

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Simulación de cobertura de vuelo entre los aeropuertos de Sevilla y Estocolmo utilizando la constelación Iridium NEXT

Autor: Diego Baquero Sanz

Tutor: José Antonio Pérez Carrasco

Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Simulación de cobertura de vuelo entre los aeropuertos de Sevilla y Estocolmo utilizando la constelación Iridium NEXT

Autor:

Diego Baquero Sanz

Tutor:

José Antonio Pérez Carrasco

Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado: Simulación de cobertura de vuelo entre los aeropuertos de Sevilla y Estocolmo
utilizando la constelación Iridium NEXT

Autor: Diego Baquero Sanz

Tutor: José Antonio Pérez Carrasco

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

A mi familia

A mis amigos

A mis maestros

Agradecimientos

Este trabajo supone el broche final a lo que para mí ha sido una de las etapas más duras, pero también más satisfactorias y gratificantes, de mi vida como estudiante. Y aunque en el trayecto ha habido muchos obstáculos, ha sido gracias al apoyo de multitud de personas que he conseguido llegar hasta aquí.

En primer lugar, querría agradecerles a mis padres y hermanos, quiénes me han apoyado en todo momento y me han impulsado siempre a encontrar la mejor versión de mí mismo. También a mis amigos, tanto los de la carrera como los de siempre, porque si con algo me quedo de esta etapa de mi vida, es con las amistades y experiencias que hemos forjado juntos.

También quiero extenderles mi agradecimiento a los profesores del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, y en especial, a Juan Antonio Becerra González, Ramón Cerquides Bueno, María José Madero Ayora, y José Antonio Pérez Carrasco. Gracias por ayudarme a entender la belleza, genialidad y pasión que hay tras la tecnología que ha permitido revolucionar nuestra sociedad.

Diego Baquero Sanz

Sevilla, 2024

Si hubiese una palabra que pudiese describir a la sociedad de hoy día, esta sería “interconectada”. Poder comunicarse con alguien situado en las antípodas del planeta, el control automático de innumerables máquinas y dispositivos, o la mera existencia de Internet son avances que hasta hace unas décadas parecían inalcanzables. Todo esto ha sido posible gracias al enorme desarrollo que ha habido en el mundo de las telecomunicaciones, dentro del cual la tecnología satelital se postula como una de las principales candidatas para continuar permitiendo a la humanidad lograr lo que hasta hace poco no eran más que sueños.

La aparición de los primeros satélites de comunicación se remonta a finales de los años 50, con la puesta en órbita del **Sputnik I**. Aunque en un inicio las prestaciones y costes de estos dispositivos los hacían inviables para su uso comercial a escala global, el desarrollo de las primeras constelaciones en órbitas LEO (*Low Earth Orbit*) en los años 90 hicieron mucho más accesible esta tecnología para las empresas y el público general. En este contexto, destacan la constelación **Iridium**, compuesta por 66 satélites equidistribuidos en 6 órbitas a 780 km de altitud; su actualización **Iridium NEXT**, capaz de alcanzar capacidades de hasta 704 kbps; y otras más recientes como **Starlink**, de la estadounidense *SpaceX*; u **O3b**, del fabricante europeo *Thales Alenia*.

Son muchas las aplicaciones que tienen esta nueva generación de constelaciones satelitales, desde proveer de conexión a áreas remotas del planeta, hasta ayudar a la monitorización de la superficie terrestre. No obstante, si hubiera que elegir un sector en el que esta tecnología ha venido adquiriendo un rol fundamental, ese sería el de la **aviación**, en el que ha permitido reducir considerablemente la latencia de las comunicaciones tanto entre aviones como con los centros de control, especialmente cuando se está en situación de vuelo, lejos de las zonas de cobertura que proveen los aeropuertos.

En este contexto, una de las mayores innovaciones tecnológicas introducidas por la tecnología satelital en el panorama aeronáutico han sido los sistemas **ADS-B** (*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*). Esta nueva generación de sistemas de posicionamiento se basa en la transmisión automática de datos por parte de la aeronave, de manera que tanto los equipos de control terrestres como otros aviones que estén en las proximidades puedan tomar las medidas de guiado y precaución adecuadas. Asimismo, los requerimientos técnicos de esta nueva tecnología son mucho menores que los de los sistemas de radar tradicionales, lo que facilita enormemente su implementación en constelaciones satelitales, donde las limitaciones en cuanto al peso y a la potencia son mucho más notables que en tierra.

Así, el objetivo de este Trabajo Fin de Grado es el análisis en profundidad de este tipo de comunicaciones avión-satélite. Para ello se estudiará el caso de un vuelo de unas 4 horas entre los aeropuertos de Sevilla y el de Estocolmo-Arlanda, utilizando como soporte para las comunicaciones la constelación **Iridium NEXT**. Asimismo, para las simulaciones se empleará **MATLAB**, valiéndose principalmente de los toolboxes de comunicaciones vía satélite (*Satellite Communications Toolbox*), y del de análisis de la capa física de los sistemas de telecomunicación (*Communication Toolbox*).

Abstract

If there was a word that could describe nowadays' society, that would be "interconnected". Being able to communicate with someone located on the planet's antipodes, the automatic control of countless machines and devices, or the mere existence of the Internet are breakthroughs that just some decades ago seemed unattainable. All this has been made possible thanks to the breathtaking development that has occurred in the world of telecommunications, in which satellite technology postulates itself as one of the main candidates to let humanity attain what not so long ago was nothing more than dreams.

The first communications satellites trace back to the late 50's, when the **Sputnik I** was put into orbit. Even if in the beginning the performance and cost of these devices made them unviable for their commercial use at a global scale, the development of the first LEO (*Low Earth Orbit*) constellations in the 90's made this technology much more accessible for companies and the general public. In this context, some standouts are the **Iridium** constellation, made of 66 satellites equally distributed in 6 orbits at an altitude of 780 km; its actualization **Iridium NEXT**, able to reach up to 704 kbps of capacity; and other more recent ones such as **Starlink**, from the American *SpaceX*, or **O3b**, from the European manufacturer *Thales Alenia*.

Many are the applications of this new generation of satellite constellations, ranging from providing with connectivity remote areas of the planet, to helping monitor the Earth's surface. However, if we had to choose a field in which this technology has been acquiring a fundamental role, that would be the **aviation sector**, in which it has helped to reduce considerably the latency of both, the communications between aircrafts and the communications with the control towers, especially when in flight, far from the coverage zones provided by the airports.

In this context, one of the main technological innovations introduced by the satellite technology in the aeronautical landscape has been the **ADS-B** (*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*) systems. This new generation of positioning systems is based on automatic data transmission by the aircraft, so then both, the ground control team and other planes on its vicinity, are able to take whichever guiding and security measures are needed. Furthermore, the technical requirements of this new technology are much lower than those of traditional radars, which greatly eases its implementation in satellite constellations, where the limitations regarding weight and power are much steeper than on Earth.

Therefore, the objective of this Final Degree Project is the profound analysis of this type of plane-satellite communications. For it, the case in study will be that of a 4-hour flight between the airports of Seville and of Stockholm-Arlanda, using the **Iridium NEXT** constellation as the backbone for the communications. Apart from that, the simulations will be run on **MATLAB**, utilising mainly the toolboxes of satellite communications (*Satellite Communications Toolbox*), and of analysis of the physical layer of telecommunications systems (*Communication Toolbox*).

ÍNDICE ABREVIADO

Agradecimientos	IX
Resumen	XI
Abstract	XIII
Índice Abreviado	XV
Índice	XVII
Índice de Tablas	XIX
Índice de Figuras	XX
Índice de Abreviaturas	XXIII
1. Introducción	1
1.1. <i>Motivaciones del trabajo</i>	1
1.2. <i>Objetivos</i>	1
1.3. <i>Metodología empleada y organización del trabajo</i>	1
2. Marco teórico	4
2.1. <i>Introducción a las comunicaciones vía satélite</i>	4
2.2. <i>La constelación Iridium. Historia y especificaciones técnicas</i>	5
2.3. <i>La constelación Iridium NEXT. Historia y especificaciones técnicas</i>	8
2.4. <i>Aplicaciones de la constelación Iridium NEXT</i>	10
3. Análisis del caso práctico	14
3.1. <i>Preparación del escenario satelital</i>	14
3.2. <i>Análisis de las Comunicaciones</i>	17
4. Resultados del estudio	27
4.1. <i>Conclusiones sobre la viabilidad del sistema</i>	27
4.2. <i>Propuestas alternativas</i>	28
Referencias	36
Anexo A	39

Agradecimientos	IX
Resumen	XI
Abstract	XIII
Índice Abreviado	XV
Índice	XVII
Índice de Tablas	XIX
Índice de Figuras	XX
Índice de Abreviaturas	XXIII
1. Introducción	1
1.1. <i>Motivaciones del trabajo</i>	1
1.2. <i>Objetivos</i>	1
1.3. <i>Metodología empleada y organización del trabajo</i>	1
2. Marco teórico	4
2.1. <i>Introducción a las comunicaciones vía satélite</i>	4
2.2. <i>La constelación Iridium. Historia y especificaciones técnicas</i>	5
2.3. <i>La constelación Iridium NEXT. Historia y especificaciones técnicas</i>	8
2.4. <i>Aplicaciones de la constelación Iridium NEXT</i>	10
2.4.1. <i>Sistema ADS-B</i>	10
2.4.2. <i>Sistema AIS</i>	11
2.4.3. <i>Sistema GEOScan</i>	11
3. Análisis del caso práctico	14
3.1. <i>Preparación del escenario satelital</i>	14
3.1.1. <i>Creación del escenario satelital</i>	14
3.1.2. <i>Definición de la trayectoria del avión</i>	15
3.1.3. <i>Introducción de la constelación Iridium NEXT en la simulación</i>	16
3.2. <i>Análisis de las Comunicaciones</i>	17
3.2.1. <i>Estudio de los intervalos de conexión con los aeropuertos</i>	17
3.2.2. <i>Estudio de los intervalos de conexión con la constelación Iridium NEXT</i>	17
3.2.3. <i>Análisis del radioenlace entre el avión y las estaciones terrenales</i>	19
3.2.4. <i>Análisis del radioenlace entre el avión y la constelación</i>	21
3.2.5. <i>Análisis del margen señal a ruido del sistema</i>	23
4. Resultados del estudio	27
4.1. <i>Conclusiones sobre la viabilidad del sistema</i>	27
4.2. <i>Propuestas alternativas</i>	28
4.2.1. <i>Soluciones con sistemas en órbitas LEO</i>	28
4.2.2. <i>Soluciones con sistemas en órbitas MEO y GEO</i>	32
Referencias	36
Anexo A	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Parámetros de la simulación ADS-B del vuelo Sevilla-Estocolmo

25

ÍNDICE DE FIGURAS

2. Marco teórico	4
<i>Figura 2.1. Ejemplo del funcionamiento de la tecnología multihaz</i>	4
<i>Figura 2.2. Esquema sobre la arquitectura de los sistemas de comunicación por satélite</i>	5
<i>Figura 2.3. Imagen de un satélite Iridium de primera generación</i>	6
<i>Figura 2.4. Constelaciones de una modulación BPSK (izquierda) y QPSK (derecha)</i>	7
<i>Figura 2.5. Esquema explicativo sobre TDMA y FDMA</i>	7
<i>Figura 2.6. Ejemplo de enlaces intersatelitales de la constelación Iridium</i>	7
<i>Figura 2.7. Diagrama ilustrativo de los planos orbitales de la constelación Iridium</i>	8
<i>Figura 2.8. Recreación de un satélite Iridium NEXT, junto con sus características principales</i>	8
<i>Figura 2.9. Esquema con las fases del lanzamiento de los distintos satélites Iridium NEXT</i>	9
<i>Figura 2.10. Esquema de funcionamiento de sistema ADS-B con soporte en la constelación Iridium NEXT</i>	10
<i>Figura 2.11. Esquema del sistema de seguimiento AIS</i>	11
<i>Figura 2.12. Esquemático de un sensor GEOScan y sus componentes</i>	12
3. Análisis del caso práctico	14
<i>Figura 3.1. Satellite Scenario Viewer con los dos aeropuertos definidos como estaciones terrenales</i>	14
<i>Figura 3.2. Representación de los movimientos de pitch y bank de un avión.</i>	15
<i>Figura 3.3. Proyección sobre la superficie terrestre de la trayectoria seguida por el avión</i>	15
<i>Figura 3.4. Detalle de la trayectoria del vuelo y del avión en el Satellite Scenario Viewer</i>	16
<i>Figura 3.5. Representación del escenario satelital una vez incluida la constelación Iridium NEXT</i>	16
<i>Figura 3.6. Resultados del estudio del enlace de acceso entre el avión y las estaciones terrenales</i>	17
<i>Figura 3.7. Representación de la zona de cobertura de un sensor cónico satelital</i>	18
<i>Figura 3.8. Resultados tabulados del estudio de enlace entre el avión y los satélites</i>	18
<i>Figura 3.9. Representación de los intervalos de visibilidad entre el avión y los satélites</i>	18
<i>Figura 3.10. Captura del Satellite Scenario Viewer en la que se muestran los satélites de conexión en un momento determinado de la simulación</i>	19
<i>Figura 3.11. Áreas de cobertura ADS-B del aeropuerto de Sevilla</i>	20
<i>Figura 3.12. Áreas de cobertura ADS-B del aeropuerto de Estocolmo-Arlanda</i>	20
<i>Figura 3.13. Representación sobre el Satellite Scenario Viewer del alcance de los sistemas ADS-B terrenales</i>	21
<i>Figura 3.14. Captura de los patrones de radiación del sistema empleando todos sus elementos antenas isotrópicas</i>	21
<i>Figura 3.15. Catálogo de antenas disponibles en el Antenna Toolbox de MATLAB</i>	22
<i>Figura 3.16. Representación del patrón de radiación, visto desde el azimut, de una antena gaussiana genérica</i>	22
<i>Figura 3.17. Captura de los patrones de radiación de los satélites con antenas de 48 haces</i>	23
<i>Figura 3.18. Resultados del cálculo de la relación E_b/N_0 del UL</i>	24
<i>Figura 3.19. Gráfica del margen de la relación E_b/N_0 del UL con respecto al tiempo</i>	24
<i>Figura 3.20. Gráfica del margen de la relación E_b/N_0 del DL con respecto al tiempo</i>	25
4. Resultados del estudio	27
<i>Figura 4.1. Coordenadas temporales del UL entre las cuales no es posible la comunicación</i>	27
<i>Figura 4.2. Coordenadas temporales del DL entre las cuales no es posible la comunicación</i>	27
<i>Figura 4.3. Margen entre las relaciones E_b/N_0 del UL para 500 W</i>	28
<i>Figura 4.4. Margen entre las relaciones E_b/N_0 del DL para 500 W</i>	29
<i>Figura 4.5. Proyección sobre la superficie terrestre de la trayectoria seguida por el avión</i>	29
<i>Figura 4.6. Gráfica con los intervalos de visibilidad entre el avión y los satélites de la constelación</i>	30
<i>Figura 4.7. Captura del escenario satelital correspondiente al vuelo entre Nueva York y las Bermudas</i>	30
<i>Figura 4.8. Margen de las relaciones E_b/N_0 del UL para 500 W</i>	30
<i>Figura 4.9. Margen de las relaciones E_b/N_0 del DL para 500 W</i>	31
<i>Figura 4.10. Resultados del estudio del enlace de acceso entre el avión y los aeropuertos</i>	31
<i>Figura 4.11. Diagrama de la constelación O3b</i>	32

Figura 4.12. Representación de la zona de cobertura sobre la superficie de los haces S11DL, S19DL y S28DL del satélite Inmarsat-5 F1	32
Figura 4.13. Representación de la órbita y posición en tiempo real del satélite Inmarsat-5 F1 [20]	33
Figura 4.14. Área de cobertura de la constelación O3b	33
Figura 4.15. Periodos de LoS entre el avión y el satélite Inmarsat-5 F1	34
Figura 4.16. Margen entre las relaciones E_b/N_0 del UL entre el avión y el satélite Inmarsat-5 F1	34
Anexo A	39
Figura A.1. Definición del escenario satelital y sus características temporales	39
Figura A.2. Definición de la posición de los aeropuertos origen y destino	39
Figura A.3. Comandos para el cálculo de la trayectoria del vuelo del avión	39
Figura A.4. Extracto del código para añadir el avión y su trayectoria al esquema satelital	40
Figura A.5. Código para la generación de una constelación de satélites igual a la constelación Iridium NEXT	40
Figura A.6. Detalle del código para el estudio del enlace de acceso del avión con los aeropuertos	41
Figura A.7. Codificación de los sensores cónicos para los satélites Iridium NEXT	41
Figura A.8. Código para el estudio del enlace de acceso entre el avión y la constelación de satélites	41
Figura A.9. Código para la representación de los intervalos de acceso con la constelación	41
Figura A.10. Definición y configuración de los sistemas ADS-B del avión y de los aeropuertos	41
Figura A.11. Configuración de antenas isotrópicas en los satélites	42
Figura A.12. Parámetros para la caracterización inicial de los haces	42
Figura A.13. Código para la generación del patrón de radiación del array para los haces centrales	42
Figura A.14. Definición final de la antena multihaz que irá sobre los satélites de la constelación	43
Figura A.15. Configuración sobre el código principal de las antenas de 48 haces de los satélites	43
Figura A.16. Comandos para el análisis de la relación E_b/N_0 del UL y el DL	43
Figura A.17. Definición de las características orbitales del satélite GEO Inmarsat-5 F1	44

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ADS-B: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast	1
BPS: Bits Por Segundo	6
BPSK: Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria	6
DL: Enlace de Bajada	6
FDMA: Acceso Múltiple por División en Frecuencia	4
GEO: Órbita Geoestacionaria	32
LEO: Baja Órbita Terrestre	4
LoS: Línea de Vista	1
MEO: Media Órbita Terrestre	32
PIRE: Potencia Isotrópica Radiada Equivalente	19
QPSK: Modulación por Desplazamiento de Fase Cuadrática	6
TDM: Multiplexación por División en Tiempo	9
TDMA: Acceso Múltiple por División en Tiempo	4
UL: Enlace de Subida	6

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivaciones del trabajo

Hoy en día las telecomunicaciones han tomado un papel protagonista en nuestra sociedad, estando cada vez más presentes en todos los ámbitos de la misma. Y es que, esta tecnología es una de las principales responsables del advenimiento de la llamada Sociedad de la Información, en la que servicios como la conectividad de banda ancha, o el tener cobertura en cualquier punto del planeta, se han convertido en necesidades imprescindibles para una gran parte de la población.

En este contexto de auge tecnológico, la principal motivación de este trabajo es, enfocándose en un sector concreto como es el de la aviación; estudiar desde un punto de vista práctico como la aparición de nuevos sistemas de telecomunicaciones, tales como las constelaciones satelitales en órbita baja, han permitido el desarrollo de dispositivos capaces de superar las prestaciones de la tecnología de radionavegación y radiocomunicación previamente existente. Para ello se estudiará en detalle, a partir de diferentes simulaciones, cómo se comportarían los sistemas ADS-B de un vuelo comercial entre los aeropuertos de Sevilla y Estocolmo-Arlanda usando como apoyo la constelación Iridium NEXT, lo que permitirá extraer una conclusión formada con respecto a la viabilidad técnica de esta nueva tecnología de aeronavegación.

1.2. Objetivos

Los objetivos que se tienen con este documento son:

- Analizar las aplicaciones y características técnicas que tienen las constelaciones satelitales, y en especial, la constelación Iridium NEXT.
- Aprender a modelar escenarios de comunicaciones satelitales en MATLAB.
- Realizar simulaciones de los intervalos de acceso y LoS (*Line of Sight*) de la aeronave con los diferentes componentes de los segmentos espacial y terrenal.
- Estudiar la viabilidad del escenario en su conjunto, así como posibles alternativas en caso de que fueran necesarias.

1.3. Metodología empleada y organización del trabajo

En lo que respecta a la metodología seguida para la realización de este proyecto, esta tendrá un carácter fundamentalmente cuantitativo, estando basadas las conclusiones del trabajo en las distintas simulaciones y análisis numéricos realizados a través de MATLAB. Asimismo, el documento se dividirá en las siguientes secciones:

- **Capítulo 1. Introducción**

Aquí se expondrán las razones que han llevado a la realización del trabajo, así como los objetivos que se persiguen, y la metodología y organización seguidas.

- **Capítulo 2. Marco teórico**

En este se detallarán los conceptos teóricos en materia de comunicaciones satelitales necesarios para comprender los razonamientos y conclusiones del estudio, haciendo hincapié en las características técnicas y aplicaciones de la constelación Iridium NEXT usada como soporte para facilitar la intercomunicación de los distintos puntos del sistema.

- **Capítulo 3. Análisis del caso práctico**

En este capítulo se detallarán los pasos seguidos para la configuración de las simulaciones empleadas para comprobar la viabilidad del escenario satelital, analizándose los intervalos de conexión con las estaciones en tierra, los periodos de línea de vista con los satélites de la constelación, y la relación $\frac{E_b}{N_o}$ del sistema.

- **Capítulo 4. Resultados del estudio**

En este punto se discutirán las conclusiones del estudio, analizando la viabilidad del mismo y, si fuera necesario, proponiendo alternativas que pudieran facilitar el correcto funcionamiento del escenario de comunicación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción a las comunicaciones vía satélite

Las comunicaciones vía satélite son aquellas en las que se utiliza como soporte uno o más satélites artificiales situados en una órbita terrestre. Ajustándose a esta definición, los primeros ejemplos de este tipo de sistemas se remontan a finales de los años 50 y principios de los 60, con el desarrollo de los satélites *Sputnik I* (1957), *SCORE* (1958), capaz de mandar a la superficie terrestre mensajes previamente grabados; *ECHO I* (1960) y *ECHO II* (1964), que actuaban como repetidores pasivos capaces de reflejar señales de vuelta a la Tierra; y *TELSTAR I* (1962), el cual destaca por ser el primer satélite que podía funcionar como repetidor activo, permitiendo la comunicación en tiempo real.

Estos avances asentaron las bases sobre las que empezarían a erigirse distintos organismos orientados a la explotación comercial de los satélites de comunicaciones. En este contexto, una de las instituciones más importantes es la *International Communications Satellite Organization (INTELSAT)*, fundada en 1963 y actualmente compuesta por más de 120 países. El primer gran proyecto de esta organización fue el *Intelsat I* (1965), un satélite comercial geoestacionario destinado a facilitar las comunicaciones entre EE. UU. y Europa; que permitía emplear o un canal bidireccional de TV, o hasta 2400 circuitos de voz de uso simultáneo.

En lo que respecta a las características técnicas de estos nuevos dispositivos de comunicación global, uno de los grandes avances se dio en la década de los 80, con la introducción de la tecnología de haces múltiples. Esta permitía focalizar de forma más eficiente la potencia que iba del satélite a la superficie terrestre, favoreciendo el uso de equipos de recepción más pequeños y baratos, y aumentando exponencialmente la tasa disponible. Como comparación, empleando tecnología multihaz y SS-TDMA (*Satellite-Switched Time Division Multiple Access*) los satélites *Intelsat VI* (1989) eran capaces de ofrecer 24000 circuitos de comunicación, 10 veces más que el antes mencionado *Intelsat I*.

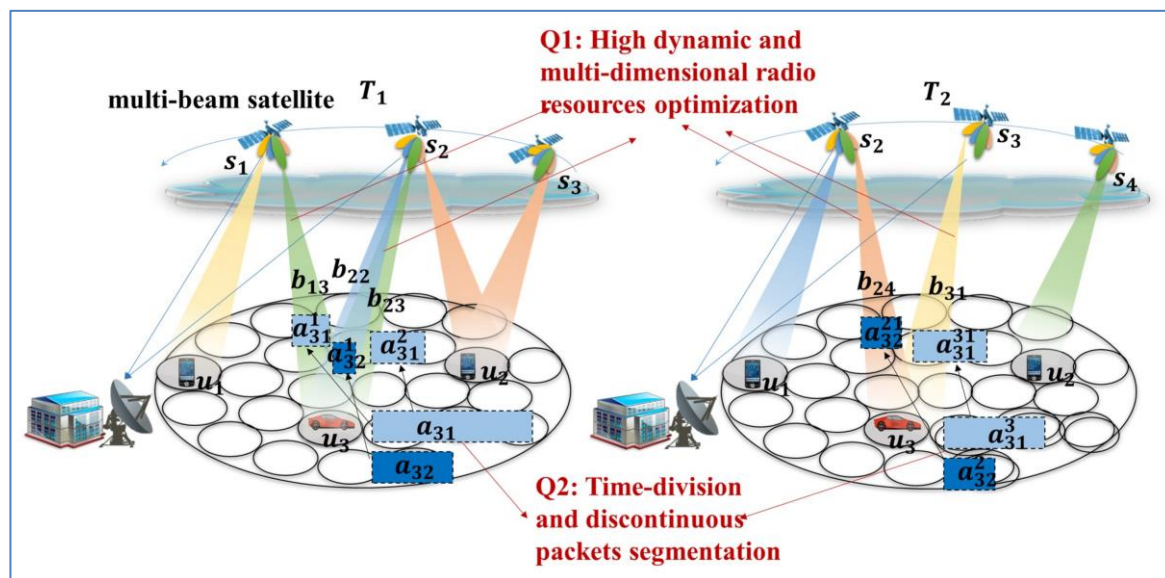


Figura 2.1. Ejemplo del funcionamiento de la tecnología multihaz [7].

En la actualidad, el sector de las comunicaciones vía satélite se apoya principalmente en el uso de constelaciones satelitales en órbitas LEO (*Low Earth Orbit*), las cuales son conjuntos de satélites diseñados para trabajar como un único sistema, siendo capaces de ofrecer cobertura global casi constante. Los primeros sistemas de este tipo surgieron en la década de los 90, con el desarrollo de la constelación Iridium. Asimismo, el modelo de funcionamiento de estos sistemas ha pasado a estar basado en el uso de comunicaciones multipunto-multipunto, lo que ha permitido reducir las prestaciones mínimas de las estaciones terrenales. Esto, unido al uso de una combinación de FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) con TDMA (*Time Division Multiple Access*) como una de las posibles formas de acceso, ha incrementado enormemente la eficiencia energética y

espectral de estos sistemas, permitiendo que tengan un uso más generalizado.

La arquitectura usada por los sistemas de comunicación por satélite no ha sufrido grandes cambios desde sus orígenes. Esta puede dividirse en tres partes principales:

- **Segmento terrenal:** Hace referencia a la infraestructura y equipos localizados en tierra necesarios para poder entablar comunicación con los satélites, así como la infraestructura de telecomunicaciones que conecta las estaciones terrenales entre ellas o con los usuarios finales.
- **Segmento espacial:** Engloba a todos los componentes y dispositivos que se encuentran en el espacio, así como los enlaces que pueda haber entre los distintos satélites.
- **Segmento de control:** Este se compone de los distintos centros de control, estaciones de seguimiento y sistemas de monitorización empleados para supervisar desde tierra el correcto funcionamiento del resto de componentes del circuito de telecomunicación.

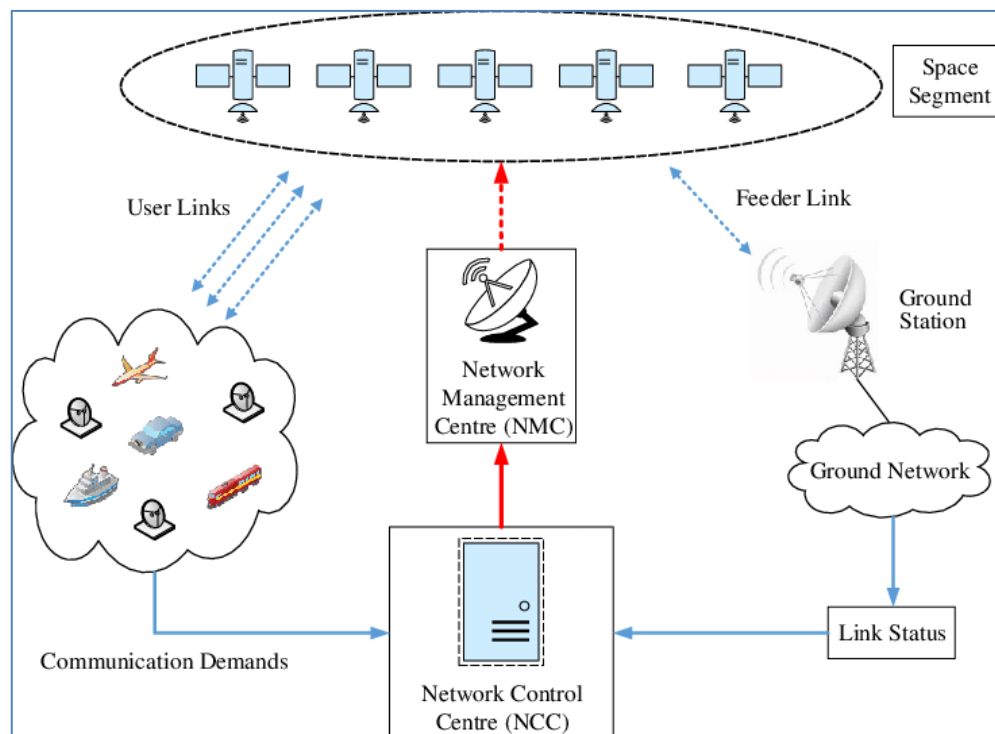


Figura 2.2. Esquema sobre la arquitectura de los sistemas de comunicación por satélite [3].

2.2. La constelación Iridium. Historia y especificaciones técnicas

La constelación Iridium es un sistema de comunicaciones vía satélite en órbita LEO, situado a unos 780 km de altitud. Con equipos equidistribuidos en 6 planos orbitales, aunque en un inicio se pensaba que serían necesarios 77 satélites, estudios posteriores permitieron refinar las características de separación e inclinación de las órbitas para reducir este número hasta los 66. No obstante, fue esta primera aproximación la que le terminó dando nombre a la constelación, tomando como referencia el parecido que había entre los primeros bocetos de esta y los átomos del elemento número 77 de la tabla periódica, el Iridio.

Iridium fue uno de los primeros intentos de acercar la tecnología satelital al público general. Diseñada para ofrecer cobertura global a equipos de comunicación con características similares a los teléfonos móviles, y desarrollada de forma conjunta por las empresas Iridium SSC y Motorola, la puesta en órbita de los distintos equipos se dio entre 1997 y 1998, año en el que empezó a estar operativa la red. Lamentablemente, los problemas de organización, la falta de clientes y el elevadísimo coste inicial de la operación provocaron la bancarrota del proyecto, el cual, tras ser comprado por cerca de 50 millones de dólares; retomó su actividad en el año 2001, volviendo a estar completamente operativo para el año 2002.



Figura 2.3. Imagen de un satélite Iridium de primera generación [11].

En lo que respecta a las características técnicas de esta primera generación de satélites Iridium:

Características de los enlaces Tierra-Satélite:

- Las comunicaciones con la superficie terrestre se realizaban en la banda L (1-2 GHz). En particular, el UL (*Up-Link*) empleaba una frecuencia de 1,616 GHz, y el DL (*Down-Link*) una de 1,6265 GHz. La ventaja de usar esta franja del espectro radioeléctrico era que, en comparación con los satélites geoestacionarios, se tenía una mayor resiliencia a las interferencias y a las inclemencias climáticas, lo que permitía alcanzar tasas de hasta 64 kbps.
- Con respecto a la forma de acceso empleada para los mensajes, cada canal bidireccional de frecuencia contenía a su vez 4 slots de tiempo, combinándose técnicas de FDMA¹ (*Frequency Division Multiple Access*) y TDMA² (*Time Division Multiple Access*).
- Para los mensajes se empleaba mayoritariamente la modulación DE-QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), aunque para momentos puntuales de la comunicación del UL esta podía sustituirse por DE-BPSK (*Binary Phase Shift Keying*).

¹ FDMA: Cada portadora emplea un canal de frecuencia distinto, pudiéndose enviar varias en un mismo intervalo de tiempo.

² TDMA: Cada señal viaja en un slot de tiempo distinto, pudiendo transmitirse varias en un mismo radiocanal de frecuencia.

- Los satélites empleaban arrays³ de antenas capaces de transmitir y recibir hasta 48 vanos, lo que hacía posible que en total se pudieran mandar a la Tierra hasta 3168 haces puntuales (*spot beams*). No obstante, las características técnicas y orbitales de los equipos permitían que con 2150 rayos fuera suficiente para garantizar cobertura global.

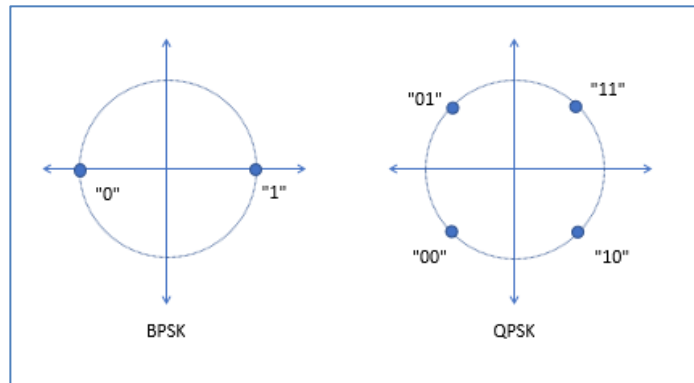


Figura 2.4. Constelaciones de una modulación BPSK (izquierda) y QPSK (derecha).

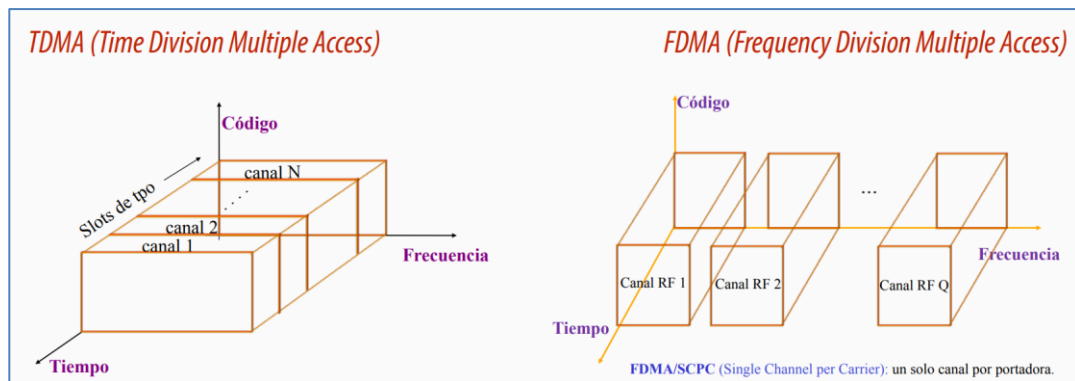


Figura 2.5. Esquema explicativo sobre TDMA y FDMA [15].

Características de los enlaces intersatelitales:

Los satélites de la constelación Iridium se encontraban sincronizados e interconectados entre sí, de manera que cada uno era capaz de establecer hasta 4 enlaces con otros satélites cercanos. Estas conexiones, realizadas en banda Ka (26,5-40 GHz), se hacían con los satélites anterior y posterior de su misma órbita, y con los satélites de los planos orbitales contiguos que optimizasen el camino de ida y vuelta del mensaje.



Figura 2.6. Ejemplo de enlaces intersatelitales de la constelación Iridium [11].

³ En el ámbito de las telecomunicaciones se define un *array* como una agrupación de antenas que trabajan de forma conjunta para mejorar las prestaciones de un sistema.

Características orbitales:

A fin de asegurar la cobertura a escala global, las 6 órbitas entre las que se distribuían los satélites de la constelación tenían una inclinación de $86,4^\circ$, y excepto por los planos orbitales 1 y 6, que se encontraban distanciados 22° entre sí y tenían sentidos de giro opuestos; todos los demás se diseñaron con una separación mutua de $31,6^\circ$, y con sus satélites moviéndose de forma sincronizada en el mismo sentido. Por otro lado, todas las órbitas tenían un periodo orbital aproximado de 100,5 minutos, y como mucho se admitía una variación máxima de la posición de los equipos dentro de sus trayectorias de 15 km.



Figura 2.7. Diagrama ilustrativo de los planos orbitales de la constelación Iridium [12].

2.3. La constelación Iridium NEXT. Historia y especificaciones técnicas

Siguiendo con el repaso histórico de Iridium, el siguiente gran hito se dio en 2017, cuando se inició la actualización de la constelación con el comienzo del proyecto Iridium NEXT. Con este se buscaba hacer una renovación íntegra de la infraestructura, sustituyéndose todos los satélites por equipos de nueva generación con mejores prestaciones y diseñados para una vida útil mínima de 15 años. En total se tendrían 81 nuevos satélites, de entre los cuales 66 se mantendrían como dispositivos activos en las mismas órbitas que sus predecesores, 6 de ellos actuarían como satélites de repuesto orbitando en torno a la Tierra, y los 9 restantes se quedarían en la superficie a la espera de ser lanzados en caso de ser necesario.

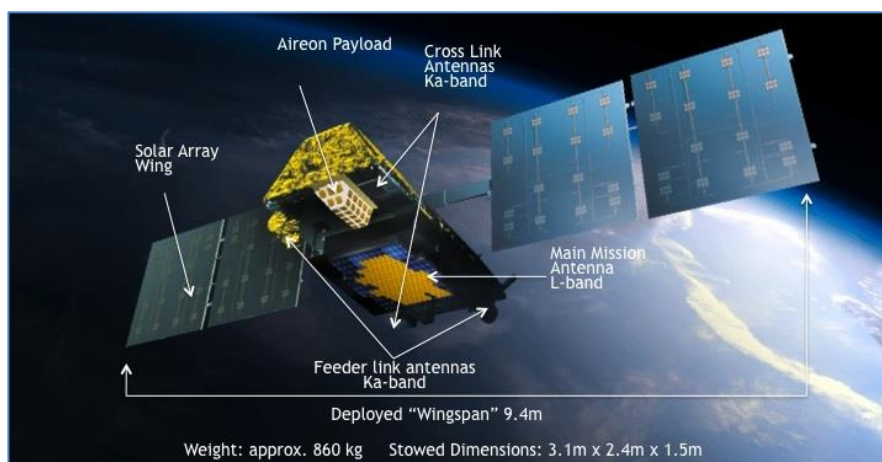


Figura 2.8. Recreación de un satélite Iridium NEXT, junto con sus características principales [13].

Así, entre 2017 y 2019 se realizaron 8 operaciones de lanzamiento, todas ellas con origen en la base de Vandenberg (California); en cada una de las cuales se llevaron al espacio entre 5 y 10 satélites a bordo de cohetes Falcon 9 FT y Falcon 9 B4, de la estadounidense *SpaceX*. Hasta la fecha, el último lanzamiento se produjo el 20 de mayo de 2023, con la puesta en órbita de 5 de los 6 satélites de repuesto antes mencionados (Iridium 174, 177, 178, 179 y 181). Asimismo, aunque todavía quedan en órbita algunos restos de la constelación predecesora, la inmensa mayoría de los satélites ya han dejado de operar y se encuentran a la espera de comenzar su descenso a algún punto seguro de la Tierra, o de modificar su órbita lo suficiente como para perderse en el espacio; por lo que podría decirse que la transición de Iridium a Iridium NEXT está prácticamente completa.

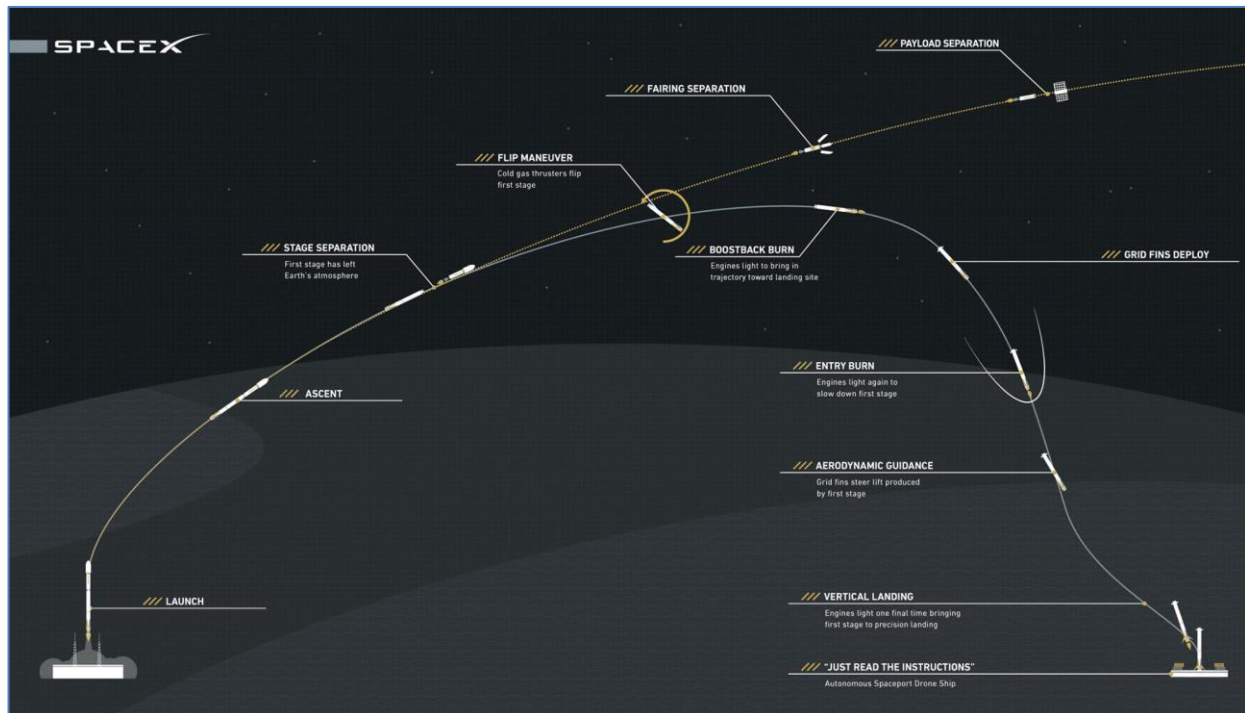


Figura 2.9. Esquema con las fases del lanzamiento de los distintos satélites Iridium NEXT [16].

En lo que respecta a las mejoras técnicas de esta nueva generación de satélites, si bien en líneas generales no han cambiado demasiado, sí que hay algunas diferencias notables a destacar:

Características de los enlaces Tierra-Satélite:

- Se siguen usando las mismas frecuencias que en la constelación original para transmitir información a través del UL y del DL. No obstante, la capacidad de los radioenlaces ha aumentado considerablemente, pudiéndose alcanzar los 100 kbps durante el 90 % del tiempo de conexión, y llegando hasta casi 1,5 Mbps en condiciones óptimas. Asimismo, para ciertas aplicaciones es posible emplear la banda Ka para permitir una tasa de hasta 8 Mbps.
- Como forma de acceso se sigue usando una combinación de TDMA y FDMA empleando TDM, así como las modulaciones DE-QPSK y ocasionalmente DE-BPSK.
- De igual manera, se continúan utilizando arrays de antenas capaces de transmitir y recibir hasta 48 haces.
- Los satélites de Iridium NEXT cuentan con dos sistemas de comunicación móviles, optimizados para trabajar entre los 20-30 GHz, con los que poder contactar con las *gateways*, es decir, las estaciones terrenales que conectan con la infraestructura de telecomunicaciones necesaria para hacer llegar el mensaje a su destino.
- Finalmente, para las funciones de control y telemetría se emplean antenas omnidireccionales que trabajan también entre los 20 y 30 GHz.

Características de los enlaces intersatelitales:

Los satélites Iridium NEXT emplean el mismo esquema de comunicación intersatelital que su predecesor, con dos antenas fijas con las que comunicarse con equipos en su mismo plano orbital, y con otras

dos antenas móviles con las que compartir información con los equipos en planos adyacentes que deban actuar como nexos. Estos circuitos semidúplex, capaces de enviar información de forma bidireccional pero no simultánea; operan entre los 23,18 GHz y 23,38 GHz, y cuentan con una tasa promedio de 12,5 Mbps.

Características orbitales:

El lanzamiento de la constelación Iridium NEXT fue planificado para que, paulatinamente, fuera ocupando las mismas posiciones que empleaba Iridium, por lo que las características orbitales de ambos sistemas son las mismas.

2.4. Aplicaciones de la constelación Iridium NEXT

2.4.1. Sistema ADS-B

ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*) son las siglas de la más reciente generación de sistemas de vigilancia y control ideados para el mundo de la aviación, los cuales se espera que dentro de pocos años terminen por sustituir completamente a los sistemas de posicionamiento por radar. Aunque los primeros estudios teóricos de esta tecnología datan de la década de los 90, hubo que esperar hasta 2010 para que la NAS (*National Airspace Systems*), uno de los organismos más importantes dentro del panorama aeronáutico estadounidense; formalizase la normativa para la implementación de estos nuevos sistemas. Desde entonces, su uso ha venido incrementándose año tras año, siendo obligatorios desde 2020 en aerolíneas comerciales que operen en EEUU, Europa, Canadá, Australia, México y multitud de países del sudeste asiático.

El modo de funcionamiento de ADS-B es, conceptualmente, muy sencillo. Cada segundo los equipos *ADS-B Out* del avión transmiten información sobre su posición actual, altitud, velocidad y demás parámetros aeromotrices e identificativos. Estas señales son luego captadas por los sistemas de control del tráfico aéreo en tierra, lo que les permite conocer la situación en tiempo real de la aeronave y mejorar la gestión del espacio aéreo. Asimismo, las señales *ADS-B Out* pueden ser también captadas por los equipos *ADS-B In* de aviones que se encuentren en las proximidades, lo que les permite tomar las medidas de precaución adecuadas para evitar accidentes o congestión de las líneas aéreas.

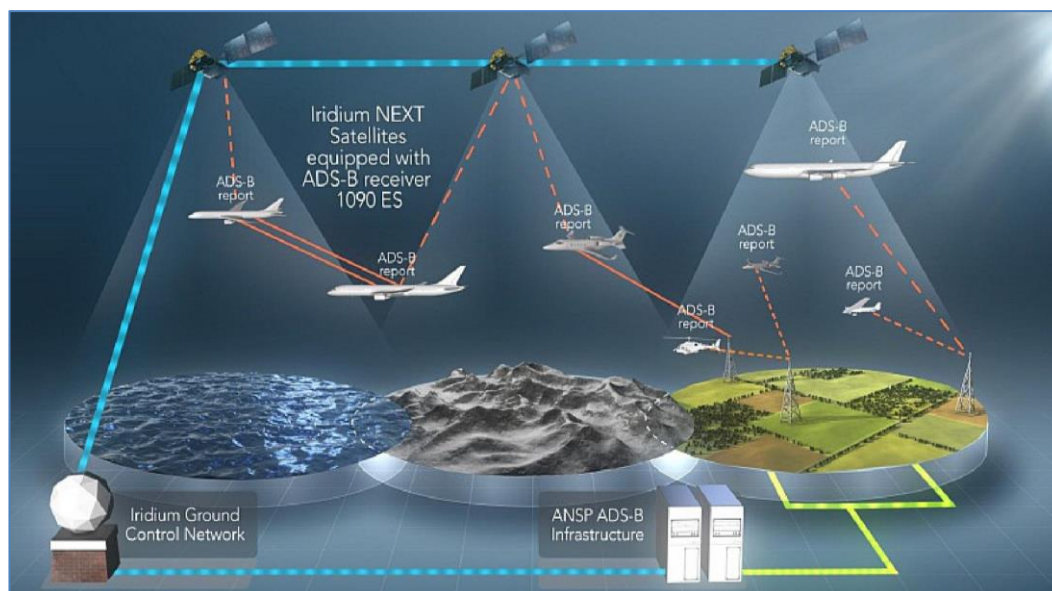


Figura 2.10. Esquema de funcionamiento de sistema ADS-B con soporte en la constelación Iridium NEXT [10].

A nivel técnico, estos sistemas constan de dos componentes fundamentales:

- **Sistema satelital de apoyo de alta fiabilidad:** A fin de garantizar la seguridad del vuelo, es fundamental que la constelación de satélites usada como soporte cumpla con los estándares definidos por la ICAO (*International Civil Aviation Organization*). En este contexto, algunos de los sistemas satelitales más usados en la actualidad son GPS (*Global Positioning System*) e Iridium NEXT, con los

que se suele trabajar a una frecuencia de 1090 MHz, o si el avión está volando por debajo de los 5500 m de altura, 978 MHz.

- **Equipos de telecomunicaciones:** El *ADS-B Out* y el *ADS-B In* deben ser capaces de establecer un radioenlace a través del cual transmitir y recibir información, así como realizar las labores de codificación y tratamiento digital necesarias.

2.4.2. Sistema AIS

AIS (*Automatic Identification System*) hace referencia a uno de los más populares sistemas de seguimiento global empleados por en el comercio marítimo. Este guarda muchas similitudes con el sistema ADS-B antes explicado, enviando información periódica con respecto al curso, velocidad e identificación de un barco a las bases costeras y buques próximos, a fin de mejorar las labores de guiado y minimizar el riesgo de accidentes. Obligatorio para todos los barcos de pasajeros y para los de gran tonelaje que realicen viajes internacionales, al igual que ADS-B estos sistemas también hacen uso de constelaciones satelitales, lo que ha permitido aumentar su fiabilidad, alcance y eficacia.

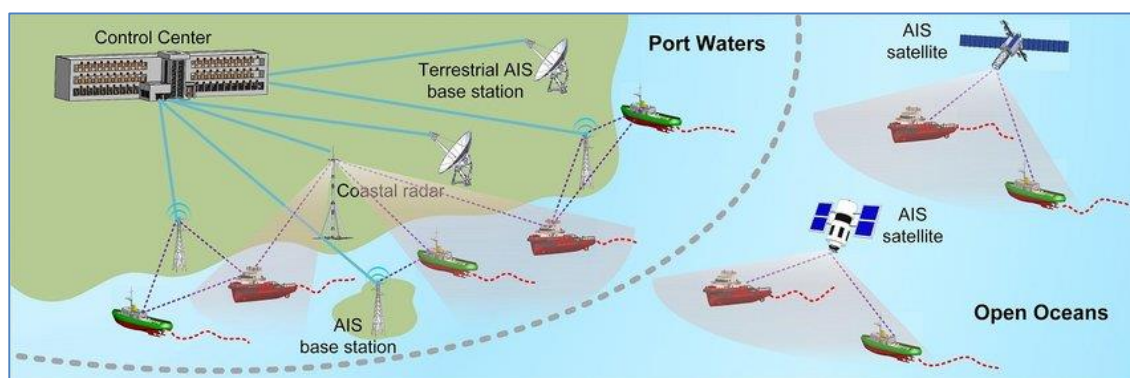


Figura 2.11. Esquema del sistema de seguimiento AIS [9].

2.4.3. Sistema GEOScan

El sistema GEOScan fue concebido como una red de sensores capaz de recabar información climática a escala global. Diseñados para ser instalados en constelaciones satélites en órbita LEO, cada uno de estos sistemas consta de 6 elementos principales:

- **Radiómetro:** Cuyo cometido principal es el de ayudar a determinar la diferencia entre la radiación absorbida por el planeta y la que finalmente es devuelta al espacio.
- **Sensor de carga eléctrica:** Aparato dotado de cobertura GPS con el que medir fenómenos eléctricos y gravitacionales.
- **Microcámara multispectral:** Usada para captar imágenes de la superficie.
- **Dosímetro de radiación:** Empleado para cuantificar la ionización del planeta a escala global.
- **Espectrómetro:** Con el cual medir diferentes características atmosféricas y de la vegetación terrestre.
- **Acelerómetro MEMS:** Usado para medir la aceleración y demás efectos de fuerzas no conservativas, permitiendo estudiar los efectos de la gravedad terrestre.

Aunque ya ha habido misiones anteriores con cometidos similares, GEOScan ofrece la ventaja de poder recabar y analizar datos meteorológicos, gravitaciones y medioambientales en tiempo real a una escala nunca antes vista, lo que le ha permitido convertirse en una importante herramienta para diversas organizaciones científicas dedicadas al estudio de la atmósfera, océanos, y demás elementos que puedan afectar a la climatología del planeta.

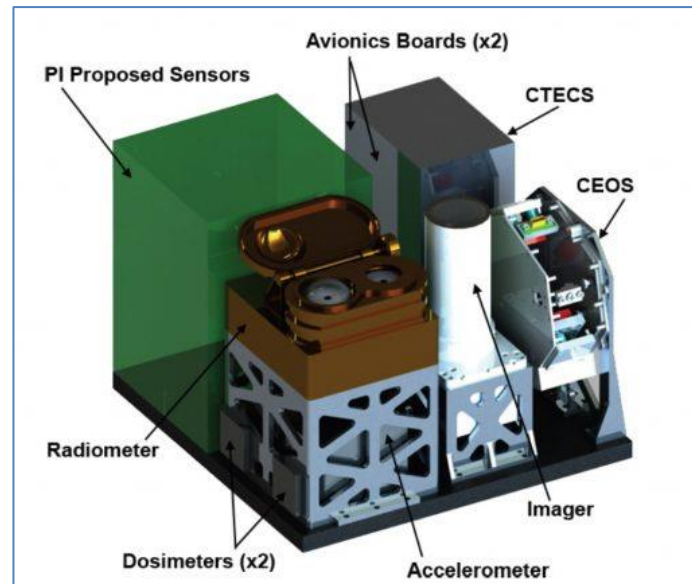


Figura 2.12. Esquemático de un sensor GEOScan y sus componentes [13].

3. ANÁLISIS DEL CASO PRÁCTICO

El escenario que se ha utilizado como soporte para el estudio del comportamiento de las comunicaciones avión-satélite ha sido el de un vuelo de 4 horas entre los aeropuertos de Sevilla y el de Estocolmo-Arlanda, el más largo que se puede hacer desde la capital hispalense sin hacer escalas intermedias. Asimismo, para la realización de las simulaciones se han empleado principalmente los toolboxes de MATLAB de comunicaciones vía satélite (*Satellite Communications Toolbox*), y el de análisis de la capa física de los sistemas de telecomunicación (*Communication Toolbox*).

En lo que respecta al software utilizado, MATLAB (abreviatura de *MATrix LABoratory*) es un entorno de programación para el desarrollo de algoritmos, cálculo numérico y análisis y visualización de datos. Este comenzó su andadura en la década de los 70 de la mano de Cleve Moler, fundador de la empresa *MarthWorks Inc.*, y aunque en un inicio solo permitía trabajar con datos en forma matricial, con el paso de los años y el desarrollo de distintas toolboxes ha aumentado enormemente el repertorio de funcionalidades que ofrece, haciendo que hoy día se haya convertido en un estándar *de facto* en el ámbito de la ingeniería y la computación científica.

3.1. Preparación del escenario satelital

El primer paso de la simulación es la definición de las diferentes condiciones del escenario sobre el que se va a trabajar. Así, en un inicio deberán concretarse los siguientes tres elementos:

3.1.1. Creación del escenario satelital

Lo primero que debe hacerse es generar un escenario satelital sobre el cual, posteriormente, se podrá estudiar la evolución de la comunicación entre las estaciones terrestres y los distintos elementos del segmento espacial. Para ello debe emplearse la función *satelliteScenario*, disponible en el *Aerospace Toolbox* desde la versión de MATLAB R2021a. Gracias a esta herramienta es posible generar un esquema tridimensional en el que poder representar la ubicación exacta de los aeropuertos de Sevilla y Estocolmo-Arlanda, así como las trayectorias que seguirán el avión y los satélites de la constelación Iridium NEXT (Anexo A).



Figura 3.1. *Satellite Scenario Viewer* con los dos aeropuertos definidos como estaciones terrenales.

3.1.2. Definición de la trayectoria del avión

Lo siguiente es, sobre el escenario satelital previamente generado, definir cuál será la trayectoria que seguirá el avión. Para ello es necesario realizar una serie de pasos:

1. Se establecen las especificaciones espaciales y temporales del vuelo, indicando la altura a la que estará el avión, las coordenadas espaciales de los dos aeropuertos de referencia, la duración estimada del viaje y la tasa de muestreo [Hz] que se empleará para realizar los cálculos geodésicos (Anexo A). Una vez decididos estos datos, a través de la función *geoTrajectory*, disponible en el toolbox de *Sensor Fusion and Tracking* de la versión R2020b; se puede calcular cuál será la trayectoria seguida (Anexo A). Con respecto a esta función, los valores de entrada más importantes que tiene son, además de los anteriormente descritos, los de *AutoPitch* y *AutoBank*, diseñados para que, de forma automática, se ajuste la trayectoria del avión a la dirección del vuelo y se contrarreste la fuerza centrípeta sufrida por el aparato. No obstante, cabe destacar que *geoTrajectory* cuenta con aún más posibles valores de entrada para enriquecer el detalle con el que pueden hacerse las simulaciones.

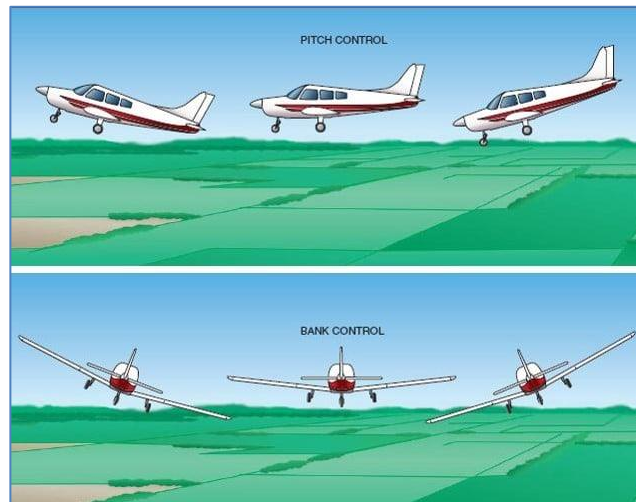


Figura 3.2. Representación de los movimientos de *pitch* y *bank* de un avión.

2. Lo siguiente será añadir la aeronave al esquema satelital que se está usando como soporte. Para ello primero será necesario calcular la posición y orientación exacta que tendrá el avión en cada momento del vuelo, seguidamente se definirán los parámetros para la visualización de la trayectoria en el *Satellite Scenario Viewer*, y finalmente, por medio de la función *satellite* del paquete *Aerospace Toolbox*; se incluirá a la aeronave dentro del escenario de simulación interpretándola como un satélite (Anexo A).

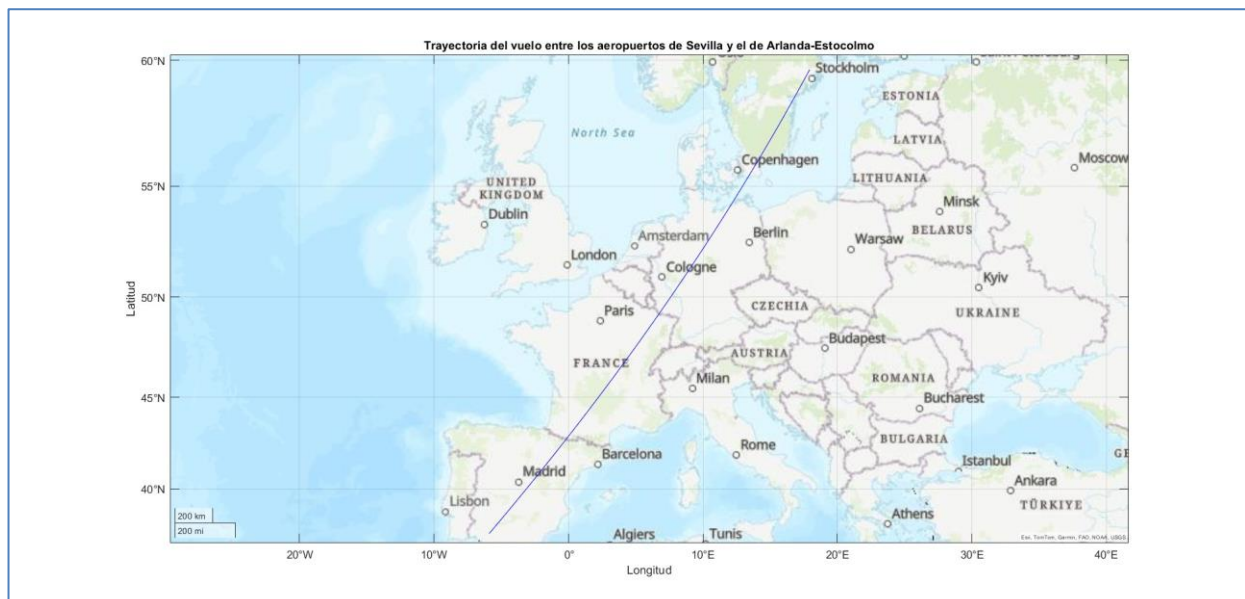


Figura 3.3. Proyección sobre la superficie terrestre de la trayectoria seguida por el avión.

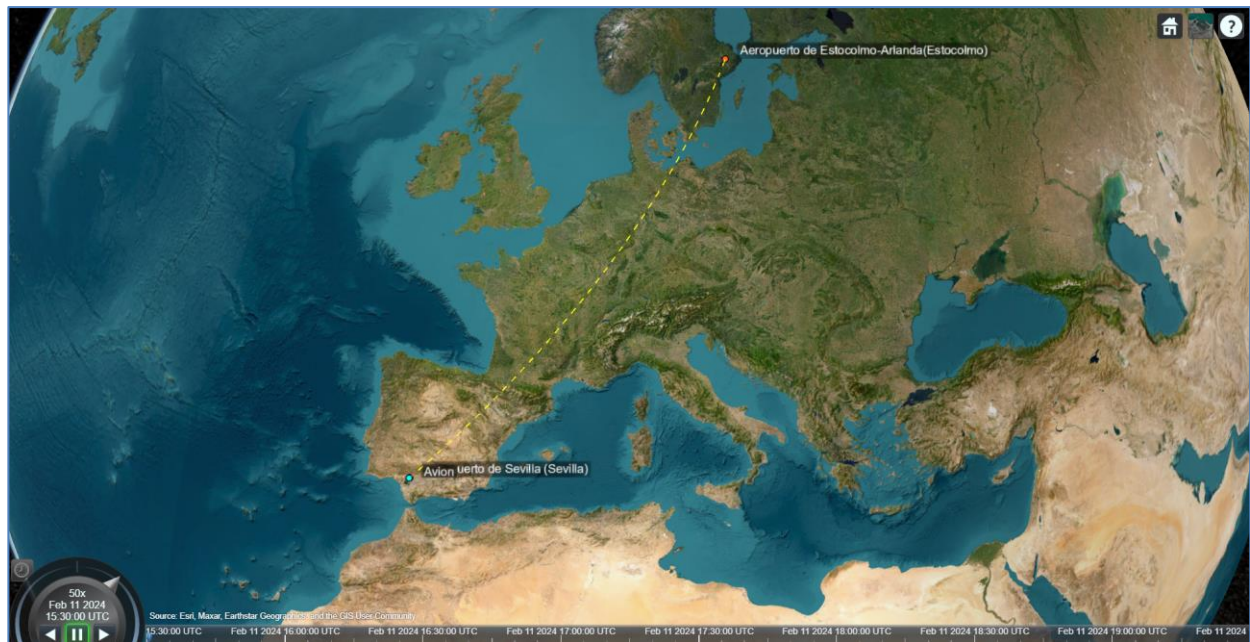


Figura 3.4. Detalle de la trayectoria del vuelo y del avión en el *Satellite Scenario Viewer*.

3.1.3. Introducción de la constelación Iridium NEXT en la simulación

El último paso de la preparación del escenario satelital consiste en definir e incluir dentro de la simulación la constelación de satélites Iridium NEXT. Como se ha comentado anteriormente, esta se compone de 66 satélites equidistribuidos en 6 planos orbitales, de manera que son capaces de cubrir la totalidad de la superficie terrestre. Así, para poder incluir este sistema satelital dentro de la simulación primero hay que diseñarla de acuerdo a sus especificaciones geométricas y orbitales (Anexo A). Como puede apreciarse, al igual que con el avión se ha utilizado el comando *satellite* para introducir la constelación generada en el escenario satelital.

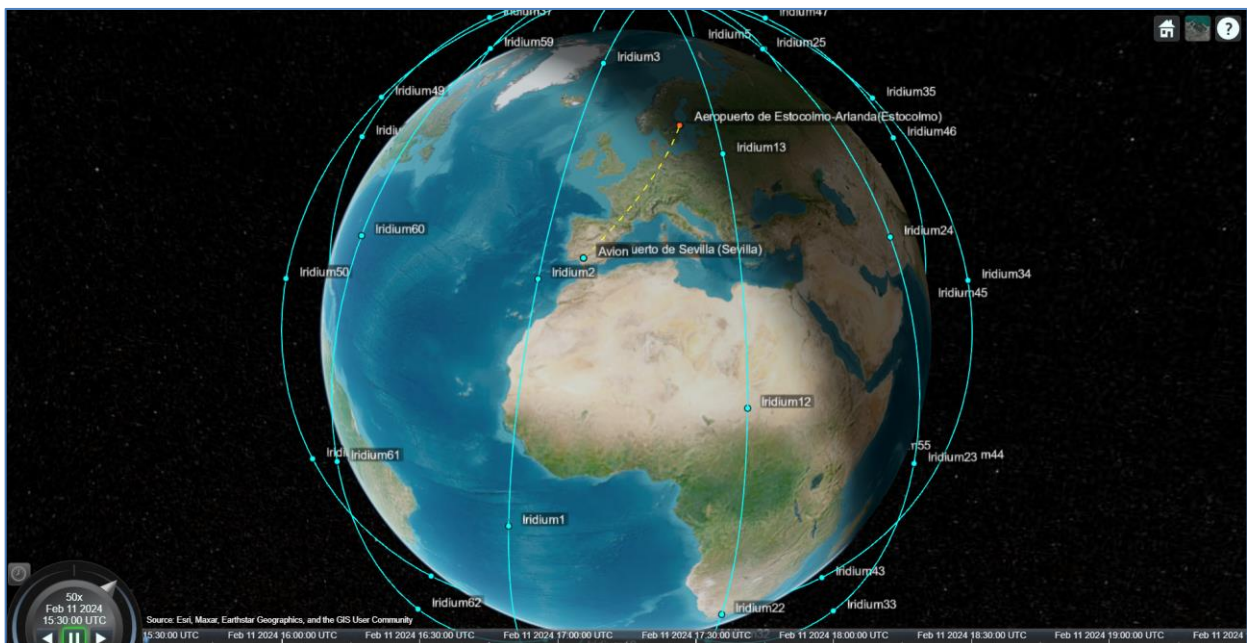


Figura 3.5. Representación del escenario satelital una vez incluida la constelación Iridium NEXT.

3.2. Análisis de las Comunicaciones

Una vez preparado el escenario satelital se puede proceder al estudio en detalle de las comunicaciones. Este análisis se dividirá en 5 partes:

1. Análisis de los intervalos de tiempo en los que se está dentro de la zona de cobertura de los aeropuertos.
2. Estudio de los periodos de tiempo en los que se tiene LoS (*Line of Sight*) con los satélites Iridium NEXT.
3. Análisis de los radioenlaces entre el avión y las estaciones terrenales.
4. Análisis de cobertura con la constelación.
5. Cálculo del margen señal-ruido del sistema completo.

3.2.1. Estudio de los intervalos de conexión con los aeropuertos

Para poder estudiar el enlace de acceso entre el avión y los aeropuertos, es decir, el intervalo de tiempo en el que se está dentro de la zona de cobertura de las estaciones terrenales; es necesario apoyarse en la función *access*, recogida en el *Aeroespace Toolbox*. A nivel de código, esta añade un nuevo tipo de objeto, denominado *Access analysis object*, a la simulación, devolviendo tras su ejecución una tabla en la que aparecen tabulados los intervalos de conexión con cada una de las estaciones terrenales (Anexo A).

Source	Target	IntervalNumber	StartTime	EndTime	Duration
"Avion"	"Aeropuerto de Sevilla (Sevilla)"	1	11-Feb-2024 15:30:00	11-Feb-2024 15:57:00	1620
"Avion"	"Aeropuerto de Estocolmo-Arlanda (Estocolmo)"	1	11-Feb-2024 18:59:00	11-Feb-2024 19:30:00	1860

Figura 3.6. Resultados del estudio del enlace de acceso entre el avión y las estaciones terrenales.

Como puede observarse en la Figura 3.6, el avión se encuentra dentro del rango de cobertura de los aeropuertos aproximadamente la primera y última media hora del viaje. Cabe resaltar que durante este espacio de tiempo también se cuenta con acceso a los satélites de la constelación, no obstante, en la práctica es preferible estar conectado a los sistemas terrenales el mayor tiempo posible, ya que suelen ofrecer mejores prestaciones en lo que respecta a la disponibilidad⁴ y fidelidad⁵ del radioenlace.

3.2.2. Estudio de los intervalos de conexión con la constelación Iridium NEXT

El estudio del enlace de acceso con los satélites de la constelación, si bien análogo al anterior, presente algunas diferencias notables. Para empezar, no es posible aplicar directamente la función *access* ya que, aunque esta permite trabajar directamente con estaciones terrenales, a la hora de estudiar la conexión con un satélite se necesita primero definir qué tipo de sensor tendrá el dispositivo. De entre los diferentes tipos de sistemas que hay disponibles, los más habituales son los sensores cónicos, los cuales definen sobre la superficie terrestre un área de cobertura circular de mayor o menor tamaño, dependiendo del grado de apertura y de incidencia del satélite; cuyo centro es el punto subsatelital, es decir, la proyección del satélite sobre la Tierra.

⁴ La disponibilidad de un radioenlace hace referencia al porcentaje de tiempo durante el cual este es capaz de transmitir información.

⁵ La fidelidad de un radioenlace se refiere al tiempo durante el cual la cantidad de errores de una transmisión por cada segundo, o por cada 10 segundos, se encuentra por debajo de un cierto umbral.

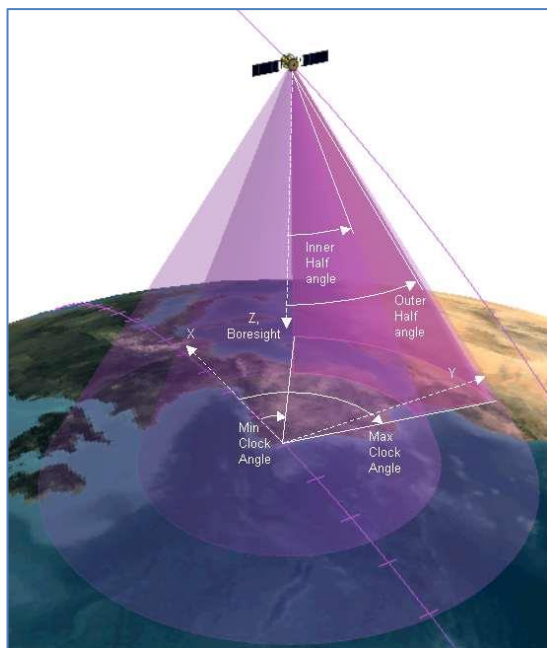


Figura 3.7. Representación de la zona de cobertura de un sensor cónico satelital [6].

Una vez definidos los sensores que habrá en el segmento espacial (Anexo A), se procede de la misma manera que en el análisis de acceso anterior para estudiar durante qué periodos de tiempo se tiene conexión con la constelación (Anexo A). No obstante, aunque tal y como se muestra en la Figura 3.8 es posible representar los resultados en forma de tabla, dado que esta termina teniendo 59 filas a fin de clarificar el estudio y discernir mejor los detalles de la comunicación es recomendable graficarlos (Anexo A).

Source	Target	IntervalNumber	StartTime	EndTime	Duration
"Avion"	"Conical sensor 72"	1	11-Feb-2024 15:36:00	11-Feb-2024 15:46:00	600
"Avion"	"Conical sensor 73"	1	11-Feb-2024 15:30:00	11-Feb-2024 15:37:00	420
"Avion"	"Conical sensor 77"	1	11-Feb-2024 16:36:00	11-Feb-2024 16:40:00	240
"Avion"	"Conical sensor 78"	1	11-Feb-2024 16:26:00	11-Feb-2024 16:32:00	360
"Avion"	"Conical sensor 79"	1	11-Feb-2024 16:15:00	11-Feb-2024 16:23:00	480
:	:	:	:	:	:
"Avion"	"Conical sensor 113"	1	11-Feb-2024 19:25:00	11-Feb-2024 19:30:00	300
"Avion"	"Conical sensor 114"	1	11-Feb-2024 19:15:00	11-Feb-2024 19:26:00	660

Figura 3.8. Resultados tabulados del estudio de enlace entre el avión y los satélites.

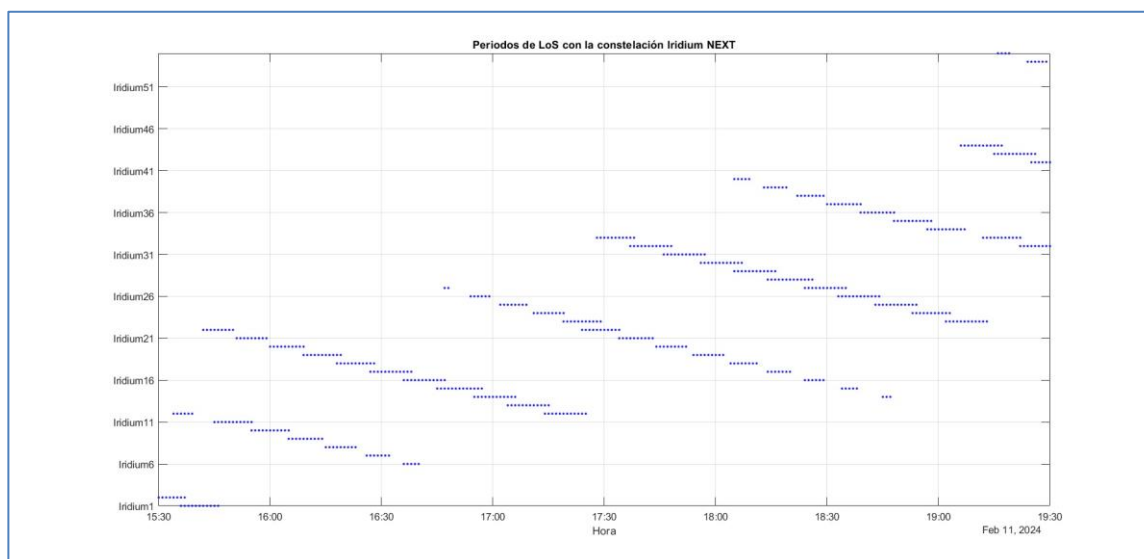


Figura 3.9. Representación de los intervalos de visibilidad entre el avión y los satélites.

Como puede apreciarse en la Figura 3.9, siempre habrá, como mínimo, un satélite conectado al avión, por lo que en una primera aproximación podría concluirse que sí habrá cobertura durante la totalidad del vuelo. No obstante, a pesar de que la existencia de cobertura o no es un factor decisivo para determinar si es posible la comunicación entre dos sistemas, es necesario realizar un estudio en mayor profundidad para discernir si la potencia que llega al avión es lo suficientemente alta como para garantizar los mínimos de calidad y disponibilidad que se establezcan.

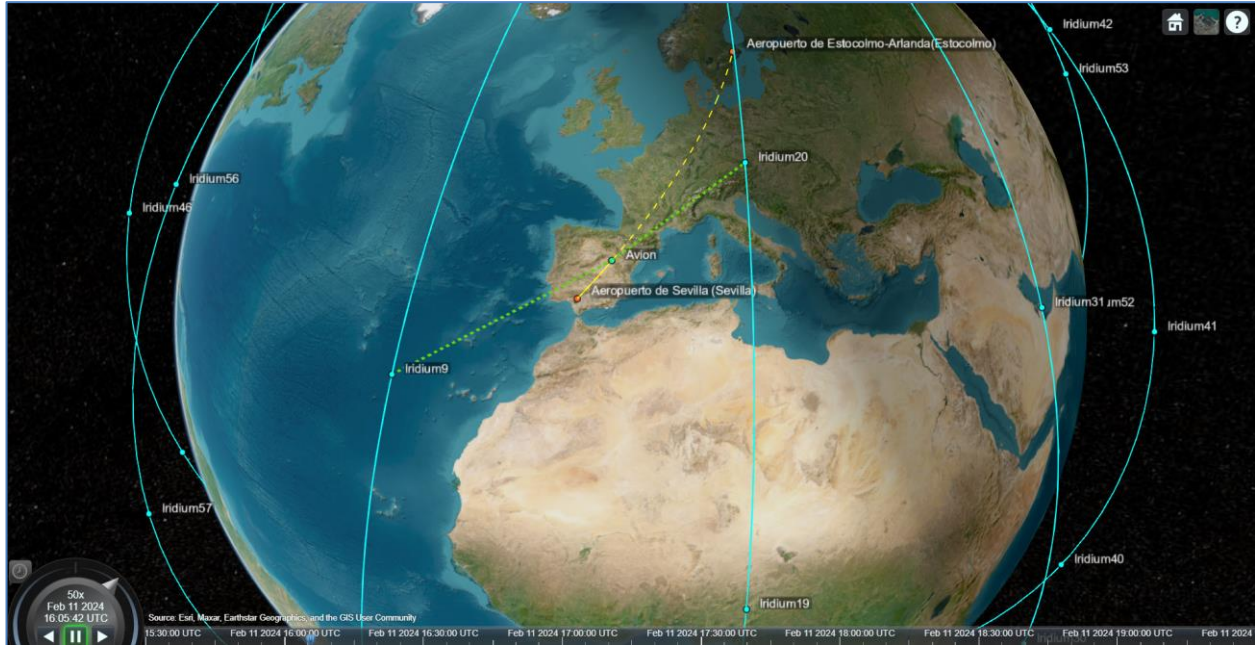


Figura 3.10. Captura del *Satellite Scenario Viewer* en la que se muestran los satélites de conexión en un momento determinado de la simulación.

3.2.3. Análisis del radioenlace entre el avión y las estaciones terrenales

La conclusión más importante que puede extraerse de los dos análisis anteriores es que sí existe cobertura durante todo el vuelo entre el avión y los distintos elementos del escenario, tanto los del segmento terrenal como los del espacial. Una vez confirmado esto, puede procederse a analizar el detalle de las comunicaciones, a fin de ver si se cumplen los criterios de calidad y disponibilidad mínimos.

Tanto para el análisis del enlace entre el avión y los aeropuertos, como para el del avión con los distintos satélites de la constelación, la aeronave empleará tecnología ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*), la cual, como se ha explicado en el punto 2.3, se encarga de enviar una vez por segundo información relativa a la localización GPS del avión, su altitud, velocidad de vuelo, y demás elementos de navegación a las equipos receptores de tierra, en el caso de los aeropuertos y torres de control; cielo, para la comunicación con otros aviones; y espacio, en el caso de que se esté usando una constelación de satélites LEO como apoyo. Así, para la configuración de estos equipos en MATLAB se han definido las siguientes características comunes tanto para el avión como para los sistemas de los aeropuertos (Anexo A):

- Frecuencia de operación de 1090 MHz.
- PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) de 125 W, equivalente a 20,97 dB aproximadamente.
- Antenas isotrópicas, es decir, antenas ideales con un patrón de radiación esférico capaces de transmitir exactamente la misma potencia en todas las direcciones del espacio.
- Configuración en forma de array de dos antenas distribuidas de forma contigua en el mismo plano del avión.

3.2.3.1. Cálculo de la zona de cobertura de las estaciones terrenales

El alcance máximo de los sistemas ADS-B ronda las 250 millas náuticas (463 km), no obstante, dependiendo de la orografía del terreno esta distancia puede variar. Por esta razón, y a fin de acercar la

simulación lo más posible a la realidad, se ha empleado una herramienta online para el cálculo del área de cobertura ADS-B de las estaciones en tierra [8]. Así, introduciendo las coordenadas de los aeropuertos de Sevilla y de Estocolmo-Arlanda, y configurando la altura a la que pudieran colocarse los equipos ADS-B necesarios, se consiguen los gráficos representados en las figuras 3.11 y 3.12.

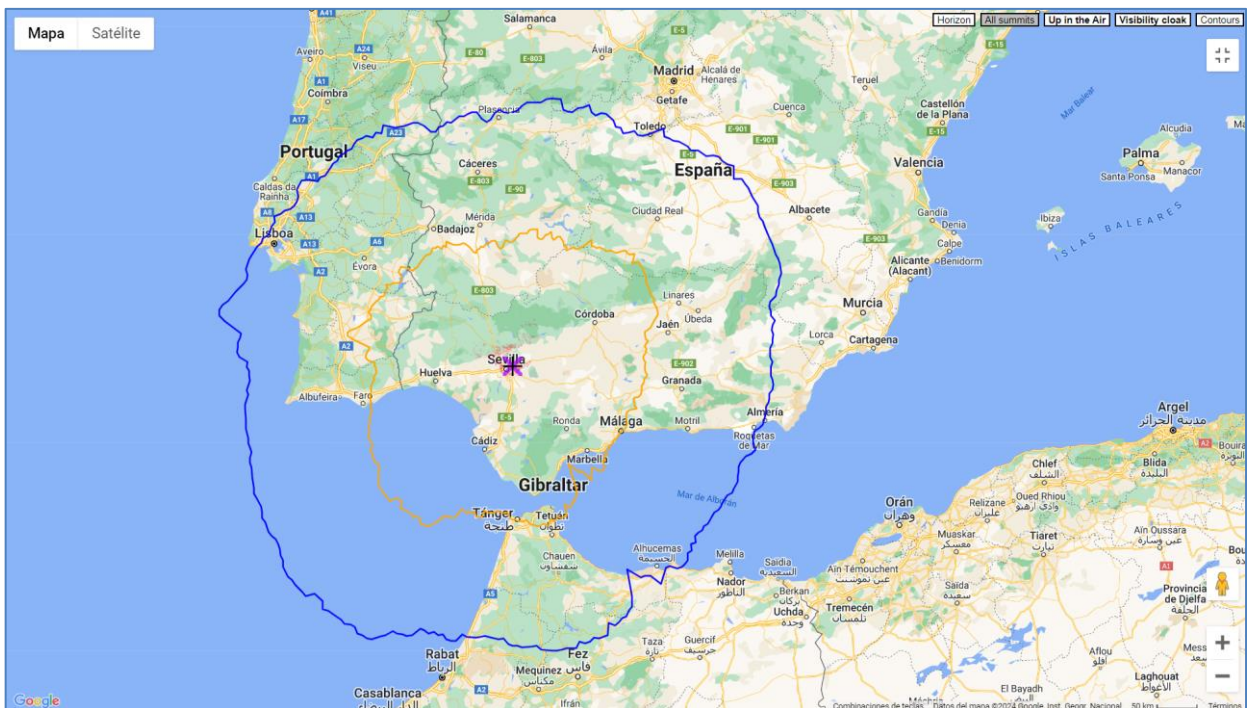


Figura 3.11. Áreas de cobertura ADS-B del aeropuerto de Sevilla. Las marcas azul y naranja se corresponden con las que habría a 10000 pies y 30000 pies respectivamente (3 y 10 km de altura aproximadamente).

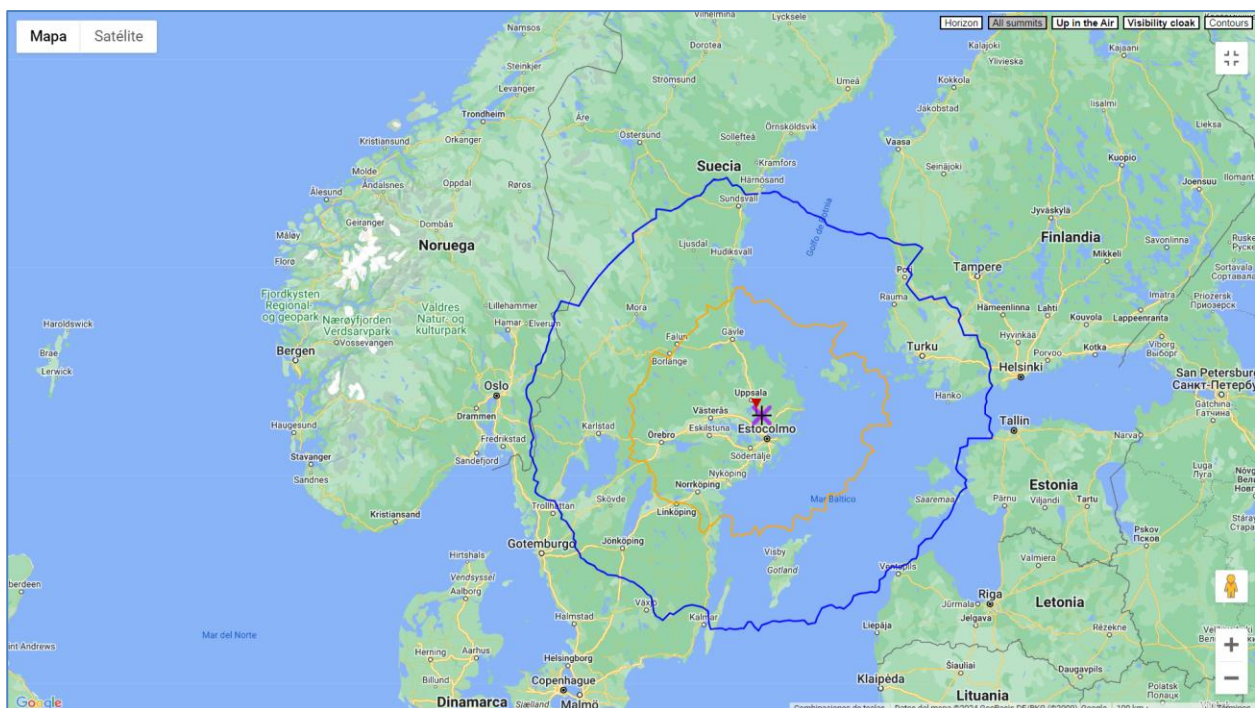


Figura 3.12. Áreas de cobertura ADS-B del aeropuerto de Estocolmo-Arlanda.

Una vez obtenidas las zonas de cobertura, puede usarse cualquier herramienta de geovisualización para estimar de forma sencilla el alcance máximo que tendrían estas estaciones terrenales. De esta forma, por medio de Google Earth puede determinarse que dichas áreas tendrán unos valores aproximados de 311600 km para el aeropuerto hispalense, y de 346200 km para el de la capital sueca.

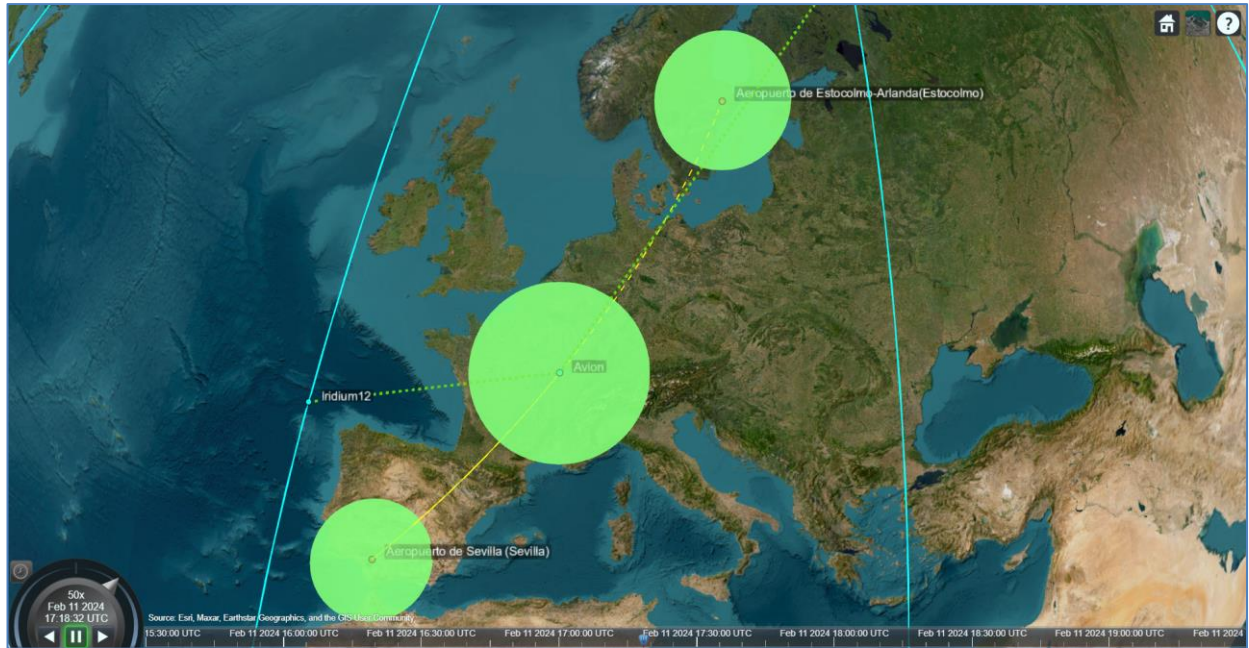


Figura 3.13. Representación sobre el *Satellite Scenario Viewer* del alcance de los sistemas ADS-B terrenales.

3.2.4. Análisis del radioenlace entre el avión y la constelación

En lo que respecta a la configuración de los satélites de la constelación, en el caso de que se decidiese utilizar antenas isotrópicas la forma de proceder sería muy similar a la explicada en el punto anterior (Anexo A):

- Nuevamente, se configuran los elementos para una frecuencia de operación de 1090 MHz.
- Se define una PIRE máxima de 200 W, la cual se empleará para los estudios posteriores del DL.
- Se distribuyen las antenas en forma de array con configuración [1 1], empleando las orientaciones (*MountingAngle*) por defecto de MATLAB.

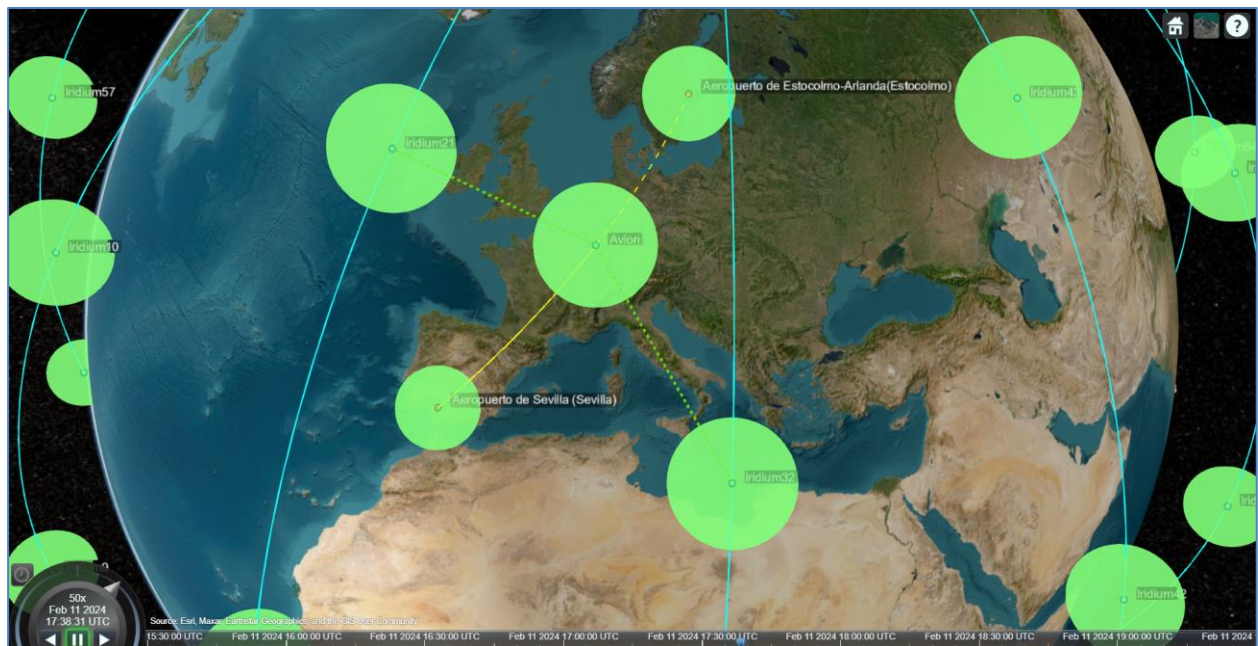


Figura 3.14. Captura de los patrones de radiación del sistema empleando todos sus elementos antenas isotrópicas.

No obstante, si bien desde un punto de vista teórico el análisis con antenas ideales puede ser interesante para tener una primera aproximación del comportamiento de las comunicaciones, como se ha explicado

anteriormente los satélites de la constelación Iridium e Iridium NEXT emplean tecnología multihaz para mejorar las prestaciones capacitivas y de transmisión del sistema, por lo que si se quiere acercarse lo máximo posible a cuál sería su comportamiento real, es necesario diseñar las antenas de 48 haces que estos equipos llevan instaladas.

3.2.4.1. Diseño de las antenas multihaz

- **Caracterización inicial**

El primer paso para el diseño de las antenas es la definición de sus 48 haces (Anexo A). Para ello estos se subdividen en 3 grupos, haces centrales, medios, y exteriores; y posteriormente se definen las características geométricas de cada uno de sus patrones de radiación, inicializando la matriz de dimensiones que se usará para estudiarlos.

- **Definición y colocación de los patrones de radiación del array**

Una vez definidos los elementos necesarios para caracterizar los distintos haces, se comienza con el diseño del patrón de radiación que tendrá el sistema de antenas (Anexo A). El procedimiento seguido para ello será el mismo para los lóbulos centrales, medios y exteriores, debiéndose cambiar únicamente los parámetros *radial_beamwidth*, *transverse_beamwidth* y *radial_offset* de forma acorde.

1. El primer paso es la definición de la clase de antena que se empleará. MATLAB permite trabajar con varios tipos diferentes (cónicas, con formas elípticas, dipolos, fractales...), no obstante, para estudios basados en la realización de simulaciones el tipo de antena predilecto es la antena gaussiana, ya que su patrón de radiación hasta los -10 dB se asemeja al que en la práctica tienen la mayoría de dispositivos de este tipo que se comercializan.

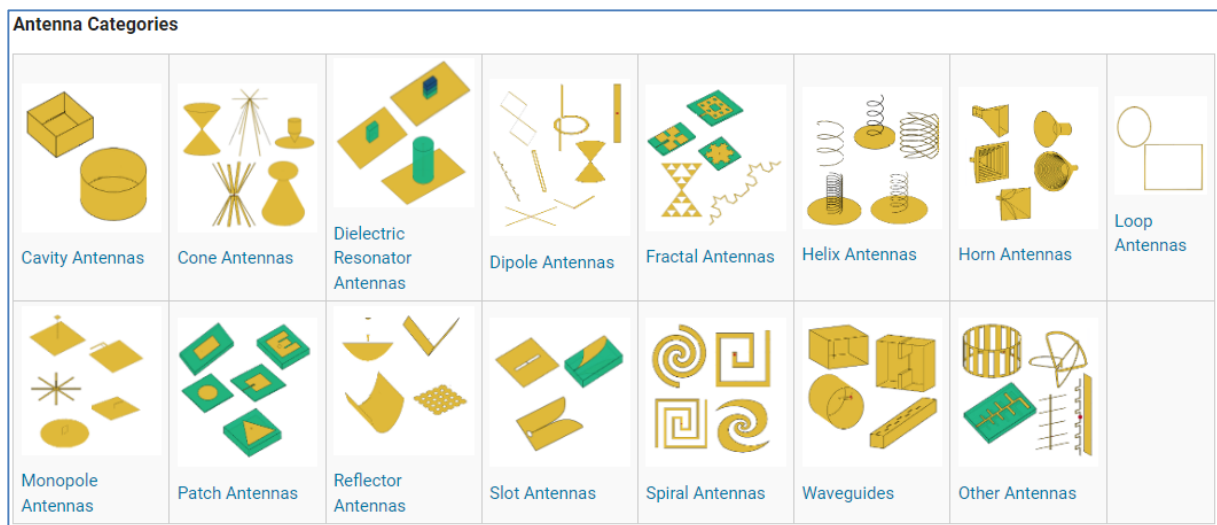


Figura 3.15. Catálogo de antenas disponibles en el *Antenna Toolbox* de MATLAB [4].

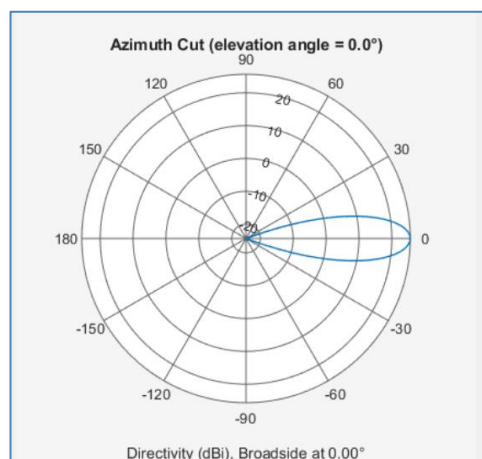


Figura 3.16. Representación del patrón de radiación, visto desde el azimut, de una antena gaussiana genérica.

2. A continuación, se comienza con la generación del patrón de radiación de la antena. Para ello se recorre la matriz *beamPat* antes definida, generando las entidades *element*, cuyas características vienen marcadas por la frecuencia de operación, azimut y elevación empleadas; que conformarán el *array* de antenas del satélite.
3. Por último, se modifica la posición del lóbulo que se acaba de definir, construyendo de forma paulatina la forma que tendrá el patrón de radiación de 48 haces.

• Caracterización final de la antena de 48 haces

Para acabar el proceso de creación de la antena a montarse sobre los satélites Iridium NEXT, se selecciona la configuración de haces que mayor ganancia sea capaz de ofrecer, y se define dicho elemento como una *CustomAntennaElement* con el azimut, ángulo de elevación y patrón de radiación definidos anteriormente (Anexo A).

Una vez definidas las nuevas parabólicas, el modo de proceder es exactamente el mismo que en el caso de las antenas isotrópicas (Anexo A):

- Se configuran los elementos para una frecuencia de operación de 1,09 GHz y una potencia de 200 W.
- Se distribuyen las antenas en forma de array con configuración [1 1], empleando las orientaciones (*MountingAngle*) por defecto de MATLAB.

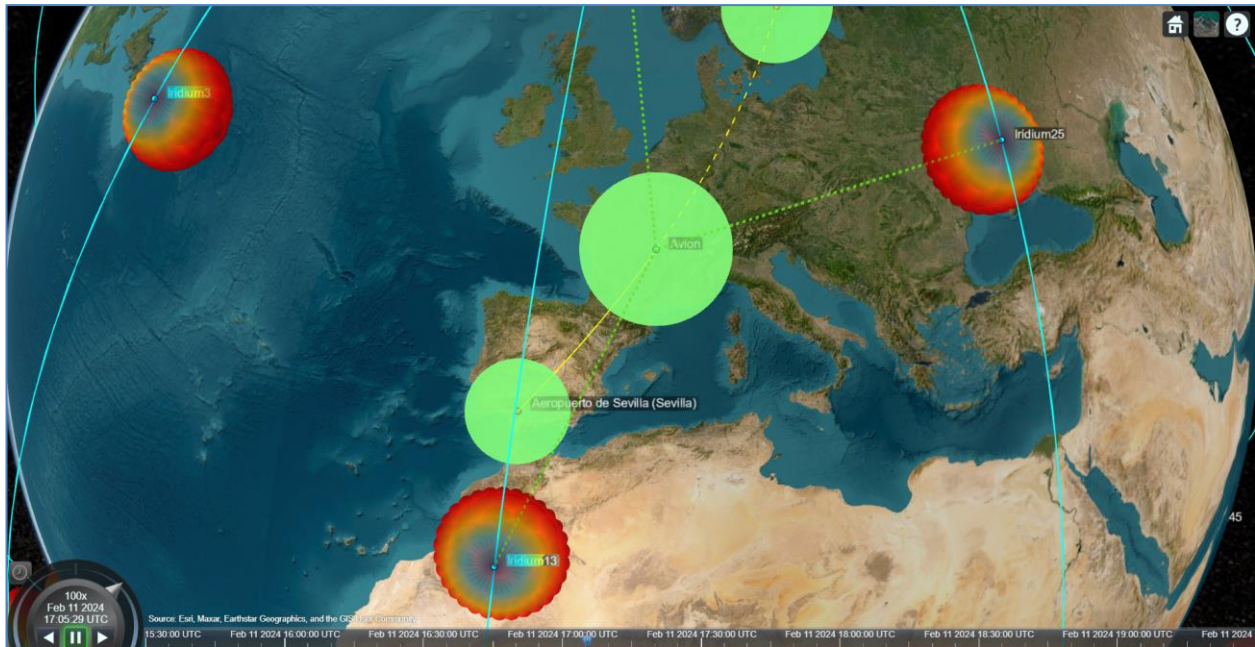


Figura 3.17. Captura de los patrones de radiación de los satélites con antenas de 48 haces.

3.2.5. Análisis del margen señal a ruido del sistema

Una vez configurados los distintos elementos radioeléctricos y equipos que conforman el sistema, es posible comprobar si este es capaz de proveer servicio de forma ininterrumpida, o si, por el contrario, habrá momentos del viaje en los que la comunicación se perderá. Hay varias formas de poder hacerlo, como realizar un estudio de la disponibilidad o de la calidad de las comunicaciones; no obstante, una de las comprobaciones más directas y que, además, es fácilmente programable con MATLAB, es el cálculo del cociente $\frac{E_b}{N_0}$, es decir, la relación entre la energía por bit y la densidad espectral de potencia de ruido. Este parámetro, ampliamente utilizado en el mundo de las comunicaciones digitales, ayuda a determinar la relación señal a ruido de un sistema, debiendo estar por encima de un cierto valor umbral para asegurar su correcto funcionamiento.

A nivel de código, los pasos a seguirse son (Anexo A):

1. En primer lugar, es necesario definir los componentes del enlace concreto que se vaya a estudiar. Así, para el UL se configurará como transmisor el avión, y como receptores los aeropuertos y los satélites, mientras que para el DL se considerará únicamente como transmisor la constelación Iridium NEXT, y

como receptor la aeronave.

2. A continuación, se calcula la relación $\frac{E_b}{N_0}$ del radioenlace. Para ello puede emplearse la función *ebno*, recogida dentro del toolbox *Satellite Communications*, con la que es posible determinar la relación señal a ruido, en dB, que habría en el extremo receptor.

```
>> E_UL
E_UL =
Columns 1 through 15
36.6918 32.4930 27.9326 24.7464 22.3729 20.4952 18.9457 17.6284 16.4835 15.4714 14.5648 13.7438 12.9939 12.3037 11.6645
-Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf
-Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf
-3.7666 -6.2300 -6.3404 -4.6894 -6.9646 -8.9383 -9.5187 -11.3200 -13.2732 -15.0103 -16.5177 -Inf -Inf -Inf -Inf
-14.4117 -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf
-Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf
-Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf
-Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf
-Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf
-Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf
-14.8444 -15.7351 -13.0500 -14.1604 -11.6794 -10.8155 -10.7651 -11.2035 -12.3126 -12.4090 -11.9621 -13.9172 -13.7340 -16.4035 -12.6853
-12.8621 -13.1240 -15.0807 -14.4458 -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf
-Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf
-Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf
-Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf
-Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf -Inf
```

Figura 3.18. Resultados del cálculo de la relación E_b/N_0 del DL.

3. Como puede verse en la Figura 3.18, MATLAB genera una matriz con los distintos resultados del estudio. No obstante, esta no es cómoda de interpretar, por lo que a fin de clarificar los resultados es recomendable graficar el margen del enlace. Para ello es necesario calcular la diferencia entre las distintas $\frac{E_b}{N_0}$ de cada conexión, y el valor mínimo que debería tener este parámetro en los sistemas ADS-B, el cual es de 10 dB. De esta forma, para cada instante de tiempo se debe representar el valor máximo de entre los posibles márgenes, siendo viable la comunicación para los intervalos en los cuales este valor fuera positivo.

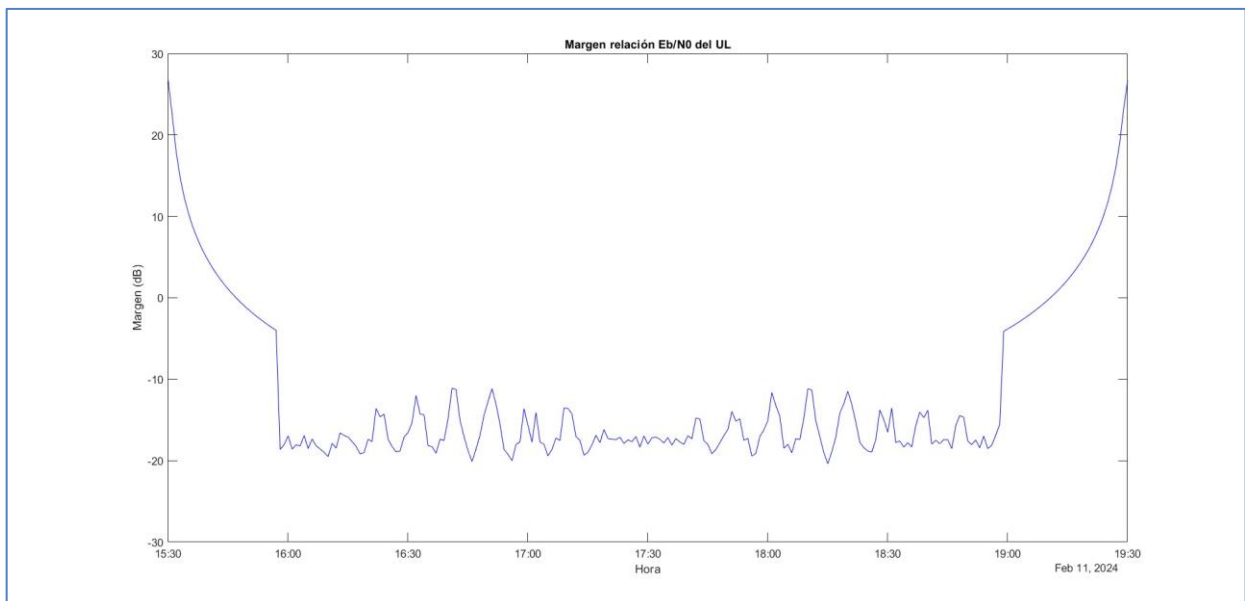


Figura 3.19. Gráfica del margen de la relación E_b/N_0 del UL con respecto al tiempo.

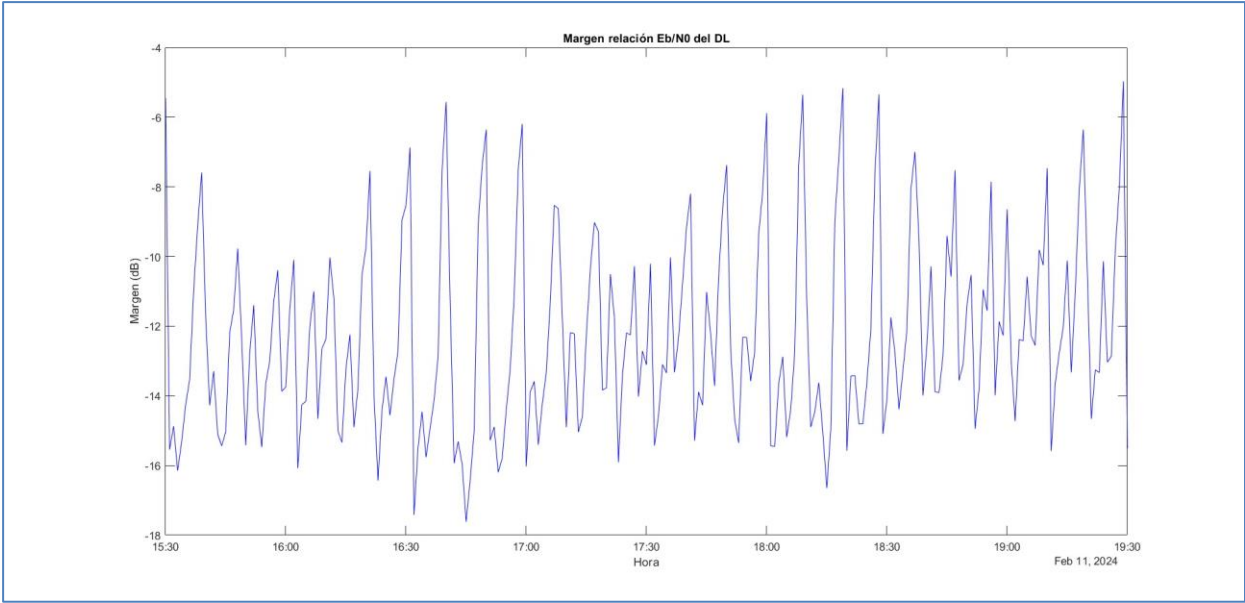


Figura 3.20. Gráfica del margen de la relación Eb/N0 del DL con respecto al tiempo.

Tabla 3.1. Parámetros de la simulación ADS-B del vuelo Sevilla-Estocolmo.

Parámetros	Valores
Altura del vuelo	10600 m
Coordenadas aeropuerto de Sevilla	37,42028 °; 5964944 °
Coordenadas aeropuerto de Estocolmo-Arlanda	-5,89028 °; 17,93417 °
Número de planos orbitales de Iridium NEXT	6
Número de satélites por plano orbital	11
Longitud del semieje mayor de las órbitas satelitales	780 km
Frecuencia de operación (DL y UL)	1090 MHz
Potencia transmitida en el UL	125 – 500 W
Potencia transmitida en el DL	200 W

4. RESULTADOS DEL ESTUDIO

4.1. Conclusiones sobre la viabilidad del sistema

Una vez finalizados los estudios explicados en el punto 3, es posible extraer varias conclusiones con respecto a la efectividad del sistema. La más importante es que, a pesar de que los análisis de los apartados 3.2.1 y 3.2.2 indican que durante la totalidad del vuelo se tiene visibilidad ya sea con alguno de los equipos del segmento espacial, o con alguno de los del terrenal; las gráficas de los márgenes muestran que, en la práctica, los circuitos de subida y bajada solo serían viables durante una pequeña parte del trayecto.

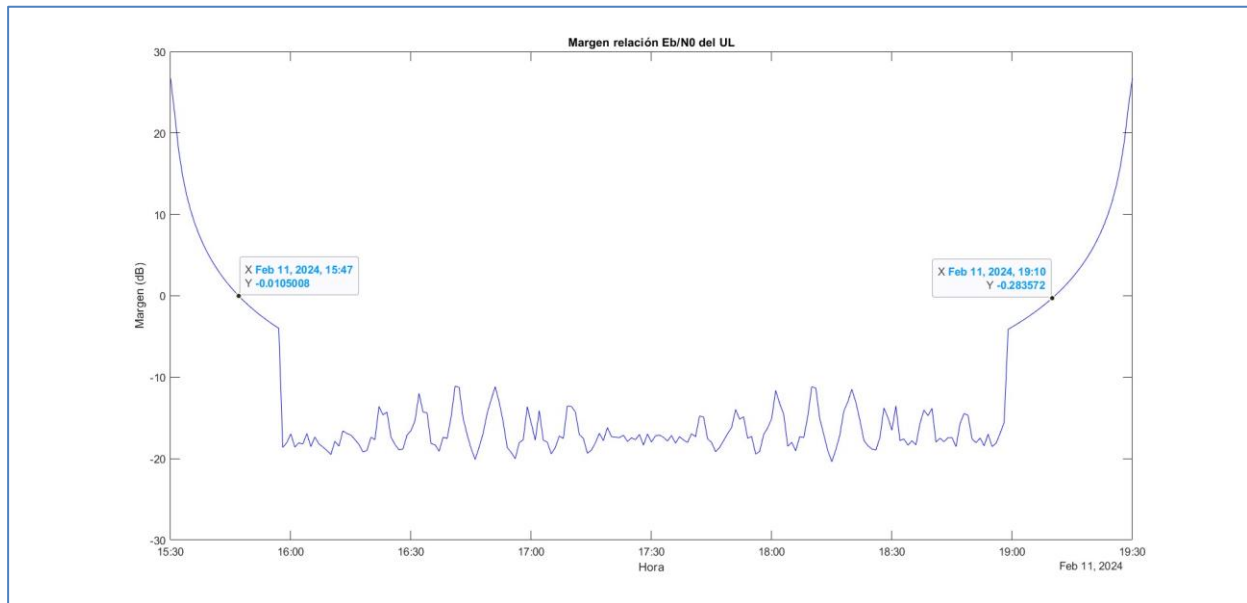


Figura 4.1. Coordenadas temporales del UL entre las cuales no es posible la comunicación.

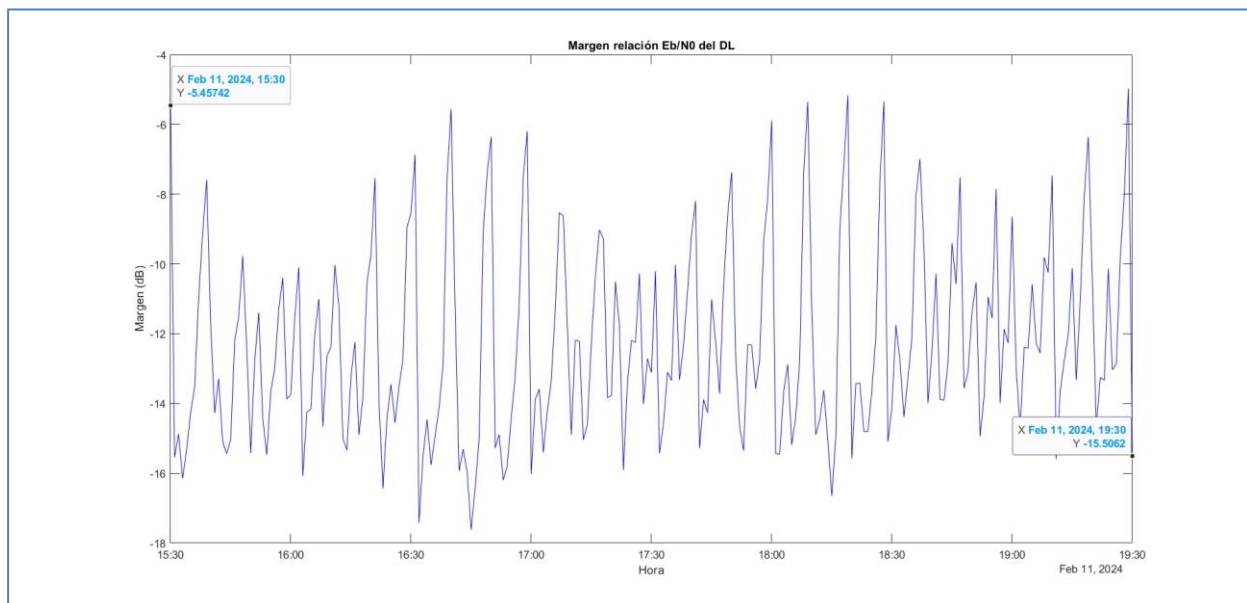


Figura 4.2. Coordenadas temporales del DL entre las cuales no es posible la comunicación.

En el caso del UL, esto es, cuando el avión actúa como transmisor y los satélites y los aeropuertos como receptores; solo sería posible la comunicación durante, aproximadamente, los primeros y últimos 20 minutos del vuelo, ya que son las franjas temporales en las que la coordenada Y de la Figura 3.19 es positiva. Es decir, que entre las 15:47 y las 19:10 solo algún otro avión que se encontrase en la zona de cobertura de 250 millas

náuticas de la aeronave transmisora sería capaz de recibir la información emitida por sus equipos *ADS-B Out*.

La situación con respecto al DL es parecida. Si bien en el análisis del punto 3.2.1 se observa que la comunicación entre las bases terrenales y el avión será posible durante aproximadamente la primera media hora de vuelo; la Figura 4.1 indica que, en ningún momento del viaje, la diferencia entre la $\frac{E_b}{N_0}]_{real}$ y la $\frac{E_b}{N_0}]_{mínima}$ del circuito entre los satélites y la aeronave vaya a ser superior a 0, lo que implica que la constelación nunca será capaz de transmitir información con suficiente potencia como para alcanzar la relación señal a ruido mínima necesaria de los equipos *ADS-B In* del avión.

4.2. Propuestas alternativas

4.2.1. Soluciones con sistemas en órbitas LEO

Como se ha visto en el apartado anterior, tanto para el UL como el DL el problema radica en la falta de potencia de los equipos transmisores, ya sean los del avión o los de los satélites. Así, la primera alternativa a estudiar será el aumento de la PIRE de estos equipos hasta el máximo posible. En lo que respecta al enlace de bajada, ya se estaba utilizando en las simulaciones la potencia pico que son capaces de proveer los satélites Iridium NEXT (200 W), no obstante, para el enlace de subida sí que es posible incrementar la potencia de los dispositivos *ADS-B Out* del avión desde los 125 W que se estaban empleando, valor mínimo establecido en la legislación para los sistemas ADS-B de aviones de pasajeros; hasta los 500 W, el máximo permitido para los vuelos comerciales. De esta forma, una vez terminadas las simulaciones se obtienen los resultados reflejados en las Figuras 4.2 y 4.3.

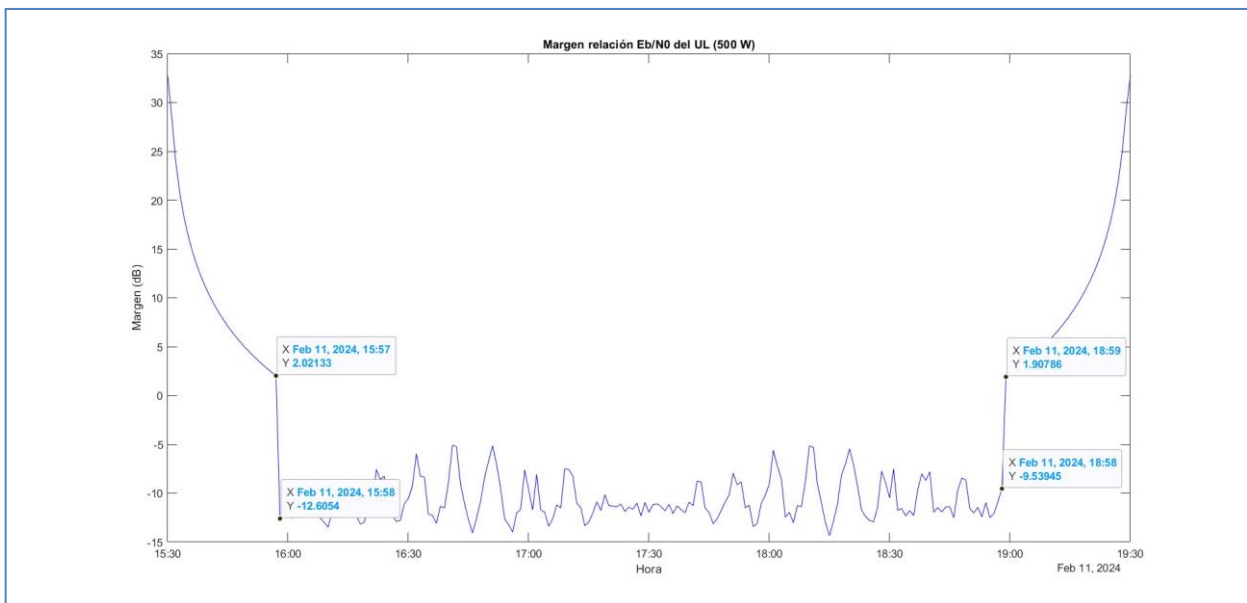


Figura 4.3. Margen entre las relaciones E_b/N_0 del UL para 500 W.

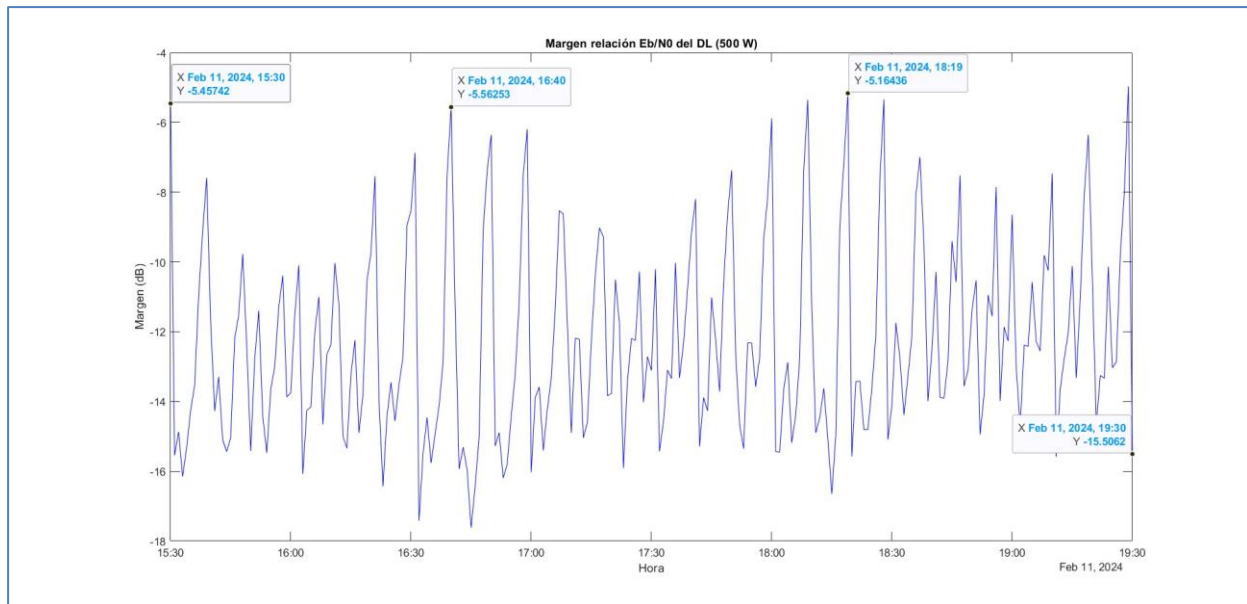


Figura 4.4. Margen entre las relaciones E_b/N_0 del DL para 500 W.

Con respecto al DL, el comportamiento es exactamente el mismo que el visto anteriormente, puesto que no han cambiado ninguna de las características de sus elementos. No obstante, en el enlace ascendente sí que puede observarse una ligera mejora, ya que ahora el tiempo durante el cual la transmisión es viable ha aumentado en total unos 20 minutos, permitiendo que coincidan los intervalos de disponibilidad del UL y el DL cuando se está en las inmediaciones de los aeropuertos origen y destino. Por tanto, únicamente restaría estudiar alguna alternativa para cuando las comunicaciones solo puedan utilizar como soporte la constelación Iridium NEXT.

Con esto en mente, lo primero es comprobar bajo qué condiciones es posible la comunicación empleando como nexo únicamente este sistema satelital. Para ello se ha diseñado otro escenario, correspondiente a un vuelo entre los aeropuertos internacionales JFK (Nueva York) y L.F Wade (Bermudas), en el que el número de satélites con los que se llega a tener cobertura es superior al del vuelo entre Sevilla y Estocolmo, a fin de comprobar si esta mayor cantidad de dispositivos permitiría paliar la falta de potencia.

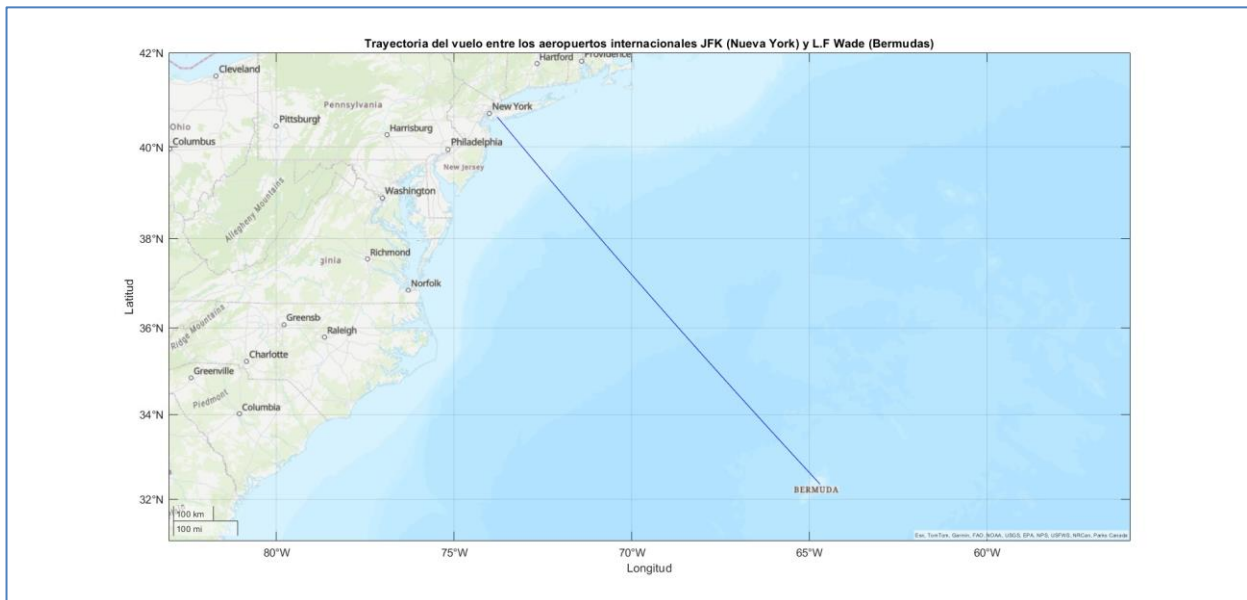


Figura 4.5. Proyección sobre la superficie terrestre de la trayectoria seguida por el avión.

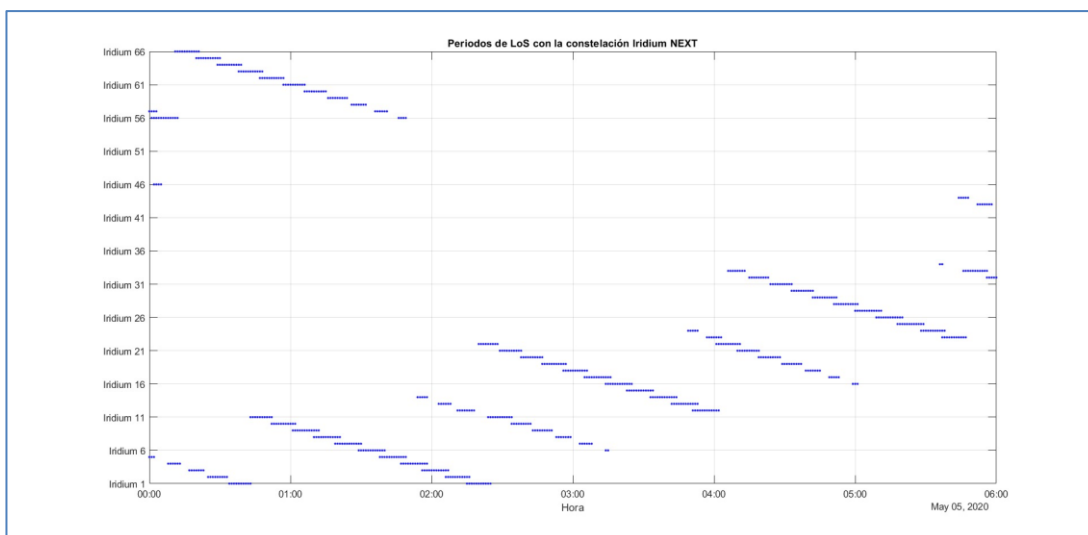


Figura 4.6. Gráfica con los intervalos de visibilidad entre el avión y los satélites de la constelación.

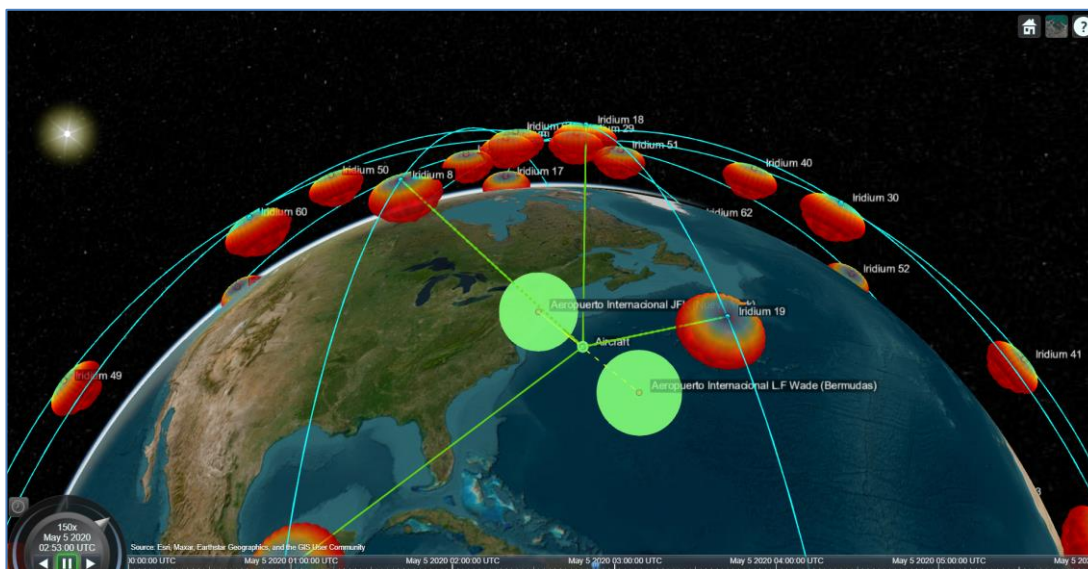


Figura 4.7. Captura del escenario satelital correspondiente al vuelo entre Nueva York y las Bermudas.

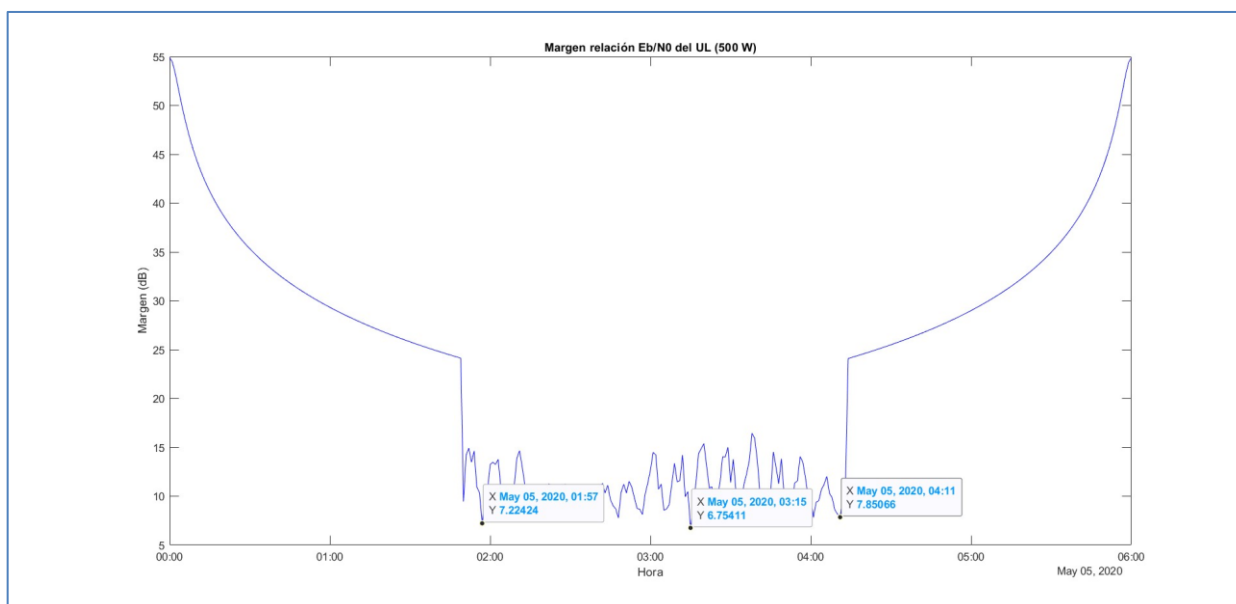


Figura 4.8. Margen de las relaciones E_b/N_0 del UL para 500 W.

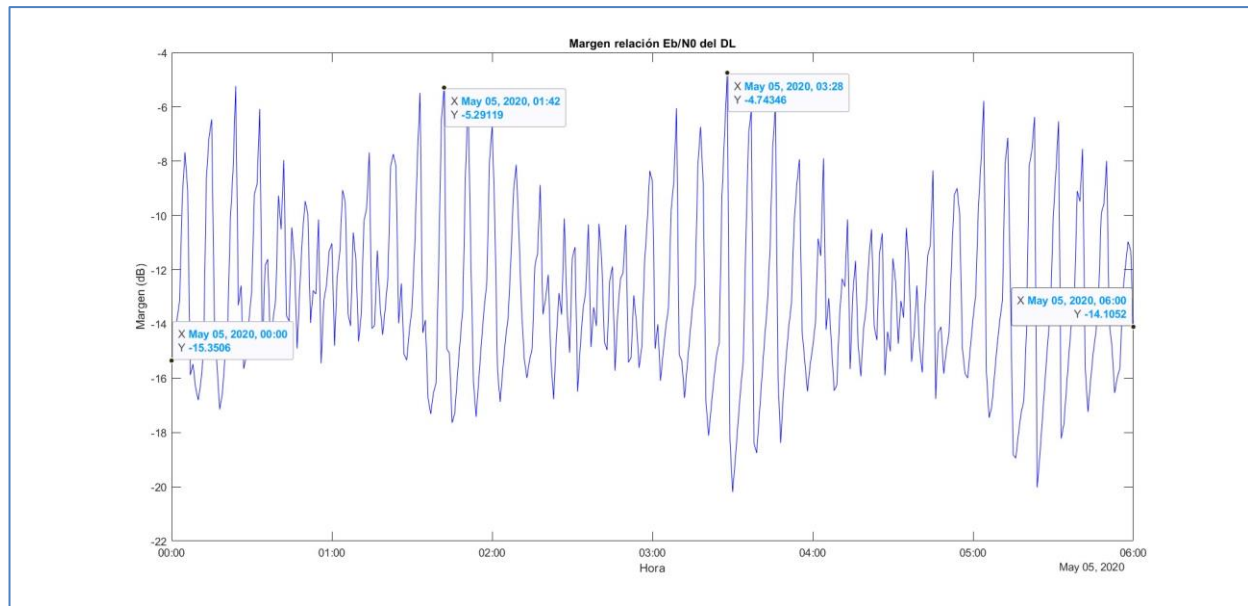


Figura 4.9. Margen de las relaciones Eb/N0 del DL para 500 W.

Source	Target	IntervalNumber	StartTime	EndTime	Duration
"Aircraft"	"Aeropuerto Internacional JFK (Nueva York)"	1	05-May-2020 00:00:00	05-May-2020 01:49:00	6540
"Aircraft"	"Aeropuerto Internacional L.F Wade (Bermudas)"	1	05-May-2020 04:14:00	05-May-2020 06:00:00	6360

Figura 4.10. Resultados del estudio del enlace de acceso entre el avión y los aeropuertos.

Los resultados de estas nuevas simulaciones, como puede apreciarse en las imágenes anteriores, son en primera instancia muy similares a los del vuelo entre Sevilla y Estocolmo, si bien, tal y como muestran las Figuras 4.5 y 4.6, la cantidad de satélites con los que en promedio es posible conectarse es considerablemente mayor, alcanzándose los 4 o incluso 5 radioenlaces simultáneos, frente a los 1 o 2 que se tenían antes. De esta forma, dado que las prestaciones de los dispositivos ADS-B no han cambiado, y que las características orbitales de la constelación Iridium NEXT son las mismas para ambos escenarios, puede deducirse que, efectivamente, este incremento del número de nodos con los que poder conectarse es la razón principal que explica que, como se ve en la gráfica de la Figura 4.7, el UL de este nuevo escenario satelital sí que sea viable, ya que es lo que ha permitido que en el intervalo de tiempo durante el que ya no se tiene cobertura con los aeropuertos, correspondiente al tramo de la gráfica que va desde las 01:49 hasta las 04:12; la diferencia entre la $\frac{E_b}{N_0}]_{real}$ y la $\frac{E_b}{N_0}]_{mínima}$ se mantenga siempre por encima de los 0 dB.

En lo que respecta al DL, sin embargo, se aprecia que, nuevamente, cuando actúan como transmisores los satélites la comunicación vuelva a no ser posible, ya que no se tiene la suficiente potencia como para poder sobreponerse al ruido. Dicho esto, el que el enlace descendente no sea factible no invalida ni la eficacia ni la utilidad del sistema ADS-B, ya que, si uno se para a pensarlo, lo imprescindible no es que la constelación pueda comunicarse con la aeronave, sino que sea esta la que, gracias al apoyo de los satélites, sea capaz de en todo momento poder establecer comunicación con alguno de los nodos del sistema, ya sean del segmento espacial o del terrenal. Una vez que se consiga esto, deberá ser la propia topología utilizada la que garantice que los datos de aeronavegación puedan llegar a los centros de control.

Dicho esto, en caso de que hubiera alguna emergencia que notificar, ya se ha demostrado con el análisis del enlace de acceso que siempre y cuando se esté dentro de la zona de cobertura de los aeropuertos, la comunicación entre estos y el avión sí sería posible. Aparte, también hay que tener en cuenta que, cuando se está en plena situación de vuelo, no es con las torres de control con las que habría que comunicarse, sino con los aviones que pudieran estar en las inmediaciones, lo cual podría seguirse haciendo a pesar de que no fuera posible apoyarse en ninguno de los satélites de la constelación.

Por ende, puede concluirse que la razón diferenciadora que hace viable la comunicación en este segundo escenario frente al primero es, simplemente, el mayor número de satélites de apoyo disponibles. De esta forma,

una posible solución para facilitar que el UL del vuelo entre Sevilla y Estocolmo cumpliera con los estándares mínimos de los equipos ADS-B, sería emplear como soporte otra constelación de satélites aún más numerosa que Iridium NEXT. En este contexto, *LeoSat*, con 108 dispositivos en órbita; *Telesat LEO*, con más de 117; o *Starlink*, con cerca de 6000 satélites en órbita baja; son las que a priori podrían postularse como las mejores alternativas para este escenario concreto.

4.2.2. Soluciones con sistemas en órbitas MEO y GEO

Otra posible alternativa sería tratar de apoyarse en alguna constelación MEO, o en un satélite GEO con el que se pudiera tener cobertura durante todo el vuelo. Así, a fin de determinar cuáles de estos equipos podrían adaptarse mejor a las condiciones del escenario, se han empleado las siguientes herramientas y páginas webs para estudiar las características radioeléctricas y superficies de cobertura de los distintos satélites de comunicación disponibles:

- **Base de datos de la UCS (*Union of Concerned Scientist*):** Repositorio que contiene información sobre más de 7560 satélites.
- **Satbeams:** Página web con la que es posible conocer las características técnicas, zonas de cobertura y bandas de frecuencia empleadas por cada uno de los haces de los equipos satelitales.
- **SatelliteXplorer:** Web con la que poder ver en tiempo real la posición y órbitas seguidas por los diferentes satélites de comunicaciones disponibles hoy día.

De esta forma, y tras analizar en detalle la información de estas fuentes, puede llegarse a la conclusión de que los candidatos más prometedores son, para el caso de la órbita MEO, la constelación O3b; y para el caso geoestacionario, el satélite Inmarsat-5 F1.

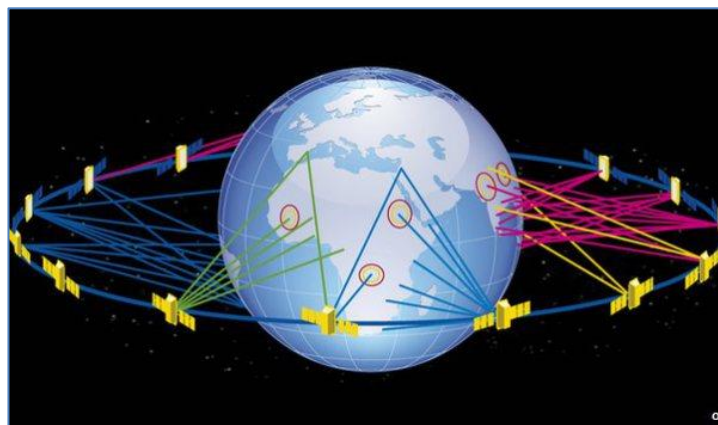


Figura 4.11. Diagrama de la constelación O3b [18].



Figura 4.12. Representación de la zona de cobertura sobre la superficie de los haces S11DL, S19DL y S28DL del satélite Inmarsat-5 F1 [19].

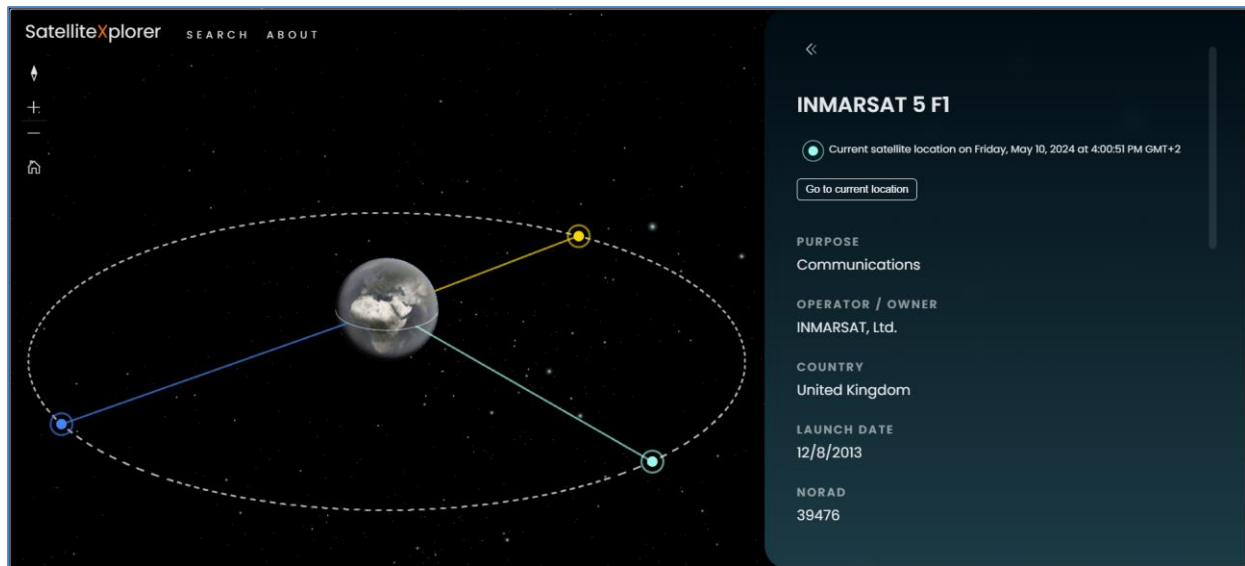


Figura 4.13. Representación de la órbita y posición en tiempo real del satélite Inmarsat-5 F1 [20].

Con respecto a la constelación O3b, si bien esta garantiza cobertura casi global, analizando la Figura 4.14 puede observarse que gran parte del vuelo Sevilla-Estocolmo se haría atravesando una de las regiones en las que precisamente peor cobertura tiene la constelación. Teniendo en cuenta que anteriormente se ha visto que, a no ser que se cuenten con muchos puntos de conexión, una constelación a 780 km de altura podría ya mostrar problemas de cobertura en el UL fruto de la falta de potencia, puede concluirse con bastante seguridad que este sistema MEO no va a ser capaz de garantizar el correcto funcionamiento de las comunicaciones, dada la distancia a la que se encuentran los satélites y la escasez de los mismos.

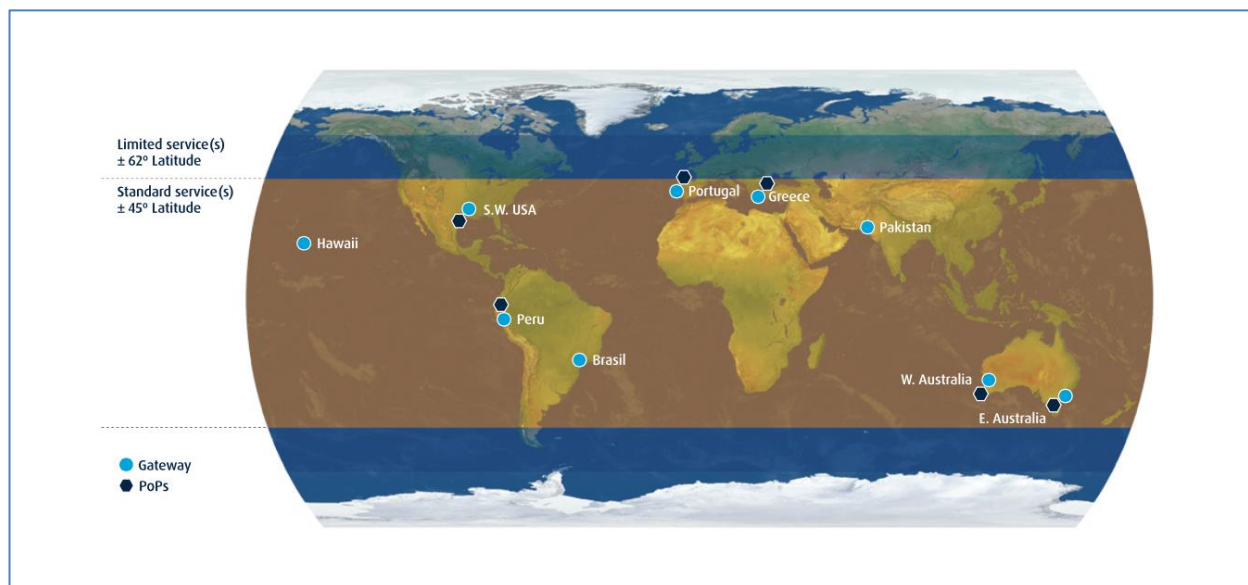


Figura 4.14. Área de cobertura de la constelación O3b [18].

Por otro lado, tras readaptar el código a las características técnicas del satélite Inmarsat-5 F1 (Anexo A), y tras someter el escenario satelital a las mismas simulaciones que los casos anteriores, se termina llegando a una conclusión similar a las de los supuestos antes vistos. Si bien como indica la Figura 4.15 durante la totalidad del vuelo se tiene LoS con el satélite, el estudio del margen del UL indica nuevamente que, aun usando los máximos valores de potencia permitidos para sistemas ADS-B, una vez se supera la zona de cobertura de las estaciones terrenales la comunicación deja de ser viable, fruto otra vez de recibir una potencia demasiado baja debido a la gran distancia que hay entre los equipos transmisores del avión, y los sistemas receptores de los segmentos espacial y terrenal.

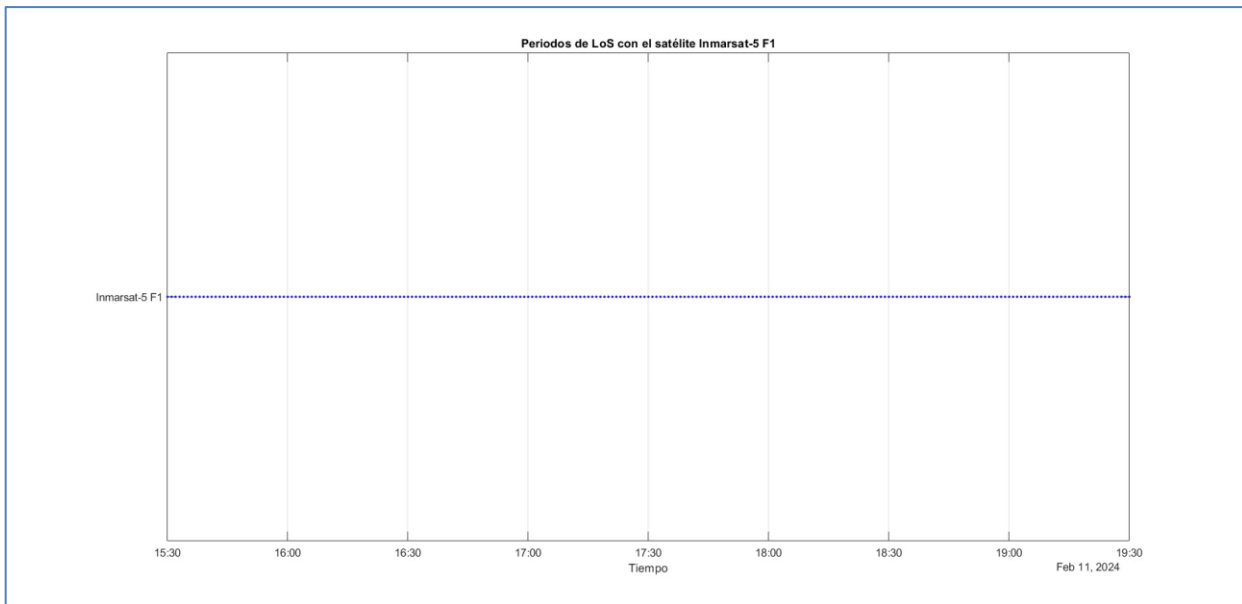


Figura 4.15. Periodos de LoS entre el avión y el satélite Inmarsat-5 F1.

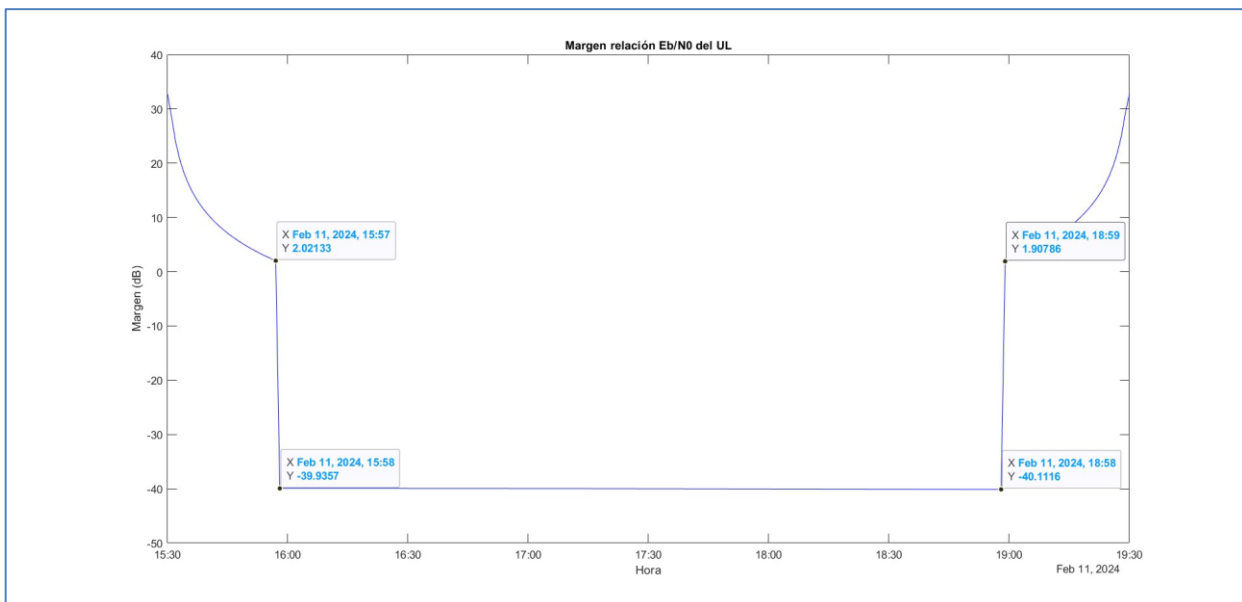


Figura 4.16. Margen entre las relaciones E_b/N_0 del UL entre el avión y el satélite Inmarsat-5 F1.

En vista a estos resultados, puede concluirse que la mejor alternativa para poder garantizar el correcto funcionamiento de las comunicaciones durante el vuelo entre Sevilla y Estocolmo sería apoyarse en una constelación LEO con una mayor densidad de satélites que Iridium NEXT, ya que como se ha podido ver, las alternativas en órbitas MEO y GEO son inviables debido a que no les llegaría suficiente potencia a los equipos *ADS-B In* del segmento espacial, dada la enorme distancia de separación y la falta de nexos adicionales a los que poder conectarse.

REFERENCIAS

- [1] Ads-B, Flightaware. s.f. “Optimizing Your ADS-B Receiver for Reliability and Performance.” Flightaware.com. <https://blog.flightaware.com/optimizing-your-ads-b-receiver>. Consultado el 3 de mayo de 2024.
- [2] “ADS-B out Explained.” s.f. Txtav.com. <https://txtav.com/en/journey/articles/articles/adsb-out-explained>. Consultado el 3 de mayo de 2024.
- [3] Al-Hraishawi, Hayder, Houcine Chougrani, Steven Kisseleff, Eva Lagunas, and Symeon Chatzinotas. 2021. “A Survey on Non-Geostationary Satellite Systems: The Communication Perspective.” *ArXiv [Eess.SP]*. <http://arxiv.org/abs/2107.05312>.
- [4] “Antenna Catalog.” s.f. Mathworks.com. <https://es.mathworks.com/help/antenna/antenna-catalog.html>. Consultado el 3 de mayo de 2024.
- [5] “Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B).” s.f. Faa.gov. https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/avs/offices/afx/afs/afs400/afs410/ads-b. Consultado el 3 de mayo de 2024.
- [6] “ComplexConic.” 2023. Agi.com. Diciembre 15, 2023. <https://help.agi.com/AGIComponentsJava/Javadoc/agi-foundation-geometry-shapes-ComplexConic.html>.
- [7] Deng, Zhongliang, Xiaoyi Yu, Wenliang Lin, Ke Wang, Hao Liu, Lei Gu, Yang Liu, and Xiaojuan Ma. 2021. “A Multi-Beam Satellite Cooperative Transmission Scheme Based on Resources Optimization and Packets Segmentation.” *Electronics* 10 (22): 2841. <https://doi.org/10.3390/electronics10222841>.
- [8] “HeyWhatsThat.” s.f. Heywhatsthat.com. <https://www.heywhatsthat.com/>. Consultado el 3 de mayo de 2024.
- [9] Huang, Yu, Yan Li, Zhaofeng Zhang, and Ryan Wen Liu. 2020. “GPU-Accelerated Compression and Visualization of Large-Scale Vessel Trajectories in Maritime IoT Industries.” *IEEE Internet of Things Journal* 7 (11): 10794–812. <https://doi.org/10.1109/jiot.2020.2989398>.
- [10] “Inmarsat-5 F1, 2, 3, 4 (GX 1, 2, 3, 4).” s.f. Gunter’s Space Page. https://space.skyrocket.de/doc_sdat/inmarsat-5.htm. Consultado el 11 de mayo de 2024.
- [11] “Iridium NEXT.” s.f. Eoportat.org. <https://www.eoportat.org/satellite-missions/iridium-next>. Consultado el 3 de mayo de 2024.
- [12] “Iridium Satellite Communications.” s.f. Iridium Satellite Communications. <https://www.iridium.com/>. Consultado el 3 de mayo de 2024.
- [13] “Iridium Satellite Network.” 2021. MetOcean Telematics. Junio 18, 2021. <https://metocean.com/iridium/>.
- [14] “Iridium-NEXT – Spacecraft & Satellites.” s.f. Spaceflight101.com. <https://spaceflight101.com/spacecraft/iridium-next/>. Consultado el 3 de mayo de 2024.
- [15] Leyva-Mayorga, Israel, Beatriz Soret, and Petar Popovski. 2021. “Inter-Plane Inter-Satellite Connectivity in Dense LEO Constellations.” *IEEE Transactions on Wireless Communications* 20 (6): 3430–43. <https://doi.org/10.1109/twc.2021.3050335>.
- [16] Madero, M. J. (2023). Tema 1: Aspectos Generales de los Sistemas de Comunicaciones. GITT: Sistemas Emergentes de Comunicaciones. Universidad de Sevilla.
- [17] Marín, Daniel. 2017. “Lanzados diez satélites en la misión Iridium 4 (Falcon 9 v1.2).” Eureka. Diciembre 24, 2017. <https://danielmarin.naukas.com/2017/12/24/lanzados-diez-satelites-en-la-mision-iridium-4-falcon-9-v1-2/>.
- [18] “O3b – Spacecraft & Satellites.” s.f. Spaceflight101.com. <https://spaceflight101.com/spacecraft/o3b/>. Consultado el 11 de mayo de 2024.

- [19] “Satbeams - World Of Satellites at your fingertips”. s.f. Satbeams Web and Mobile. <https://www.satbeams.com/satellites?norad=39476>. Consultado el 11 de mayo de 2024.
- [20] “Satellite Map”. s.f. Esri.com. <https://geoxc-apps.bd.esri.com/space/satellite-explorer/>. Consultado el 11 de mayo de 2024.
- [21] S.f. Sourceforge.net. <https://lloydwood.users.sourceforge.net/Personal/L.Wood/O3b-polar/o3b-narrative.pdf>. Consultado el 11 de mayo de 2024.
- [22] Tan, Zizhong, Honglei Qin, Li Cong, and Chao Zhao. 2019. “Positioning Using IRIDIUM Satellite Signals of Opportunity in Weak Signal Environment.” *Electronics* 9 (1): 37. <https://doi.org/10.3390/electronics9010037>.

ANEXO A

```
% Creamos el escenario satelital, definiendo inicio y duración del vuelo
```

```
startTime = datetime(2024,2,11,15,30,0,0);  
stopTime = startTime + hours(4);  
sampleTime = 60;  
sc = satelliteScenario(startTime, stopTime, sampleTime);  
viewer = satelliteScenarioViewer(sc);
```

Figura A.1. Definición del escenario satelital y sus características temporales.

```
% Definimos las propiedades de los aeropuertos
```

```
% Coordenadas aeropuerto Sevilla: 37,42028, -5,89028
```

```
% Coordenadas aeropuerto Estocolmo: 59,64944, 17,93417
```

```
Nombre_aeropuertos = ["Aeropuerto de Sevilla (Sevilla)"; "Aeropuerto de Estocolmo-Arlanda  
(Estocolmo)"];  
Lat_aeropuertos = [37.42028; 59.64944];  
Long_aeropuertos = [-5.89028; 17.93417];  
aeropuertos = groundStation(sc, Lat_aeropuertos, Long_aeropuertos,  
Name=Nombre_aeropuertos);
```

Figura A.2. Definición de la posición de los aeropuertos origen y destino.

```
% Definimos los detalles de la trayectoria del avión
```

```
altura_vuelo = 10600;  
Origen = [Lat_aeropuertos(1) Long_aeropuertos(1) altura_vuelo];  
Destino = [Lat_aeropuertos(2) Long_aeropuertos(2) altura_vuelo];  
Duracion_vuelo = [0 seconds(sc.StopTime - sc.StartTime)];  
sampleRate = 1/30; % Tasa de muestreo para el cálculo de la trayectoria (Hz)  
  
trayectoria = geoTrajectory([Origen; Destino], Duracion_vuelo, SampleRate=sampleRate,  
AutoPitch=true, AutoBank = true);  
% Con AutoPitch y AutoBank ajustamos la trayectoria del avión para ajustarse a la  
dirección del vuelo y contrarrestar la fuerza centrípeta respectivamente  
  
[positionLLA, orientation] = trayectoria();  
[posicion_avion, orientacion_avion] = lookupPose(trayectoria,  
trayectoria.TimeOfArrival(1):(1/trayectoria.SampleRate):trayectoria.TimeOfArrival(end));
```

Figura A.3. Comandos para el cálculo de la trayectoria del vuelo del avión.

```

%% Generamos una tabla en la que se recoja la posición y orientación del avión

Ubicacion_Exacta = timetable(posicion_avion, StartTime = sc.StartTime, TimeStep =
seconds(1/trayectoria.SampleRate), VariableNames="LAT-LONG-ALT");
Orientacion_Exacta = timetable(compact(orientacion_avion), StartTime = sc.StartTime,
TimeStep = seconds(1/trayectoria.SampleRate), VariableNames="Orientacion");
Posicion_avion_exacta = retime(Ubicacion_Exacta, 'regular', 'linear', TimeStep =
seconds(sc.SampleTime));
Orientacion_avion_exacta = retime(Orientacion_Exacta, 'regular', 'nearest', TimeStep =
seconds(sc.SampleTime));

% Configuramos los parámetros para la visualización de la trayectoria seguida por el
avión
Lat_avion = Posicion_avion_exacta("LAT-LONG-ALT")(:,1);
Long_avion = Posicion_avion_exacta("LAT-LONG-ALT")(:,2);
figure(1);
geoplot(Lat_avion, Long_avion, "b-");
geolimits("auto");
geobasemap topographic;

% Añadimos el avión al estudio satelital interpretándolo como un satélite
avion = satellite(sc, Posicion_avion_exacta, coordinateFrame = "geographic", Name =
"Avion");
pointAt(avion, Orientacion_avion_exacta, CoordinateFrame = "ned");
hide(avion.Orbit);
show(avion.GroundTrack);

```

Figura A.4. Extracto del código para añadir el avión y su trayectoria al esquema satelital.

```

%% Añadimos a la simulación la constelación de satélites Iridium NEXT

num_Sat_por_Plano_Orbital = 11;
num_Orbitas = 6;

RAAN = [];
trueanomaly = [];

for i = 1:num_Orbitas
    for j = 1:num_Sat_por_Plano_Orbital
        RAAN(end+1) = 180*(i-1)/num_Orbitas;
        if mod(i,2)
            trueanomaly(end+1) = 360*(j-1)/num_Sat_por_Plano_Orbital;
        else
            trueanomaly(end+1) = 360*(j-1 + 0.5)/num_Sat_por_Plano_Orbital;
        end
    end
end

% Definimos las características de las órbitas de la constelación
Semieje_Mayor = repmat((6371 + 780)*1e3, size(RAAN)); % En Km
Inclinacion = repmat(86.4, size(RAAN)); % En grados(°)
Excentricidad = zeros(size(RAAN)); % En grados(°)
argofperiapsis = zeros(size(RAAN)); % En grados(°)
Constelacion_Iridium = satellite(sc, Semieje_Mayor, Excentricidad, Inclinacion, RAAN,
argofperiapsis, trueanomaly, Name = "Iridium" + string(1:66));

% Mostramos los distintos planos orbitales
hide(Constelacion_Iridium.Orbit, viewer);
show(Constelacion_Iridium(1:num_Sat_por_Plano_Orbital:end).Orbit, viewer);

```

Figura A.5. Código para la generación de una constelación de satélites igual a la constelación Iridium NEXT.

```
% Realizamos un análisis de los intervalos de tiempo en los cuales el avión tiene
conexión con los aeropuertos origen y destino
LoS_aeropuerto = access(avion, sc.GroundStations);
intervalo_LoS_aeropuerto = accessIntervals(LoS_aeropuerto)
```

Figura A.6. Detalle del código para el estudio del enlace de acceso del avión con los aeropuertos.

```
% Configuramos los sensores cónicos montados sobre los satélites
Sensores_Iridium = conicalSensor(Constelacion_Iridium, "MaxViewAngle",125);
```

Figura A.7. Codificación de los sensores cónicos para los satélites Iridium NEXT.

```
% Analizamos los intervalos de acceso con los satélites Iridium NEXT
LoS_satelite = access(avion, Sensores_Iridium);
intervalos_LoS_satelite = accessIntervals(LoS_satelite)
```

Figura A.8. Código para el estudio del enlace de acceso entre el avión y la constelación de satélites.

```
% Graficamos los intervalos de visualización con los satélites de la constelación
[sSatellite, time] = accessStatus(LoS_satelite);
Grafica_LoS_satelite = double(sSatellite);
Grafica_LoS_satelite(Grafica_LoS_satelite == false) = NaN; % Evitamos que se muestren
aquellos satélites que no son visibles
Grafica_LoS_satelite = Grafica_LoS_satelite + (0:numel(Constelacion_Iridium) - 1)';

figure(2);
plot(time, Grafica_LoS_satelite, " .", Color="blue")
yticks(1:5:66)
yticklabels(Constelacion_Iridium.Name(1:5:66))
title("Periodos de LoS con la constelación Iridium NEXT")
grid on
xlabel("Tiempo")
axis tight
```

Figura A.9. Código para la representación de los intervalos de acceso con la constelación.

```
%% Una vez que se observa que el avión tendrá siempre conectividad, ya sea en los
aeropuertos o por medio de los satélites, realizamos un análisis más detallado

f_operacion = 1090e06;
pot_operacion = 10*log10(125); % Potencia mínima para los vuelos comerciales: 125 W.
Potencia máxima permitida: 500 W

antena_avion = arrayConfig("Size",[1 1]); % Generación de la antena isotrópica
trans_avion = transmitter(avion, Antenna=antena_avion, Power=pot_operacion,
MountingAngles=[0;0;0], Name="Transmisor ADS-B del avión");
pattern(trans_avion, Size = 450000);
receptor_avion = receiver(avion, Antenna=antena_avion, Name= "Receptor ADS-B del avión");

% Creamos las antenas para los aeropuertos
antena_aeropuerto = arrayConfig("Size",[1 1]);
receptor_aeropuerto = receiver(aeropuertos, Antenna=antena_aeropuerto,
Name=aeropuertos.Name + "Receptor");
pattern(receptor_aeropuerto(1), f_operacion, Size = 311600);
pattern(receptor_aeropuerto(2), f_operacion, Size = 346200);
```

Figura A.10. Definición y configuración de los sistemas ADS-B del avión y de los aeropuertos.

```

antennaType = "Isotropic";
pot_sat = 10*log10(200);           % La PIRE máxima de los TX Iridium NEXT es de 200 W

if antennaType == "Isotropic"
    antena_sat = arrayConfig("Size", [1 1]);
    receptor_sat = receiver(Constelacion_Iridium, Antenna=antena_sat, MountingAngles=[0,
0, 0], Name = Constelacion_Iridium.Name + "Receptor");
    trans_sat = transmitter(Constelacion_Iridium, Antenna=antena_sat, Power=pot_sat,
MountingAngles=[0;0;0], Name = Constelacion_Iridium.Name + "Transmisor");
    pattern(receptor_sat, f_operacion, Size = 300000);
    play(sc);
end

```

Figura A.11. Configuración de antenas isotrópicas en los satélites.

```

% Se clasifican los 48 haces de acuerdo a cuán exteriores son
beamCountCenter = [15,32,31,48,47,16];
beamCountMiddle = [12,29,24,30,28,45,40,46,44,13,8,14];
beamCountOuter =
[5,6,7,25,17,20,18,26,27,19,21,22,23,41,33,36,34,42,43,35,37,38,39,9,1,4,2,10,11,3];

% Definición de los patrones geométricos de los haces [°]
radial_offset = [19,42,58];
radial_beamwidth = [35,15,20];
transverse_beamwidth = [21,30,12];

el = -90:1:90;
az = -90:1:90;

% Se inicializan los parámetros de los patrones de radiación
beamPat = zeros(numel(el),numel(az),48,'like',1);

```

Figura A.12. Parámetros para la caracterización inicial de los haces.

```

%% Evaluamos cada uno de los haces del array de antenas

for i = 1:48

    % Se comienza con el estudio de los haces centrales
    if any(ismember(i,beamCountCenter))

        % En primer lugar se diseña una antena gaussiana con las prestaciones geométricas
        antes definidas
        element =
phased.GaussianAntennaElement(Beamwidth=[radial_beamwidth(1),transverse_beamwidth(1)]);

        % Se genera el patrón de radiación empleando como base la matriz antes definida
        pat = zeros(numel(el),numel(az),'like',1);
        for m = 1:numel(el)
            temp = element(f_operacion,[az;el(m)*ones(1,numel(az))]);
            pat(m,:) = temp;
        end

        % Se rota el patrón de radiación hasta su posición correcta
        k = find(i == beamCountCenter);
        phi = 360/numel(beamCountCenter)*(k-1);
        newax = rotx(phi)*rotz(radial_offset(1));
        beamPat(:, :, i) = rotpat(pat,az,el,newax);
    end
end

```

Figura A.13. Código para la generación del patrón de radiación del array para los haces centrales.

```
% Generación del patrón compuesto y definición de la antena multihaz a ser usada en el código principal

compositeMag = max(abs(beamPat),[],3); % Se elige la configuración con mayor ganancia

antenna =
phased.CustomAntennaElement('AzimuthAngles',az,'ElevationAngles',el,'MagnitudePattern',mag2db(compositeMag),'PhasePattern',zeros(size(compositeMag)));
```

Figura A.14. Definición final de la antena multihaz que irá sobre los satélites de la constelación.

```
if antennaType == "Custom 48-Beam"
    antena_sat = HelperCustom48BeamAntenna(f_operacion);
    receptor_sat = receiver(Constelacion_Iridium, Antenna=antena_sat, MountingAngles=[0, -90, 0], Name = Constelacion_Iridium.Name + "Receptor");
    trans_sat = transmitter(Constelacion_Iridium, Antenna=antena_sat, Power=pot_sat, MountingAngles=[0;0;0], Name = Constelacion_Iridium.Name + "Transmisor");
    pattern(receptor_sat, f_operacion, Size = 300000);
    play(sc);
end
```

Figura A.15. Configuración sobre el código principal de las antenas de 48 haces de los satélites.

```
% Analizamos la relación Eb/N0 (dB) de los enlaces, considerando que en los sistemas ADS-B la Eb/N mínima es de 10 dB

% Calculamos el margen máximo del UL considerando cualquiera de los RX a los que es posible conectarse
UL = link(trans_avion, [receptor_aeropuerto, receptor_sat]);
[E_UL, time] = ebno(UL);
margen = E_UL - repmat([receptor_aeropuerto.RequiredEbNo, receptor_sat.RequiredEbNo]',[1,size(E_UL,2)]);

% Representamos dicho margen
figure(3);
plot(time, max(margen), "b");
xlabel("Hora");
ylabel("Margen (dB)");
title("Margen relación Eb/N0 del UL");

% Realizamos el análisis análogo del DL considerando solo el receptor del avión, ya que si no habría que hacer 66 estudios (uno por cada satélite)
DL = link(trans_sat, receptor_avion);
[E_DL, time] = ebno(DL);
margen = E_DL - repmat([receptor_avion.RequiredEbNo]',[1,size(E_DL,2)]);

% Representamos el margen máximo del DL antes calculado
figure(4);
plot(time, max(margen), "b");
xlabel("Hora");
ylabel("Margen (dB)");
title("Margen relación Eb/N0 del DL");
```

Figura A.16. Comandos para el análisis de la relación Eb/N0 del UL y el DL.

```
% Añadimos a la simulación el satélite GEO Inmarsat-5 F1  
  
Semieje_Mayor = 42164 * 1e3;  
Excentricidad = 0;  
Inclinacion = 0;  
RAAN = 0;  
argumentOfPeriapsis = 0;  
trueAnomaly = 0;  
sat =  
satellite(sc,Semieje_Mayor,Excentricidad,Inclinacion,RAAN,argumentOfPeriapsis,trueAnomaly  
, Name = "Inmarsat-5 F1");
```

Figura A.17. Definición de las características orbitales del satélite GEO Inmarsat-5 F1.