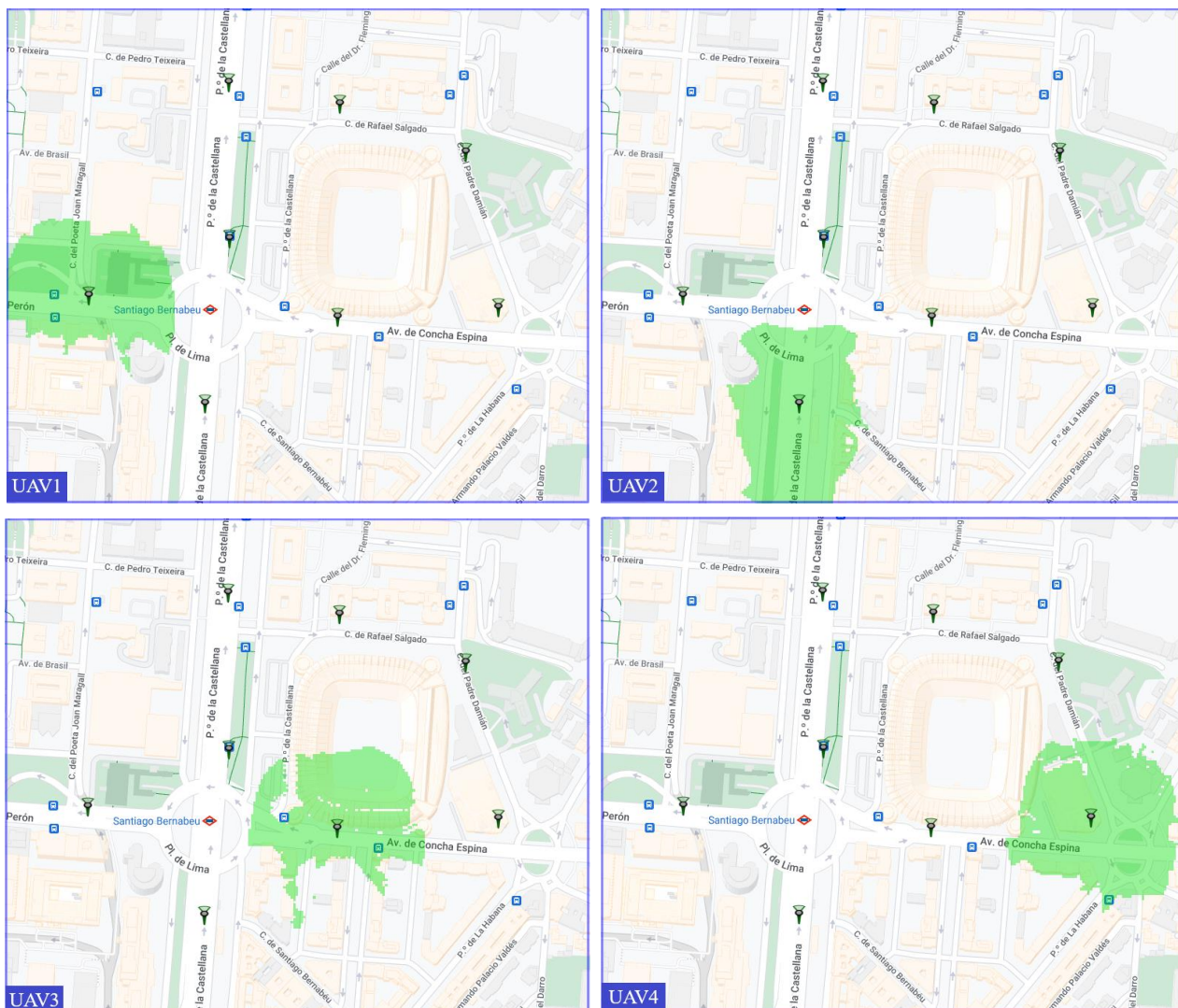
Estación base	Latitud	Longitud
UAV1	40°27'08.08"N	003°41'32.74"W
UAV2	40°27'03.80"N	003°41'26.67"W
UAV3	40°27'07.22"N	003°41'19.76"W
UAV4	40°27'07.61"N	003°41'11.36"W
UAV5	40°27'13.80"N	003°41'13.09"W
UAV6	40°27'16.56"N	003°41'25.42"W
UAV7	40°27'10.35"N	003°41'25.38"W
UAV8	40°27'15.71"N	003°41'19.63"W

Estas localizaciones han sido seleccionadas después de realizar varias simulaciones de prueba, tratando de optimizar el área de cobertura y teniendo en cuenta la distancia máxima de cobertura calculada con la **ecuación 5.5**.

En los siguientes subapartados vamos a presentar las simulaciones realizadas en esta situación, tanto de las coberturas individuales como de la cobertura multitransmisor. Todas ellas han sido realizadas en la cartografía “Madrid Docente”, la cual permite una resolución de 4 m/píxel.

5.2.1. COBERTURAS INDIVIDUALES: NIVEL DE SEÑAL

La primera simulación está formada por el estudio de cobertura de cada transmisor en terminos de nivel de señal recibida (RSRP). Esto ha sido de suma importancia para fijar la posición de cada UAV, de manera que cuando un área de cobertura acabe, empieza la siguiente. Al medir sobre el mapa la distancia máxima de cobertura de cada dron se estima entre 110 y 118 metros, lo cual coincide de forma aproximada con lo calculado anteriormente en el balance de potencias. Las simulaciones se detallan en la **figura 5.5**.





Señal de cobertura

- **Tipo de resultado:** Potencia
- **Rangos de señal:**
 - $[-\infty, -94,3)$ dBm (Sin señal)
 - $[-94,3, \infty)$ dBm

Figura 5.5. Coberturas individuales

La visualización con varios rangos de señal y diferentes colores no quedaba del todo clara, por lo que hemos decidido incluir un solo rango de señal en estos estudios individuales y en la cobertura multitransmisor. Se puede apreciar que las áreas de cobertura son uniformes en las calles, mientras que cuando existen obstáculos (en su mayoría edificios), directamente no hay cobertura. Esto es debido a que el nivel de difracción es muy alto, ya que estamos manejando bandas de ondas milimétricas. Aun así, el nivel de señal en el área de cobertura de cada UAV es muy bueno, ya que estamos en todo momento por encima del umbral de recepción.

5.2.2. COBERTURA MULTITRANSMISOR: NIVEL DE SEÑAL, MEJOR SERVIDOR Y SOLAPAMIENTO

Después de simular cada estudio por separado, hemos integrado los ocho transmisores en un estudio de cobertura multitransmisor para obtener resultados sobre el nivel de señal, mejor servidor y solapamiento.

Como se aprecia en la **figura 5.6**, hemos conseguido el objetivo de brindar cobertura a todas las calles principales del área de estudio seleccionada.

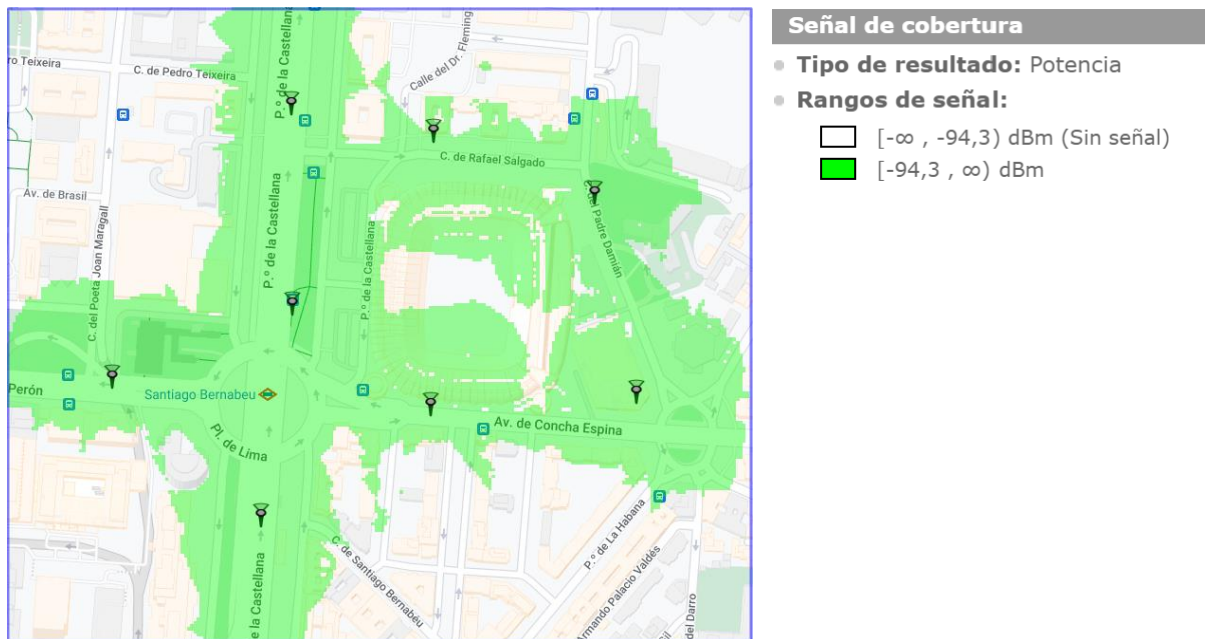


Figura 5.6. Nivel de señal de la cobertura multitransmisor

En la **figura 5.7** se puede ver con claridad cual es el mejor servidor en función de donde nos encontremos en la zona de estudio. Representa en cada punto el transmisor que ha sido elegido como mejor servidor. De manera que, un receptor ubicado en dicho punto establecerá la comunicación con el transmisor conocido como mejor servidor [48].

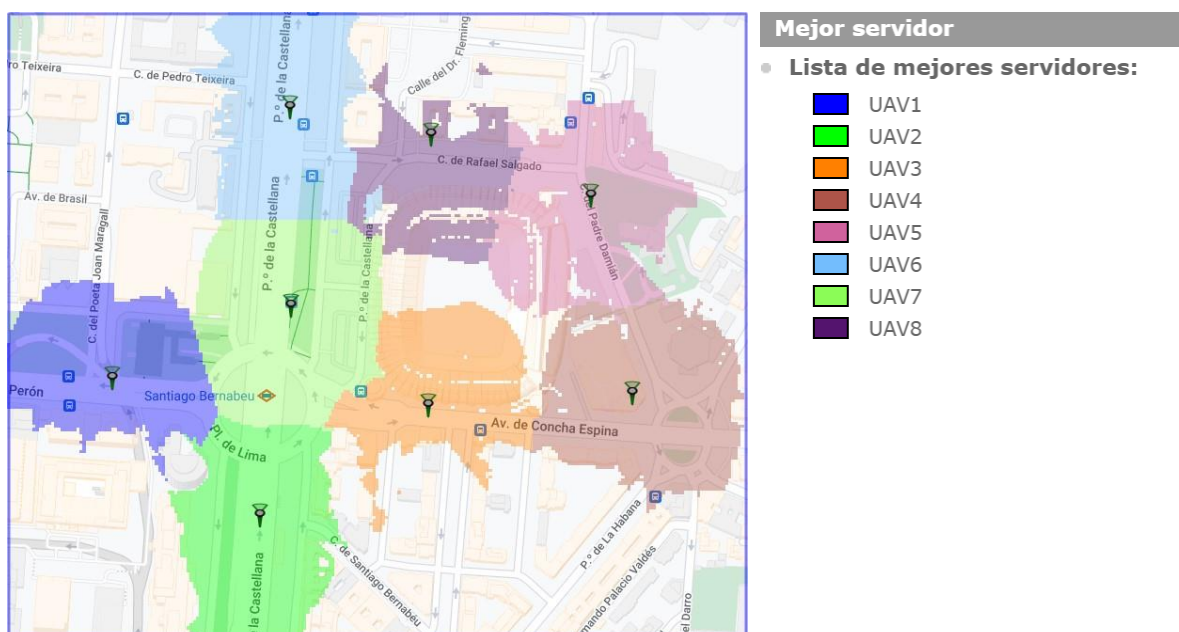


Figura 5.7. Mejor servidor de la cobertura multitransmisor

En la **figura 5.8** nos encontramos el nivel de solapamiento existente entre los transmisores. Un ligero nivel de solapamiento puede resultar beneficioso en estos casos, ya que así garantizamos que no existen fisuras en nuestra zona de cobertura y además se facilitan los traspasos. No obstante, un alto nivel de solapamiento puede generar interferencias entre los distintos transmisores, de forma que lo mejor es encontrar un equilibrio adecuado.

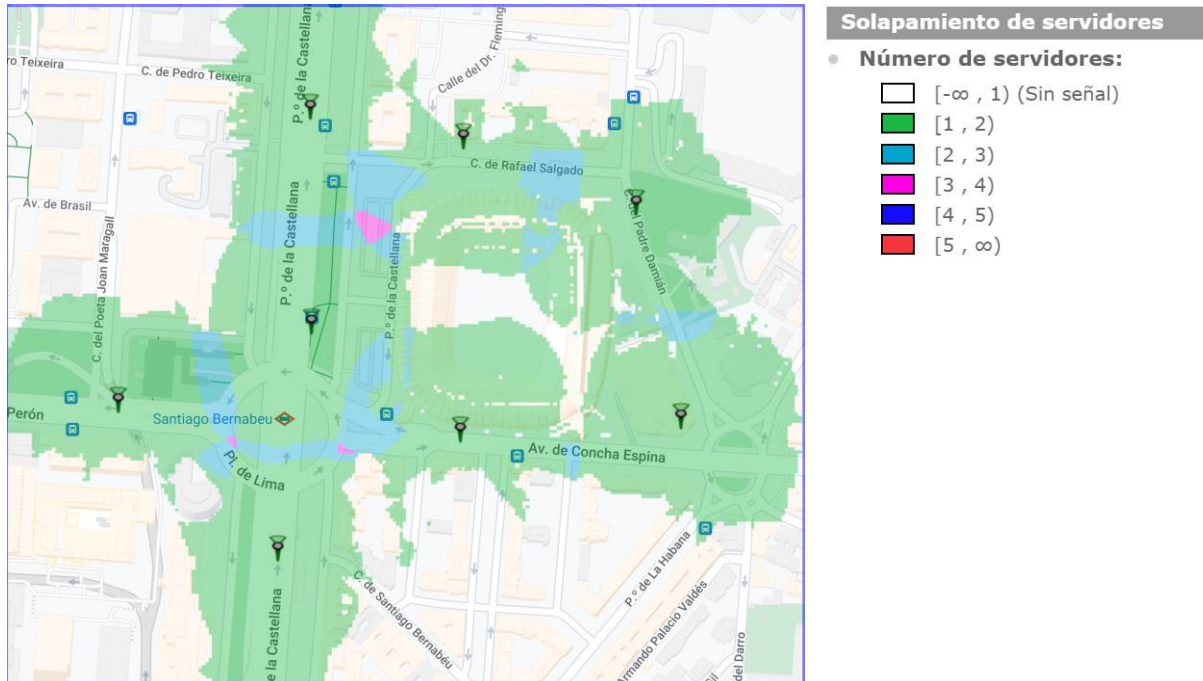


Figura 5.8. Nivel de solapamiento de la cobertura multitransmisor

En nuestro caso vemos que la mayoría del solapamiento se debe a dos transmisores y en áreas reducidas, teniendo pequeñas zonas con tres transmisores. Esto se puede considerar como un nivel de solapamiento aceptable debido al pequeño tamaño de las zonas afectadas.

5.2.3. COBERTURA MULTITRANSMISOR: INTERFERENCIA

Xirio-Online suministra también un cálculo de interferencias en la red con los siguientes resultados: nivel de señal RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), nivel de señal SS-RSRQ (*Secondary Synchronization signal-Reference Signal Received Quality*), nivel de señal SINR en DL y en UL, y el *throughput* teórico en DL y en UL. De todos ellos vamos a analizar el nivel de señal RSSI por ser el resultado más interesante.

El resultado de nivel de señal RSSI es la media lineal del total de potencia recibida observada solo en ciertos símbolos OFDM de mediciones de recursos de tiempo, en las medidas de ancho de banda, sobre un número N de RB procedentes de todas las fuentes incluyendo ruido térmico, interferencia de canal adyacente e interferencia cocanal [49]. Dicho de otra forma, es un indicador de la intensidad de la señal recibida teniendo en cuenta las fuentes de interferencia existentes en todo el ancho de banda disponible. De manera que un nivel de señal RSSI alto indica una menor interferencia recibida por parte del UE, lo que se traduce en una conexión robusta y fiable.

Como se aprecia en la **figura 5.9**, vemos que el nivel de señal RSSI en nuestra red es muy bueno y uniforme en toda la zona de cobertura. Esto es debido al poco solapamiento que existe entre las zonas de cobertura individuales de cada UAV, como veíamos en la **figura 5.8**.

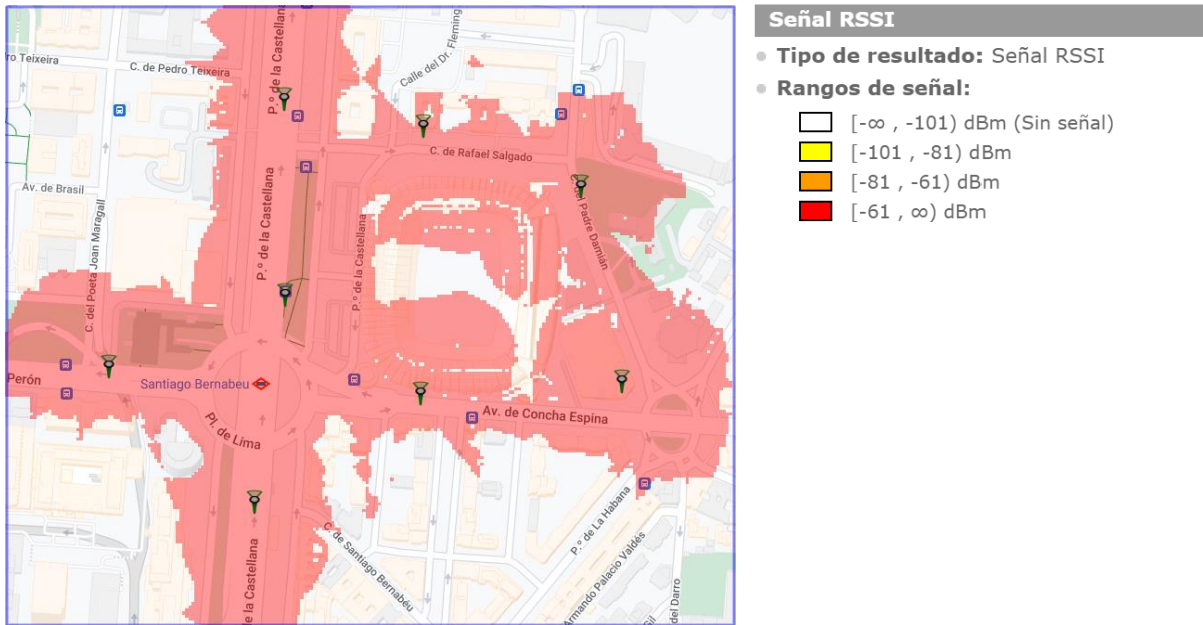


Figura 5.9. Nivel de señal RSSI de la cobertura multitransmisor

5.2.4. SEGUNDO ESTUDIO DE COBERTURA

Aprovechando la libertad de movilidad y trayectoria en el espacio tridimensional de los UAV, vamos a analizar un segundo caso de estudio dentro de la misma área de servicio. En esta situación nos encontramos en los minutos previos al inicio del evento, de manera que los asistentes están muy cerca del estadio. De esta forma los UAV se posicionan alrededor del estadio, cubriendo todas las entradas al mismo, como se aprecia en la **figura 5.10**.

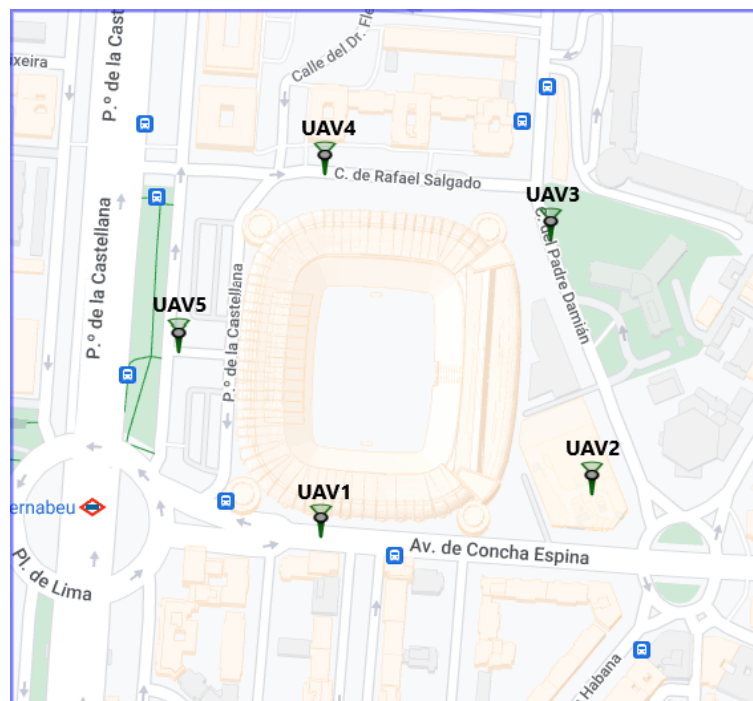


Figura 5.10. Localizaciones de los UAV (2º Estudio)

Tras realizar varios estudios de prueba, se ha llegado a la conclusión de que desplegando 5 BS UAV es suficiente para cubrir la nueva zona de estudio. Las coordenadas de estos UAV, así como sus alturas sobre el nivel del suelo se facilitan en la **tabla 5.2**.

Tabla 5.2. Coordenadas y alturas de los UAV (2º Estudio)

Estación base	Latitud	Longitud	Altura
UAV1	40°27'07.22"N	003°41'19.76"W	50 m
UAV2	40°27'08.17"N	003°41'11.89"W	40 m
UAV3	40°27'13.80"N	003°41'13.09"W	40 m
UAV4	40°27'15.26"N	003°41'19.65"W	40 m
UAV5	40°27'11.31"N	003°41'23.89"W	30 m

Con respecto al primer estudio de cobertura se han modificado las alturas de todos los UAV menos uno. Aprovechando la reducción del área de cobertura hemos podido reducir las alturas de los UAV 2 al 5. De esta forma contamos con enlaces más robustos y fiables, ya que al estar los drones más cerca de los usuarios la transmisión de datos sufre menos pérdidas y atenuaciones. No obstante, hemos mantenido la altura del UAV1 en 50 metros debido a que las alturas de los edificios que lo rodean son bastante elevadas y su zona de cobertura se veía negativamente afectada.

A continuación, se presentan los resultados de la cobertura multitransmisor: el nivel de señal recibida en la **figura 5.11**, el mejor servidor en la **figura 5.12**, el nivel de solapamiento en la **figura 5.13** y el nivel de señal RSSI en la **figura 5.14**.

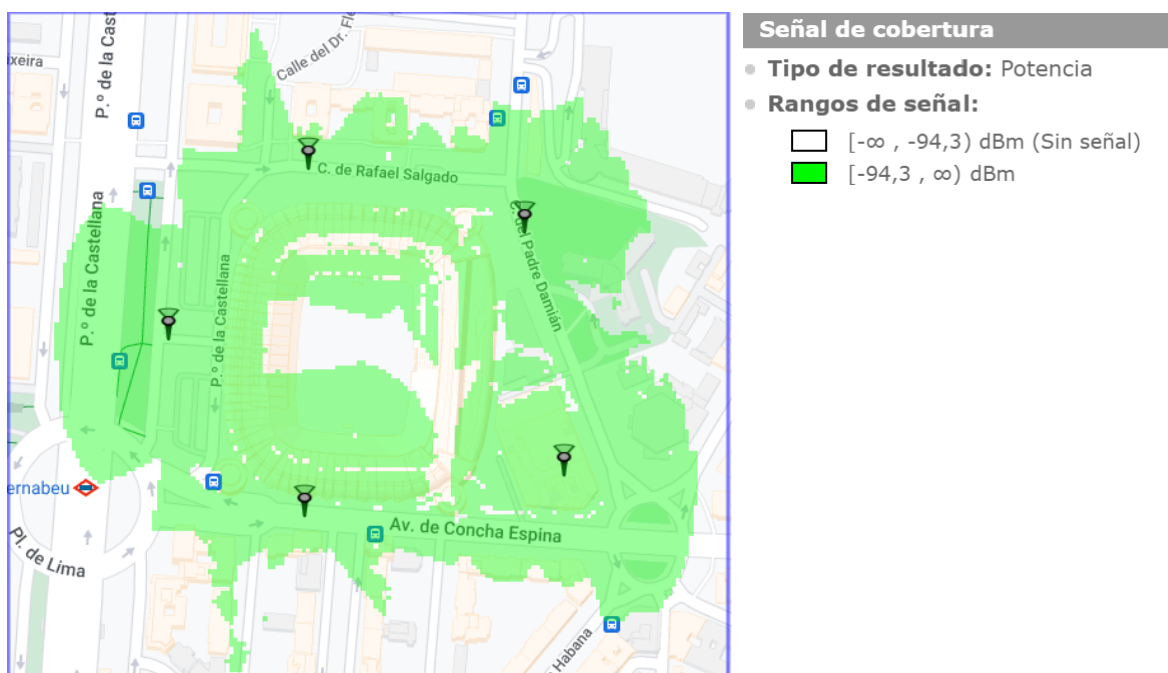


Figura 5.11. Nivel de señal de la cobertura multitransmisor (2º Estudio)

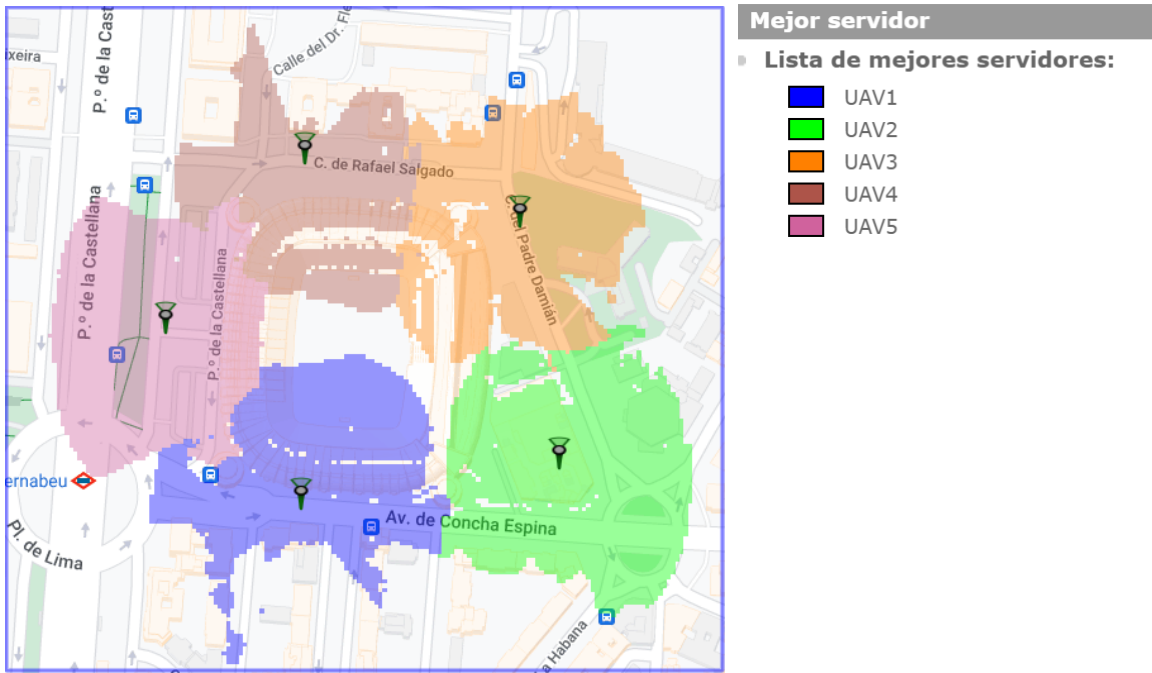


Figura 5.13. Mejor servidor de la cobertura multitransmisor (2º Estudio)

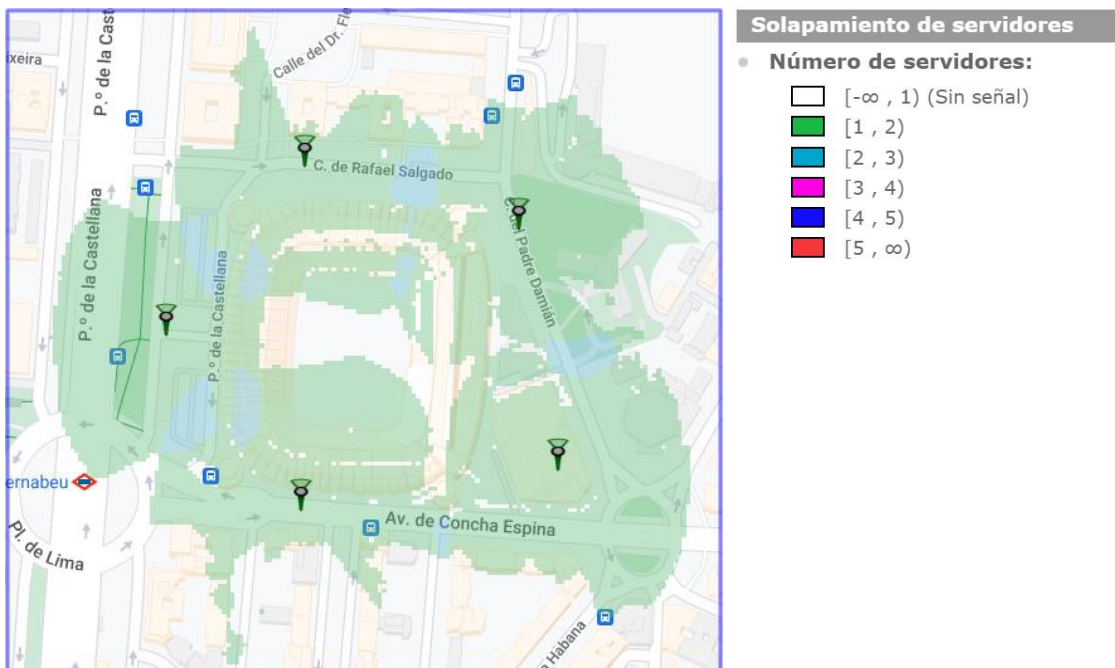


Figura 5.12. Nivel de solapamiento de la cobertura multitransmisor (2º Estudio)

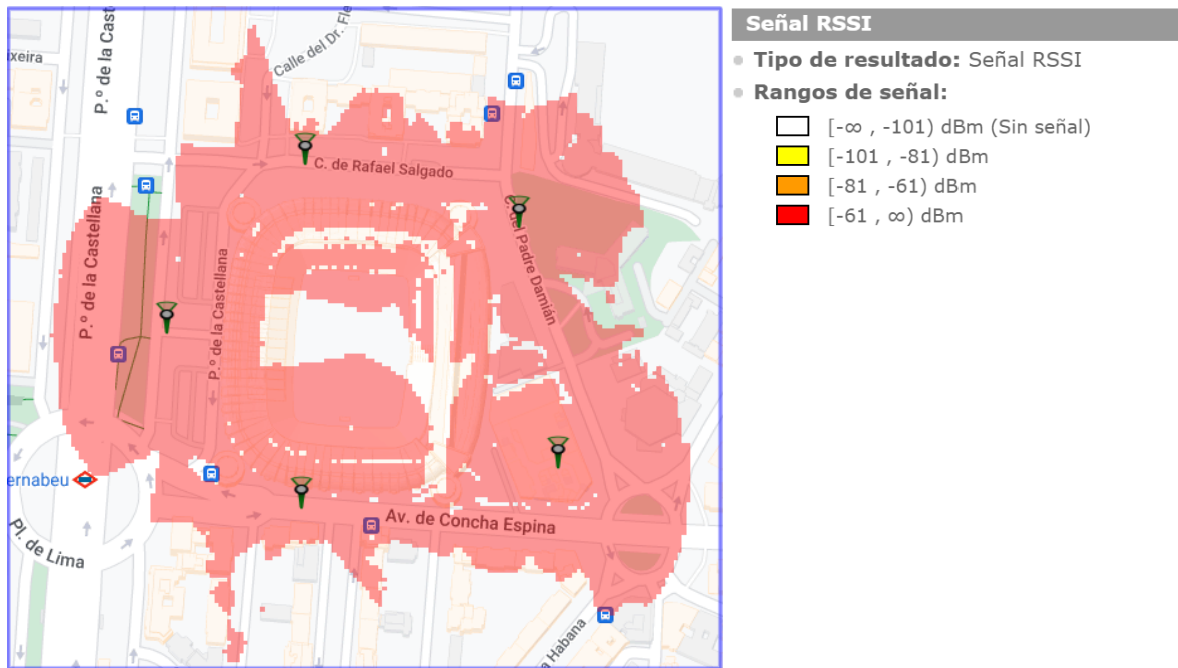


Figura 5.14. Nivel de señal RSSI de la cobertura multitransmisor (2º Estudio)

Los resultados son muy similares a los del anterior estudio de cobertura en cuanto a calidad de servicio. Tanto el nivel de señal recibido como el nivel de señal RSSI siguen siendo muy favorables. El nivel de solapamiento es algo menor debido a la reducción del número de transmisores, pero suficiente para mantener una cobertura continua y facilitar los traspasos.

5.3.EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

En este apartado vamos a analizar y comparar los resultados de ambos estudios de cobertura. En el primer estudio hemos empleado 8 BS UAV para cubrir la zona de cobertura, obteniendo resultados muy favorables en cuanto a nivel de señal, solapamiento y nivel de interferencia, mientras que en el segundo estudio con desplegar 5 BS UAV ha sido suficiente. Esto supone un menor coste de despliegue, a costa de disminuir hasta en un 65% el área de cobertura. No obstante, esta reducción en la zona de cobertura es algo esperado debido al contexto de esta segunda situación, en la cual los asistentes al evento se encuentran aglomerados en las proximidades del estadio.

Al ser la zona de cobertura más reducida en este segundo estudio, nos hemos podido permitir disminuir las alturas de los UAV, dando lugar a una conexión más robusta, fiable y de mayor capacidad, ya que al estar los drones más cerca de los usuarios la transmisión de datos sufre menores pérdidas. Con todo esto presente, los resultados de este estudio son incluso ligeramente mejores que los del primero, sobre todo en cuanto a nivel de solapamiento debido a la reducción en el número de drones desplegados.

En definitiva, podemos concluir que los resultados de ambos estudios de cobertura son muy satisfactorios en todos los aspectos.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1. CONCLUSIONES

En el presente Trabajo de Fin de Grado se ha llevado a cabo el estudio y diseño de una red 5G basada en la implementación de estaciones base aéreas con UAV en entornos urbanos en el contexto de eventos temporales.

Para ello, se ha realizado un estudio teórico de la tecnología 5G NR, así como el aprovechamiento de sus prestaciones para la creación de la red propuesta en este proyecto. También se ha llevado a cabo un detallado análisis teórico de los UAV, pasando por sus características, su implementación y casos de uso como estaciones base aéreas, así como los desafíos que todavía plantean al tratarse de una tecnología innovadora y en constante evolución. Se ha demostrado mediante el análisis de varios estudios el buen rendimiento de una red formada por BS UAV y su capacidad para descongestionar las redes terrestres existentes durante la celebración de eventos temporales.

Con el fin de diseñar una red 5G basada en estaciones base aéreas con UAV, se ha utilizado la herramienta de planificación radioeléctrica Xirio-Online. Tras el análisis del área de estudio seleccionada, la elección de los equipos apropiados para este diseño, como el dron, las antenas y el equipo Tx/Rx, y la realización de cálculos preliminares se han llevado a cabo dos estudios de cobertura en las proximidades del estadio Santiago Bernabéu.

En cuanto al primer estudio, la mayor dificultad ha sido encontrar los emplazamientos óptimos para cada UAV, ya que su libertad de movimiento en el espacio ofrece múltiples posibilidades. Cabe destacar que la zona de estudio seleccionada cuenta con altos edificios que dificultan la comunicación en ciertos puntos. Esto concuerda con las características de las bandas de ondas milimétricas empleadas para el enlace de acceso, muy susceptibles a pérdidas de propagación y difracción por obstáculos. A pesar de ello, se han obtenido resultados muy ilustrativos y favorables en términos de nivel de señal, solapamiento e interferencia, demostrándose así la viabilidad y buen rendimiento de las redes móviles con UAV.

Centrándonos en el segundo estudio, se ha optado por movilizar los drones muy cerca del estadio y reducir su número, debido a que en esta situación nos encontramos en los instantes previos a la apertura de puertas del estadio y los asistentes están aglomerados en sus proximidades. Al ser la zona de estudio más pequeña, se han reducido las alturas de los drones, dando lugar a una conexión más robusta y fiable. Aun con todos estos cambios, los resultados obtenidos son igual de favorables que los del primer estudio de cobertura, demostrándose así la ventaja que supone la capacidad de reposicionamiento y movilidad de los UAV con respecto a las redes terrestres existentes.

En conclusión, el despliegue de una red 5G basada en estaciones base aéreas con UAV requiere un posicionamiento óptimo de sus drones. La libertad de movilidad y trayectoria de los UAV es una característica única que, bien aprovechada, puede dar lugar a redes celulares con una cobertura continua, sin fisuras y de alta velocidad.

6.2.LÍNEAS FUTURAS

Las estaciones base aéreas con UAV suponen una tecnología temprana y en constante evolución que aún no está implantada en el mercado. Por ello, a continuación, se proponen líneas de trabajo e investigación que habría sido interesante abordar, pero escapaban del objetivo de este Trabajo de Fin de Grado:

- La creación de un sistema de recarga de las baterías de los UAV, para poder ofrecer un servicio ininterrumpido a los usuarios. Ya sea mediante un algoritmo para el reemplazo automático de los UAV o con la instalación de estaciones de recarga en las cercanías de la zona de servicio.
- El desarrollo de un algoritmo que permita determinar las ubicaciones 3D óptimas de las BS UAV dentro de la zona de servicio, maximizando el rendimiento de la red y minimizando el consumo de energía.
- El diseño de un estudio que permita tener en cuenta más factores, como la conexión con el *backhaul* o un modelado del número de usuarios activos en la zona de servicio.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Dahlman, S. Parkvall y J. Sköld. "5G NR The Next Generation Wireless Access Technology", Academic Press, Elsevier, 2018. Consultado en Marzo 2024.
- [2] J. T. J. Penttinen, "5G Second Phase Explained: The 3GPP Release 16 Enhancements", John Wiley & Sons, Ltd., 2021. Consultado en Marzo 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=9508776>
- [3] A. Fotouhi et al., "Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges" in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 4, pp. 3417-3442, Fourthquarter 2019. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8675384>.
- [4] S. D. Muruganathan et al., "An Overview of 3GPP Release-15 Study on Enhanced LTE Support for Connected Drones" in IEEE Communications Standards Magazine, vol. 5, no. 4, pp. 140-146, December 2021. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.0001.1900021>
- [5] Mary-Ann Russon. International Business Times. "Nokia and EE Trial Mobile Base Stations Floating on Drones to Revolutionise Rural 4G Coverage", 2016. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <http://www.ibtimes.co.uk/nokia-ee-trial-mobile-base-stations-floating-drones-revolutionise-rural-4g-coverage-1575795>
- [6] Huawei. Connected Aerial Vehicle Live. Consultado en Mayo 20, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.huawei.com/en/industry-insights/innovation/xlabs/use-cases/mbbf2017-connected-aerial-vehicle-live>
- [7] O. Abbasi, A. Yadav, H. Yanikomeroglu, N. -D. Đào, G. Senarath and P. Zhu, "HAPS for 6G Networks: Potential Use Cases, Open Challenges, and Possible Solutions" in IEEE Wireless Communications, vol. 31, no. 3, pp. 324-331, June 2024. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/MWC.012.2200365>
- [8] Skyfront. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://skyfront.com/>
- [9] M. Dudek et al., "Hybrid fuel cell—Battery system as a main power unit for small unmanned aerial vehicles (UAV)" Int. J. Electrochem. Sci., vol. 8, pp. 8442–8463, Jun. 2013. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <http://electrochemsci.org/papers/vol8/80608442.pdf>
- [10] M. H. Shaheed et al., "Flying by the sun only: The solarcopter prototype" Aerosp. Sci.Technol., vol. 45, pp. 209–214, Sep. 2015. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.05.016>
- [11] H. Wang et al., "Power control in UAV-supported ultra dense networks: Communications, caching, and energy transfer" IEEE Commun. Mag., vol. 56, no. 6, pp. 28–34, Jun. 2018. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700431>
- [12] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y. -H. Nam and M. Debbah, "A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems" in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 3, pp. 2334-2360, thirdquarter 2019. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862>

- [13] Georgios Amponis, Thomas Lagkas, Maria Zevgara, Georgios Katsikas, Thanos Xirofotos, Ioannis Moscholios and Panagiotis Sarigiannidis. "Drones in B5G/6G Networks as Flying Base Stations", 2022, *Drones* 6, no. 2: 39. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2504-446X/6/2/39>
- [14] M. N. Boukoberine, Z. Zhou and M. Benbouzid, "Power Supply Architectures for Drones - A Review" *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 5826-5831. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927702>
- [15] Z. Becvar, P. Mach and M. Nikooroo, "Reducing Energy Consumed by Repositioning of Flying Base Stations Serving Mobile Users" 2020 *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Seoul, Korea (South), 2020, pp. 1-7. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/WCNC45663.2020.9120682>
- [16] L. D. P. Pugliese, F. Guerriero, D. Zorbas, and T. Razafindralambo, "Modelling the mobile target covering problem using flying drones" *Optim. Lett.*, vol. 10, no. 5, pp. 1021–1052, 2016. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11590-015-0932-1>
- [17] V. Sharma, K. Srinivasan, H.-C. Chao, K.-L. Hua, and W.-H. Cheng, "Intelligent deployment of UAVs in 5G heterogeneous communication environment for improved coverage" *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 85, pp. 94–105, May 2016. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.12.012>
- [18] M. Erdelj, O. Saif, E. Natalizio, and I. Fantoni, "UAVs that fly forever: Uninterrupted structural inspection through automatic UAV replacement" *Ad Hoc Netw.*, pp. 1–13, Dec. 2017. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2017.11.012>
- [19] Y. Li and L. Cai, "UAV-assisted dynamic coverage in a heterogeneous cellular system" *IEEE Network.*, vol. 31, no. 4, pp. 56–61, Jul./Aug. 2017. <https://doi.org/10.1109/MNET.2017.1600280>
- [20] M. Blenkin. (2017). "Powerlines to Charge Drones: Lockheed Martin's Melbourne Research Lab Takes Flight". Aug. 23, 2017. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://australianaviation.com.au/2017/08/lockheed-martins-melbourne-research-lab-takes-flight/>
- [21] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis and M. Debbah, "Efficient Deployment of Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Optimal Wireless Coverage" in *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 8, pp. 1647-1650, Aug. 2016. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2578312>
- [22] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis and M. Debbah, "Optimal transport theory for power-efficient deployment of unmanned aerial vehicles", 2016 *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016, pp. 1-6. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7510870>
- [23] Y. Yuan, C. Yang, W. Xiong and X. Cao, "Optimal Deployment of UAV Base Stations for Maximum Coverage of Task UAVs with Dynamical Positions", 2023 35th *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Yichang, China, 2023, pp. 3892-3897. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/CCDC58219.2023.10327351>

- [24] M. M. Saym, M. Mahbub and F. Ahmed, "Coverage Maximization by Optimal Positioning and Transmission Planning for UAV-Assisted Wireless Communications" 2021 International Conference on Science & Contemporary Technologies (ICSCT), Dhaka, Bangladesh, 2021, pp. 1-4. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ICSCT53883.2021.9642510>
- [25] Bin Li, Zesong Fei, Senior Member, IEEE, and Yan Zhang. "UAV Communications for 5G and Beyond: Recent Advances and Future Trends", 2019. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2887086>
- [26] Sabzehali, Javad & Shah, Vijay & Fan, Qiang & Choudhury, Biplav & Liu, Lingjia & Reed, Jeffrey. (2021). "Optimizing Number, Placement, and Backhaul Connectivity of Multi-UAV Networks". Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/356127635_Optimizing_Number_Placement_and_Backhaul_Connectivity_of_Multi-UAV_Networks
- [27] J. Lyu, Y. Zeng, R. Zhang and T. J. Lim, "Placement Optimization of UAV-Mounted Mobile Base Stations" in IEEE Communications Letters, vol. 21, no. 3, pp. 604-607, March 2017. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2633248>
- [28] Nirwan Ansaria, Di Wua y Xiang Sunb. "FSO as backhaul and energizer for drone-assisted mobile access networks" ICT Express, Volume 6, Issue 2, 2020, Pages 139-144, ISSN 2405-9595. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.icte.2019.12.002>
- [29] E. Ciaramella, Y. Arimoto, G. Contestabile, M. Presi, A. D'Errico, V. Guarino, and M. Matsumoto, "1.28 Terabit/s (32×40 Gbit/s) WDM transmission over a double-pass free space optical link" in Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optica Publishing Group, 2009), paper OMN7. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1364/OFC.2009.OMN7>
- [30] N. Ansari, Q. Fan, X. Sun and L. Zhang, "SoarNet" in IEEE Wireless Communications, vol. 26, no. 6, pp. 37-43, December 2019. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1109/MWC.001.1900126>
- [31] H. Elayan, O. Amin, B. Shihada, R. M. Shubair and M. -S. Alouini, "Terahertz Band: The Last Piece of RF Spectrum Puzzle for Communication Systems" in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 1, pp. 1-32, 2020. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8901159>
- [32] P. K. Singya, B. Makki, A. D'Errico and M. -S. Alouini, "Hybrid FSO/THz-Based Backhaul Network for mmWave Terrestrial Communication" in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 22, no. 7, pp. 4342-4359, July 2023. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3224331>
- [33] Z. Becvar, M. Vondra, P. Mach, J. Plachy and D. Gesbert, "Performance of Mobile Networks with UAVs: Can Flying Base Stations Substitute Ultra-Dense Small Cells?" European Wireless 2017; 23th European Wireless Conference, Dresden, Germany, 2017, pp. 1-7. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8011325>

- [34] I. Karamouzas, B. Skinner, S.J. Guy, “Universal power law governing pedestrian interactions”, 2014. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.1082>
- [35] T. S. Rappaport, F. Gutierrez, E. Ben-Dor, J. N. Murdock, Y. Qiao and J. I. Tamir, "Broadband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Models Using Adaptive-Beam Antennas for Outdoor Urban Cellular Communications" in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, no. 4, pp. 1850-1859, April 2013. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2235056>
- [36] M. Lauridsen, L. Noël, T. Sørensen, and P. Mogensen. “An Empirical LTE Smartphone Power Model with a view to Energy Efficiency Evolution”, Intel Technology Journal, Volume 18, Issue 1, 2014. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/176790997/An_Empirical_LTE_Smartphone_Power_Model_with_a_View_to_Energy_Efficiency_Evolution.pdf
- [37] F. Alsaleem, F. Alsunaydih, K. Alhassoon, O. H. Salim and M. Shaban, "Adopting a Flying Base Station for Connectivity Coverage of Temporary Events", 2023 IEEE USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium), Portland, OR, USA, 2023, pp. 15-16. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.23919/USNC-URSI54200.2023.10288614>
- [38] N. Tafintsev, A. Chiumento, O. Vikhrova, M. Valkama and S. Andreev, "Utilization of UAVs as Flying Base Stations in Urban Environments", 2023 15th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Ghent, Belgium, 2023, pp. 7-11. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ICUMT61075.2023.10333093>
- [39] <https://www.realmadrid.com/es-ES/santiago-bernabeu>
- [40] <https://airspan.com/products/5g/air5g-7200/>
- [41] M. Dabbous, A. Ngom, A. Diallo, P. L. Thuc, R. Staraj and J. M. Ribero, "Reconfigurable antenna array for 5G small cells", 2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Florence, Italy, 2023, pp. 1-4. Consultado en Marzo 2024 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.23919/EuCAP57121.2023.10133272>
- [42] <https://mmwavetech.fujikura.jp/5g/>
- [43] User Equipment (UE) radio access capabilities (3GPP TS 38.306 version 17.0.0 Release 17) 2022. Consultado en Abril 2024 [En línea]. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138306/17.00.00/ts_138306v170000p.pdf
- [44] “Tema 6: Tecnologías y Sistemas 5G”, material docente del Máster Universitario En Ingeniería De Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid (ETSIT-UPM), curso 2023/2024.
- [45] “Acceso Radio 5G NR”, Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid (ETSIT-UPM).
Consultado en Abril 2024 [En línea]. Disponible en: http://www.grc.ssr.upm.es/Portal%205G/subsitio/Informes%20y%20Notas/Microsoft%20PowerPoint%20-%205G_Acceso%20Radio%20%20JMHR.pdf
- [46] <https://www.calcmaps.com/es/map-area/>

-
- [47] “TS 138 101-2 - V17.5.0 - 5G”. Consultado en Mayo 2024 [En línea]. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/13810102/17.05.00_60/ts_13810102v170500p.pdf
- [48] Xirio Online, “Resultados de cobertura multitransmisor: mejor servidor”. Consultado en Mayo 2024 [En línea]. Disponible en: https://www.xirio-online.com/web/help/es/best_server_result.htm
- [49] Xirio Online, “Resultados 5G: nivel de señal RSSI”. Consultado en Mayo 2024 [En línea]. Disponible en: https://www.xirio-online.com/web/help/es/nr5g_results.htm

ANEXO A: ASPECTOS ÉTICOS, ECONÓMICOS, SOCIALES Y AMBIENTALES

A.1 INTRODUCCIÓN

A pesar de que LTE es una tecnología muy estandarizada y fiable, hay requerimientos que no es posible cubrir con LTE o sus sucesivas versiones. Por ello, en los últimos años ha emergido la tecnología 5G NR, la cual, gracias a sus capacidades como alta tasa de datos, amplia cobertura, baja latencia y alta fiabilidad, es capaz de ofrecer una excelente calidad de servicio a sus usuarios. Al mismo tiempo, el estudio de aplicaciones de los UAV en el sector de las telecomunicaciones ha tenido un auge sin precedentes desde la llegada del 5G. Una de las principales aplicaciones de los UAV en las comunicaciones móviles es su uso como estaciones base aéreas para asistir a las redes terrestres en casos de congestión por una alta afluencia de usuarios. Por todo esto, el objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es diseñar una red 5G basada en el uso de estaciones base aéreas con UAV, concretamente en entornos urbanos donde debido a diferentes eventos pueda existir una sobrecarga de usuarios en la red.

En este contexto, en el siguiente apartado se tratará más en profundidad la relación existente entre este proyecto con temas sociales, económicos, éticos, legales y/o ambientales

A.2 DESCRIPCIÓN DE IMPACTOS RELEVANTES RELACIONADOS CON EL PROYECTO

En este apartado vamos a discutir los asuntos más relevantes relacionados con la sostenibilidad social, económica, ambiental o ética del presente Trabajo Fin de Grado.

En cuanto al impacto social de la red diseñada en este Trabajo de Fin de Grado, podemos asegurar un impacto positivo en la sociedad. Esto es debido a que el objetivo de esta red es descongestionar las actuales redes terrestres para así poder ofrecer un mejor servicio a los usuarios. Este diseño implica una mejor tasa de datos y cobertura durante eventos en los cuales, normalmente, esto no suele ser así. De esta forma mejoramos notablemente la experiencia de usuario y, en definitiva, influimos positivamente en la calidad de vida de las personas. Además, la tecnología 5G es considerada segura y robusta frente a posibles ataques. De esta manera aseguramos la privacidad y seguridad de los usuarios conectados a nuestra red.

Considerando ahora el aspecto económico, debemos tener en cuenta que el despliegue de esta red supone un coste más o menos elevado debido a su innovadora estructura que implica UAV, tecnología FSO, bandas milimétricas, etc.... A pesar de ello, esta red puede ser vista como una oportunidad de negocio por las principales operadoras españolas y puede ser tomada en cuenta para futuros despliegues en zonas urbanas e incluso rurales. Esto podría resultar beneficioso para el mercado, ya que puede generar competitividad entre las diferentes compañías de servicio móvil por ver cuál es la que más perfecciona y mejor despliega este tipo de redes. Por consiguiente, todo esto resultaría en una mejor experiencia de usuario, ya que la competitividad entre empresas suele ser beneficiosa para los clientes.

Otro de los aspectos más importantes es el ético, el cual, en redes 5G de esta índole está estrechamente relacionado con la seguridad y la privacidad. Las redes 5G son capaces de manejar cantidades de datos enormes, por lo que es crucial mantener la seguridad y privacidad de los usuarios en todo momento, así como respetar la ley de protección de datos y

demás regulaciones estatales. Estas redes tienen una ventaja comparativa en términos de seguridad sobre las generaciones anteriores. Sin embargo, también surgen riesgos reales, por ejemplo, debido a arquitecturas de red más complejas, abiertas y fragmentadas y a la capacidad de transmitir grandes cantidades de información y permitir que más personas y dispositivos interactúen simultáneamente. La interconexión con otras redes y la naturaleza transnacional de muchas amenazas inciden en su seguridad, y el uso esperado de estas redes para funciones críticas para la economía y la sociedad incrementará el impacto potencial de los incidentes de seguridad que sufran. Todos estos riesgos específicos de seguridad de las comunicaciones móviles 5G se abordaron regulatoriamente en España a través del Real Decreto-ley 7/2022, de 29 de marzo, sobre requisitos para garantizar la seguridad de las redes y servicios de comunicaciones electrónicas de quinta generación, que incorpora en toda su extensión la Recomendación (UE) 2019/534, de 26 de marzo de 2019, de la Comisión Europea, sobre la ciberseguridad de las redes 5G. De manera que, todo lo estipulado en este documento ha sido aprobado recientemente mediante la publicación del Real Decreto 443/2024, de 30 de abril, por el que se aprueba el Esquema Nacional de Seguridad de redes y servicios 5G.

En último lugar tenemos un factor que ha ganado especial relevancia en los últimos años, el medioambiental. Una red totalmente inalámbrica como lo es la presentada en este TFG se traduce en una reducción en el consumo de materiales y energía, ya que no es necesaria instalación de cableados de fibra óptica o cobre. Asimismo, las redes 5G gozan de una gran eficiencia energética gracias al uso que hacen de diferentes técnicas de ahorro de energía, lo que contribuye a la sostenibilidad y a la reducción de la huella de carbono.

A.3 ANÁLISIS DETALLADO DE ALGUNO DE LOS PRINCIPALES IMPACTOS

En esta sección vamos a profundizar en una faceta muy interesante del ámbito social. La red basada en la implementación de estaciones base con UAV diseñada en este Trabajo de Fin de Grado supone un avance en cuanto a la creación de redes móviles capaces de ofrecer una buena calidad de servicio ininterrumpida. Es más, el uso de UAV para ofrecer cobertura 5G de alta velocidad es un gran paso hacia una sociedad cada vez más digitalizada que depende de una cobertura continua y fiable en todo momento, debido a la enorme demanda de servicios móviles existente actualmente. Además, teniendo en cuenta la libertad de movimiento y trayectoria de los UAV, estos pueden reposicionarse en el área de cobertura dependiendo de las necesidades de los usuarios en cada momento, aumentando así la calidad del servicio. Todo lo mencionado anteriormente conduce a una mejora de la calidad de vida de los usuarios y de la sociedad en general.

A.4 CONCLUSIONES

El proyecto de diseño de la red 5G basada en estaciones base aéreas con UAV en entornos urbanos ha sido tratado desde diferentes ángulos en este anexo. En definitiva, podemos afirmar que este diseño puede resultar beneficioso para la sociedad, sobre todo en vistas a la creación de redes móviles con una cobertura robusta y sin fisuras, al tiempo que incrementamos la calidad de vida de las personas.

ANEXO B: CÁLCULO DEL ÁREA Y DEL PERÍMETRO DE LA ZONA DE COBERTURA

Para el cálculo del área de cobertura hemos empleado la herramienta Google Earth, la cual permite obtener imágenes aéreas de zonas concretas a buena calidad. También te calcula automáticamente el área y el perímetro de la zona seleccionada, de manera que en nuestro caso el área es de 440141.41 m² y el perímetro de 2665.85 m, tal y como se aprecia en la **figura B.1**.

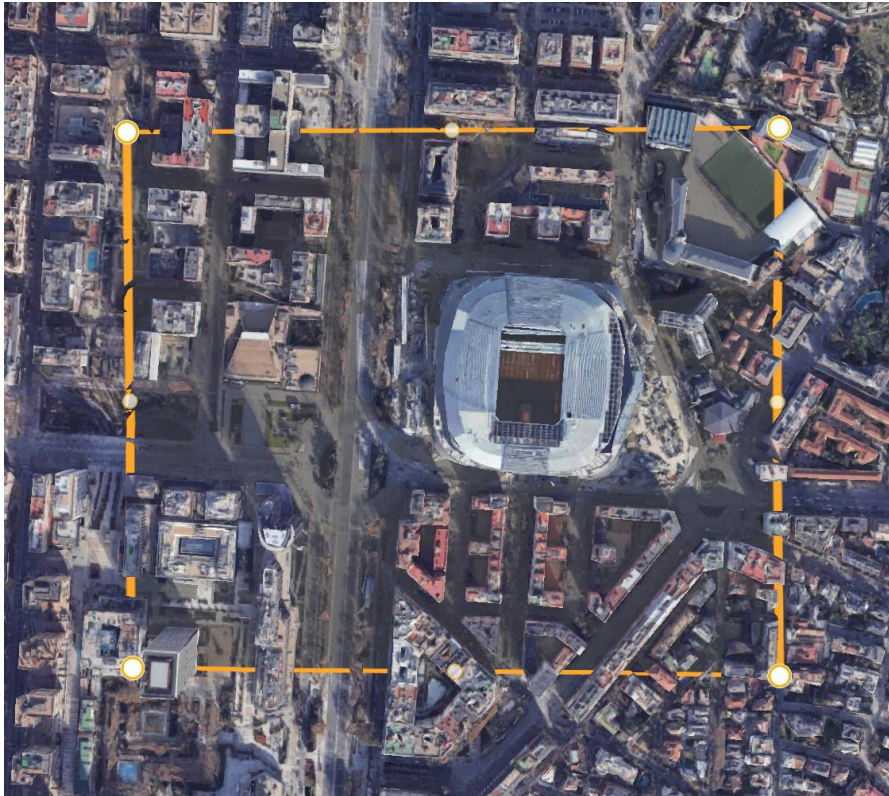


Figura B.1. Área y perímetro de la zona seleccionada

Para el cálculo del área de las zonas peatonales que nos facilitaba el número de UAV necesarios para el diseño de la red en el **punto 4.3**, hemos utilizado la página web Calcmaps [46].

ANEXO C: PRESUPUESTO ECONÓMICO

COSTE DE MANO DE OBRA (coste directo)		Horas	Precio/hora	Total	
		400	15 €	6.000 €	
COSTE DE RECURSOS MATERIALES (coste directo)		Precio de compra	Uso en meses	Amortización (en años)	Total
Ordenador personal (Software incluido).....		1.200,00 €	6	5	120,00 €
COSTE TOTAL DE RECURSOS MATERIALES				120,00 €	
GASTOS GENERALES (costes indirectos)	15%	sobre CD		918,00 €	
BENEFICIO INDUSTRIAL	6%	sobre CD+CI		422,28 €	
MATERIAL FUNGIBLE					
Licencia Xirio-Online				1.150,00 €	
SUBTOTAL PRESUPUESTO				8.610,28 €	
IVA APLICABLE			21%	1.808,16 €	
TOTAL PRESUPUESTO				10.418,44 €	

Tabla C.1. Presupuesto económico del proyecto