



MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES

TRABAJO FIN DE MASTER

Estudio de la implementación de redes 5G en la industria de la aviación: transformación de comunicaciones, operaciones y retos de implementación.

Autor: Ana Suárez Fábregas

Director: Pedro Celestino Olmos González

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Estudio de la implementación de redes 5G en la industria de la aviación: transformación de
comunicaciones, operaciones y retos de implementación
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.
El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.:



Fecha: 20/05/2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Pedro Celestino Olmos González

Fecha: 20/05/2025



MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES

TRABAJO FIN DE MASTER

Estudio de la implementación de redes 5G en la industria de la aviación: transformación de comunicaciones, operaciones y retos de implementación.

Autor: Ana Suárez Fábregas

Director: Pedro Celestino Olmos González

Madrid

Agradecimientos

Con este proyecto pongo fin a seis años de mucho trabajo y esfuerzo, de largas jornadas de estudio y de muchas caras nuevas y experiencias variopintas. Por eso, me gustaría poder agradecer de alguna manera a todas aquellas personas que me han acompañado a lo largo de estos años, ya que han sido un pilar fundamental tanto a nivel académico como personal.

En primer lugar, dar las gracias a mi familia, en especial a mis padres, por apoyarme día a día, confiar en mí y recordarme que con trabajo todo se puede sacar adelante.

A mis amigas y amigos del Colegio Mayor, por vuestra amistad y por haberme acompañado a lo largo de estos años, en los momentos de más agobio y estrés, pero también en tardes libres y de ocio, gracias por vuestro tiempo y por conseguir sacar siempre un rato para pensar en otras cosas.

A mis compañeros de la Universidad Politécnica, en especial a Cristina, por ser mi mano derecha desde el primer día y por ser un apoyo fundamental durante la carrera. También a la academia Crisser, en especial a Raúl, por transmitirnos su optimismo, humor y tranquilidad y demostrar que se puede enseñar desde muchas perspectivas.

Y, por último, me gustaría agradecer a mis compañeros de Máster, que me han acompañado en estos dos últimos años y han puesto la guinda final a una muy buena etapa.

Gracias a todos.

ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE REDES 5G EN LA INDUSTRIA DE LA AVIACIÓN: TRANSFORMACIÓN DE COMUNICACIONES, OPERACIONES Y RETOS DE IMPLEMENTACIÓN.

Autor: Suárez Fábregas, Ana

Director: Olmos González, Pedro Celestino.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto analiza la viabilidad de implementar redes 5G en el sector aeronáutico, tanto en los enlaces directos con estaciones terrestres como en las conexiones vía satélite. Mediante un enfoque teórico-práctico, se abordan las limitaciones actuales de las comunicaciones aire-tierra de tipo A2G y se simulan distintos escenarios de aplicación del 5G. Los resultados evidencian mejoras significativas en latencia, capacidad y estabilidad del enlace, posicionando al 5G como una solución prometedora para las comunicaciones a bordo.

Palabras clave: 5G, Comunicaciones aeronáuticas, DA2G, SA2G, Satélites LEO.

1. Introducción

Este proyecto consiste en un estudio teórico y práctico sobre la viabilidad de implementar redes 5G en el sector aeronáutico. A lo largo del trabajo se analizan los distintos tipos de comunicaciones presentes en la aviación, así como las características y fundamentos técnicos de la tecnología 5G. El objetivo es evaluar sus posibilidades de aplicación en este entorno y posteriormente, simular escenarios prácticos de uso.

2. Definición del proyecto

Aunque las comunicaciones aeronáuticas han experimentado una evolución significativa en las últimas décadas, todavía presentan ciertas limitaciones que condicionan su rendimiento y escalabilidad, específicamente en el ámbito de las comunicaciones aire-tierra A2G.

Las soluciones actuales, que emplean tecnologías como LTE para enlaces directos y satélites GEO para comunicaciones satelitales, permiten una conectividad funcional, pero se enfrentan a restricciones relacionadas con la latencia, la cobertura global continua y la eficiencia espectral. En este contexto, la tecnología 5G surge como una oportunidad para mejorar estos sistemas, al ofrecer comunicaciones de alta velocidad, baja latencia y la capacidad de gestionar un gran número de dispositivos conectados. Esto permitiría habilitar nuevos servicios operacionales más eficientes y avanzados, superando las limitaciones de las redes actuales y ofreciendo una experiencia del pasajero mejorada.

Este proyecto tiene como objetivo analizar la viabilidad de implementar redes 5G en el ámbito aeronáutico en las comunicaciones A2G. Tanto para enlaces directos con estaciones base en tierra (DA2G) como mediante enlaces satelitales (SA2G). Para ello, se ha adoptado un enfoque mixto que combina el estudio teórico con simulaciones prácticas, en las que se evalúan parámetros como cobertura, latencia y capacidad de enlace.

En cuanto a su estructura, el trabajo se divide en dos bloques principales: una parte teórica y una parte práctica.

La sección teórica se compone de dos capítulos. El primero analiza la evolución de las redes de comunicaciones en la aviación, desde sus orígenes hasta la actualidad, se clasifican los tipos de redes en la industria aeronáutica y se centra el estudio en las comunicaciones A2G, comentando su situación actual y limitaciones. El segundo capítulo se centra en el estudio de las redes 5G, se describen sus características técnicas y espectrales y se explora las posibles aplicaciones de la tecnología 5G en el ámbito aeronáutico, tanto para enlaces terrestres como satelitales.

La parte práctica está compuesta por tres capítulos. En el primero se introducen los escenarios y herramientas de simulación. El segundo capítulo analiza, mediante el programa Radio Mobile, tres escenarios de implementación de 5G en comunicaciones DA2G y en el tercero, se simula un enlace SA2G utilizando satélites LEO, evaluando mejoras en latencia, capacidad y cobertura.

Por último, se presentan los resultados principales del proyecto y las conclusiones, junto con posibles líneas de investigación futura.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Para llevar a cabo el estudio práctico, se han empleado diversas herramientas de simulación y análisis. La selección de estas herramientas responde a su capacidad para modelar entornos de vuelo, estimar parámetros clave de los enlaces y representar las condiciones reales de operación.

En primer lugar, se ha utilizado el programa Radio Mobile Online, una plataforma basada en el modelo de propagación Longley-Rice, que permite simular enlaces inalámbricos considerando la topografía, altura de las antenas y condiciones del terreno. Esta herramienta ha sido clave en la simulación de escenarios DA2G, permitiendo analizar la cobertura en distintas fases del vuelo: despegue, crucero y transición hacia zonas oceánicas.

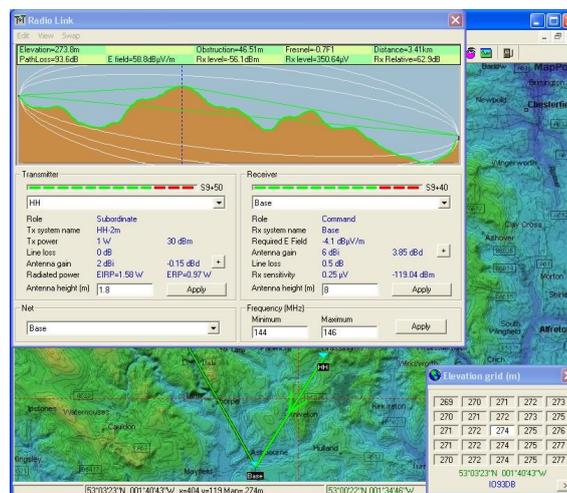


Ilustración 1. Interfaz de Radio Mobile Online utilizada para simular los escenarios DA2G

Por otro lado, para las simulaciones SA2G, se ha empleado el entorno de programación técnica MATLAB, con el que se han calculado métricas fundamentales del enlace como la pérdida por espacio libre (FSPL), relación señal-ruido (SNR), latencia y capacidad del canal, tanto en uplink como en downlink. Los análisis se han centrado en enlaces con satélites LEO utilizando la banda Ka, lo que permite evaluar el rendimiento teórico del 5G sobre este tipo de infraestructura.

Finalmente, se ha integrado la herramienta Satellite Map Space, una plataforma interactiva que proporciona visualización en tiempo real de constelaciones satelitales como Starlink y OneWeb. Esta herramienta ha sido utilizada para validar la cobertura y disponibilidad de nodos satelitales en las zonas simuladas, aportando una visión complementaria a los cálculos teóricos.

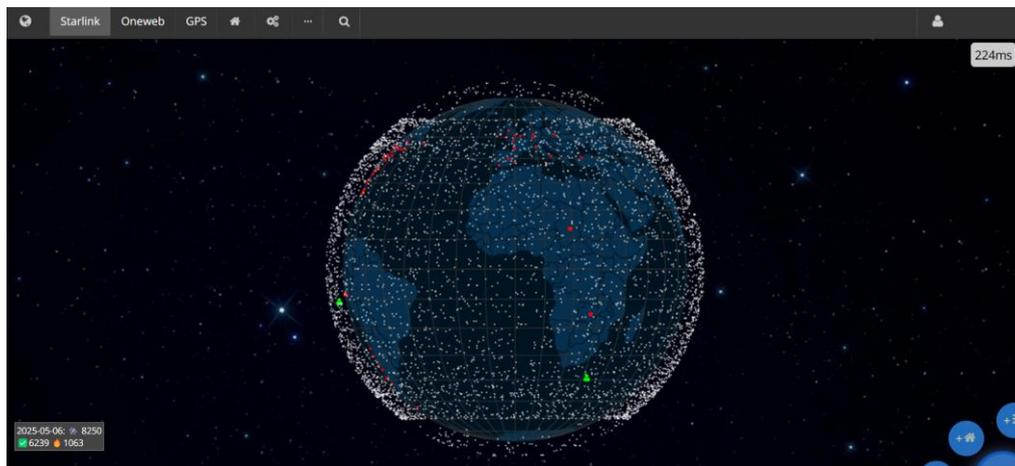


Ilustración 2. Visualización de la constelación LEO desde Satellite Map Space

Además, el proyecto incorpora el análisis de varios protocolos aeronáuticos relevantes, como ACARS, ADS-B, AMHS o TAO, que actualmente estructuran las comunicaciones aeronáuticas. Su estudio ha permitido establecer un marco comparativo con las capacidades que podría ofrecer la tecnología 5G, especialmente en cuanto a sincronización, fiabilidad y volumen de datos transmitidos.

4. Resultados

Las simulaciones desarrolladas permitieron validar el potencial del 5G para mejorar las comunicaciones aeronáuticas en escenarios tanto DA2G como SA2G. En los enlaces tierra-aire, se demostró la viabilidad de mantener conectividad continua en las fases de despegue y crucero mediante estaciones base 5G, destacando una mejora en la cobertura, el throughput y una reducción del impacto del efecto Doppler. En escenarios oceánicos, se evidenció la necesidad de transición a enlaces satelitales, donde el uso de satélites LEO con tecnología 5G mostró una reducción de la latencia de más del 80 % frente a enlaces GEO tradicionales y una mejora notable en la capacidad del canal. Los resultados obtenidos respaldan la integración de redes 5G como una solución viable para ampliar la cobertura, mejorar la estabilidad de los enlaces y habilitar nuevos servicios a bordo.

A modo de ejemplo, la figura que se muestra a continuación recoge una muestra uno de los resultados obtenidos en el análisis de cobertura de una estación base con 5G a 10 km de altura.

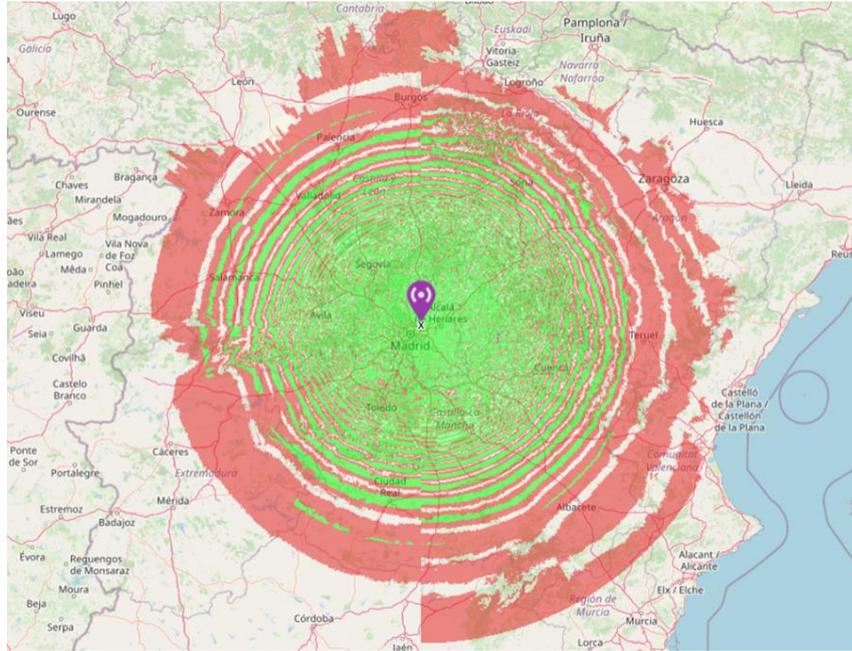


Ilustración 3. Cobertura estimada de una estación base 5G en Madrid para enlaces DA2G durante la fase de crucero

5. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto ha permitido constatar que, a pesar de su madurez e implantación consolidada, las comunicaciones aeronáuticas actuales presentan limitaciones en cobertura, latencia y adaptabilidad a nuevos servicios digitales.

En este escenario, la tecnología 5G se perfila como una solución de alto potencial, capaz de mejorar la calidad, fiabilidad y disponibilidad de los enlaces. No obstante, su adopción enfrenta barreras significativas asociadas a la regulación internacional, la necesidad de evolución y adaptación de protocolos, los costes de implementación de nueva infraestructura y la necesidad de desarrollar mecanismos que garanticen la ciberseguridad. Así, con este proyecto se concluye que la integración del 5G en el entorno aeronáutico es técnicamente viable, pero requerirá una estrategia progresiva y coordinada entre los distintos actores del sector.

Como líneas futuras, se plantea el análisis de la viabilidad económica del despliegue, la validación de las soluciones en entornos reales y la exploración de nuevas aplicaciones y modelos tecnológicos que podrían transformar las comunicaciones a bordo.

6. Referencias

(3GPP, 2024; 5G Americas, 2022; ITU-R, 2017)

STUDY ON THE IMPLEMENTATION OF 5G NETWORKS IN THE AVIATION INDUSTRY: TRANSFORMATION OF COMMUNICATIONS, OPERATIONS, AND IMPLEMENTATION CHALLENGES.

Author: Suárez Fábregas, Ana.

Supervisor: Olmos González, Pedro Celestino.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This project analyzes the feasibility of implementing 5G networks in the aviation sector, focusing on both direct links with ground stations and satellite-based connections. Through a theoretical and practical approach, current limitations of air-to-ground (A2G) communications are addressed, and various 5G application scenarios are simulated. The results show significant improvements in latency, capacity, and link stability, positioning 5G as a promising solution for onboard communications.

Keywords: 5G, Aeronautical communications, DA2G, SA2G, LEO satellites.

1. Introduction

This project consists of a theoretical and practical study on the feasibility of implementing 5G networks in the aviation sector. Throughout the work, various types of communication systems used in aviation are analyzed, along with the characteristics and technical foundations of 5G technology. The objective is to evaluate its potential applications in this environment and, subsequently, simulate practical usage scenarios.

2. Project Definition

Although aeronautical communications have undergone significant evolution in recent decades, they still present certain limitations that affect their performance and scalability, particularly in the area of air-to-ground (A2G) communications.

Current solutions, which rely on technologies such as LTE for direct links and GEO satellites for satellite communications, provide functional connectivity but face challenges related to latency, continuous global coverage, and spectral efficiency. In this context, 5G technology emerges as an opportunity to enhance these systems by offering high-speed communication, low latency, and the ability to manage a large number of connected devices. This would enable more advanced and efficient operational services while improving the passenger experience.

The aim of this project is to assess the feasibility of implementing 5G networks in the aeronautical domain, for both direct links with ground base stations (DA2G) and satellite links (SA2G). To achieve this, a hybrid approach has been adopted that combines theoretical analysis with practical simulations, evaluating parameters such as coverage, latency, and link capacity.

In terms of structure, the work is divided into two main blocks: a theoretical part and a practical part.

The theoretical section consists of two chapters. The first analyzes the evolution of communication networks in aviation, from their origins to the present day. It classifies the types of networks used in the aeronautical industry and focuses on A2G (air-to-ground) communications, discussing their current state and limitations. The second chapter centers on the study of 5G networks, describing their technical characteristics, spectrum usage, and the potential applications of 5G technology in the aeronautical field, for both terrestrial and satellite links.

The practical part consists of three chapters. The first introduces the simulation scenarios and tools used. The second chapter analyzes three DA2G implementation scenarios using Radio Mobile software. The third simulates an SA2G link using LEO satellites, evaluating improvements in latency, capacity, and coverage.

Lastly, the main results and conclusions of the project are presented, along with potential future lines of research.

3. Description of the model/system/tool

To carry out the practical part of the study, various simulation and analysis tools have been employed. The selection of these tools is based on their ability to model flight environments, estimate key link parameters, and represent real operating conditions.

Firstly, the Radio Mobile Online software was used, a platform based on the Longley,Rice propagation model, which allows the simulation of wireless links by taking into account topography, antenna height, and terrain conditions. This tool has been essential in simulating DA2G scenarios, enabling the analysis of coverage across different phases of flight: takeoff, cruise, and transition to oceanic zones.

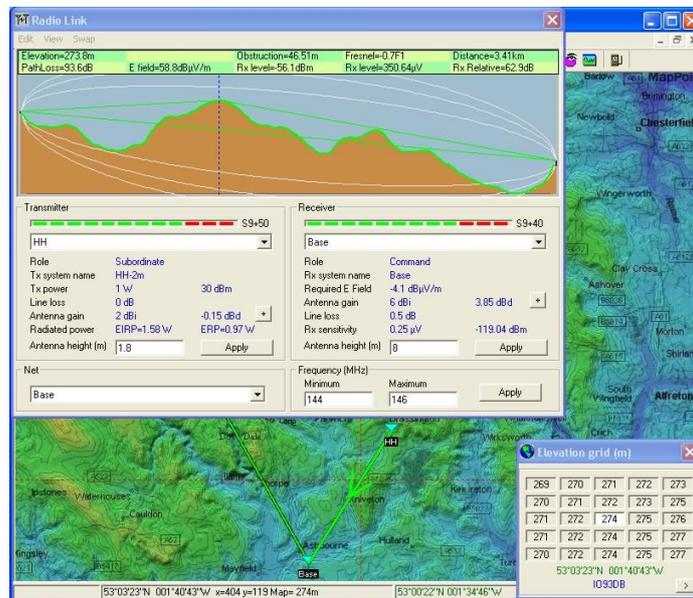


Figure 1. Radio Mobile Online interface used to simulate DA2G scenarios

On the other hand, for the SA2G simulations, the MATLAB technical computing environment was used to calculate fundamental link metrics such as free-space path loss

(FSPL), signal-to-noise ratio (SNR), latency, and channel capacity, for both uplink and downlink. The analyses focused on links with LEO satellites operating in the Ka band, allowing for the evaluation of the theoretical performance of 5G over this type of infrastructure.

Finally, the Satellite Map Space tool was integrated, an interactive platform that provides real-time visualization of satellite constellations such as Starlink and OneWeb. This tool was used to validate the coverage and availability of satellite nodes in the simulated areas, offering a complementary perspective to the theoretical calculations.

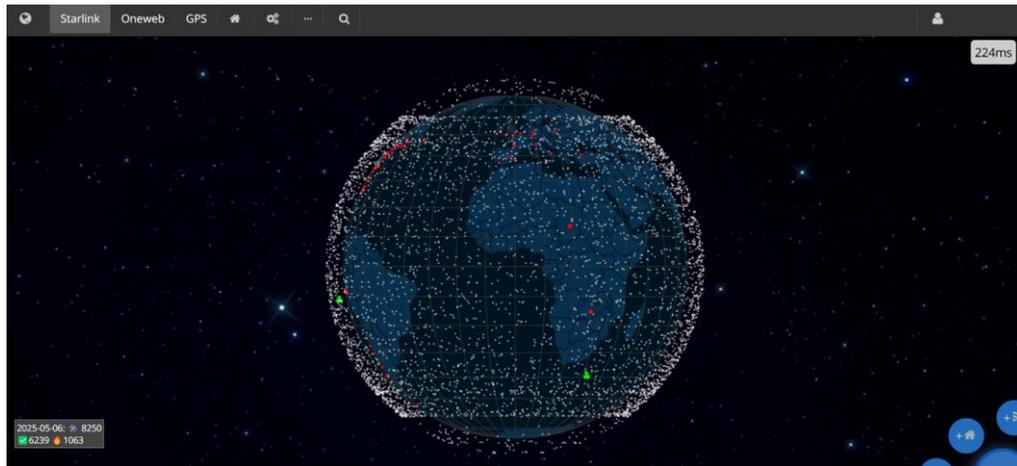


Figure 4. LEO constellation visualization using Satellite Map Space

In addition, the project includes an analysis of several relevant aeronautical communication protocols, such as ACARS, ADS-B, AMHS, and TAO, which currently form the backbone of aeronautical communications. Their study has provided a comparative framework to assess the capabilities that 5G technology could offer, particularly in terms of synchronization, reliability, and data transmission volume.

4. Results

The simulations carried out validated the potential of 5G to improve aeronautical communications in both DA2G and SA2G scenarios. For air-to-ground links, the viability of maintaining continuous connectivity during takeoff and cruise phases using 5G base stations was demonstrated, highlighting an improvement in throughput and a reduction in the impact of the Doppler effect. In oceanic scenarios, the need for transitioning to satellite links became evident. The use of LEO satellites with 5G technology showed a latency reduction of over 80% compared to traditional GEO links, along with a notable improvement in channel capacity.

The results obtained support the integration of 5G networks as a viable solution to expand coverage, enhance link stability, and enable new onboard services.

The following figure presents a sample of the results obtained for the coverage analysis of a 5G base station at 10 km of height.

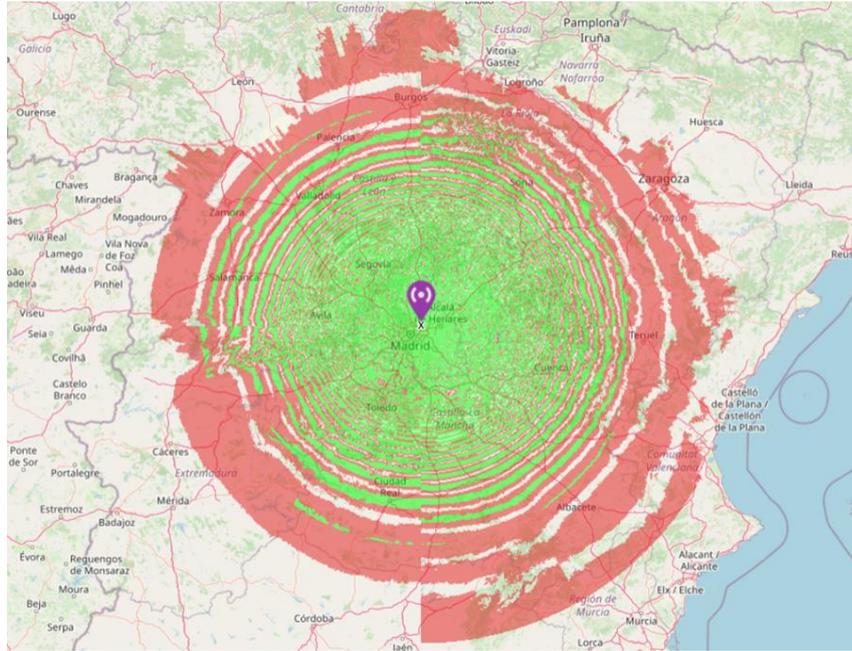


Figure 5. Estimated coverage of a 5G base station in Madrid for DA2G links during the cruise phase

5. Conclusions

The development of this project has shown that, despite the maturity and established deployment of current aeronautical communication systems, they still present limitations in terms of coverage, latency, and adaptability to new digital services.

In this context, 5G technology stands out as a high-potential solution capable of enhancing the quality, reliability, and availability of communication links. However, its adoption faces significant challenges related to international regulation, the evolution of existing protocols, the costs associated with implementing new infrastructure and the need to develop mechanisms that guarantee cybersecurity.

This project concludes that integrating 5G into the aeronautical environment is technically feasible but will require a progressive and coordinated strategy among the various stakeholders in the sector. Future lines of research include analyzing the economic viability of deployment, validating solutions in real operational environments, and exploring new applications and technological models that could transform onboard communications.

6. References

(3GPP, 2024; 5G Americas, 2022; ITU-R, 2017)

Índice de la memoria

<i>Índice de la memoria</i>	<i>I</i>
<i>Capítulo 1. Introducción</i>	<i>4</i>
1.1 Introducción.....	4
1.2 Motivación del proyecto.....	4
<i>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías</i>	<i>6</i>
<i>Capítulo 3. Estado de la Cuestión</i>	<i>8</i>
<i>Capítulo 4. Definición del Trabajo</i>	<i>9</i>
4.1 Justificación.....	9
4.2 Objetivos	9
4.3 Metodología.....	10
4.4 Planificación y Estimación Económica	11
<i>Parte I Estudio teórico</i>	<i>13</i>
<i>Capítulo 1. Redes de telecomunicaciones en la industria aeronáutica: evolución, clasificación y limitaciones existentes</i>	<i>14</i>
1.1 Evolución de las comunicaciones en la aviación.....	14
1.2 Tipos de comunicaciones en la industria aeronáutica	17
1.3 Comunicaciones A2G: definición y limitaciones.....	18
<i>Introducción a las comunicaciones A2G</i>	18
<i>Limitaciones de las redes A2G</i>	19
<i>Capítulo 2. Redes 5G: Fundamentos técnicos y aplicaciones en la industria aeronáutica</i> <i>22</i>	
2.1 Introducción a las redes 5G: tipos de servicios de comunicaciones.....	22
2.2 Espectro de frecuencias en 5G	24
<i>Bandas bajas (por debajo de 1 GHz)</i>	25
<i>Bandas medias (1-6 GHz)</i>	25
<i>Bandas milimétricas (mmWave) (> 24 GHz)</i>	25

2.3 Implementación de 5G en redes A2G: líneas de aplicación y mejora de las comunicaciones	26
<i>Incorporación del 5G en las comunicaciones de tipo DA2G</i>	27
<i>Incorporación del 5G en comunicaciones SA2G:</i>	28
Parte II Estudio práctico	30
Capítulo 1. Introducción a las simulaciones, escenarios y herramientas utilizadas	31
Capítulo 2. Escenario 1: Implementación de 5G en comunicaciones DA2G	33
2.1 Parámetros y configuraciones previas del enlace	33
2.2 Simulación de escenarios	34
<i>Simulación i: Fase despegue</i>	35
<i>Simulación ii: Fase crucero</i>	39
<i>Simulación iii: Fase crucero en el Atlántico</i>	42
Capítulo 3. Escenario 2: Implementación de 5G en comunicaciones SA2G	46
3.1 Parámetros y configuración del enlace	46
<i>Análisis latencia</i>	50
<i>Análisis throughput y capacidad</i>	50
<i>Análisis de cobertura</i>	52
3.2 Consideraciones finales a tener en cuenta	55
<i>Timing Advance</i>	55
<i>Handover entre satélites</i>	56
Capítulo 4. Análisis de resultados	60
Capítulo 5. Conclusiones y Trabajos Futuros	62
Capítulo 6. Bibliografía	64
Capítulo 7. Anexo A	69
<i>Alineamiento con los ODS</i>	69
Capítulo 8. Anexo B	71
8.1 Evolución de las telecomunicaciones en la aviación	71
<i>Radio Receptor de Marconi</i>	71

8.2 Aspectos técnicos del 5G	72
<i>Beamforming</i>	72
<i>Network Slicing</i>	72
<i>Mimo Masivo</i>	72
8.3 Tecnologías asociadas al uso del espectro.....	73
<i>Multiplexación por división en la frecuencia OFDM</i>	73
<i>Formación de haz (Beamforming)</i>	74
<i>Agregación de portadoras</i>	74
<i>Reducción de interferencias</i>	74
8.4 Simulaciones de escenarios. Ampliación de resultados	75

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En la era de la hiperconectividad, la industria de la aviación avanza hacia una transformación digital que exige comunicaciones más rápidas, fiables y seguras. La tecnología 5G se perfila como un elemento clave para lograr este salto cualitativo, al ofrecer velocidades de transmisión ultra rápidas, baja latencia y una conectividad robusta, lo que la convierte en una opción idónea para modernizar los sistemas de comunicación aeronáuticos.

Recientemente, la Comisión Europea ha aprobado el uso de redes 5G a bordo de los aviones, permitiendo a los pasajeros utilizar sus dispositivos móviles con plena funcionalidad durante el vuelo, gracias a la implementación de picocélulas que conectan con redes terrestres a través de satélites. Esta iniciativa marca un hito en la integración del 5G en el entorno aeronáutico, abriendo nuevas posibilidades para mejorar la conectividad y los servicios a bordo (El Mundo, 2022).

Además, en octubre de 2024, se realizó el primer vuelo de un sistema 5G autónomo integrado en un avión reactor E25 (C.101) del Ejército del Aire y del Espacio de España. Este proyecto, desarrollado conjuntamente por Airbus y Telefónica, representa un avance significativo en la aplicación del 5G en aeronaves, con el objetivo de mejorar las capacidades de comunicación y control en entornos complejos (Primer Vuelo de 5G Aeronáutico Integrado En Un Avión Reactor - Actualidad Aeroespacial, n.d.).

Estas iniciativas reflejan una tendencia creciente en la industria hacia la adopción del 5G para optimizar las operaciones aéreas, mejorar la seguridad y ofrecer una mejor experiencia de vuelo. Sin embargo, la implementación de esta tecnología también plantea importantes retos, tanto a nivel tecnológico como de infraestructura, tal y como se verá a lo largo de este trabajo.

Por lo tanto, este proyecto se enmarca en este contexto de transformación tecnológica, con el objetivo de analizar la viabilidad y el impacto de la integración del 5G en la aviación. A través de un enfoque multidisciplinario, se explorarán las oportunidades y retos que presenta esta tecnología, contribuyendo al desarrollo de soluciones innovadoras que impulsen la evolución del sector aeronáutico en la era digital.

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Este proyecto nace a nivel personal con la intención de estudiar, simular y evaluar la viabilidad de aplicar redes 5G en la industria de la aviación, específicamente en los sistemas de comunicación aire-tierra (A2G), tanto en sus versiones terrestres (DA2G), como satelitales (SA2G).

Mi interés por este tema surge de la confluencia de dos grandes ámbitos de especial atractivo: la aviación y la tecnología. Desde siempre, el mundo aeronáutico me ha resultado fascinante, y como ingeniera de telecomunicaciones, me atrae especialmente explorar cómo los avances tecnológicos pueden transformar sectores estratégicos como este. Así, la convergencia entre las telecomunicaciones y la aviación representa para mí un campo de enorme potencial, y este trabajo es fruto de ese entusiasmo por aplicar conocimientos técnicos en un entorno que considero clave en la innovación tecnológica.

Además, en la última década, el mundo de las telecomunicaciones ha avanzado a un ritmo vertiginoso; las conexiones móviles son cada vez más rápidas, más seguras y están disponibles en casi cualquier lugar del planeta. En este contexto, la tecnología 5G surge como una oportunidad para revolucionar las comunicaciones del sector de la aviación, ofreciendo un escenario ideal para modernizar los sistemas actuales y responder a las crecientes demandas de pasajeros y operadores. Así, en este proyecto se busca demostrar cómo la adopción del 5G puede revolucionar las comunicaciones en la industria aeronáutica, con el objetivo de superar las limitaciones existentes y contribuir a la mejora de la conectividad aérea.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

A lo largo de este proyecto se ha hecho uso de varias tecnologías, protocolos y herramientas, que se presentan a continuación:

Herramientas utilizadas

- **Radio Mobile Online:** es una herramienta de simulación basada en modelos de propagación de radiofrecuencia, utilizada para analizar la cobertura y rendimiento de redes inalámbricas en diferentes entornos geográficos.
Esta herramienta se basa en el modelo Longley-Rice (o modelo de Irregular Terrain Model, ITM), que permite calcular la propagación de señales en condiciones reales teniendo en cuenta la topografía, la altura de las antenas y las características del terreno.
En el contexto de este proyecto, Radio Mobile Online se ha utilizado como herramienta de para poder simular la aplicación del 5G en los distintos tipos de comunicaciones según la fase del vuelo.
- **MATLAB:** entorno de programación técnica empleado para la modelización y simulación de enlaces satelitales (SA2G). Se ha utilizado para llevar a cabo los cálculos detallados de los parámetros del enlace, incluyendo pérdidas por espacio libre (FSPL), relación señal-ruido (SNR), ganancia de antenas, latencia, capacidad teórica del canal y margen de enlace, tanto en enlaces uplink como downlink con satélites de órbita baja (LEO), en bandas Ka y S.
- **Satellite Map Space (Live Starlink & OneWeb Satellite Map):** plataforma interactiva utilizada para la visualización en tiempo real de las constelaciones satelitales LEO, específicamente Starlink y OneWeb. Esta herramienta ha permitido analizar la disposición orbital de los satélites, su cobertura geográfica y la densidad de nodos en diferentes regiones del planeta.

Protocolos utilizados

En el contexto de las comunicaciones aeronáuticas, existen distintos protocolos que se utilizan en el proyecto y que se explicarán más adelante con mayor detalle, principalmente los siguientes:

- **DA2G:** Sistema de comunicación que permite conectar directamente aeronaves con estaciones base terrestres mediante tecnologías celulares como LTE, proporcionando conectividad de alta velocidad en vuelo a través de redes terrestres (Lin, Furuskär, Liberg, & Euler, 2020).

- SA2G: Sistema de comunicación que establece enlaces de datos bidireccionales entre aeronaves y estaciones terrestres a través de satélites. Estos sistemas son fundamentales para la integración de redes espaciales, aéreas y terrestres, conocidas como Space–Air–Ground Integrated Networks (SAGIN).
- ACARS: Sistema digital de enlace de datos que permite la transmisión de mensajes cortos entre aeronaves y estaciones terrestres a través de radio en banda aérea o satélite (Wyatt & Tooley, 2011a).
- Time Alignment Offset (TAO): protocolo de sincronización adaptado para redes 5G en entornos de larga distancia como los enlaces satelitales. Es una extensión del mecanismo estándar de Timing Advance empleado en redes terrestres, que permite ajustar el momento de transmisión de cada dispositivo en función de su posición (calculada mediante GNSS) y las características del enlace satelital.
- ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast): sistema que permite que la aeronave emita periódicamente su posición y otros datos clave que pueden ser recibidos por estaciones en tierra o por satélites, facilitando la integración en redes SAGIN (Space-Air-Ground Integrated Networks).
- AMHS (Aeronautical Message Handling System): protocolo de red utilizado para el intercambio de mensajes aeronáuticos no críticos, como planes de vuelo o NOTAM, entre centros de control y aerolíneas. Sustituye al anterior sistema AFTN (Aeronautical Fixed Telecommunication Network).

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

En los últimos años, se han acelerado rápidamente los avances en las comunicaciones móviles. Mientras que el 1G solo transmitía voz, las generaciones más recientes ya permiten transportar contenido multimedia sofisticado, haciendo posible el despliegue de nuevos productos y servicios. En este contexto, con la llegada del 5G, aparece una nueva tecnología que ofrece la posibilidad de crear conexiones ultra fiables y de baja latencia, con muy alta velocidad y capacidad.

El impacto transversal del 5G, está reflejado en diversos estudios publicados en los últimos años y sus beneficios ya son visibles en múltiples industrias. Dentro de este marco de transformación tecnológica, uno de los ámbitos con un gran potencial de mejora es el de las comunicaciones en el sector aeronáutico. Así, el 5G proporciona la oportunidad de revolucionar las comunicaciones a través del desarrollo de enlaces tierra-aire de baja latencia, más robustos, con un mayor ancho de banda y mejor conectividad a bordo (Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública, n.d.).

Existen autores que ya han abordado de forma teórica la posibilidad de implementar redes 5G en áreas específicas de las comunicaciones de la industria aeronáutica. Por ejemplo, Lin et al. (2020) analizan la viabilidad del 5G en sistemas Air-to-Ground, proponiendo una arquitectura híbrida terrestre-satelital. Bilen et al. (2022), por su parte, exploran el uso de redes DA2G basadas en 5G para mejorar la conectividad de pasajeros en vuelo, mientras que Dinc et al. (2017) se centran en los desafíos técnicos como la latencia o el efecto Doppler en comunicaciones de alta velocidad. Estos trabajos reflejan el creciente interés por parte de la comunidad científica y tecnológica en adaptar el 5G a los requerimientos específicos de la aviación comercial.

En esta línea; este proyecto se justifica con el objetivo de evaluar de forma integral la viabilidad de implementar comunicaciones 5G en la aviación, estudiando desde una perspectiva no solo teórica sino también práctica mediante la simulación, cómo la implementación del 5G puede superar las limitaciones actuales de conectividad y mejorar las comunicaciones existentes.

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

Este proyecto se justifica por la necesidad creciente de mejorar la conectividad y eficiencia en las comunicaciones aeronáuticas, un ámbito donde las limitaciones tecnológicas actuales aún representan un obstáculo importante para la digitalización completa del sector. A pesar de los avances logrados con tecnologías como LTE en los sistemas DA2G o con satélites GEO en las comunicaciones SA2G, persisten desafíos significativos relacionados con la cobertura, la latencia, la fiabilidad del enlace y la interoperabilidad global.

En este contexto, la tecnología 5G emerge como una solución prometedora que aún no ha sido completamente explorada ni aprovechada en el entorno aeronáutico. Su capacidad para ofrecer comunicaciones de baja latencia, alta velocidad y gran densidad de dispositivos conectados habilita un conjunto de nuevas aplicaciones, tanto para la experiencia del pasajero como para la operativa de vuelo y el mantenimiento predictivo. Sin embargo, hasta la fecha, la mayoría de los estudios se han centrado en enfoques teóricos o aplicaciones limitadas, sin un análisis práctico e integral que abarque escenarios de implementación.

Este proyecto pretende cubrir ese vacío, combinando un análisis técnico detallado de la viabilidad del 5G en diferentes configuraciones de vuelo (DA2G y SA2G), con simulaciones que permitan cuantificar su impacto potencial. Asimismo, responde a una necesidad estratégica del mercado: las aerolíneas, fabricantes de aeronaves y proveedores de servicios de conectividad buscan activamente soluciones que reduzcan costes operativos, mejoren la experiencia del usuario y se alineen con la evolución hacia un espacio aéreo más inteligente y digitalizado.

Por tanto, este trabajo no solo contribuye al conocimiento técnico, sino que también plantea una propuesta de valor clara para los actores de la industria: demostrar, con fundamentos y datos, que la integración de redes 5G en la aviación es viable, eficaz y estratégica para afrontar los retos de conectividad del presente y del futuro.

4.2 OBJETIVOS

A continuación, se detallan los objetivos del proyecto, que se clasifican en objetivos principales y objetivos secundarios.

Objetivos Principales:

Evaluación de la viabilidad de la implementación de redes 5G en la industria de la aviación, considerando sus implicaciones técnicas, operativas y regulatorias, así como su potencial para transformar los sistemas de comunicación aeronáuticos en escenarios reales.

Objetivos secundarios:

- Revisión de los fundamentos técnicos y operativos de la tecnología 5G, incluyendo aspectos como la arquitectura de red, servicios habilitados (eMBB, URLLC, mMTC), uso del espectro y tecnologías asociadas (beamforming, network slicing, massive MIMO).
- Descripción y análisis de los sistemas de comunicación actuales utilizados en el sector aeronáutico, con especial atención a su evolución, tipología de enlaces (DA2G, SA2G, ACARS, ADS-B) y principales limitaciones técnicas.
- Identificación de posibles soluciones de conectividad basadas en redes 5G, evaluando su integración con infraestructuras terrestres y satelitales para garantizar conectividad global y continua en operaciones aéreas, incluyendo entornos transoceánicos.
- Elaboración de escenarios prácticos de implementación mediante simulaciones técnicas, aplicando herramientas como Radio Mobile Online, MATLAB y Satellite Map Space, para medir métricas clave (cobertura, throughput, latencia y margen de enlace) y compararlas con las tecnologías actualmente disponibles.

4.3 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos definidos en este proyecto, se ha seguido una metodología estructurada en distintas fases, que combinan el estudio teórico con la experimentación práctica mediante simulaciones. El enfoque adoptado se detalla a continuación:

- 1. Revisión bibliográfica y análisis del estado del arte:** en una primera etapa, se realizó una investigación exhaustiva de fuentes científicas, técnicas y normativas, con el fin de comprender el contexto actual de las comunicaciones aeronáuticas y las posibilidades que ofrece la tecnología 5G. Esta revisión permitió identificar los protocolos existentes, las limitaciones tecnológicas actuales, y las iniciativas más relevantes en el ámbito de la conectividad aérea.
- 2. Desarrollo del marco teórico:** la fase teórica del proyecto se centró en establecer una base conceptual para comprender tanto el contexto de las comunicaciones aeronáuticas como las capacidades técnicas de las redes 5G. Se identificaron las limitaciones actuales de estas comunicaciones y se desarrolló un estudio técnico de los principios de funcionamiento del 5G, incluyendo su arquitectura, servicios, y espectro.
- 3. Identificación de oportunidades de implementación:** con base en el análisis previo, se definieron los posibles escenarios donde la tecnología 5G podría aplicarse para superar limitaciones actuales en términos de cobertura, latencia y capacidad. Se plantearon dos

líneas principales de trabajo: el uso de 5G en comunicaciones DA2G (enlace directo tierra-aire) y su aplicación en redes SA2G mediante enlaces satelitales LEO.

- 4. Simulación de escenarios prácticos:** para validar la viabilidad técnica de estas soluciones, se llevaron a cabo simulaciones con herramientas como Radio Mobile Online para modelar enlaces DA2G en distintas fases del vuelo, y MATLAB junto con plataformas de visualización satelital como Satellite Map Space para analizar las capacidades de los enlaces SA2G sobre constelaciones LEO. En estas simulaciones se calcularon parámetros clave como cobertura, pérdida de señal, relación señal-ruido, capacidad del canal y latencia.
- 5. Análisis de resultados y validación de hipótesis:** finalmente, se interpretaron los datos obtenidos en las simulaciones, comparándolos con los estándares y limitaciones actuales de la industria. Esto permitió validar la hipótesis inicial del proyecto: que la implementación de redes 5G puede representar una mejora sustancial en la eficiencia, fiabilidad y escalabilidad de las comunicaciones aeronáuticas.

4.4 PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN ECONÓMICA

Para estimar el coste del presente Trabajo Fin de Máster, se han identificado las principales actividades desarrolladas durante el proyecto, en coherencia con los objetivos definidos y la metodología aplicada.

Cada actividad ha sido valorada en términos de dedicación estimada (en horas) y coste asociado, utilizando como referencia una tarifa de 30 €/hora correspondiente a trabajo técnico especializado.

El proyecto se ha desarrollado entre noviembre de 2024 y el 15 de mayo de 2025, acumulando un total de 300 horas de trabajo distribuidas a lo largo de seis meses y medio. La planificación ha seguido un enfoque cronológico, comenzando por tareas de investigación y revisión bibliográfica, seguidas por el desarrollo del marco teórico, la identificación de escenarios de aplicación del 5G, las simulaciones técnicas (DA2G y SA2G), y el análisis de resultados. Paralelamente, se ha procedido con la redacción del documento, la coordinación con el tutor y en última instancia, la maquetación final.

Además del coste directo asociado a la mano de obra, se han considerado los siguientes elementos para una estimación económica global:

- Recursos materiales, como el uso de un ordenador personal y licencias de software, estimados proporcionalmente a su uso durante el proyecto.
- Gastos generales, que representan un 15% sobre el coste directo acumulado.
- Beneficio industrial, valorado en un 6% sobre el conjunto de costes directos e indirectos.
- Material fungible, que contempla la impresión y encuadernación del documento final.

El presupuesto total estimado asciende a 13.357,76 €, incluyendo el IVA aplicable del 21%. Esta cifra refleja una valoración realista del esfuerzo técnico, recursos empleados y costes asociados a la ejecución completa del TFM.

Esta información se recoge en las siguientes tablas de presupuestación:

Actividad	Inicio	Fin	Duración (días)	Horas
Revisión bibliográfica y análisis del estado del arte	01/11/2024	31/12/2024	61	65
Desarrollo del marco teórico	01/12/2024	31/01/2025	62	40
Identificación y definición de escenarios de aplicación del 5G	01/01/2025	28/02/2025	59	30
Simulaciones DA2G con Radio Mobile Online	01/02/2025	31/03/2025	59	55
Simulaciones SA2G con MATLAB y plataformas satelitales	01/03/2025	30/04/2025	61	55
Análisis de resultados y validación técnica	01/04/2025	24/04/2025	24	25
Redacción final del documento y maquetación	25/04/2025	07/05/2025	13	20
Coordinación con tutores y revisión iterativa	01/11/2024	15/05/2025	196	10
Total			196	300

Ilustración 6. Planificación temporal actividades del proyecto

Concepto	Coste (€)
Coste de mano de obra	9.000,00 €
Recursos materiales	525,00 €
Gastos generales (15%)	9.525,00 €
Beneficio industrial (6%)	1.428,75 €
Material fungible	85,73 €
Subtotal sin IVA	11.039,48 €
IVA (21%)	2.318,29 €
TOTAL PRESUPUESTO	13.357,76 €

Ilustración 7. Estimación económica del proyecto

Parte I ESTUDIO TEÓRICO

Capítulo 1. REDES DE TELECOMUNICACIONES EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA: EVOLUCIÓN, CLASIFICACIÓN Y LIMITACIONES EXISTENTES

1.1 EVOLUCIÓN DE LAS COMUNICACIONES EN LA AVIACIÓN

En la industria de la aviación, las telecomunicaciones son un elemento crítico para garantizar la seguridad y la eficiencia de las operaciones. Su aplicación en este ámbito es muy amplia, abarcando desde la interacción entre la tripulación y los controladores en tierra, hasta las comunicaciones internas entre la tripulación y los pasajeros. En este primer apartado, se aborda la evolución de las telecomunicaciones aplicadas a la industria de la aviación con el objetivo de entender su aplicación, importancia y relevancia.

En cuanto a su evolución temporal, los primeros sistemas de instalados en aviones datan de la Primera Guerra Mundial, cuando se utilizaban transmisores de chispa y sistemas de baja frecuencia (LF, 30-300 KHz), posteriormente durante los años treinta, estos sistemas comenzaron a ser reemplazados por enlaces radiotelefónicos, que operaban en las bandas LF y HF (3-30 MHz), y que enviaban mensajes encriptados utilizando el código Morse. Sin embargo, estos sistemas eran limitados en cuanto a la cantidad de canales disponibles, lo que se convertiría en un desafío con el aumento del tráfico aéreo después de la Segunda Guerra Mundial (Llanos Yáñez, 1999).

En 1935 con la creación y desarrollo del radar, se produce un gran impulso en las comunicaciones aeronáuticas, pues este sistema no solo permitía el rastreo de las aeronaves, si no también disponer de variables como su velocidad, la distancia o la dirección en la que volaban. A partir de entonces, las bandas LF, MF (300-3000 KHz) y HF comenzaron a ser reemplazadas por sistemas en bandas de muy alta frecuencia (VHF), que permitía mejorar la capacidad de las comunicaciones fundamentalmente para distancias cortas (IBERIA, 2023; US Department of Transportation, 2008).

Más adelante en los años 70, la introducción de los ordenadores en los aviones permitió avances significativos en las comunicaciones aeronáuticas. En 1978, se desarrolló el Aircraft Communications Addressing and Reporting System (ACARS), un sistema digital de comunicaciones que utiliza bandas VHF, HF y satélites para el envío y recepción de mensajes automatizados entre aeronaves y estaciones terrestres sin necesidad de intervención humana. Este sistema revolucionó la forma en que se transmiten datos críticos, pudiendo enviar datos en tiempo real sobre el desempeño de la aeronave, generar informes de mantenimiento y actualizaciones operativas (Hernandez Carmona & López Monjaras, 2012).

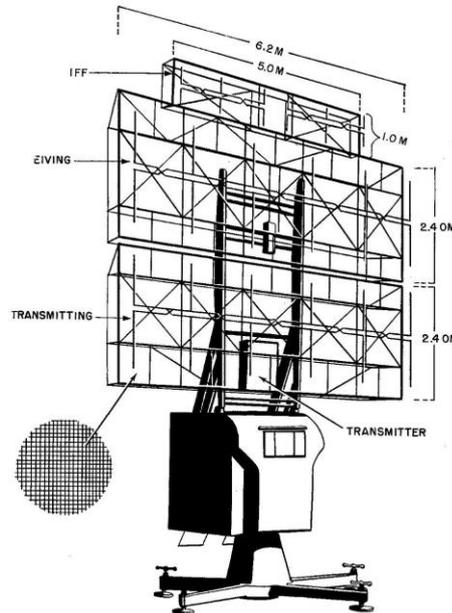


Ilustración 8. Radar Freya usado durante la SGM. Fuente: (Wikipedia, n.d.)

Por lo tanto, con la implementación del ACARS y otros sistemas digitales en los años 70, las comunicaciones aeronáuticas se organizaron de manera más estructurada según el tipo de servicio y el alcance requerido. Para comunicaciones aire-tierra de corto y medio alcance, las bandas VHF (118-137 MHz) se consolidaron como estándar, en paralelo, las comunicaciones HF (3-30 MHz) se reservaron para vuelos de larga distancia, especialmente en rutas transoceánicas, aprovechando su capacidad de propagación. Adicionalmente, la incorporación de sistemas SATCOM (comunicaciones vía satélite) a partir de la década de 1980 amplió significativamente las capacidades de comunicación global, utilizando bandas L (1.5-1.6 GHz) y, más recientemente, bandas Ka (26.5-40 GHz) para comunicaciones de alta velocidad.

Posteriormente, en 1983, la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) formó el Comité Future Air Navigation System (FANS), con el objetivo de definir el sistema de navegación aérea del futuro. En su informe de 1988, se establecieron los principios y estándares para integrar las comunicaciones, la navegación y la vigilancia (CNS) para la gestión del tráfico aéreo (ATM). Este sistema incluye tanto el monitoreo automático de aeronaves mediante sistemas satelitales y enlaces de datos, como sistemas para garantizar la comunicación directa y eficiente entre pilotos y controladores aéreos. El entorno CNS/ATM ha transformado la navegación aérea, al permitir niveles de precisión y eficiencia sin precedentes, incluyendo tecnologías, elementos humanos (pilotos y controladores) y nuevos procedimientos operativos avanzados (Barco & Suárez, 2018).

Ya en la década de 2000, el 3G mejoró la transmisión de datos móviles, influyendo en los estándares de conectividad aérea, especialmente en tierra y aeropuertos. Posteriormente, el 4G LTE permitió velocidades más rápidas y menor latencia, haciendo posible el Wi-Fi a bordo y comunicaciones más robustas entre aeronaves y estaciones terrestres. Esto dio lugar a las comunicaciones DA2G (Direct Air-to-Ground), que surgieron a finales de los 2000 para conectar aeronaves a redes LTE terrestres, ofreciendo Wi-Fi en vuelo y transmisión de datos operativos. Por su parte, las comunicaciones SA2G (Satellite Air-to-Ground) aparecieron en la década de 2010, utilizando satélites GEO y LEO para ofrecer conectividad global, lo que habilitó la posibilidad de ofrecer entretenimiento en vuelo y el envío de datos críticos.

Finalmente, hoy en día, la navegación aérea moderna depende en gran medida de las tecnologías electrónicas para la comunicación y la navegación (esto se conoce como aviónica ¹) y aunque los sistemas actuales ofrecen una conectividad robusta, los expertos proyectan un avance hacia un modelo donde las redes de satélites, radiofrecuencias y enlaces de datos se integren plenamente para optimizar las operaciones.

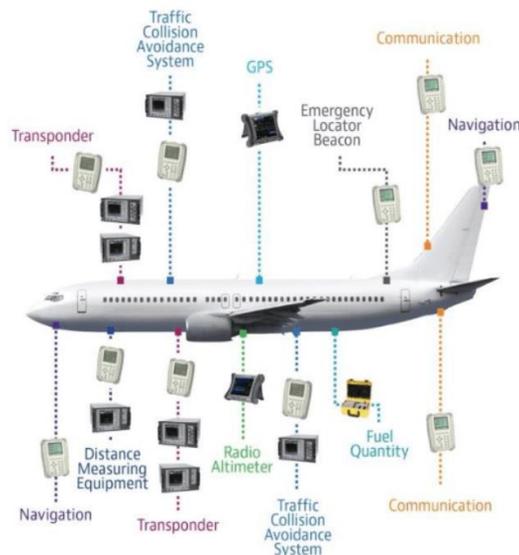


Ilustración 9. Sistemas electrónicos presentes en un avión. Fuente: (Tecnous, 2020)

En este contexto, la tecnología 5G promete revolucionar la industria aeronáutica al proporcionar velocidades de transmisión ultrarrápidas, baja latencia y la capacidad de gestionar millones de dispositivos conectados simultáneamente. Así, tal y como muchos

¹ Aviónica: es la aplicación de la electrónica a la aviación o a los sistemas de las aeronaves, es decir, todos aquellos sistemas electrónicos, tanto en sistemas de comunicación como indicadores y sus elementos de manejo. La aviónica surgió en los años 70, de la necesidad de mejorar la aviación militar y posteriormente se extendió a la aviación comercial (Tecnous, 2020).

autores afirman, el 5G se posiciona como uno de los catalizadores para continuar avanzando en comunicaciones eficientes, veloces y seguras en la aviación (Hispanaviación, 2017).

1.2 TIPOS DE COMUNICACIONES EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA

A pesar de que existen distintos tipos de clasificaciones, podemos agrupar estas comunicaciones en dos categorías según la ubicación física de los puntos emisores y receptores de la información. Son las siguientes:

Servicio Fijo Aeronáutico (AFS)

El servicio fijo aeronáutico se refiere a las comunicaciones tierra-tierra, utilizadas principalmente para intercambiar información previa al vuelo, como los NOTAM², planes de vuelo o datos meteorológicos. Estos datos se distribuyen a través de redes especializadas como AFTN (Red de Telecomunicaciones Fijas Aeronáuticas) y AMHS (Sistema de Gestión de Mensajes Aeronáuticos). Estas redes permiten que la información esté disponible de forma rápida y accesible en puntos críticos como aeropuertos, aerolíneas y centros de control (ETSIAE (Universidad Politécnica de Madrid), 2018; Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO), 2011).

Servicio Móvil Aeronáutico

El servicio móvil aeronáutico incluye las comunicaciones tradicionales en VHF (Very High Frequency) y HF (High Frequency), que permiten la transmisión directa de voz entre pilotos y controladores de tráfico aéreo. Por otro lado, este servicio también incluye las comunicaciones que permiten la transmisión de datos en tiempo real durante el vuelo, a través de las comunicaciones A2G (Air to Ground Communications) que pueden ser de dos tipos, directas (DA2G) o satelitales (SA2G). En la siguiente ilustración se muestra un esquema de una red híbrida de telecomunicaciones que combina los sistemas terrestres y satelitales.

² NOTAM (Notice to Airmen): boletines emitidos por las diferentes autoridades aeronáuticas para informar a los pilotos de los posibles cambios o restricciones en los aeropuertos, de los procedimientos o de eventos a lo largo de una ruta (One Air, n.d.).

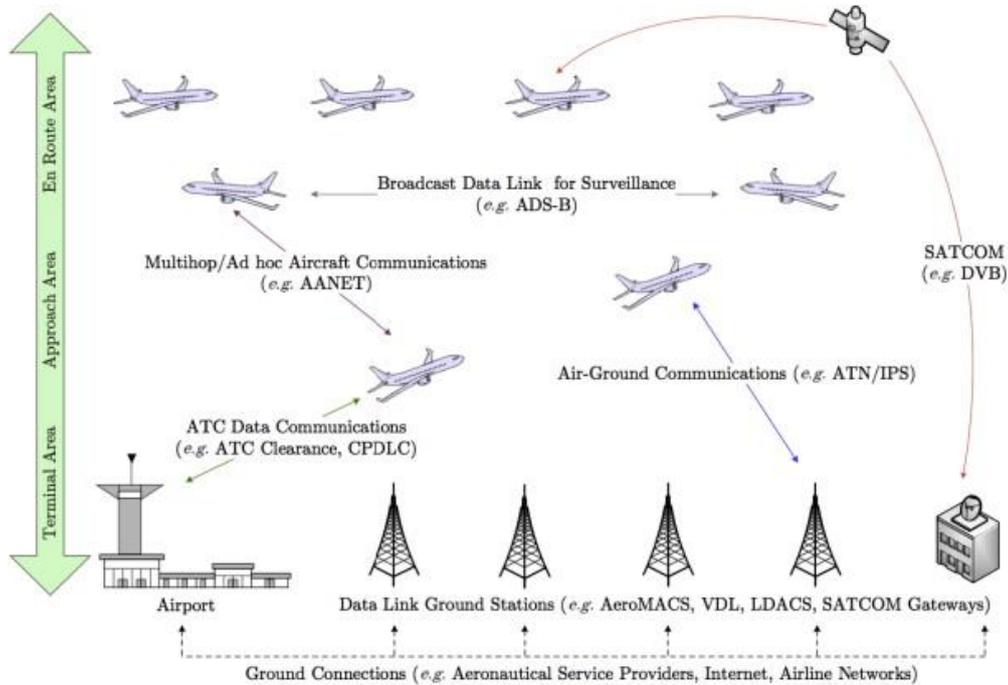


Ilustración 10. Topología de las comunicaciones aeronáuticas. Fuente: (Mahmoud et al., 2014)

En este trabajo nos centraremos en el caso de las comunicaciones A2G que son aquellas que permiten la transmisión de datos y comunicaciones entre las aeronaves y estaciones terrestres. A continuación, las analizaremos más en detalle y estudiaremos cuáles son las limitaciones que presentan actualmente estos sistemas.

1.3 COMUNICACIONES A2G: DEFINICIÓN Y LIMITACIONES

INTRODUCCIÓN A LAS COMUNICACIONES A2G

Las comunicaciones aire-tierra (A2G, por sus siglas en inglés) son enlaces de comunicación que conectan aeronaves en vuelo con estaciones terrestres. Estas comunicaciones son fundamentales para garantizar la seguridad, eficiencia y continuidad de las operaciones aéreas, permitiendo la transmisión de información crítica entre el avión y los sistemas de control en tierra.

Históricamente, las comunicaciones A2G comenzaron con sistemas de telegrafía inalámbrica a principios del siglo XX. Durante la Primera Guerra Mundial, se realizaron las primeras transmisiones de voz entre aeronaves y estaciones terrestres, marcando un hito en la aviación. Con el tiempo, estas comunicaciones evolucionaron hacia sistemas más avanzados, incorporando tecnologías digitales y enlaces de datos que mejoraron la capacidad y fiabilidad de las comunicaciones.

En la actualidad, las comunicaciones A2G utilizan diversas tecnologías, incluyendo VHF, HF, enlaces satelitales y, más recientemente, redes celulares como LTE. Estas tecnologías permiten una amplia gama de aplicaciones, desde la gestión del tráfico aéreo (ATM) hasta servicios de conectividad para pasajeros (Nokia, 2024; Wyatt & Tooley, 2011b).

Además, las comunicaciones A2G son esenciales para sistemas modernos como el Sistema de Vigilancia Dependiente Automática Radiodifusión (ADS-B), que mejora la vigilancia y seguimiento de aeronaves en tiempo real. También se utilizan en la transmisión de datos meteorológicos, información de mantenimiento y otros servicios operacionales críticos (Federal Aviation Administration, 2010).

No obstante, las comunicaciones A2G actuales, presentan aún importantes limitaciones en cuanto a cobertura, latencia, fiabilidad y capacidad de integración global. En este contexto, la tecnología 5G se perfila como una solución prometedora, y a nivel mundial, empresas como Safran y SKYFive ya están avanzando en esta línea, desarrollando e impulsando soluciones de conectividad 5G aire-tierra específicamente diseñadas para el sector aeronáutico.

Siguiendo con el objetivo principal de este proyecto, que es analizar la viabilidad de implementación del 5G en estas redes de comunicación, a continuación se analizarán en detalle las limitaciones actuales existentes en las comunicaciones A2G, que justifican la necesidad de explorar esta nueva tecnología (Actualidad Aeroespacial, 2022).

LIMITACIONES DE LAS REDES A2G

Diversos estudios y el desempeño práctico de las comunicaciones A2G han evidenciado tres de las principales limitaciones que afectan a estos sistemas, las cuales generan algunos inconvenientes en la operatividad aeronáutica. Las principales limitaciones identificadas son:

- Limitación de cobertura
- Limitación por las altas velocidades de los aviones
- Latencia
- Limitación de regulación y necesidad de un marco común

Limitación de cobertura

Esto es un factor que afecta principalmente a las comunicaciones DA2G. Estas, están basadas en tecnología celular (LTE) y emplean estaciones terrestres con antenas orientadas hacia el cielo para establecer enlaces con las aeronaves en vuelo. En general, esto les permite ofrecer menores latencias y mayor capacidad en comparación con los enlaces satelitales, sin embargo; su principal limitación en relación con la cobertura radica en la distancia que hay

entre estaciones base o ISD (Inter-Site Distance), que es significativamente mayor que en las redes celulares terrestres.

Como consecuencia de esto, la cobertura se ve restringida a regiones con suficientes estaciones bases y no es viable para vuelos intercontinentales o rutas sobre océanos y zonas remotas (Dinc et al., 2017; PXCCom, 2024).

Limitación por las altas velocidades de los aviones

Las aeronaves comerciales, al volar a velocidades entre 900 y 1000 km/h, enfrentan importantes desafíos técnicos en la comunicación inalámbrica, tanto en redes A2G directas como satelitales.

Uno de los principales problemas en redes DA2G es la frecuencia de handover entre estaciones base, ya que para una aeronave que se desplaza a esa velocidad, la transición entre estaciones terrestres debe ocurrir cada pocos segundos. Cualquier retraso en este proceso provoca interrupciones momentáneas en la conectividad, contribuyendo a la degradación de la calidad del servicio (Bilen et al., 2022).

Otro reto clave es el efecto Doppler, que provoca desplazamientos en la frecuencia de la señal debido al movimiento de las aeronaves. En sistemas de comunicación basados en OFDM, este desplazamiento puede alterar la ubicación de las subportadoras, causando pérdida de paquetes y errores en la recepción, especialmente en redes que operan en frecuencias altas, como mmWave (Lin et al., 2021).

Latencia

La latencia es una de las limitaciones fundamentales de las comunicaciones SA2G, especialmente aquellas que utilizan satélites GEO, debido a la larga distancia que tienen que recorrer las señales lo que hace que aumente el tiempo de propagación. Tal y como han demostrado algunos estudios y autores, la latencia en estas conexiones puede superar los 250 ms, lo cual influye directamente en la calidad de los servicios que utilizan estas comunicaciones.

Limitaciones regulatorias y de seguridad

Otra de las limitaciones actuales de las comunicaciones A2G (Air-to-Ground) se debe a las barreras regulatorias y la falta de armonización del espacio radioeléctrico entre distintos países. Esto significa que las bandas de frecuencia asignadas para estas comunicaciones varían según la región, dificultando la interoperabilidad de los sistemas a nivel global.

- En la Unión Europea, las comunicaciones A2G se han asignado a las bandas de 5855-5875 MHz y 1900-1920 MHz.
- En Estados Unidos, las comunicaciones A2G (como la red Gogo Biz) utilizan las bandas 849-851 MHz y 894-896 MHz.

- En China, las pruebas de comunicaciones A2G se han realizado en la banda de 1785-1805 MHz.

Esta disparidad en las frecuencias asignadas genera problemas para las aerolíneas que operan a nivel internacional, ya que deben equipar sus aeronaves con sistemas capaces de adaptarse a las diferentes bandas de frecuencia según la región (EASA, 2019; Observatorio Nacional 5G, 2020).

Por otro lado, también cabe destacar las limitaciones derivadas de restricciones de seguridad. Organismos como la FAA³ en EE.UU y la EASA⁴ en Europa establecen normas estrictas sobre el uso de telecomunicaciones en aeronaves para evitar interferencias con otros sistemas; con radares, sistemas de control de tráfico aéreo o altímetros de radio. Estas regulaciones incluyen restricciones en el uso de frecuencias específicas tanto en aeropuertos como durante las fases críticas del vuelo (despegue y aterrizaje) y requerimientos como la certificación de los equipos de comunicación en aeronaves.

Además, en el caso específico de las redes A2G, también existen limitaciones significativas en materia de ciberseguridad. Al tratarse de sistemas basados en tecnologías inalámbricas, como LTE y comunicaciones satelitales, estas redes son vulnerables a posibles interferencias, accesos no autorizados y ataques cibernéticos. Las aeronaves conectadas a redes A2G pueden ser objeto de ataques de interferencia deliberada (jamming) o suplantación de señal (spoofing), afectando la calidad y seguridad de las comunicaciones.

Asimismo, el uso de múltiples bandas de frecuencia en distintas regiones aumenta el riesgo de configuraciones incorrectas, mientras que la transmisión de datos sensibles requiere mecanismos avanzados de cifrado y autenticación para proteger la privacidad y la integridad de la información transmitida (Aviación21, 2023; Ejército del Aire, 2024; ITU, 2013).

³ FAA: Administración Federal de Aviación es la agencia de los Estados Unidos, es el organismo responsable de la regulación, supervisión y certificación de todos los aspectos de la aviación civil en el país (Aviación21, 2023).

⁴ EASA: Agencia Europea de Seguridad Aérea, es el organismo encargado de asegurar la seguridad en la aviación civil dentro de la Unión Europea (EASA, 2019).

Capítulo 2. REDES 5G: FUNDAMENTOS TÉCNICOS Y APLICACIONES EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA

En este capítulo se analiza la tecnología 5G, abordando tanto sus fundamentos técnicos como su aplicabilidad específica en el entorno aeronáutico. Se describen sus principales características, la evolución de los servicios que habilita, el uso del espectro y las tecnologías asociadas. Finalmente, se exploran las líneas de aplicación concretas del 5G en las comunicaciones aire-tierra, destacando su potencial para transformar las operaciones y servicios en la aviación.

2.1 INTRODUCCIÓN A LAS REDES 5G: TIPOS DE SERVICIOS DE COMUNICACIONES

Las discusiones sobre la comunicación móvil de quinta generación (5G) comenzaron alrededor de 2012. Muchos autores, utilizan el término 5G para referirse a una nueva tecnología de acceso por radio específica. Sin embargo, tal y como Dahlman explica, el 5G también se emplea en un contexto mucho más amplio, no solo refiriéndose a una tecnología concreta sino también a una amplia gama de nuevos servicios utilizados en comunicaciones móviles actuales (Dahlman, Parkvall, y Sköld, 2018).

Cabe mencionar que la tecnología NR (New Era) es la nueva generación de tecnologías 5G desarrolladas por el 3GPP. Se trata de una evolución tecnológica que define la manera en la que se transmiten los datos en la red y permite mejorar aspectos como la velocidad, la latencia y la eficiencia espectral. A menudo se menciona la tecnología 5G NR como simplemente 5G, sin embargo, tal y como se ha comentado, representa una verdadera transición con respecto a las redes 5G desarrolladas inicialmente y que estaban basadas en LTE. Así, y en lo que respecta este trabajo, cuando se habla de 5G nos centraremos en las oportunidades y soluciones que ofrece en este estándar de 5G NR.

Así, en este contexto del 5G, a menudo se distinguen de tres tipos de servicios de comunicaciones:

ENHANCED MOBILE BROADBAND (EMBB)

Banda ancha móvil mejorada.

Este caso de uso corresponde a una evolución directa de los servicios móviles y de banda ancha actuales, permitiendo mayores volúmenes de datos y una experiencia de usuario mejorada. Específicamente, eMBB soporta tasas de transmisión mucho más altas para los usuarios finales, esenciales para aplicaciones como streaming en 4K y experiencias inmersivas como realidad aumentada y realidad virtual. Además, uno de los objetivos de

eMBB es la conectividad robusta en escenarios de alta densidad, donde la demanda de ancho de banda es extremadamente alta.

Estos servicios son posibles gracias a la aplicación de tecnologías avanzadas como el beamforming, la segmentación de la red o network slicing y el MIMO masivo, explicados con más detalle en el Anexo (Anexo, Parte II8.2) (Kirubakaran, 2025).

En el ámbito de la aviación, el eMBB puede encontrar su aplicación en los sistemas de conectividad en tiempo real, en conexiones de alta velocidad o en los sistemas de entretenimiento a bordo por ejemplo ofreciendo servicios de streaming y 4k.

MASSIVE MACHINE-TYPE COMMUNICATION (mMTC)

Comunicación masiva entre dispositivos.

Este tipo de comunicación está diseñado para conectar un gran número de dispositivos como sensores, actuadores y equipos de monitoreo en el Internet de las Cosas (IoT). Los dispositivos conectados en este entorno suelen ser de bajo costo y consumo energético extremadamente bajo, lo que permite una vida útil de batería prolongada, a menudo de varios años.

En el ámbito de la aviación, las comunicaciones mMTC podrían utilizarse en sensores que permitan el mantenimiento predictivo del estado de los componentes, recopilando y enviando datos que ayuden a prevenir fallos.

ULTRA-RELIABLE AND LOW-LATENCY COMMUNICATION (URLLC)

Comunicación ultra confiable y de baja latencia.

URLLC se enfoca en aplicaciones críticas que requieren latencias extremadamente bajas (del orden de 1 ms) y una fiabilidad cercana al 100 %. Este tipo de comunicación es crucial para sectores donde la prevención de accidentes depende de decisiones en tiempo real basadas en datos precisos.

Las características de latencia y fiabilidad hacen que este tipo de comunicaciones sean interesantes en la industria de la aviación, especialmente en sistemas de control del tráfico aéreo y en los sistemas de navegación y aterrizaje de las aeronaves.

En la siguiente ilustración se muestra la clasificación de los principales servicios que habilita la tecnología 5G agrupados en las categorías mencionadas. Se observa cómo las capacidades del 5G se traducen en aplicaciones concretas que permiten mejorar la conectividad y la optimización de procesos, contribuyendo así a la digitalización de muchos sectores incluido la aviación.

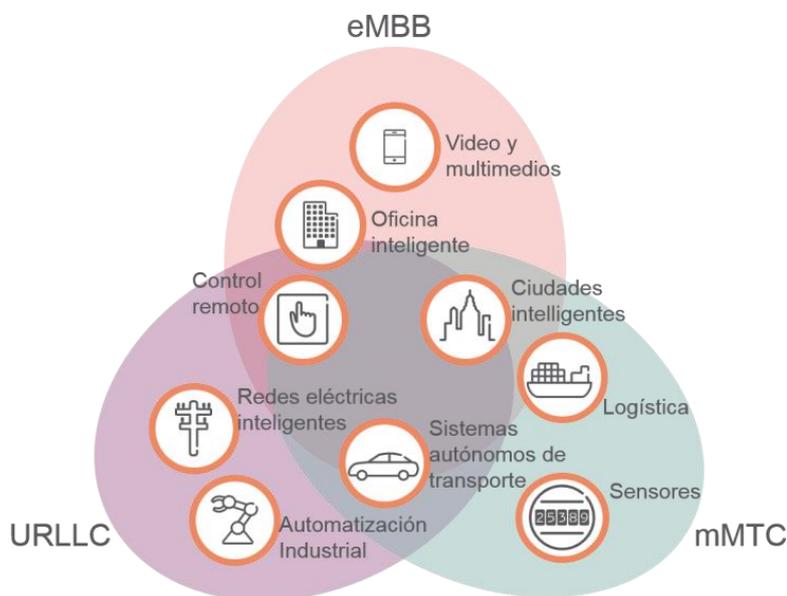


Ilustración 11. Nuevos casos de uso del 5G. Fuente:(IoT Futura, 2018)

2.2 ESPECTRO DE FRECUENCIAS EN 5G

El diseño de la tecnología 5G se centra en el uso eficiente y flexible del espectro electromagnético, abarcando una gama de frecuencias más amplia que en generaciones anteriores. Esto permite cumplir con los objetivos clave de 5G, como velocidades de datos ultrarrápidas, latencia ultra baja, y la capacidad de soportar una gran densidad de dispositivos conectados.

De esta forma; el espectro 5G está dividido en tres categorías principales, una primera Banda Baja (hasta 1GHz) que incluye ondas de tipo VHF⁵ y UHF⁶, una segunda Banda Media (hasta 6 GHz) incluyendo UHF y SHF⁷ y una última Banda Milimétrica que engloba comunicaciones a EHF⁸ tal y como se muestran en la siguiente figura.

Banda Baja	Banda Media	Banda Milimétrica
700 Mhz	3.5 Ghz	26 Mhz

Ilustración 12. Espectro de frecuencias del 5G

⁵ VHF: Very High Frequency

⁶ UHF:Ultra High Frequency

⁷ SHF: Super High Frequency

⁸ EHF: Extremelly High Frequency

Cada una de estas bandas está optimizada para diferentes casos de uso y escenarios que se explican a continuación (GSMA, 2019).

BANDAS BAJAS (POR DEBAJO DE 1 GHz)

Estas frecuencias se utilizan principalmente para garantizar cobertura en áreas extensas, ya que tienen excelente capacidad de penetración en edificios, lo que las hace ideales para servicios básicos de IoT y comunicaciones móviles en zonas de baja densidad. Un ejemplo de uso es la Banda de 700 MHz, frecuentemente utilizada en Europa para 5G (Telefónica S.A, n.d.-a).

El uso de 5G en banda baja (600 MHz - 1 GHz) en comunicaciones A2G (Air-to-Ground) ofrece una oportunidad para mejorar la cobertura de las aeronaves, especialmente en rutas sobre tierra y regiones rurales. Gracias a su capacidad de penetración y su amplio alcance, las estaciones base terrestres pueden proporcionar conectividad a las aeronaves incluso a grandes distancias, asegurando una conexión continua para servicios como monitoreo operativo, Wi-Fi para pasajeros y actualización de datos de vuelo.

BANDAS MEDIAS (1-6 GHz)

Las bandas medias, que abarcan frecuencias entre 1 y 6 GHz, ofrecen un equilibrio óptimo entre velocidad de transmisión y cobertura. Son esenciales para garantizar conectividad de alta capacidad en escenarios urbanos densos y áreas de alta demanda. En este rango, las frecuencias como la banda C (3.5 GHz) destacan por proporcionar suficiente capacidad para aplicaciones avanzadas como streaming en 4K, realidad aumentada y conexiones IoT avanzadas (Dahlman et al., 2018).

En el mundo aeronáutico, esta banda ya se utiliza para las siguientes comunicaciones (T-Mobile, 2020):

- 2.6 GHz: Implementada en redes privadas de 5G en aeropuertos, mejorando la eficiencia operativa mediante servicios como gestión de equipajes, monitoreo de vehículos y comunicaciones internas.
- 3.5 GHz (Banda C): Utilizada para conexiones de Internet en vuelo a través de tecnologías A2G (Air-to-Ground), permitiendo a los pasajeros acceder a servicios de conectividad de alta velocidad.
- 4.9 GHz: Asignada para redes de emergencia y seguridad en aeropuertos, garantizando comunicaciones críticas entre equipos de respuesta y control de seguridad.

BANDAS MILIMÉTRICAS (MMWAVE) (> 24 GHz)

Estas frecuencias son clave para velocidades extremadamente altas y baja latencia, pero tienen un alcance más limitado y dificultades para penetrar obstáculos. Su implementación

suele requerir densificación de estaciones base y tecnologías como beamforming⁹ (Lagunas Hernández, 2019).

La utilización de esta banda en el ámbito de la aviación continúa en fase de investigación y desarrollo, centrada en sistemas avanzados de radares y sensores y conexiones satelitales de alta capacidad.

Como hemos visto, el espectro de frecuencias en 5G está diseñado para ofrecer un equilibrio entre cobertura, capacidad y velocidad, adaptándose a las necesidades de diferentes aplicaciones. Las bandas bajas (hasta 1 GHz) proporcionan una cobertura amplia y confiable, lo que las convierte en una opción ideal para comunicaciones A2G en rutas terrestres y áreas rurales. Las bandas medias (1-6 GHz) ofrecen un compromiso entre velocidad y alcance, permitiendo conectividad de alta capacidad en entornos urbanos y aeropuertos. Por último, las bandas milimétricas (>24 GHz) proporcionan velocidades ultrarrápidas, aunque su aplicación en aviación aún se encuentra en desarrollo, especialmente para sistemas avanzados de radares y conectividad satelital de alta capacidad.

Este enfoque flexible del espectro permite que la tecnología 5G se adapte a diferentes casos de uso, desde comunicaciones A2G en vuelo hasta optimización operativa en aeropuertos, abriendo nuevas oportunidades para mejorar la conectividad y la eficiencia en la industria aeronáutica.

En la siguiente sección, se analizará cómo la tecnología 5G puede aplicarse de manera efectiva en las comunicaciones A2G, destacando de forma más detallada sus beneficios y las oportunidades que ofrece tanto en redes terrestres como satelitales.

2.3 IMPLEMENTACIÓN DE 5G EN REDES A2G: LÍNEAS DE APLICACIÓN Y MEJORA DE LAS COMUNICACIONES

La tecnología 5G ofrece una serie de mejoras significativas para las comunicaciones A2G, permitiendo superar las limitaciones de capacidad, latencia y cobertura que afectan a las soluciones actuales. Este apartado analiza cómo el 5G puede aplicarse tanto en redes terrestres DA2G, mediante estaciones terrestres optimizadas, como en sistemas satelitales SA2G, a través de constelaciones de satélites LEO. A continuación, se presentan las principales líneas de aplicabilidad y ventajas que ofrece el 5G en ambos contextos.

⁹ Beamforming: tecnología que permite dirigir señales inalámbricas de manera más eficiente, enfocándolas en una dirección específica en lugar de dispersarlas en todas direcciones (MATLAB & Simulink, n.d.).

INCORPORACIÓN DEL 5G EN LAS COMUNICACIONES DE TIPO DA2G

La implementación de redes 5G en sistemas DA2G busca mejorar la conectividad reduciendo las limitaciones de capacidad y cobertura presentes en las soluciones actuales. Las propuestas se fundamentan en el despliegue de estaciones terrestres con infraestructura 5G, optimizadas para enlaces DA2G, que operarían en bandas de frecuencia desde sub-7 GHz hasta ondas milimétricas (mmWave). Esto permitiría lo siguiente:

- **Mayor eficiencia espectral y mejora del throughput:** El uso de 5G permitirá operar en distintas bandas de frecuencia, lo que maximiza el uso del espectro disponible y reduce la congestión que existe en las redes LTE. Además, mientras que LTE en redes DA2G ofrece un máximo de 75 Mbps en downlink y 20 Mbps en uplink, 5G NR puede alcanzar velocidades de hasta 1 Gbps, gracias a su mejor aprovechamiento del espectro y el uso de técnicas avanzadas de modulación (*Throughput and Capacity Evaluation of 5G New Radio Non-Terrestrial Networks with LEO*, n.d.).
- **Mitigación del Efecto Doppler y mejora del handover:** 5G NR incluye algoritmos avanzados de compensación Doppler, que ajustan la frecuencia de transmisión y recepción en tiempo real, reduciendo los errores de transmisión y mejorando la estabilidad del enlace (*Leveraging LEO for Next-Generation In-Flight Connectivity / Avionics Digital Edition*, n.d.).
- **Uso de antenas avanzadas con beamforming y Massive MIMO:** Las estaciones base DA2G con 5G NR incorporan beamforming para dirigir la señal de manera eficiente hacia los aviones, reduciendo pérdidas de señal y mejorando la estabilidad de la conexión. Además, massive MIMO en redes A2G permite mejorar la relación señal-ruido en los casos en los que no tenemos visión directa, lo que optimiza la calidad de la transmisión y reduce la interferencia entre aeronaves que comparten la misma celda.

Actualmente, los despliegues de 5G en DA2G se centran en proveer Wi-Fi a los pasajeros, pero no en aplicaciones críticas de comunicaciones aeronáuticas. Esto significa que las aerolíneas y proveedores de telecomunicaciones están utilizando la infraestructura 5G para mejorar la conectividad en vuelo, pero aún no para la transmisión de datos operacionales en tiempo real ni para sistemas críticos de navegación o control.

De esta forma, a nivel práctico, la implementación de redes 5G supondría cambios tanto en la arquitectura de las redes, como en los sistemas de comunicación de las aeronaves.

Para poder implementar redes 5G en sistemas DA2G, sería necesario desplegar una infraestructura terrestre específica con estaciones base 5G orientadas hacia el cielo que operen en bandas desde sub-7 GHz hasta mmWave, que puedan garantizar cobertura continua a aeronaves en movimiento y con capacidad de gestionar handovers rápidos.

Al mismo tiempo, sería imprescindible adaptar las aeronaves mediante la instalación de antenas receptoras compatibles con 5G NR, diseñadas para trabajar en altas frecuencias y capaces de compensar los efectos del desplazamiento Doppler, además de integrar sistemas

de radio avanzados que puedan realizar cambios de celda sin cortes de conexión, permitiendo una conectividad fluida durante todo el trayecto.

Actualmente a nivel práctico, empresas como Ericsson han realizado ensayos de conectividad 5G crítica en vuelo para servicios de emergencia, y proyectos como HAPSMobile ya están explorando el uso de plataformas aéreas de gran altitud como estaciones base 5G.



Ilustración 13. Proyecto de HAPS Mobile (Wikipedia, 2018)

INCORPORACIÓN DEL 5G EN COMUNICACIONES SA2G:

El objetivo de esta propuesta es integrar la nueva generación de redes 5GNR a través de satélites de órbita baja que permitan complementar o reemplazar las soluciones actuales basadas en satélites GEO y MEO. Esto permitiría lo siguiente:

- **Reducción de la latencia:** Los satélites LEO operan a una distancia de 500-2000 Km por lo que, tal y como los principales estudios muestran, se podría reducir la latencia a 20-50 ms en comparación con los 600 ms actuales que introducen los satélites GEO.
- **Mayor capacidad y throughput:** La capacidad de transmisión de un satélite depende tanto del ancho de banda disponible como de la frecuencia en la que opera. A medida que se utilizan frecuencias más altas, como en la banda Ka, es posible transmitir más datos en menos tiempo, aumentando significativamente la velocidad y la capacidad de la red. Un satélite LEO en banda S (2-4 GHz) con 30 MHz de ancho de banda puede alcanzar velocidades de transmisión de hasta 600 Mbps, y operando en banda Ka (26-40 GHz) de hasta 700 Mbps. Estos resultados, superan en capacidad y velocidades de transmisión a las soluciones actuales basadas en LTE o satélites GEO (*Throughput and Capacity Evaluation of 5G New Radio Non-Terrestrial Networks with LEO*, n.d.).
- **Cobertura global sin interrupciones:** Las constelaciones LEO, al moverse continuamente en distintas órbitas, garantizan conectividad en tiempo real sobre

océanos, regiones polares y áreas sin infraestructura terrestre, lo que las hace una opción muy interesante en términos de cobertura global, estable y continua (Reed, 2023).

¿Qué cambios supondría esto? Para poder implementar 5G NR en redes satelitales LEO, habría que adaptar los estándares 5G NTN (Non Terrestrial Network). En primer lugar, habría que utilizar un mecanismo que permita solucionar la necesidad del Timing Advance, tal y como se detallará en la sección práctica de este trabajo, también se tendrían que adaptar los algoritmos de handover y compensación Doppler, así como diseñar nuevas antenas aeronáuticas capaces de ajustarse a cambios de satélite sin provocar pérdidas de señal.

Un ejemplo destacado de esta integración es la colaboración entre Eutelsat, Airbus y MediaTek, quienes realizaron con éxito la primera prueba mundial de una conexión 5G directa a través de satélites LEO de OneWeb. Durante la prueba, un terminal de usuario 5G se conectó al núcleo 5G mediante un enlace satelital, demostrando la viabilidad de la red para proporcionar conectividad y abriendo la puerta a su implementación en entornos móviles como aeronaves (Reuters, 2025).

Parte II ESTUDIO PRÁCTICO

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN A LAS SIMULACIONES, ESCENARIOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Para evaluar la viabilidad y el rendimiento de la aplicación de redes 5G en la aviación, se han desarrollado una serie de simulaciones basadas en escenarios que modelan distintas fases del vuelo en términos de conectividad. En esta parte práctica del proyecto, se analizan dos tipos de escenarios diferenciados: el primero corresponde a un entorno de comunicaciones directas aire-tierra (DA2G), mientras que el segundo se centra en un entorno de comunicaciones vía satélite (SA2G).

El objetivo principal de estos escenarios es estudiar cómo la incorporación de tecnología 5G podría mejorar parámetros clave en las comunicaciones aeronáuticas. Para ello, se ha hecho uso de diversas herramientas especializadas, que permiten simular condiciones reales de operación y obtener resultados cuantitativos sobre el rendimiento de las comunicaciones.

Simulación de comunicaciones DA2G

En los escenarios de comunicaciones directas aire-tierra, se ha empleado la herramienta Radio Mobile Online, que ha sido fundamental para analizar la conectividad entre estaciones base terrestres y aeronaves en distintas fases del vuelo. Esta herramienta permite simular la propagación de señales 5G teniendo en cuenta variables clave como la topografía del terreno, la altura de las antenas y la frecuencia de operación.

Las simulaciones DA2G realizadas en este proyecto incluyen tres escenarios representativos: la fase de despegue, la fase de crucero sobre zonas terrestres y la transición hacia zonas oceánicas. En cada uno de ellos, Radio Mobile Online ha permitido generar mapas de cobertura, estimar la pérdida de señal y definir el área de servicio efectiva para garantizar una conectividad continua durante el trayecto.

Simulación de comunicaciones SA2G

Para los escenarios basados en comunicaciones vía satélite, se han empleado dos herramientas complementarias: MATLAB y Satellite Map Space.

Por un lado, MATLAB se ha utilizado como entorno de programación para calcular métricas clave del enlace satelital, como la pérdida por espacio libre, la relación señal-ruido, la latencia y la capacidad del canal en los enlaces de subida (uplink) y bajada (downlink). Estas simulaciones se han centrado en el uso de satélites de órbita baja (LEO) operando en banda Ka, lo que permite evaluar el rendimiento teórico del 5G sobre este tipo de infraestructura. Asimismo, se ha incorporado la dinámica orbital de los satélites para analizar el impacto del movimiento relativo y los cambios de satélite necesarios durante el vuelo.

Por otro lado, la herramienta Satellite Map Space ha proporcionado una visualización en tiempo real de las constelaciones satelitales utilizadas, como Starlink y OneWeb. Esta

plataforma ha permitido validar los resultados obtenidos en MATLAB, contrastando la disponibilidad y densidad de cobertura de los satélites en las regiones simuladas. Su uso ha sido clave para confirmar la viabilidad práctica de mantener enlaces SA2G estables durante vuelos transoceánicos o en áreas sin cobertura terrestre.

En los siguientes capítulos, se presentan las simulaciones.

Capítulo 2. ESCENARIO 1: IMPLEMENTACIÓN DE 5G EN COMUNICACIONES DA2G

Este escenario pretende analizar los resultados de implementar redes 5G en las conexiones DA2G. Para ello, se harán tres simulaciones cada una de ellas correspondiente a una fase de vuelo:

- Simulación i: Fase despegue, enlace estación base Madrid
- Simulación ii: Fase crucero, enlace estación base Madrid
- Simulación iii: Fase crucero, enlace estación base salida Atlántico

Antes de realizar las simulaciones, es necesario establecer una serie de parámetros y configuraciones generales previas que se utilizarán en los tres enlaces, estas se detallan a continuación.

2.1 PARÁMETROS Y CONFIGURACIONES PREVIAS DEL ENLACE

En este apartado, se explicará el cálculo de los siguientes parámetros del enlace:

- CQI en el límite de la celda
- Eficiencia espectral
- SNR mínima requerida
- Potencia de ruido
- Interferencia SNRI
- Potencia de señal
- Potencia de señal con margen

En primer lugar, estimamos la potencia mínima necesaria a transmitir desde las estaciones base para garantizar la transmisión 5G considerando las limitaciones de ruido e interferencia. Para ello, partimos del CQI (Channel Quality Indicator) en el límite de la celda, que nos proporciona la eficiencia espectral del enlace suponiendo la peor ubicación en términos de calidad.

La eficiencia espectral η viene dada por el valor de CQI=1:

$$\eta = 0,1523 \text{ bps/Hz}$$

A partir de esta, calculamos la relación señal-ruido (SNR) mínima requerida, asegurándonos de mantener un margen de 1 dB por encima del límite de Shannon para compensar pérdidas adicionales en la señal. La fórmula utilizada es:

$$SNR_{min} = 10 \log(2\eta - 1) + 1$$

Sustituyendo los valores:

$$SNR_{min} = 10 \log_2(0,1523 - 1) + 1 = -8,53 \text{ dB}$$

A continuación, determinamos la potencia de ruido del sistema, para este caso se utilizarán 26 Resource Blocks (RBs), el factor de ruido será de 2 dB y la potencia de ruido la siguiente:

$$PN = -99,97 \text{ dBm}$$

Dado que la interferencia es la principal limitación en este escenario, consideramos una relación señal-interferencia de 6,5 dB, lo que implica que la potencia de interferencia es 6,5 dB por encima de la del ruido térmico:

$$P_{RuidoTotal} = PN + PI = 5,47 * 10^{-13} \text{ W} \approx -92,6 \text{ dBm}$$

La potencia mínima de señal requerida se obtiene sumando la potencia total de ruido con la SNR mínima:

$$PS = P_{RuidoTotal} + SNR_{min} = -92,6 + (-8,53) = -101,13 \text{ dBm}$$

Finalmente, consideramos un margen de desvanecimiento de aproximadamente 7 dB para garantizar una fiabilidad del 90%.

$$PS_{final} = -108 \text{ dBm}$$

En la siguiente tabla se resumen los valores de los parámetros para el diseño del enlace:

Parámetro	Valor
CQI en el límite de la celda	1
Eficiencia espectral	0,1523 bps/Hz
SNR mínima requerida	-8,53 dB
Potencia de ruido	-99,97 dBm
Interferencia SNRI	6,5 dB por encima del ruido térmico
Potencia de señal	-101,13 dBm
Potencia de señal con margen	-108 dBm

Ilustración 14. Parámetros y configuración de estaciones base

2.2 SIMULACIÓN DE ESCENARIOS

A continuación, una vez ya hemos definido estos parámetros, procedemos a realizar la simulación de los distintos escenarios.

SIMULACIÓN I: FASE DESPEGUE

El primer escenario simulado en este estudio corresponde a la fase inicial del vuelo, el despegue desde el Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas hasta las inmediaciones del Circuito del Jarama, donde se alcanza una altitud de 1500 metros.

En el presente estudio, se considera que la fase de despegue abarca hasta los 1500 metros de altitud, ya que representa el tramo crítico desde el punto de vista de las comunicaciones aire-tierra. En esta etapa, la aeronave aún se encuentra dentro del entorno aeroportuario, con una trayectoria ascendente pronunciada y mayor susceptibilidad a pérdidas de enlace por obstáculos, interferencias y variaciones rápidas en la geometría del canal de comunicación.

En esta etapa, la comunicación se mantiene mediante un enlace directo tierra-aire (DA2G) desde la estación base ubicada en el aeropuerto hasta la antena del avión. Este enlace se puede observar en la siguiente figura:

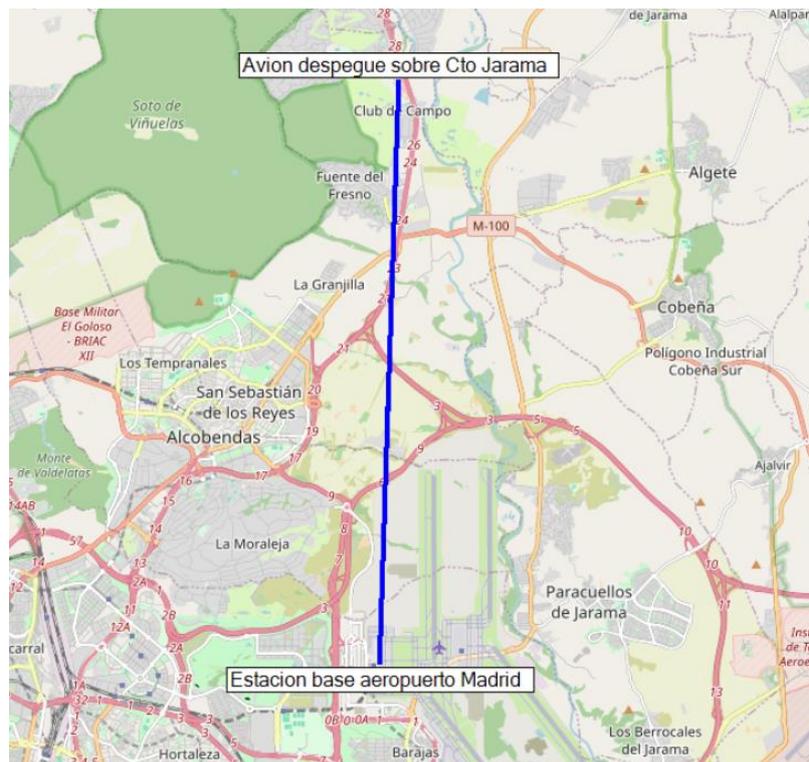


Ilustración 15. Enlace despegue a 1500m. Radio Mobile Online

En primer lugar, se presenta la configuración de los puntos del enlace que se han utilizado en la herramienta de simulación.

CONFIGURACIÓN DEL ENLACE

La estación base situada en el aeropuerto se encuentra a una elevación de 606.1 metros sobre el nivel del mar y cuenta con una antena instalada a 20 metros de altura, con un azimuth de 1.87° TN y una inclinación de 6.05° orientada para optimizar la cobertura.

Por su parte, la aeronave en ascenso, a medida que se aleja del aeropuerto, se encuentra a 1500 metros de altura sobre el Circuito del Jarama. La antena a bordo está orientada con un azimuth de 181.88° TN y una inclinación de -6.18°, lo que permite mantener la alineación con la estación base y garantizar un enlace estable durante la fase de ascenso. Estos parámetros se resumen en la siguiente tabla

Configuración puntos del enlace			
Estación Base (Madrid - Aeropuerto)		Aeronave en Despegue sobre el Circuito del Jarama	
Latitud	40.491610°	Latitud	40.616005°
Longitud	-3.589783°	Longitud	-3.584419°
Elevación del terreno	606.1 m	Elevación del terreno	609.0 m
Altura de la antena	20.0 m	Altura de la antena	1500.0 m
Azimuth	1.87° TN	Azimuth	181.88° TN
Inclinación	6.05°	Inclinación	-6.18°

Ilustración 16 Configuración de los puntos del enlace en el despegue

A continuación, se comentan los parámetros de configuración del sistema de radio, así como las condiciones de propagación.

CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA RADIO

El sistema de radio utilizado en la simulación opera en una frecuencia de 902 Mhz, esta frecuencia forma parte del rango de espectro sub-1 GHz que puede ser utilizado para comunicaciones 5G, especialmente para comunicaciones de baja latencia y gran cobertura.

Se ha establecido una potencia de transmisión de 43.01 dBm, lo que garantiza una emisión suficiente para mantener la conectividad en la fase de ascenso y la configuración de las antenas incluye una ganancia de 6 dBi en transmisión y 2.00 dBi en recepción, lo que mejora la eficiencia del enlace.

También se consideran pérdidas debidas al cableado, con 2 dB en transmisión y 1 dB en recepción. Por otro lado, la sensibilidad del receptor, calculada en la configuración previa del enlace y fijada en -108.51 dBm, establece el umbral mínimo de señal detectable para garantizar una comunicación estable.

El rendimiento del enlace también está influenciado por las condiciones de propagación del entorno, que vienen calculadas en la interfaz del programa. En este caso, la pérdida en espacio libre asciende a 114.38 dB, lo que es típico para distancias de varios kilómetros sin obstrucciones significativas. También se ha considerado una pérdida por obstrucción de

-5.63 dB, lo que sugiere que hay una ligera afectación en la propagación de la señal, posiblemente debido a obstáculos en la trayectoria del enlace.

Finalmente, la pérdida estadística de 16.27 dB refleja la variabilidad de las condiciones del canal de propagación, resultando en una pérdida total de 125.02 dB en el sistema.

Condiciones de Propagación	
Parámetro	Valor
Pérdida en espacio libre	114.38 dB
Pérdida por obstrucción	-5.63 dB
Pérdida por bosque	0.00 dB
Pérdida por urbanización	0.00 dB
Pérdida estadística	16.27 dB
Pérdida total	125.02 dB

Ilustración 17. Parámetros del sistema radio fase despegue a 1500m

Parámetros sistema Radio	
Parámetro	Valor
Potencia TX	43.01 dBm
Pérdida en cable TX	2.00 dB
Ganancia de antena TX	6.00 dBi
Ganancia de antena RX	2.00 dBi
Pérdida en cable RX	1.00 dB
Sensibilidad RX	-108.51 dBm

Ilustración 18. Condiciones de propagación fase despegue a 1500m

Al ejecutar la simulación obtenemos los siguientes resultados de cobertura, zona Fresnel y rendimiento:

ESCENARIO 1: IMPLEMENTACIÓN DE 5G EN COMUNICACIONES DA2G

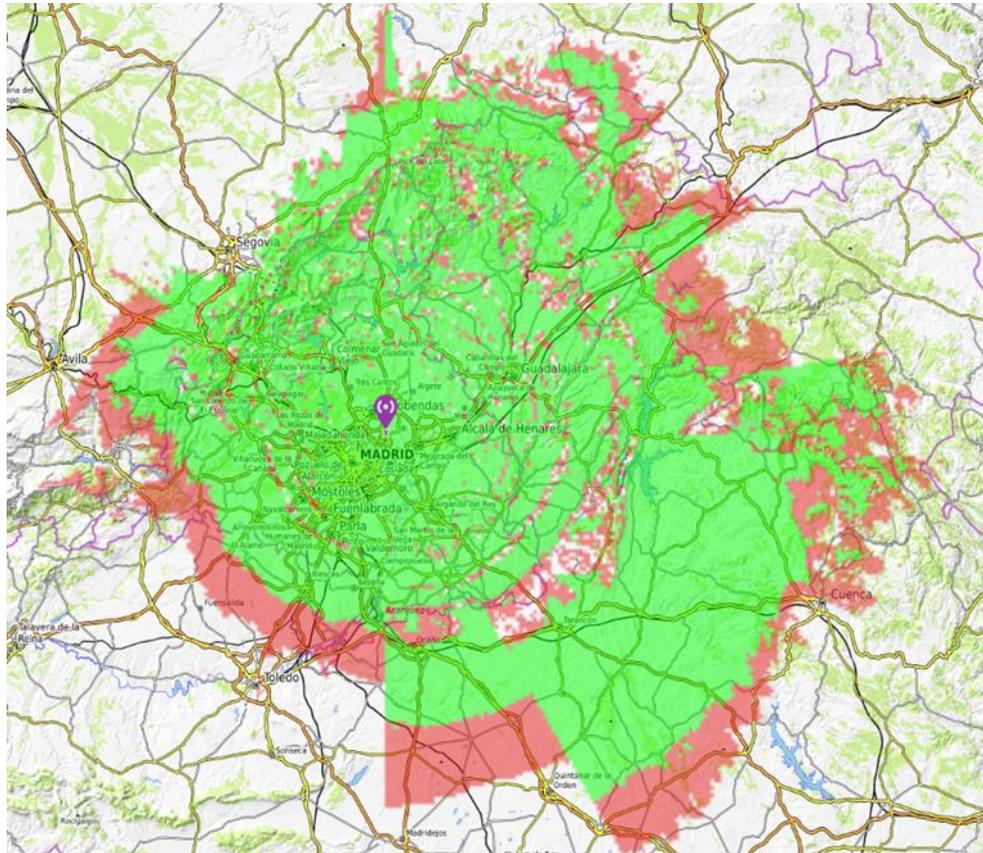


Ilustración 19. Cobertura fase despegue



Ilustración 20. Zonas de Fresnel fase despegue

Resultados y Rendimiento del Enlace	
Parámetro	Valor
Distancia entre transmisor y receptor	13.840 km
Frecuencia de operación	902 MHz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente (EIRP)	50.238 W
Ganancia total del sistema	156.52 dB
Fiabilidad requerida	90%
Señal recibida	-77.01 dBm
Margen de escucha	31.50 dB

Ilustración 21. Resultados rendimiento enlace fase despegue

En el anexo se incluyen los resultados detallados de la simulación. (Anexo, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)

Los resultados obtenidos demuestran que el enlace tierra-aire (DA2G-5G) en la fase de despegue es completamente viable. La cobertura se mantiene en toda la zona con una buena potencia de señal recibida (-77.01 dBm), baja atenuación y un margen de seguridad adecuado (31.50 dB). Esto sugiere que la comunicación puede mantenerse sin interferencias significativas, permitiendo una transmisión de datos fiable desde el aeropuerto hasta la aeronave en ascenso.

SIMULACIÓN II: FASE CRUCERO

En este segundo escenario de simulación, observaremos los resultados del enlace anterior cuando el avión alcanza una altura de crucero de 10.000 m. Para ello, se han mantenido los mismos parámetros de configuración que en el caso anterior, modificando únicamente la localización de la antena receptora del avión, que se sitúa ahora a unos 213 km de la estación base y a la altura de crucero.

Con esta simulación se persigue evaluar el alcance del sistema, identificar los factores que afectan a la degradación de la señal y poder determinar los márgenes de seguridad que se obtienen. Este estudio permitiría planificar el despliegue de la red y optimizar la localización de estaciones base.

ESCENARIO 1: IMPLEMENTACIÓN DE 5G EN COMUNICACIONES DA2G

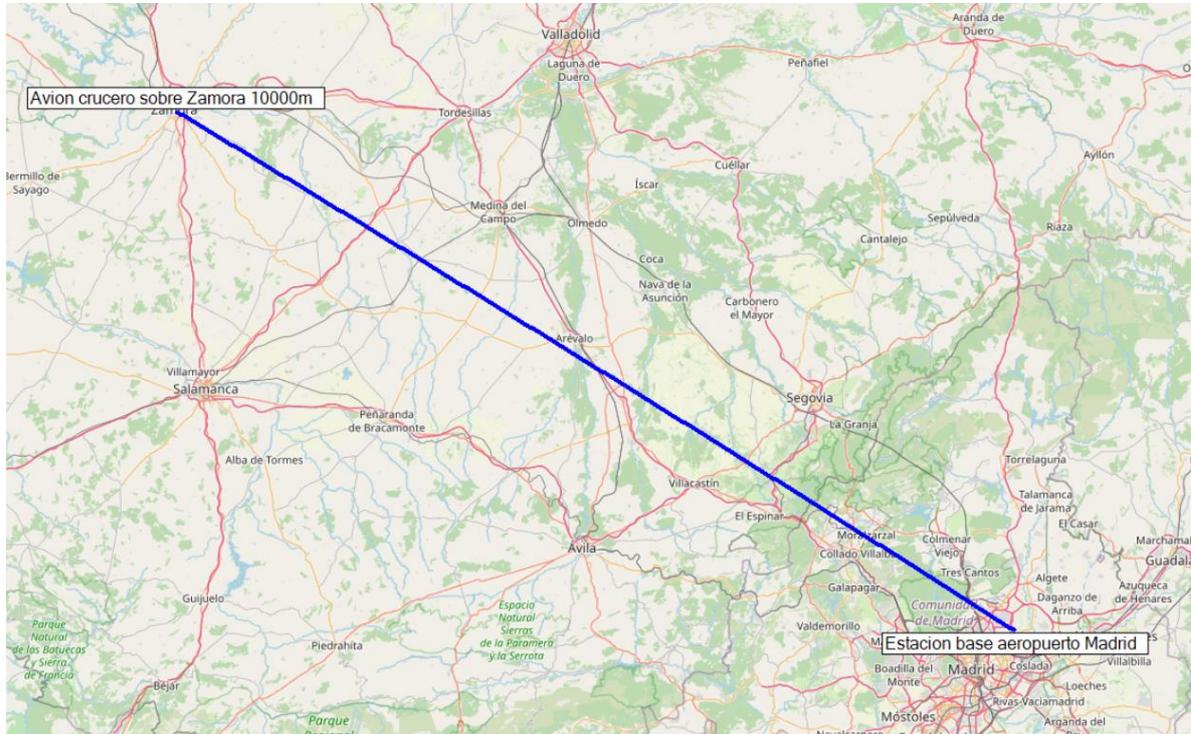


Ilustración 22 Enlace crucero a 10,000 m

Los resultados que obtenemos son los siguientes:

ESCENARIO 1: IMPLEMENTACIÓN DE 5G EN COMUNICACIONES DA2G

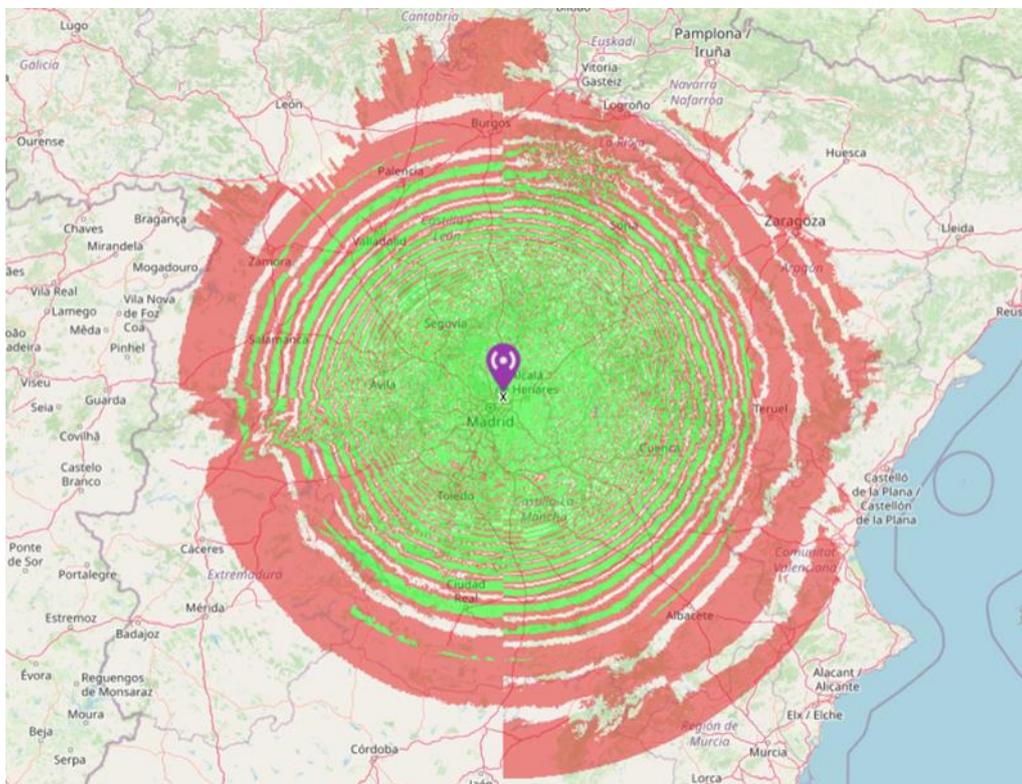


Ilustración 23. Cobertura fase crucero

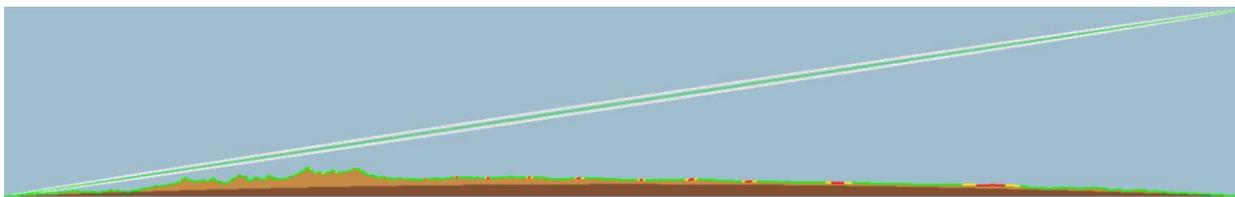


Ilustración 24 Zona de Fresnel fase crucero

Resultados y Rendimiento del Enlace	
Parámetro	Valor
Distancia entre transmisor y receptor	213.085 km
Frecuencia de operación	902 Mhz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente (EIRP)	50.238 W
Ganancia total del sistema	156.52 dB
Fiabilidad requerida	90
Señal recibida	-103.26 dBm
Margen de escucha	5.25 dB

Ilustración 25. Resultados fase crucero desde aeropuerto de Madrid.

En este caso, a diferencia de la primera simulación, se aprecia como el terreno parece interrumpir parcialmente la zona de Fresnel en algunos puntos, lo que podría aumentar la pérdida por difracción.

Por otro lado, observamos como, incluso en el punto límite de cobertura (a una distancia de la torre emisora de 213.085 km), el enlace sigue siendo viable dentro de los márgenes operativos y la potencia y la ganancia del sistema permiten alcanzar largas distancias. Se obtiene una potencia de señal recibida de -103.26 dBm, lo que implica un margen de escucha de 5.25 dB. Esto justifica que la frecuencia elegida (902 Mhz) es adecuada para garantizar un buen compromiso entre cobertura y propagación.

Además, dado que la simulación ha alcanzado el límite de cobertura del enlace, es importante destacar que en la práctica el sistema gestionaría automáticamente una transición a otra estación base terrestre.

SIMULACIÓN III: FASE CRUCERO EN EL ATLÁNTICO

En esta tercera simulación, se ha empleado una antena directiva para el enlace DA2G-5G con orientación hacia el Atlántico desde la costa gallega, ya que este punto representa la última oportunidad de conexión terrestre antes de la transición a enlaces satelitales. El uso de una antena con directividad permite concentrar la potencia radiada en la dirección del corredor aéreo esperado, maximizando el alcance y mejorando la relación señal-ruido en situaciones de cobertura límite, como las que se presentan en entornos oceánicos alejados de la infraestructura terrestre convencional.

Este escenario es especialmente relevante porque, a diferencia de los enlaces en tierra, presenta características únicas al estar orientado hacia mar abierto. Se reducen los obstáculos físicos, pero se deben considerar efectos como la curvatura terrestre, la propagación sobre el agua y la posible refracción atmosférica.

Analizar esta configuración permite evaluar la capacidad de extender la cobertura terrestre al máximo antes de la transición a SA2G-5G, lo que permitiría asegurar una conectividad continua en vuelos transoceánicos y optimizar la infraestructura de telecomunicaciones en regiones costeras.

Los resultados que se obtienen son los siguientes:

ESCENARIO 1: IMPLEMENTACIÓN DE 5G EN COMUNICACIONES DA2G

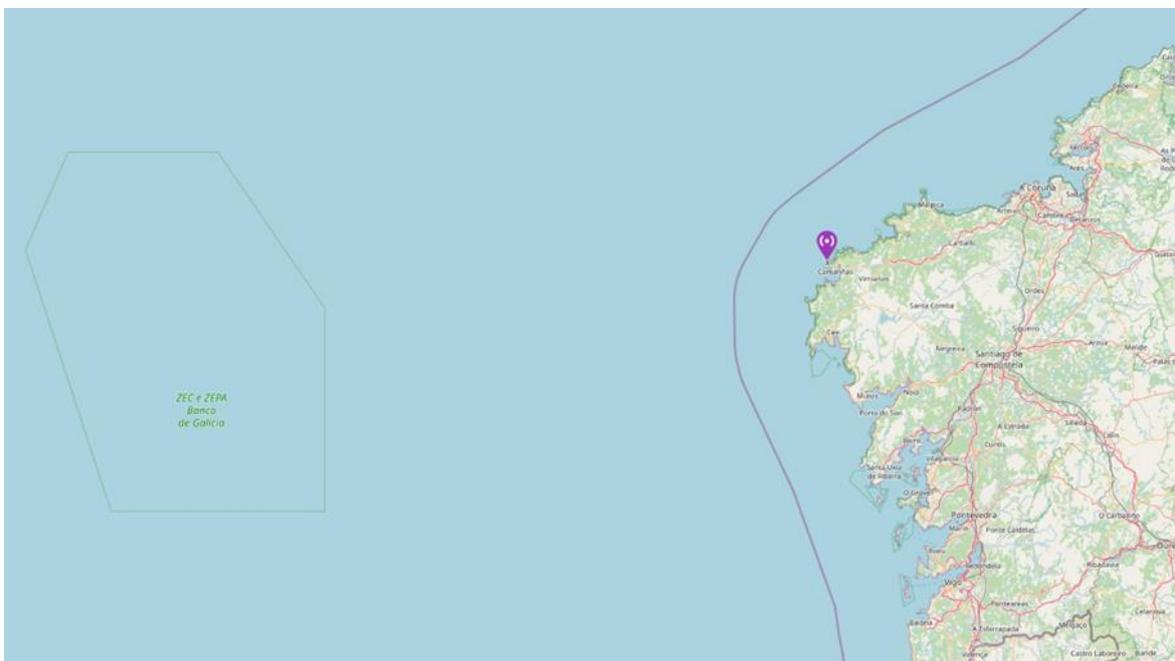


Ilustración 26. Ubicación estación base Atlántico



Ilustración 27. Enlace fase crucero Atlántico

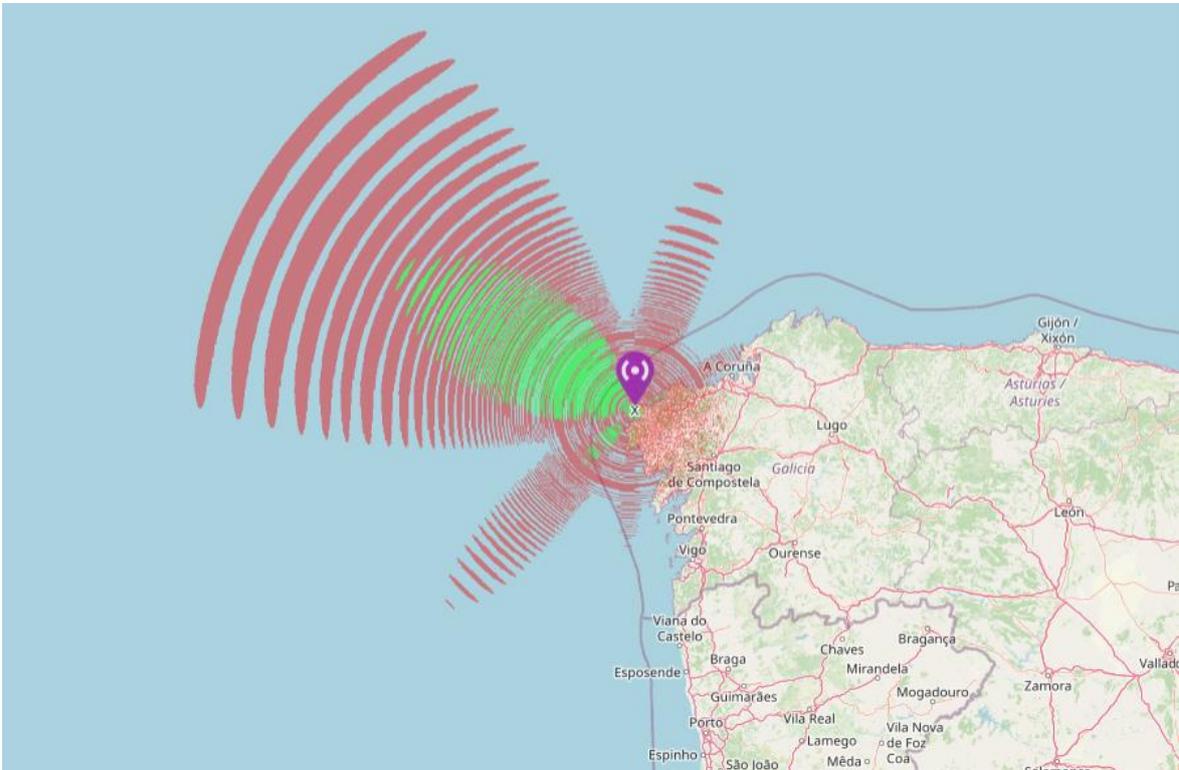


Ilustración 28. Cobertura enlace crucero Atlántico

Observando la imagen se pueden ver anillos de cobertura decreciente, lo que implica que existen zonas de interferencia y pérdidas graduales debido a fenómenos como la refracción y la difracción sobre la curvatura del planeta. En el horizonte, la señal se dispersa y se debilita, lo que explica esta presencia de áreas con menor cobertura. Por lo tanto, los aviones en vuelo a mayor altitud podrán mantener la conexión por más tiempo, mientras que aeronaves a menor altitud perderán la cobertura antes.

En cuanto a la zona Fresnel, observamos cómo queda completamente libre de obstáculos, ya que la superficie del mar no presenta irregularidades significativas del terreno

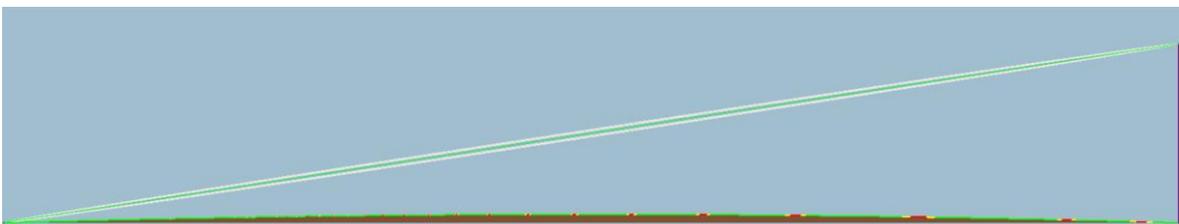


Ilustración 29. Zona Fresnel enlace crucero Atlántico.

Los resultados del enlace se resumen a continuación:

ESCENARIO 1: IMPLEMENTACIÓN DE 5G EN COMUNICACIONES DA2G

Resultados y Rendimiento del Enlace	
Parámetro	Valor
Distancia entre transmisor y receptor	179.633 km
Frecuencia de operación	902 Mhz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente (EIRP)	50.238 W
Ganancia total del sistema	156.52 dB
Fiabilidad requerida	90%
Señal recibida	-98.31 dBm
Margen de escucha	10.21 dBm

Ilustración 30. Resultados fase crucero desde el Atlántico

La simulación demuestra que la conectividad DA2G sobre 5G puede extenderse hasta el último punto posible en el océano antes de la transición a SA2G. Sin embargo, si el margen de escucha es muy bajo o negativo, el enlace se encuentra en su límite de cobertura, lo que hace necesaria la transición a un sistema satelital. Además, como observamos en la imagen de la cobertura, factores como la curvatura terrestre y las pérdidas por propagación influyen en la viabilidad de este tipo de enlaces.

Capítulo 3. ESCENARIO 2: IMPLEMENTACIÓN DE 5G EN COMUNICACIONES SA2G

En este segundo escenario, se simulará una conexión 5G entre un avión a una altura de crucero y un satélite de órbita baja (LEO). El objetivo final es poder visualizar las características de este enlace y compararlas con las que se obtienen con las conexiones actuales sobre satélites en órbita geoestacionaria (GEO).

3.1 PARÁMETROS Y CONFIGURACIÓN DEL ENLACE

En primer lugar, lo que haremos es definir los parámetros de la comunicación, lo que nos permitirá calcular las características del enlace. Así, con el objetivo de poder analizar los resultados que se obtendrían, calcularemos primeramente lo siguiente:

- Pérdidas en el espacio libre (FSPL)
- Ganancias de las antenas emisora y receptora
- Pérdidas adicionales
- Temperatura de ruido y densidad de ruido
- Potencia transmitida y EIRP
- Cálculo de G/T
- Relación señal a ruido (SNR)
- Margen de enlace
- Capacidad del enlace

Para los cálculos, nos centraremos primero en una comunicación downlink desde el satélite LEO hasta el terminal del avión.

En primer lugar, calculamos las pérdidas de espacio libre (FSPL). Estas representan la atenuación natural que sufrirá la señal al propagarse. Empleamos la siguiente fórmula:

$$FSPL = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 92.45 = 176,64 \text{ dB}$$

Donde distancia viene dada por la diferencia entre la altura del satélite LEO y la altura del avión (10 km), la frecuencia utilizada es de 30 GHz pues utilizamos para este enlace la banda Ka, viable para comunicaciones 5G. Como era de esperar, obtenemos una atenuación muy alta, pero típica para un enlace satelital de alta frecuencia.

El siguiente paso en la simulación es el cálculo de las ganancias y las pérdidas adicionales. La ganancia nos permite saber cómo de bien se concentra la señal en una dirección concreta, para esta simulación hemos establecido los siguientes valores:

$$G_{tx_{dB}}^{10} = 14,5 \text{ dB (antena del satélite, directiva)}$$

$$G_{rx_{dB}}^{11} = 40 \text{ dB (antena del avión, considerando tracking }^{12})$$

Para el cálculo de las pérdidas adicionales, hemos tenido en cuenta dos posibles causas:

$$\text{Pérdidas por de la atmósfera (gases, vapor oxígeno)} = 0.1 \text{ dB}$$

$$\text{Pérdidas por fuera del eje del lóbulo principal} = 3 \text{ dB}$$

Cabe señalar que no se han considerado las pérdidas por desajuste de polarización, ya que se ha optado por el uso de polarización circular, la cual minimiza este tipo de pérdidas. Por lo que el total de pérdidas adicionales resulta:

$$L_{adicional} = 3.1 \text{ dB}$$

A continuación, calculamos el valor del EIRP y de la potencia recibida. El valor de EIRP se calcula en base a la potencia transmitida y a la ganancia. Para ello, se asume una potencia de transmisión de 100 W, típica en satélites LEO de comunicaciones como los de Starlink:

$$P_{tx} = 100 \text{ W} = 20 \text{ dBW}$$

$$EIRP = P_{tx} + G_{tx} = 34.5 \text{ dBW}$$

La potencia recibida en el avión se determina mediante:

$$P_{rx} = EIRP - FSPL - L_{adicional} + G_{rx} = -105.24 \text{ dBW}$$

Seguidamente, se calcula la potencia total de ruido térmico del canal. Se utilizan los siguientes parámetros:

$$\text{Temperatura de sistema: } T = 130 \text{ K}$$

$$\text{Ancho de banda del canal: } BW = 100 \text{ MHz}$$

¹⁰ Ganancia antena transmisora: la ganancia de la antena del satélite se ha estimado a partir de su anchura de haz, utilizando aproximaciones numéricas extraídas de la fuente Microwaves101 (Microwaves101, n.d.).

¹¹ Ganancia antena receptora: la ganancia de la antena del avión se ha estimado teniendo en cuenta la frecuencia del enlace a 30GHz y un tamaño viable aproximado de 40cm.

¹² Tracking: Proceso mediante el cual el sistema de comunicación a bordo del avión ajusta de forma continua la orientación de la antena direccional para mantener alineada su línea de visión con el satélite (Perez-Neira et al., 2019).

Se ha adoptado una temperatura de cielo efectiva, considerando el factor de ruido del sistema.

$$N_0 = 10 \log(k * T) = -207.47 \text{ dBW/Hz}$$

$$N = N_0 + 10 \log(BW) = -127.47 \text{ dBW}$$

La relación señal-ruido (SNR) se obtiene comparando la potencia recibida con la potencia de ruido:

$$SNR = Pr_x - N = 22.23 \text{ dB}$$

Finalmente, se estima la capacidad teórica máxima del canal utilizando la fórmula de Shannon, incorporando un margen de 1 dB que tiene en cuenta las pérdidas asociadas al uso turbo códigos¹³ y LDPC¹⁴.

$$SNR_{util} = 21.23 \text{ dB}$$

$$C = BW * \log_2(1 + SNR_{util}) = 706 \text{ Mbps}$$

Este resultado confirma que el sistema es capaz de soportar transmisiones de alta velocidad. Los valores de los parámetros para el enlace downlink se resumen a continuación:

¹³ Turbo código (Turbo code): Los turbo códigos son una clase de códigos de corrección de errores que permiten aproximarse al límite teórico de capacidad del canal definido por Shannon. Estos combinan dos o más codificadores convolucionales junto con un intercalador, y se decodifican iterativamente (Berrou, Glavieux, y Thitimajshima, 1993).

¹⁴ LDPC (Low-Density Parity-Check Code): Los códigos LDPC son códigos de corrección de errores lineales que utilizan matrices de paridad dispersas (con pocos unos) para lograr una gran eficiencia de codificación y decodificación, especialmente a altas tasas. Se decodifican mediante algoritmos iterativos como el sum-product y son ampliamente utilizados en sistemas de comunicaciones modernos, incluyendo 5G y DVB-S2 (Gallager, 1962).

LEO (enlace downlink)	
Distancia satélite-avión	540 km
FSPL	176.64 dB
Potencia recibida	-105.24 dBW
SNR	22.23 dB
Capacidad teórica	706 Mbps

Ilustración 31. Parámetros del enlace downlink satélite LEO

En el anexo se incluyen los cálculos para el enlace uplink (Anexo, 8.4), los resultados son los siguientes:

LEO (enlace uplink)	
Distancia avión-satélite	540 km
FSPL	176.64 dB
Potencia recibida	-115.23 dBW
SNR	6.38 dB
Capacidad teórica	216 Mbps

Ilustración 32. Parámetros del enlace uplink desde el avión al satélite.

Teniendo estos datos podemos compararlos con los que se obtienen actualmente en las conexiones SA2G basadas en órbitas GEO y sobre tecnologías satelitales como DVB-S2 / S2X para downlink y DVB-RCS2 para uplink.

A continuación, nos centraremos en primer lugar en analizar las diferencias en la latencia, throughput y capacidad.

ANÁLISIS LATENCIA

Teniendo en cuenta la distancia entre el avión y el satélite LEO, obtenemos un valor de latencia y por consiguiente de RTT de:

$$Latencia_{ida} = \frac{d}{c} = 1.8 \text{ ms}$$

$$RTT = 2 * Latencia = 3.6 \text{ ms}$$

Actualmente, los valores de latencia en conexiones SA2G sobre satélites GEO son de unos 119 ms, con un RTT de 238 ms. Por lo tanto, vemos que empleando satélites en órbita baja podemos mejorar notablemente estos tiempos de recepción.

Consideraciones a tener en cuenta

En primer lugar, debemos tener en cuenta que estos tiempos de transmisión se corresponden al tiempo teórico mínimo físico de ambos enlaces. Para el caso de un enlace SA2G sobre satélites GEO, los tiempos de RTT típicos se sitúan entre los 500 y 700 ms, considerando los retardos de procesamiento, enrutamiento y transmisión.

Para el caso de los satélites LEO, aunque estos representan una ventaja clara en términos de latencia física, la latencia real de red depende también de factores como la ruta inter satélite (que consiste en el enrutamiento de datos de un satélite a otro sin pasar por estaciones terrestres) y la congestión del sistema, que depende a su vez de cómo se establezca la planificación de los recursos y los algoritmos de enrutamiento adaptativo. Por lo tanto, para un análisis más detallado de aplicaciones críticas en tiempo real sería esencial considerar no solo la altitud del satélite, sino la arquitectura completa de la red LEO y su capacidad de adaptación dinámica.

ANÁLISIS THROUGHPUT Y CAPACIDAD

Otra de las ventajas que se señalaba en la parte teórica del proyecto era la posibilidad de, a través de conexiones SA2G basadas en 5G, mejorar las tasas de transmisión y la capacidad del enlace.

Durante la simulación, se ha obtenido un valor de capacidad de: 216 Mbps para el enlace uplink y de 706 Mbps para downlink. Para un enlace satelital sobre GEO y con la tecnología utilizada en la actualidad, los valores de capacidad del enlace de descarga son de en torno a 20 Mbps y 220 Mbps, esta información se puede observar en la siguiente tabla, con datos reales sobre las velocidades proporcionada por distintos proveedores de servicios de conectividad en vuelo.

Proveedor / Sistema	Velocidad de descarga estimada	Tecnología / Banda	Comentarios
Starlink Aviation	Hasta 220 Mbps	LEO / Banda Ka	Utilizado por aerolíneas como United Airlines; velocidades entre 40 y 220 Mbps.
Gogo Galileo (FDX)	Hasta 195 Mbps	GEO / Banda Ku	Diseñado para aeronaves de mayor tamaño; velocidades de hasta 195 Mbps.
Viasat Ka-band	Más de 20 Mbps	GEO / Banda Ka	Velocidades típicas superiores a 20 Mbps.
Inmarsat Global Xpress	Hasta 50 Mbps	GEO / Banda Ka	Servicio global con velocidades de hasta 50 Mbps.
European Aviation Network	Hasta 75 Mbps	Híbrido (LTE + S-band)	Cobertura en Europa; velocidades de hasta 75 Mbps.

Ilustración 33. Velocidades de descarga de los principales proveedores. Fuente: información pública de los proveedores

Para poder hacer una buena comparación del enlace LEO-5G con las tasas de transmisión reales que se obtienen en la actualidad, tenemos que considerar que la capacidad teórica calculada anteriormente representa el límite máximo bajo condiciones ideales, mientras que las velocidades reales están influenciadas por factores como las limitaciones de hardware, las condiciones atmosféricas o los protocolos de red y overhead. Por lo tanto, si calculamos el valor del throughput estimado en nuestro enlace, teniendo en cuenta un factor de rendimiento η , obtenemos lo siguiente:

$$\text{Throughput estimado} = \text{Capacidad teórica} \times \eta$$

Si suponemos un escenario pesimista, con una eficiencia del 50% obtenemos:

$$\begin{aligned} \text{Throughput_Downlink}_{\text{pesimista}} &= 706 * 0,50 = 353 \text{ Mbps} \\ \text{Throughput_Uplink}_{\text{pesimista}} &= 216 * 0,50 = 108 \text{ Mbps} \end{aligned}$$

Si consideramos una eficiencia del 85%, el valor de throughput sería:

$$\begin{aligned} \text{Throughput_Downlink}_{\text{optimista}} &= 706 * 0,85 = 600,1 \text{ Mbps} \\ \text{Throughput_Uplink}_{\text{optimista}} &= 216 * 0,85 = 183,6 \text{ Mbps} \end{aligned}$$

Observamos cómo en ambos casos sigue siendo superior a las tasas que se obtienen con las conexiones comerciales actuales en vuelo. Este salto en la capacidad habilita la posibilidad de mejorar las comunicaciones existentes y de incorporar un nuevo conjunto de servicios y aplicaciones a bordo del avión que actualmente resultan inviables o muy limitados. Entre ellos se encuentran la transmisión en tiempo real de vídeo HD o 4K, la transmisión de actualizaciones en vivo del software de aeronavegación o el análisis de los datos operativos desde el aire.

Consideraciones a tener en cuenta

Por un lado, debe tenerse en cuenta que la capacidad de transmisión del satélite se comparte entre todos los usuarios conectados simultáneamente a él, por lo que el throughput real disponible para una aeronave concreta dependerá de la carga de usuarios en ese momento. Aunque el número de aviones conectados a un mismo satélite LEO no suele ser elevado, este aspecto puede afectar el rendimiento individual del enlace.

Por otro lado, la temperatura del sistema también influye directamente en el rendimiento del enlace, ya que un incremento térmico eleva el nivel de ruido del receptor, reduciendo la relación señal-ruido y, por consiguiente, la capacidad. En particular, si el satélite se encuentra orientado hacia el Sol, la temperatura del sistema puede aumentar drásticamente, alcanzando valores del orden de 3000 K. Esta degradación térmica se encuentra recogida en la Recomendación ITU-R P.372, que proporciona los niveles de temperatura de ruido según las condiciones de exposición del sistema a fuentes térmicas intensas, esta se puede ver en el anexo (Anexo, 8.4).

ANÁLISIS DE COBERTURA

Para el análisis de cobertura, se evaluará qué tipo de infraestructura satelital es necesaria para garantizar que se satisfacen los requisitos de cobertura del enlace.

Como se ha comentado en la parte teórica, la posibilidad de las constelaciones LEO de ofrecer conectividad en tiempo real incluso en zonas remotas, hace que sean una alternativa muy atractiva para lograr una cobertura global. Sin embargo, para conseguir esta disponibilidad, es necesario un sistema denso de satélites distribuidos en múltiples planos orbitales, con trayectorias que aseguren el solapamiento de las huellas de cobertura y permitan la transición eficiente entre satélites.

Actualmente, las constelaciones satelitales que operan en órbita LEO son principalmente la de Starlink y OneWeb. Ambas tienen como objetivo ofrecer conectividad global de alta velocidad y baja latencia, especialmente en zonas rurales, remotas o en movimiento, donde las infraestructuras terrestres son limitadas o inexistentes. Starlink, desarrollada por SpaceX, es actualmente la constelación más extensa, con más de 5.000 satélites operativos a altitudes cercanas a los 550 km. OneWeb, por su parte, opera a mayor altitud (unos 1.200 km) y ha desplegado una constelación de más de 600 satélites.

Utilizando la herramienta Satellite Map Space es posible visualizar en tiempo real la disposición orbital de las constelaciones Starlink y OneWeb, así como el desplazamiento de sus satélites individuales. Además, la plataforma permite analizar de forma gráfica la intensidad de cobertura relativa de cada satélite en función de su posición, lo que nos permite sacar conclusiones sobre el potencial de conectividad en distintas regiones del planeta con la infraestructura ya existente. Esto se muestra en las siguientes imágenes:

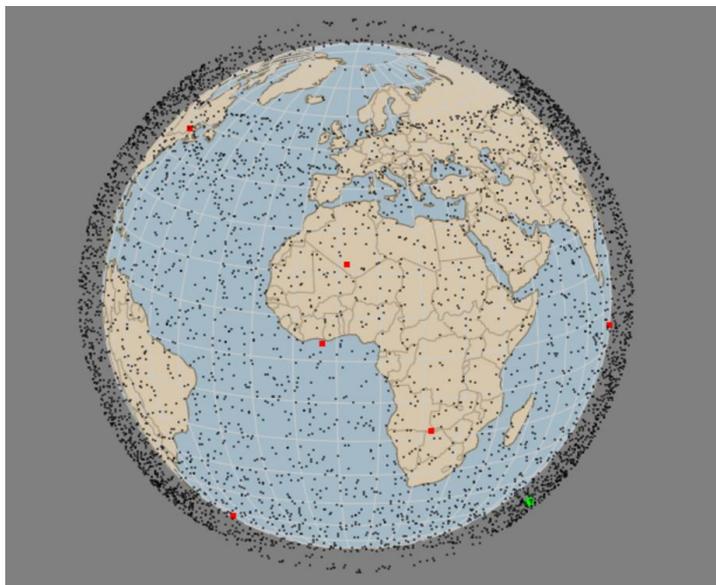


Ilustración 34. Constelación de satélites de Starlink en Abril de 2025. Fuente Live Starlink Satellite Map

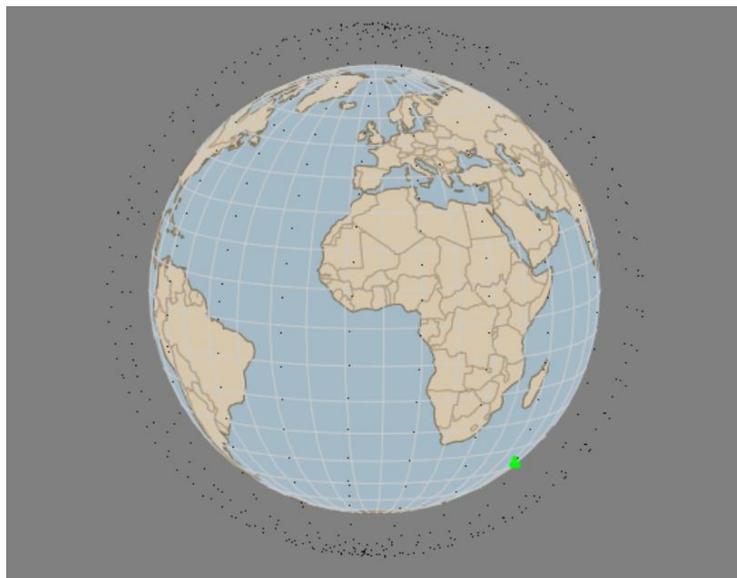
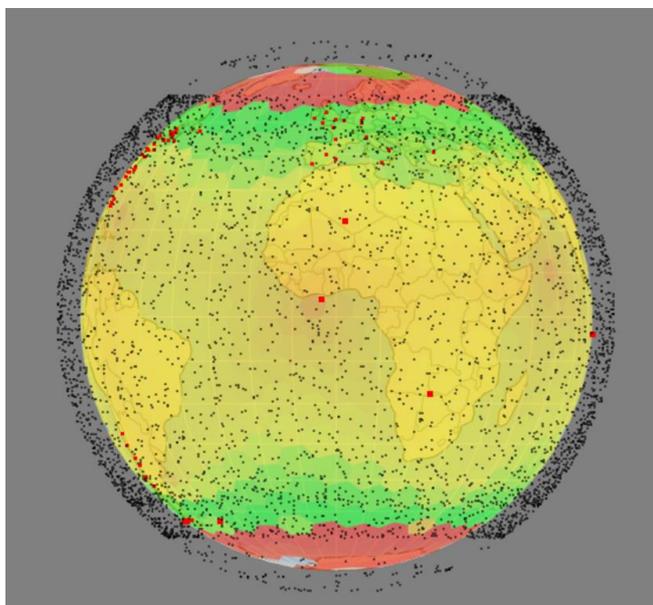
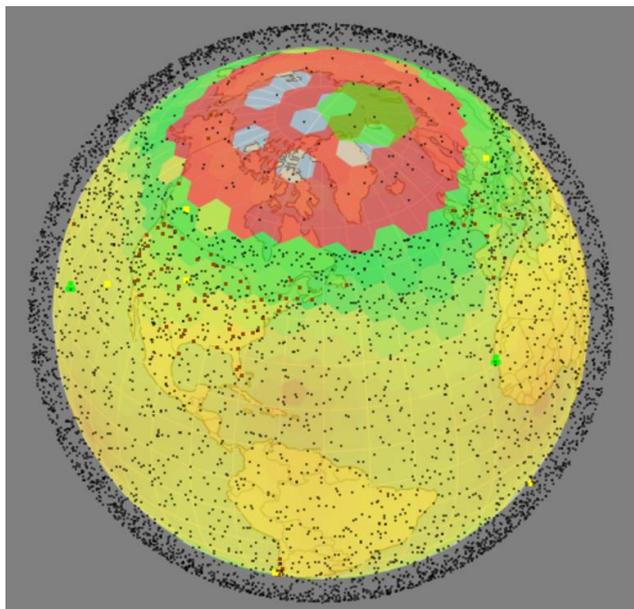


Ilustración 35. Constelación de satélites de OneWeb en Abril de 2025. Fuente Live Starlink Satellite Map

Para el caso de los satélites de Starlink podemos visualizar la cobertura que proporcionan, que se muestra en la siguiente imagen.



*Ilustración 36. Intensidad de cobertura en la constelación de StarLink Abril de 2025.
Fuente Live Starlink Satellite Map*



*Ilustración 37. Intensidad de cobertura en la constelación de StarLink Abril de 2025.
Fuente Live Starlink Satellite Map*

Analizando estas imágenes, podemos observar cómo, con la constelación de satélites ya desplegada, se alcanza una cobertura prácticamente global, con excepción de ciertas zonas en los polos. Esta cobertura incluye tanto áreas densamente pobladas como regiones remotas, lo que demuestra la viabilidad de utilizar estas constelaciones LEO como soporte para comunicaciones 5G con aeronaves.

3.2 CONSIDERACIONES FINALES A TENER EN CUENTA

TIMING ADVANCE

En las redes 5G terrestres, el Timing Advance (TA) es un mecanismo fundamental que permite ajustar el instante en el que un dispositivo transmite sus señales hacia la estación base, con el objetivo de evitar interferencias causadas por las diferencias de distancia entre usuarios. Este sistema está optimizado para escenarios donde la separación entre terminal y estación base es relativamente pequeña, y tiene un límite práctico de corrección de unos 100 km.

Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones importantes cuando se traslada a entornos satelitales, donde las distancias de propagación son mucho mayores (centenares o miles de kilómetros) y, por tanto, los retardos temporales asociados superan ampliamente los márgenes que el TA estándar puede manejar. Para gestionar esta problemática y garantizar una sincronización adecuada en enlaces no terrestres, se aplican las siguientes estrategias complementarias:

- **Sincronización mediante GNSS:** En escenarios como la aviación, los dispositivos (aeronaves) pueden emplear sistemas GNSS (como GPS o Galileo) para determinar con precisión su ubicación y, en consecuencia, calcular el momento exacto de transmisión. Esta información permite al sistema 5G alinear correctamente las señales, incluso con grandes retardos de propagación. La sincronización se realiza dentro del marco de 5G NR, que permite integrar esta información en su arquitectura.
- **Uso del Time Alignment Offset (TAO):** El TAO es una extensión del TA tradicional, diseñada específicamente para enlaces de larga distancia como los satelitales. Este mecanismo ajusta el tiempo de transmisión basándose en la ubicación obtenida por GNSS y en modelos de propagación satelital, asignando slots de transmisión específicos que minimizan la interferencia. En redes 5G, esto se implementa comúnmente en sistemas OFDM con duplexación TDD, que permiten un control preciso del tiempo de emisión y recepción.
- **Adaptación del software de la estación base:** Otra solución viable consiste en modificar el software de las estaciones base para que acepten retardos superiores a los convencionales, manteniendo no obstante el tiempo diferencial entre usuarios por debajo del límite de 100 km. Este método puede aplicarse sin modificar el protocolo de TA, ajustando simplemente los relojes de transmisión o recepción para compensar el desfase.

Esquema conceptual de sincronización 5G satelital con TAO (Time Alignment Offset)

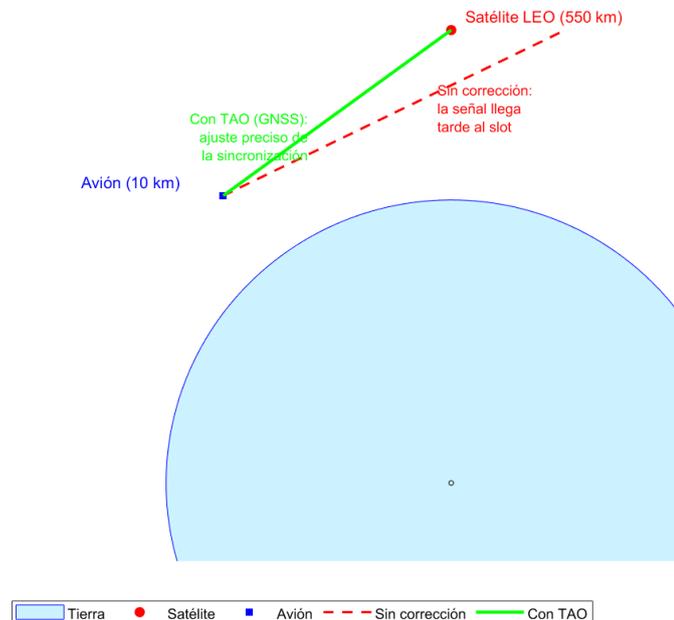


Ilustración 38. Sincronización con Time Alignment Offset

HANDOVER ENTRE SATÉLITES

El handover se define como el proceso mediante el cual una conexión activa, en este caso la comunicación entre un satélite LEO y un avión, se transfiere de un satélite a otro sin interrumpir la sesión de comunicación. Esto tiene especial relevancia en la simulación debido a la alta velocidad relativa de los satélites LEO con respecto a la tierra.

De esta forma, se ha realizado un cálculo para estimar la distancia mínima necesaria para iniciar el handover entre satélites teniendo en cuenta la limitación del Timing Advance (este cálculo se ha tenido en cuenta en los apartados previos de la simulación). En este caso, se ha considerado que no se modifica el protocolo si no que, como se comentaba en la sección anterior, se adapta el software de la estación base para que la distancia diferencial esté dentro de los límites de 100 Km.

Con el objetivo de estimar la distancia de handover, se ha representado una situación geométrica en la que el satélite se encuentra a una altitud de 550 km sobre la superficie terrestre (órbita baja), y se considera el avión volando a una altitud de crucero media de 10 km. A partir de estos datos, se construye un triángulo con los siguientes lados, como se muestra en la figura:

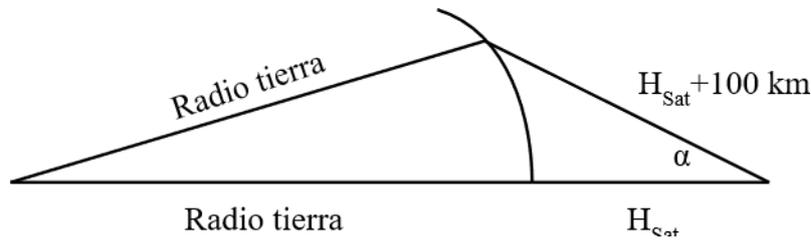


Ilustración 39. Cálculo del handover

- La distancia entre el centro de la Tierra y el satélite:

$$c = R + H_{sat} = 6379 \text{ km} + 550 \text{ km} = 6929 \text{ km}$$

- La distancia del satélite en el límite del timing advance (100km)

$$b = H_{sat} + 100 \text{ km} = 550 \text{ km} + 100 \text{ km} = 650 \text{ km}$$

Aplicando el Teorema del Coseno, se determina el ángulo mínimo α bajo el cual el satélite puede seguir cubriendo dos puntos en tierra antes de perder la línea de visión directa y requerir un cambio de satélite:

$$\cos(\alpha) = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$$

Con esto obtenemos un valor de $\alpha = 0,85$. A partir de ese ángulo, la distancia sobre la que puede recorrer el avión sin perder cobertura de un mismo satélite se calcula como:

$$L = 2 \cdot d_{AvionSatelite} \cdot \sin(\alpha) \approx 2 \cdot 540 \cdot \sin(0,85) \approx 2 \cdot 540 \cdot 0.0148 \approx 577 \text{ km}$$

Este valor representa la proyección del cono de visibilidad del satélite en un instante dado, es decir, la distancia que puede recorrer el avión dentro de la cobertura de dicho satélite. Esto se puede observar de forma gráfica en las siguientes imágenes:

ESCENARIO 2: IMPLEMENTACIÓN DE 5G EN COMUNICACIONES SA2G

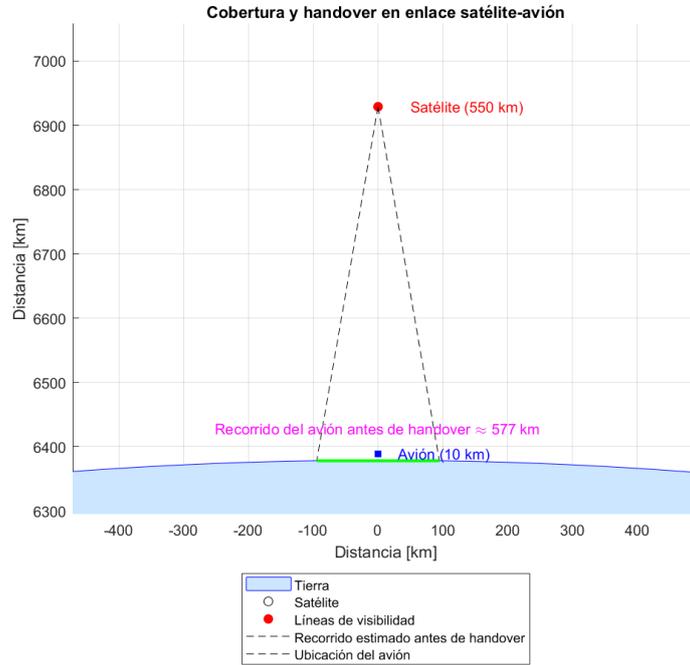


Ilustración 40. Simulación de handover durante vuelo

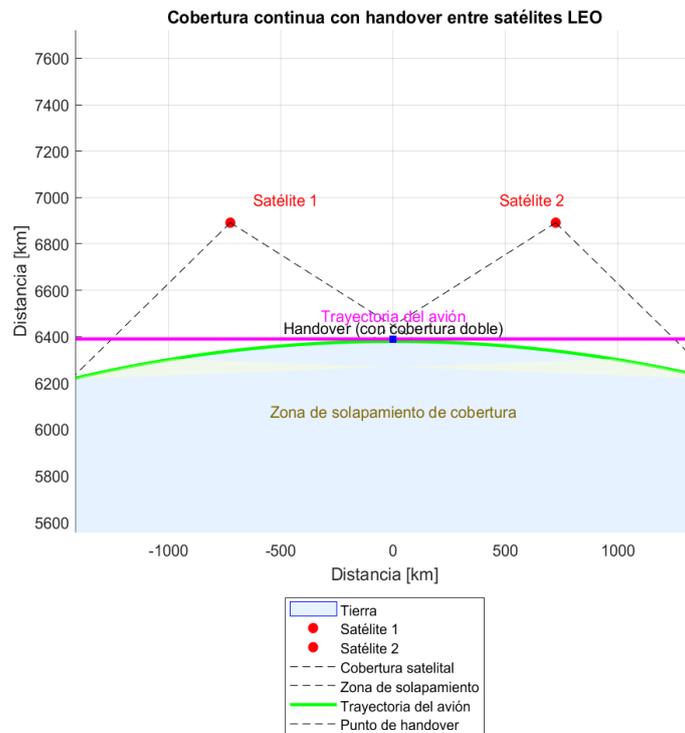


Ilustración 41. Cobertura durante handover entre satélites

ESCENARIO 2: IMPLEMENTACIÓN DE 5G EN COMUNICACIONES SA2G

En esta figura se representa de forma esquemática la cobertura proporcionada por dos satélites LEO a 550 km de altitud, así como la trayectoria de un avión en vuelo a 10 km de altitud. Cada satélite cubre una región de la superficie terrestre delimitada por su ángulo de visibilidad (cono de cobertura). El solapamiento entre coberturas permite garantizar que el avión, al desplazarse, se mantenga en todo momento dentro del área cubierta por al menos uno de los dos satélites.

Capítulo 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En primer lugar, el estudio teórico realizado en el proyecto ha permitido identificar una serie de limitaciones clave en las comunicaciones aeronáuticas actuales, específicamente en aquellas de tipo aire-tierra (A2G) lo que justifica la exploración de nuevas alternativas tecnológicas como el 5G. Los resultados de este estudio son las siguientes limitaciones:

- Limitación de cobertura: especialmente en redes DA2G. Aunque estas redes ofrecen baja latencia y mayor capacidad en comparación con los enlaces satelitales, su despliegue depende de estaciones base terrestres con gran separación entre sí (ISD). Esto restringe su aplicabilidad a zonas con infraestructura terrestre ya desarrollada, por lo que no pueden ser utilizadas para vuelos con rutas intercontinentales o sobre regiones sin cobertura.
- Limitación por handover: a velocidades de hasta 1000 km/h, las aeronaves requieren cambios de celda cada pocos segundos, esto incrementa el riesgo de interrupciones temporales en la conectividad. Además, el efecto Doppler puede provocar desplazamientos en la frecuencia de la señal, generando errores en la recepción de datos, especialmente en sistemas que operan en bandas de frecuencia alta.
- Limitación por latencia: que afecta fundamentalmente a las comunicaciones SA2G, ya que los enlaces vía satélites GEO presentan retardos superiores a 250 ms, lo que afecta a las aplicaciones que requieren sincronización o respuesta en tiempo real.
- Limitación por falta de un marco regulatorio común: actualmente la asignación de bandas de frecuencia varía según la región. Esto supone una limitación para la interoperabilidad global y también encarece el coste de los equipos.

Ante este contexto, se identificaron dos líneas de viabilidad para la integración de la tecnología 5G en el entorno aeronáutico: su aplicación en redes DA2G y en enlaces SA2G. A través de simulaciones específicas para cada caso, se obtuvieron los siguientes resultados:

Las simulaciones de redes DA2G desarrolladas en Radio Mobile Online abarcaron tres fases del vuelo: despegue, crucero sobre infraestructura terrestre y transición hacia zonas oceánicas. Los resultados muestran que:

- En la fase de despegue, la aplicación de 5G sobre enlaces DA2G es viable, con una buena potencia de señal y baja atenuación. Se comprobó que, a una altitud de 1500 metros, la estación base mantenía una línea de visión directa y sin interferencias significativas con la aeronave, lo que garantiza una conexión estable desde el aeropuerto de Madrid hasta las inmediaciones del circuito del Jarama.
- En la fase de crucero, a 10.000 metros de altitud, se confirma que el sistema es capaz de mantener la conexión a largas distancias, aunque se identifican puntos donde la

zona de Fresnel queda parcialmente interrumpida. Aun así, el enlace se mantiene dentro de los márgenes operativos.

- En el enlace hacia el Atlántico, se demuestra que la conectividad con 5G sobre DA2G puede extenderse hasta el último punto con visibilidad antes de que la curvatura terrestre degrade la señal. Se visualizan zonas de pérdida progresiva debidas a la difracción y a la refracción atmosférica. Este resultado valida la necesidad de transición a SA2G en vuelos transoceánicos.

En cuanto a la aplicación de 5G en redes SA2G, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Latencia: el RTT físico mínimo calculado fue de 3.6 ms, frente a los 500–700 ms que presentan actualmente los enlaces GEO en condiciones reales. Esto confirma la ventaja del uso de satélites LEO para aplicaciones que requieren baja latencia.
- Capacidad: se obtuvieron 216 Mbps en uplink y 706 Mbps en downlink como capacidad teórica e incluso en escenarios realistas con eficiencia reducida, el throughput estimado supera ampliamente las tasas actuales disponibles en vuelo.
- Cobertura: se verificó que las constelaciones LEO, como Starlink y OneWeb, proporcionan cobertura global continua, permitiendo conectividad en zonas remotas o sin infraestructura terrestre, gracias a su elevada densidad de satélites y planificación orbital.

Capítulo 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Del desarrollo de este Trabajo Fin de Máster se extraen varias conclusiones relevantes:

En primer lugar, se constata que, a pesar de contar con décadas de desarrollo y consolidación, las comunicaciones aeronáuticas presentan limitaciones, especialmente en lo que respecta a cobertura, latencia y capacidad de adaptación a nuevos servicios digitales. Estas limitaciones evidencian un amplio margen de mejora, sobre todo si se tiene en cuenta que el entorno aeronáutico evoluciona hacia un modelo cada vez más digitalizado y centrado en la conectividad continua.

En este contexto, a lo largo del proyecto se ha comprobado cómo la tecnología 5G se presenta como una posible solución tecnológica de alto potencial, tanto en enlaces directos aire-tierra como en comunicaciones vía satélite. Las capacidades de esta tecnología en términos de velocidad, baja latencia y eficiencia espectral la posicionan como una herramienta que mejoraría la calidad, fiabilidad y disponibilidad de las comunicaciones a bordo de aeronaves, tal y como se ha demostrado en los resultados del trabajo.

No obstante, hoy en día, la adopción del 5G en el ecosistema aeronáutico presenta una serie de limitaciones, principalmente porque se trata de una industria altamente regulada donde la implantación de nuevas tecnologías requiere superar barreras como:

- La existencia de marcos normativos y de seguridad comunes a nivel internacional que garanticen la interoperabilidad y la certificación técnica de las redes de comunicaciones.
- La necesidad de garantizar la ciberseguridad de las nuevas comunicaciones, dado que la integración de tecnologías como 5G y enlaces satelitales expone al entorno aeronáutico a nuevos vectores de ataque. Será necesario implementar mecanismos robustos de autenticación, cifrado y detección de intrusiones que aseguren tanto la confidencialidad e integridad de los datos como la protección de sistemas críticos frente a accesos no autorizados.
- La adaptación de los protocolos de comunicación existentes, tanto los actuales en el ámbito aeronáutico, que deberán evolucionar para ser compatibles con las características y exigencias del 5G; como los propios protocolos del 5G que deberán ajustarse para poder operar en este entorno.
- El desembolso económico asociado al despliegue de nueva infraestructura. Esto incluye la adaptación de las estaciones base terrestres, la actualización de los sistemas de comunicación en las aeronaves (como antenas, transceptores y módulos de conectividad compatibles con 5G), así como las inversiones necesarias en la infraestructura satelital, incluyendo el desarrollo y mantenimiento de constelaciones satelitales adecuadas para enlaces SA2G de nueva generación.

Estas conclusiones evidencian que, si bien el 5G representa una oportunidad real de evolución para las comunicaciones aeronáuticas, su implementación requerirá un enfoque estratégico, colaborativo y progresivo entre los distintos actores del sector.

Como líneas de trabajo futuras se proponen las siguientes:

- **Estudiar la viabilidad económica y escalabilidad de las soluciones propuestas:** realizar un estudio detallado sobre los costes reales de implementación de infraestructura 5G en el entorno aeronáutico, así como una evaluación de la viabilidad de mercado tanto para las operadoras de red como para las aerolíneas, considerando las nuevas oportunidades de negocio que surgirían con la oferta de servicios avanzados a bordo.
- **Validación de las redes de comunicación en entornos reales y extensión del modelo:** avanzar hacia pruebas piloto en condiciones operativas reales que permitan comprobar la robustez de los enlaces y el comportamiento del 5G en vuelo. Paralelamente, sería interesante realizar un estudio más técnico y detallado, incorporando hardware específico y herramientas de simulación avanzadas para modelar con mayor precisión aspectos como interferencias, movilidad o gestión dinámica de recursos.
- **Exploración de aplicaciones futuras y nuevos modelos tecnológicos:** el despliegue del 5G podría habilitar una nueva generación de servicios a bordo, tanto para la operación de la aeronave como para la experiencia del pasajero. Entre ellos se encuentran servicios de conectividad avanzada en cabina, comunicaciones V2X (Aeronautics-to-Everything) entre aeronaves o la transmisión de datos operativos en tiempo real. Este análisis podría ampliarse para incluir algunas de las soluciones emergentes para enlaces SA2G, como las plataformas estratosféricas tipo HAPS (High-Altitude Platform Stations) o proyectos innovadores como los globos de Google Loon.

Además, aunque el estándar 5G aún se encuentra en fase de despliegue global, ya han comenzado los primeros desarrollos del futuro 6G, con expectativas de mejoras sustanciales en latencia, velocidad, eficiencia energética y cobertura global. Este contexto de evolución tecnológica refuerza la relevancia de este TFM, Entender las posibilidades, limitaciones y escenarios de uso del 5G resulta clave como paso previo para afrontar los retos que traerán las futuras generaciones de redes móviles. Así, este trabajo no solo responde a las necesidades actuales de conectividad aérea, sino que sienta las bases para futuros estudios sobre la integración del 6G en la industria aeronáutica.

Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA

3GPP. (2024). *Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks*. <http://www.3gpp.org>

5G Americas. (2022). *5G-non-terrestrial-networks*. <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2022/01/5G-Non-Terrestrial-Networks-2022-WP-Id.pdf>

Técnicas en comunicaciones digitales. Multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM). (2018). Recuperado el 16 de mayo de 2025, de <https://steemit.com/stem-espanol/@vjav55/tecnicas-en-comunicaciones-digitales-multiplexacion-por-division-de-frecuencias-ortogonales-ofdm>

Actualidad Aeroespacial. (2022). Safran se asocia con SKYFive para comercializar 5G aire-tierra en China. <https://actualidadaeroespacial.com/safran-se-asocia-con-skyfive-para-comercializar-5g-aire-tierra-en-china/>

Actualidad Aeroespacial. (2024). Primer vuelo de 5G aeronáutico integrado en un avión reactor. <https://actualidadaeroespacial.com/primer-vuelo-de-5g-aeronautico-integrado-en-un-avion-reactor/>

Aidong Yang, X., Yue, X., Wu, M., & Ouyang, Y. (2021). A dynamic Q-learning beamforming method for inter-cell interference mitigation in 5G massive MIMO networks. *ITU Journal on Future and Evolving Technologies*, 2(4), 47–55. <https://doi.org/10.52953/KXFT3962>

Alonso Llanos Yáñez. (1999). *Diseño de un sistema móvil aeronáutico de correspondencia pública*.

Aviación21. (2023, mayo). FAA reglas para evitar interferencia 5G en modelos Boeing. <https://a21.com.mx/normatividad/2023/05/16/emite-faa-reglas-para-evitar-interferencia-5g-en-modelos-boeing>

Ben Mahmoud, M. S., Pirovano, A., & Larrieu, N. (2014). Aeronautical communication transition from analog to digital data: A network security survey. *Computer Science Review*, 11–12, 1–29. <https://doi.org/10.1016/J.COSREV.2014.02.001>

Berrou, C., Glavieux, A., & Thitimajshima, P. (1993). Near SHANNON limit error-correcting coding and encoding: Turbo-codes (1). *IEEE International Conference on Communications*, 1064–1070. <https://doi.org/10.1109/ICC.1993.397441>

Bilen, T., Ahmadi, H., Canberk, B., & Duong, T. Q. (2022). Aeronautical networks for in-flight connectivity: A tutorial of the state-of-the-art and survey of research challenges. *IEEE Access*, 10, 20053–20079. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3151658>

Witte, B. (2020). The basics of 5G's modulation, OFDM. <https://www.5gtechnologyworld.com/the-basics-of-5gs-modulation-ofdm/>

Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. (2018). *Modulación y multiacceso en 5G*.

Lagunas Hernández, D. M. Á. (2019). *5G en perspectiva*.

Department of Economic and Social Affairs. (s.f.). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. Recuperado el 20 de mayo de 2025, de <https://sdgs.un.org/2030agenda>

Dinc, E., Vondra, M., Hofmann, S., Schupke, D., Prytz, M., Bovelli, S., Frodigh, M., Zander, J., & Cavdar, C. (2017). In-flight broadband connectivity: Architectures and business models for high capacity air-to-ground communications. *IEEE Communications Magazine*, 1. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-211529>

EASA. (2019). Resumen de la labor de la EASA en materia de certificación de aeronaves. <https://www.easa.europa.eu/es/light/topics/idea-sky-how-easa-ensures-aircraft-safe-fly>

Ejército del Aire. (2024). *Revista de aeronáutica y astronáutica*. <https://publicaciones.defensa.gob.es/>

El Mundo. (2022). La UE permitirá el acceso a redes 5G durante los vuelos. <https://www.elmundo.es/tecnologia/creadores/2022/11/28/6384bddafdddf94068b4593.html>

Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2018). *5G the next generation wireless access technology*. Academic Press. https://ie.u-ryukyu.ac.jp/~wada/system18/5G_Book.pdf

ETSIAE (Universidad Politécnica de Madrid). (2018). *Las telecomunicaciones aeronáuticas*.

Federal Aviation Administration. (2010). *Automatic Dependent Surveillance—Broadcast (ADS-B) Out performance requirements to support air traffic control (ATC) service*. GPO. <http://edocket.access.gpo.gov/2010/pdf/2010-12645.pdf>

Gallager, R. G. (1962). Low-density parity-check codes. *IRE Transactions on Information Theory*, 8(1), 21–28. <https://doi.org/10.1109/TIT.1962.1057683>

Barco, G. A., & Suárez, N. E. (2018). *Diseño de un sistema de telecomunicaciones tierra aire para la transmisión de información meteorológica, de aeródromo y guía en superficie vía data link para aeronaves de aviación comercial operando en el Aeropuerto el Dorado*. Universidad Piloto de Colombia.

GSMA. (2019). *Espectro 5G posición de política pública de la GSMA*.

Hernandez Carmona, G. A., & López Monjaras, C. I. (2012). Historia de la comunicación aeronáutica: del Morse al ACAR.

Hispanaviación. (2017). Comunicaciones aeronáuticas para el futuro, y más allá. *La Empresa*. <http://www.hispaviacion.es/comunicaciones-aeronauticas-para-el-futuro-y-mas-alla-2/>

IBERIA. (2023). Historia de la comunicación aeronáutica: del Morse al ACAR. <https://megustavolar.iberia.com/2023/08/16/historia-de-la-comunicacion-aeronautica-del-morse-al-acars/>

IEE. (2020). *5G workshop and demo day 5G network slicing management concept and demo*.

IoT Futura. (2018). Las comunicaciones 5G en el Internet de las cosas. <https://iotfutura.com/2018/10/iot-y-comunicaciones-5g/>

ITU. (2013). *ITU-R M.541 - Operational procedures for the use of digital selective-calling equipment in the maritime mobile service*. <https://1f8a81b9b0707b63-19211.webchannel-proxy.scarabresearch.com/md/R12-SG05-C-0267/en>

ITU-R. (2017). *Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s) M series mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services*. <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>

Reed, J. (2023). Leveraging LEO for next-generation in-flight connectivity. <https://interactive.aviationtoday.com/avionicsmagazine/july-august-2023/leveraging-leo-for-next-generation-in-flight-connectivity/>

Anguís Horno, J. J. (2008). Redes de área local inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11579/fichero/g.+Cap%C3%ADtulo+3+-+Tecnolog%C3%ADa+MIMO.pdf>

Cerezo, J., & Cerezo, P. (s.f.). El impacto del 5G. Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. Recuperado el 27 de diciembre de 2024, de <https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/>

Benson, K. (2017). Phased array beamforming ICs simplify antenna design.

Lin, X., Furuskär, A., Liberg, O., & Euler, S. (2020). Sky high 5G: New radio for air-to-ground communications. En *5G and beyond: Fundamentals and standards* (pp. 503–515). https://doi.org/10.1007/978-3-030-58197-8_17

Lin, X., Lin, Z., Löwenmark, S. E., Rune, J., & Ericsson, R. K. (2021). Doppler shift estimation in 5G new radio non-terrestrial networks.

Live Starlink Satellite Map. (s.f.). Recuperado el 24 de abril de 2025, de <https://satellitemap.space/?constellation=starlink#>

MathWorks. (s.f.). IFFT explanation. Recuperado el 7 de febrero de 2025, de <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html>

MATLAB & Simulink. (s.f.). Beamforming. Recuperado el 14 de mayo de 2025, de <https://es.mathworks.com/discovery/beamforming.html>

Microwaves101. (s.f.). Antenna design. Recuperado el 6 de mayo de 2025, de <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/antenna-design>

Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública. (s.f.). S.E. de digitalización e inteligencia artificial y S.E. de telecomunicaciones e infraestructuras digitales. Recuperado el 31 de marzo de 2025, de <https://avance.digital.gob.es/5G/Paginas/Index.aspx>

Naciones Unidas. (s.f.). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. Recuperado el 20 de mayo de 2025, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Namaskaram Kirubakaran. (2025). Enhanced mobile broadband in 5 era: Addressing demand for high-speed connectivity for the future of mobile data services.

Nokia. (2024). Use case: In-flight broadband internet access with LTE air-to-ground (A2G) solution. <https://www.nokia.com/networks/use-cases/in-flight-broadband-internet-access-with-lte-air-to-ground-a2g-solution/>

Observatorio Nacional 5G. (2020). Informe de estandarización y despliegue de 5G.

One Air. (s.f.). Qué es un NOTAM y para qué sirve en aviación. Recuperado el 3 de marzo de 2025, de <https://www.oneair.es/que-es-un-notam/>

Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO). (2011). Implementación y evolución de los servicios fijos aeronáuticos.

Perez-Neira, A. I., Vazquez, M. A., Shankar, M. R. B., Maleki, S., & Chatzinotas, S. (2019). Signal processing for high-throughput satellites: Challenges in new interference-limited scenarios. *IEEE Signal Processing Magazine*, 36(4), 112–131. <https://doi.org/10.1109/MSP.2019.2894391>

PXCom. (2024, noviembre). ATG connectivity - PXCom onboard digital services. <https://pxcom.aero/atg-connectivity-tech-challenging-satellite-dominance/>

Reuters. (2025). Eutelsat succeeds in world's first 5G network trial from space with Airbus, MediaTek. <https://www.reuters.com/technology/space/eutelsat-succeeds-worlds-first-5g-network-trial-space-with-airbus-mediatek-2025-02-24/>

Tecnous. (2020). ¿Qué es la aviónica y cómo se aplica en la aviación comercial? <https://www.tecnous.com/que-es-avionica-como-aplica-aviacion-comercial/>

Telefónica S.A. (2020). Casos de uso 5G. <https://www.telefonica.es/es/servicios/casos-de-uso-5g/>

Telefónica S.A. (2022). Qué es el 5G y cómo funciona. <https://www.telefonica.com/es/wp-content/uploads/sites/4/2021/11/como-funciona-el-5G.jpg.pdf>

Throughput and Capacity Evaluation of 5G New Radio Non-Terrestrial Networks with LEO. (s.f.). Recuperado el 9 de febrero de 2025, de https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/World-first_direct_5G_connection_to_low_Earth_orbit_satellite_opens_new_era_for_mobile_coverage?

T-Mobile. (2020). T-Mobile for business BrandVoice. <https://www.forbes.com/sites/tmobile/2022/08/19/the-next-big-thing-for-5g-is-happening-now/>

Universidad de Sevilla. (s.f.). La técnica de modulación OFDM.

US Department of Transportation. (2008). Pilot's handbook of aeronautical knowledge.

Wikipedia. (s.f.). Radar Freya. Recuperado el 5 de mayo de 2025, de https://es.wikipedia.org/wiki/Radar_Freya

Wikipedia. (2018, 3 de enero). HAPSMobile. AeroVironment. <http://www.avinc.com/resources/press-releases/view/solar-high-altitude-long-endurance-uas>

Wyatt, D., & Tooley, M. (2011a). *Aircraft communications and navigation systems: Principles, maintenance and operation*. 330.

Wyatt, D., & Tooley, M. (2011b). *Aircraft communications and navigation systems: Principles, maintenance and operation*. 330.

Capítulo 7. ANEXO A

ALINEAMIENTO CON LOS ODS

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas establece 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que buscan afrontar los grandes retos globales en materia social, económica y ambiental. La implementación de tecnologías avanzadas, como las redes 5G en la industria de la aviación, tiene un impacto directo y positivo en varios de estos objetivos, promoviendo un desarrollo sostenible y la innovación en un sector estratégico.



Ilustración 42. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: (Witte, 2020; Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2018)

Contribución a ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura

El presente proyecto impulsa el ODS 9, que promueve la construcción de infraestructuras resilientes, la industrialización sostenible y la innovación. La integración de redes 5G en la aviación representa un avance tecnológico significativo, al mejorar las comunicaciones aire-tierra mediante enlaces directos y satelitales. Esta innovación facilita operaciones más eficientes, seguras y conectadas, fortaleciendo la infraestructura tecnológica del sector aeronáutico.

Además, las mejoras en latencia, capacidad y fiabilidad de las comunicaciones permiten desarrollar nuevos servicios y aplicaciones que optimizan la gestión de vuelos, el mantenimiento predictivo y la experiencia del pasajero, promoviendo una industria aeronáutica más inteligente y sostenible.

Impacto en ODS 13: Acción por el Clima

Aunque el objetivo principal del proyecto es la mejora de las comunicaciones, la implementación de redes 5G puede contribuir indirectamente a la mitigación del cambio climático, alineándose con el ODS 13. La optimización de operaciones aéreas mediante comunicaciones más eficientes puede traducirse en rutas más cortas, un mejor control del tráfico aéreo y una reducción en el consumo de combustible y emisiones de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, el desarrollo de tecnologías de comunicación avanzadas también puede facilitar la implementación de sistemas de monitoreo ambiental y mantenimiento predictivo que contribuyan a la sostenibilidad del sector.

Aporte a ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles

El proyecto favorece la conectividad y la integración de la aviación con redes terrestres y satelitales, lo que impacta en el ODS 11 al mejorar la conectividad urbana y regional. Una aviación mejor conectada contribuye a la movilidad sostenible de personas y mercancías, facilitando el acceso a servicios y generando beneficios sociales y económicos en las comunidades.

Relación con ODS 17: Alianzas para Lograr los Objetivos

La colaboración entre diferentes actores: fabricantes, operadores, reguladores y proveedores de tecnología, es esencial para el éxito de la implementación de redes 5G en aviación. Este trabajo promueve la cooperación multisectorial necesaria para desarrollar e implementar soluciones innovadoras y sostenibles que contribuyan al cumplimiento de los ODS.

En resumen, este proyecto no solo representa un avance tecnológico relevante para la industria aeronáutica, sino que también se alinea claramente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, impulsando la innovación, la sostenibilidad y la colaboración en un sector clave para la conectividad global. La integración de redes 5G en la aviación tiene el potencial de transformar las comunicaciones y operaciones aéreas, contribuyendo así a un desarrollo más eficiente, seguro y respetuoso con el medio ambiente, en línea con la visión global de un futuro sostenible para todos (Department of Economic and Social Affairs, n.d.; Naciones Unidas, n.d.).

Capítulo 8. ANEXO B

8.1 EVOLUCIÓN DE LAS TELECOMUNICACIONES EN LA AVIACIÓN.

RADIO RECEPTOR DE MARCONI

Estos equipos permitían la recepción de señales de radio en distintas bandas de frecuencia, facilitando la comunicación aire-tierra y la navegación aérea. En la aviación, este tipo de receptores se empleaban en aeronaves comerciales y militares para establecer contacto con torres de control, recibir información meteorológica y coordinar rutas de vuelo. Su uso fue fundamental en la evolución de la comunicación aeronáutica, contribuyendo a la seguridad y eficiencia del tráfico aéreo.

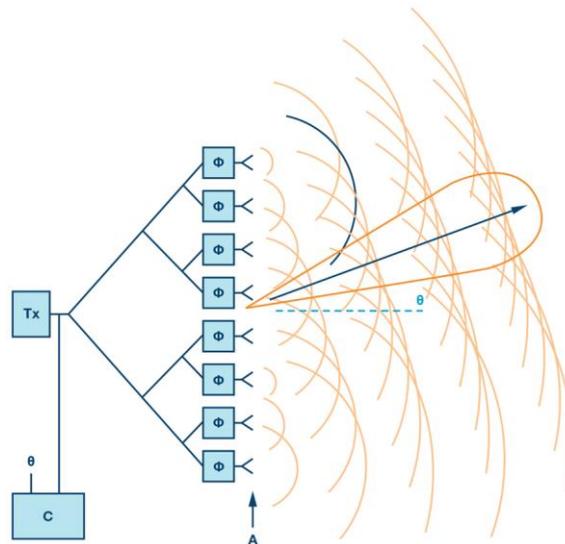


Ilustración 43 Radio receptor de Marconi. Fuente: Museo de Telecomunicación ETSIT-UPM Profesor Joaquín Serna

8.2 ASPECTOS TÉCNICOS DEL 5G

BEAMFORMING

Técnica utilizada en sistemas de comunicación inalámbrica que permite mejorar la eficiencia y el alcance de las comunicaciones al dirigir la señal de transmisión en una dirección específica, típicamente mediante el uso de múltiples antenas que permiten formar un “haz” orientado al dispositivo objetivo (Yang et al., 2021). Tal y como se muestra en la imagen, la matriz de antenas permite ajustar la fase de las señales emitidas para dirigir el lóbulo de radiación en una dirección específica. Mediante el control de fase, se produce la interferencia constructiva de las señales, que interfieren en la dirección deseada, maximizando la ganancia y reduciendo la interferencia.



Principio del beamforming. Fuente: Benson, 201)

NETWORK SLICING

Es una funcionalidad clave en las redes 5G que permite crear múltiples redes virtuales e independientes sobre una misma infraestructura física. Cada “slice” o segmento está diseñado para adaptarse a unos requerimientos específicos de rendimiento, latencia y capacidad (IEE, 2020).

MIMO MASIVO

El MIMO masivo (Multiple-Input Multiple-Output) es una tecnología que utiliza un gran número de antenas en las estaciones base para mejorar la capacidad y eficiencia de redes inalámbricas, esto permite mejorar la eficiencia espectral y la cobertura, pudiendo establecer distintas conexiones simultáneas.

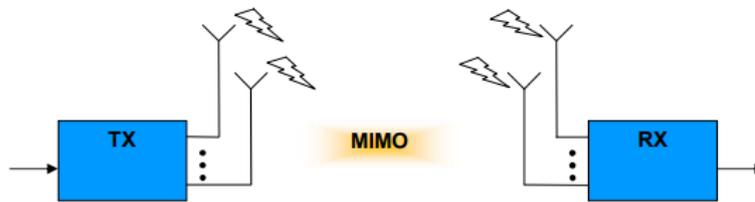


Ilustración 44 Diagrama de un sistema MIMO. Fuente: Anguís Horno, 2008

8.3 TECNOLOGÍAS ASOCIADAS AL USO DEL ESPECTRO

Una vez hemos introducido las distintas bandas que se utilizan en 5G, podemos comentar brevemente las tecnologías que habilitan tanto el uso del espectro como la capacidad de transmisión de cada una de las bandas, a continuación, se mencionan las más relevantes.

MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN EN LA FRECUENCIA OFDM

Esta técnica es fundamental en la tecnología 5G. Consiste en la transmisión de múltiples subportadoras ortogonales en paralelo (esta ortogonalidad permite que las subportadoras se superpongan en frecuencia sin interferir entre ellas, optimizando el uso del espectro disponible). OFDM fusiona las ventajas de la Modulación por Amplitud en Cuadratura (QAM) y la Multiplexación por División de Frecuencia (FDM) para crear un sistema de comunicación de alta tasa de datos.

Por un lado, QAM incluye modulaciones específicas como BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, entre otras, y FDM a su vez, permite que múltiples canales de comunicación coexistan asignando una porción del espectro de frecuencia a cada canal (Witte, 2020; Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2018).

En las redes 5G, se implementa OFDM en el transmisor y en el receptor. El transmisor se encarga de generar las señales OFDM modulando las subportadoras con los datos del usuario, y en el receptor se demodulan estas señales para obtener los datos originales.

A modo de ilustración, en la siguiente imagen se muestra la estructura de OFDM en el dominio del tiempo y frecuencia, podemos observar cómo el ancho de banda se divide en múltiples subportadoras ortogonales que se combinan utilizando la IFFT¹⁵ y generar la señal OFDM.

¹⁵ IFFT (Inverse Fast Fourier Transform o Transformada Rápida de Fourier Inversa): algoritmo que calcula la transformada de Fourier discreta inversa (IDFT) de una secuencia de datos. La IFFT convierte datos del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, permitiendo reconstruir la señal original a partir de su representación en frecuencia. Este proceso es esencial para la modulación y transmisión de señales en tecnologías como el 5G (MathWorks, n.d.).

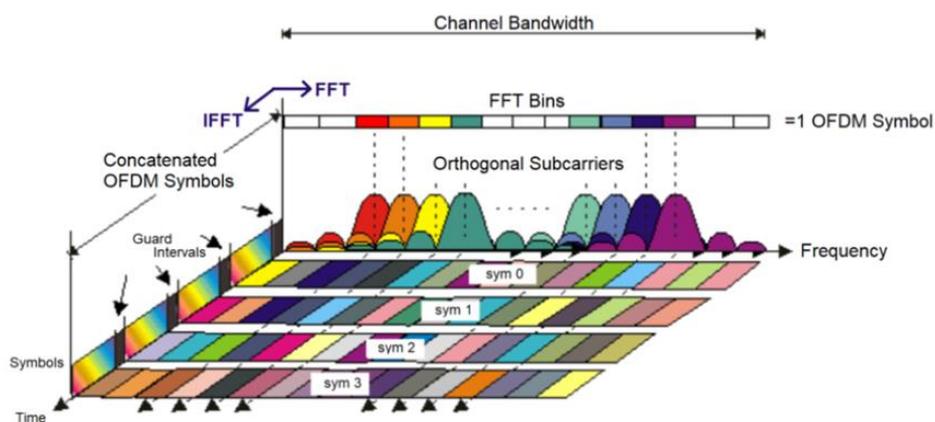


Ilustración 45. Esquema de modulación OFDM. Fuente: Técnicas en comunicaciones digitales – Multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM), n.d.

FORMACIÓN DE HAZ (BEAMFORMING)

En las bandas milimétricas (mmWave), se utilizan antenas MIMO avanzadas y formación de haz para dirigir las señales hacia los usuarios específicos, esto permite maximizar la eficiencia espectral y reducir la interferencia (Cerezo & Cerezo, n.d.).

AGREGACIÓN DE PORTADORAS

Esta técnica permite combinar múltiples bandas de frecuencia, aprovechando tanto la cobertura de las bandas bajas como la capacidad de las bandas medias y milimétricas para garantizar un servicio continuo y de alta calidad (Dahlman et al., 2018; Telefónica S.A, 2022).

REDUCCIÓN DE INTERFERENCIAS

Técnicas como el uso de prefijos cíclicos¹⁶ (CP) y algoritmos avanzados de gestión de interferencias son esenciales en escenarios densos donde se superponen múltiples celdas pequeñas (Lagunas Hernández, 2019).

¹⁶ El prefijo cíclico (CP) se utiliza en las modulaciones OFDM para eliminar los efectos producidos por la interferencia intersimbólica (ISI) (Universidad de Sevilla, n.d.).

8.4 SIMULACIONES DE ESCENARIOS. AMPLIACIÓN DE RESULTADOS

DA2G

Se incluyen los resultados detallados obtenidos en la herramienta software para cada uno de los tres escenarios:

Estudio del radio enlace durante el despegue Madrid-Cto Jarama 1500m			
Estacion base aeropuerto Madrid (1)		(2) Avion despegue sobre Cto Jarama	
Latitud	40.491610 °	Latitud	40.616005 °
Longitud	-3.589783 °	Longitud	-3.584419 °
Elevación del terreno	606.1 m	Elevación del terreno	609.0 m
Altura de la antena	20.0 m	Altura de la antena	1500.0 m
Azimuth	1.87 TN 1.94 MG °	Azimuth	181.88 TN 181.95 MG °
Inclinación	6.05 °	Inclinación	-6.18 °
Sistema de radio		Propagation	
Potencia TX	43.01 dBm	Pérdida en espacio libre	114.38 dB
Pérdida en cable TX	2.00 dB	Pérdida por obstrucción	-5.63 dB
Ganancia de antena TX	6.00 dBi	Pérdida por bosque	0.00 dB
Ganancia de antena RX	2.00 dBi	Pérdida por urbanización	0.00 dB
Pérdida en cable RX	1.00 dB	Pérdida estadística	16.27 dB
Sensibilidad RX	-108.51 dBm	Pérdida total	125.02 dB
Performance			
Distance			13.840 km
Precisión			10.0 m
Frecuencia			902.000 MHz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente			50.238 W
Ganancia del sistema			156.52 dB
Fiabilidad requerida			90.000 %
Señ recibida			-77.01 dBm
Señ recibida			31.58 µV
Márgen de escucha			31.50 dB

Ilustración 46 Ampliación resultados simulación i.

Avion en crucero Madrid-Zamora 10000m			
Estacion base aeropuerto Madrid (1)		(2) Avion crucero sobre Zamora 10000m	
Latitud	40.491610 °	Latitud	41.505997 °
Longitud	-3.589783 °	Longitud	-5.744133 °
Elevación del terreno	606.1 m	Elevación del terreno	660.0 m
Altura de la antena	20.0 m	Altura de la antena	10000.0 m
Azimuth	302.66 TN 302.73 MG °	Azimuth	121.25 TN 121.98 MG °
Inclinación	1.74 °	Inclinación	-3.65 °
Sistema de radio		Propagation	
Potencia TX	43.01 dBm	Pérdida en espacio libre	138.08 dB
Pérdida en cable TX	2.00 dB	Pérdida por obstrucción	-2.48 dB
Ganancia de antena TX	6.00 dBi	Pérdida por bosque	0.00 dB
Ganancia de antena RX	2.00 dBi	Pérdida por urbanización	0.00 dB
Pérdida en cable RX	1.00 dB	Pérdida estadística	15.67 dB
Sensibilidad RX	-108.51 dBm	Pérdida total	151.27 dB
Performance			
Distance			213.085 km
Precisión			106.5 m
Frecuencia			902.000 MHz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente			50.238 W
Ganancia del sistema			156.52 dB
Fiabilidad requerida			90.000 %
Señ recibida			-103.26 dBm
Señ recibida			1.54 µV
Márgen de escucha			5.25 dB

Ilustración 47. Resultados simulación ii

Avión sobre Atlántico			
Estacion base Costa (1)		(2) Avión sobre Atlántico	
Latitud	43.155580 °	Latitud	43.917674 °
Longitud	-9.210848 °	Longitud	-11.175842 °
Elevación del terreno	15.1 m	Elevación del terreno	0.0 m
Altura de la antena	20.0 m	Altura de la antena	10000.0 m
Azimuth	298.82 TN 300.69 MG °	Azimuth	117.47 TN 120.05 MG °
Inclinación	2.36 °	Inclinación	-3.98 °
Sistema de radio		Propagation	
Potencia TX	43.01 dBm	Pérdida en espacio libre	136.61 dB
Pérdida en cable TX	2.00 dB	Pérdida por obstrucción	-5.98 dB
Ganancia de antena TX	6.00 dBi	Pérdida por bosque	0.00 dB
Ganancia de antena RX	2.00 dBi	Pérdida por urbanización	0.00 dB
Pérdida en cable RX	1.00 dB	Pérdida estadística	15.69 dB
Sensibilidad RX	-108.51 dBm	Pérdida total	146.32 dB
Performance			
Distance			179.633 km
Precisión			89.8 m
Frecuencia			902.000 MHz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente			50.238 W
Ganancia del sistema			156.52 dB
Fiabilidad requerida			90.000 %
Señal recibida			-98.31 dBm
Señal recibida			2.72 µV
Márgen de escucha			10.21 dB

Ilustración 48 Resultados simulación iii

SA2G: CÁLCULO PARÁMETROS DEL ENLACE UPLINK

De la misma manera en la que se han calculado los parámetros del enlace downlink, en primer lugar, se calculan las pérdidas de espacio libre:

$$FSPL = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 92.45 = 176,64 \text{ dB}$$

Los terminales de enlaces satelitales compactos (por ejemplo, los que podrían ir montados en un avión) suelen operar en el rango de 1 a 20 W para transmisores en banda Ka o Ku, por lo tanto, para este caso, utilizaremos el valor de 10W de potencia transmitida.

$$EIRP_{dBW} = P_{tx_{dBW}} + G_{tx_{dB}} = 50 \text{ dBW}$$

La potencia recibida en el satélite, se calcula con la siguiente fórmula:

$$Prx = EIRP - FSPL - L_{adiccionales} + Grx = -115.23 \text{ dBW}$$

En este caso, la ganancia de transmisión es la ganancia de la antena del avión, $Grx = 40 \text{ dB}$. Calculamos la potencia total de ruido en el canal, que se compara con la señal recibida para obtener el SNR:

$$N0_{dBW/Hz} = 10\log(k * T_{sistema}) = -201.61 \text{ dBW/Hz}$$

$$N_{dBW} = N0_{dBW/Hz} + 10\log_{10}(BW)$$

Siendo $T_{sistema} = 500 \text{ K}$, que es el valor típico para un receptor satelital, y el ancho de banda el de un sistema en banda Ka, $BW = 100 \text{ MHz}$, obtenemos una potencia de ruido total:

$$N_{dBW} = -121,61 \text{ dBW}$$

Calculamos también la relación señal a ruido con la siguiente fórmula:

$$SNR_{dB} = Prx_{dBW} - N_{dBW} = 6.38 \text{ dB}$$

Se estima la capacidad teórica máxima del canal utilizando la fórmula de Shannon, incorporando un margen de 1 dB que tiene en cuenta las pérdidas asociadas al uso turbo códigos y LDPC:

$$SNR_{\text{útil}} = 5.38 \text{ dB}$$

Por último, calculamos el valor de la capacidad máxima teórica del canal en condiciones ideales a través de la siguiente fórmula:

$$C = BW * \log_2(1 + SNR_{\text{útil}}) = 216 \text{ Mbps}$$

Los valores obtenidos para el enlace se resumen en la siguiente tabla:

LEO (enlace uplink)	
Distancia avión-satélite	540 km
FSPL	176.64 dB
Potencia recibida	-115.23 dBW
SNR	6.38 dB
Capacidad teórica	216 Mbps

Ilustración 49. Parámetros del enlace uplink avión- satélite LEO

RECOMENDACIÓN DE LA ITU-R P.372-17

La Recomendación ITU-R P.372-13 establece los niveles esperados de temperatura de ruido para distintos escenarios, como el ruido galáctico, el fondo cósmico y, especialmente, el caso en el que una antena de haz estrecho está directamente orientada hacia el Sol. Este último caso es crítico, ya que puede incrementar la temperatura del sistema planteado hasta valores del orden de 3000 K, lo que implica una degradación considerable de la sensibilidad del receptor.

La siguiente figura muestra el gráfico oficial de dicha recomendación, donde se observan las curvas de temperatura de ruido para diferentes fuentes:

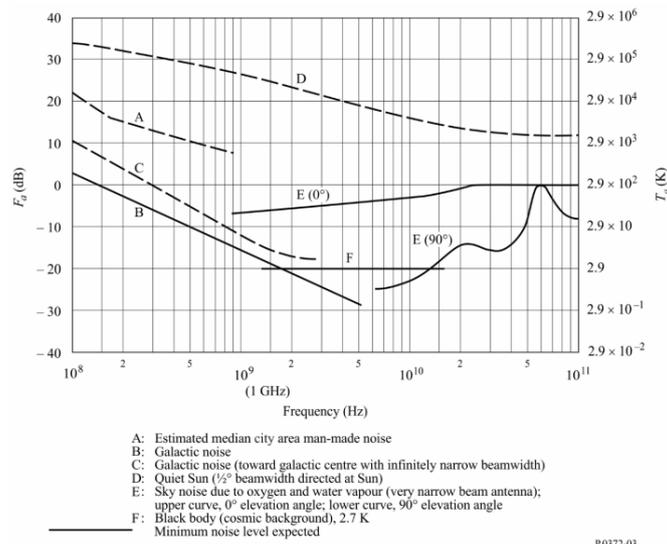


Ilustración 50. Recomendación de la ITU-R P.372-17