



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*Megaconstelaciones de satélites en órbita LEO. Oportunidades,
desafíos y riesgos en el ámbito de la Defensa y Seguridad*

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa

ALUMNO: Francisco José Magaz Villaverde
DIRECTOR: José María Núñez Ortuño
CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*Megaconstelaciones de satélites en órbita LEO. Oportunidades,
desafíos y riesgos en el ámbito de la Defensa y Seguridad*

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa
Especialidad de Sistemas y Tecnologías de Telecomunicación

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

La industria de los satélites está preparada para colocar en órbita terrestre baja LEO (*Low Earth Orbit*) más satélites pequeños, aquellos con una masa inferior a 600 kg., en la próxima década que todos los lanzados desde el comienzo de la carrera espacial. A medida que los avances tecnológicos han hecho que el uso del espacio sea más factible y económico, el número de satélites pequeños en el espacio exterior ha aumentado a un ritmo exponencial. La miniaturización de la tecnología también ha afectado la tecnología satelital y ha permitido que la industria espacial utilice satélites pequeños con capacidades que hace sólo unos años habrían requerido satélites mucho más grandes. Estos satélites hacen posible el reciente lanzamiento y propuesta de megaconstelaciones, redes de más de 100 satélites operando juntos en LEO.

La Estrategia Espacial de Seguridad Nacional de los EE. UU. reconoce que las operaciones espaciales son de vital importancia para la Seguridad Nacional. Para los ejércitos de todo el mundo, estas megaconstelaciones propuestas brindan un potencial de ventajas inigualables sobre el escenario actual, pero también numerosos riesgos potenciales.

Este trabajo examina documentos disponibles públicamente, artículos de noticias, revistas, publicaciones académicas, informes gubernamentales, tratados internacionales, leyes y regulaciones, y otra información para evaluar el estado actual de la industria de las megaconstelaciones LEO, así como las tendencias que se están produciendo. Algunos de los aspectos discutidos se relacionan con actividades espaciales que incluyen el conocimiento de la situación espacial; ciberseguridad, inteligencia, reconocimiento y vigilancia, espionaje en órbita, interferencias de radio, desechos espaciales y armas antisatélite, por nombrar algunos.

PALABRAS CLAVE

Defensa, Seguridad, LEO, megaconstelación, satélite

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a mi familia por su apoyo, ánimo y aliento durante la realización de este Máster DIRETIC.

También agradecer el apoyo de mi tutor, José María Núñez Ortuño, que gracias a su ayuda y consejos me han permitido finalizar este trabajo y adquirir conocimientos profundos en el área de las telecomunicaciones, en particular la satelital.

Finalmente mencionar también a mis compañeros de Máster con los que tantos buenos momentos, algunos de carreras y estrés ante una entrega inminente, hemos pasado en las fases presenciales en la ENM de Marín.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	4
1 Introducción y objetivos	5
1.1 Contexto y justificación	5
1.1.1 Las megaconstelaciones LEO.....	6
1.1.2 Seguridad y Defensa	10
1.2 Objetivos del trabajo	11
1.3 Organización de la memoria	11
1.4 Fuentes de información	11
2 Estado del arte	12
2.1 Introducción a la comunicación satelital.....	12
2.2 Órbitas satelitales	13
2.3 Órbita terrestre alta (HEO).....	15
2.4 Órbitas Geosíncrona (GSO) y Geoestacionaria (GEO)	15
2.5 Órbita terrestre media (MEO)	16
2.6 Órbita terrestre baja (LEO)	18
2.6.1 Características de la Órbita LEO	18
2.6.2 Comunicaciones ISL en órbita LEO.....	19
2.6.3 Ventajas de los satélites en órbita LEO	21
2.6.4 Desafíos de los satélites en órbita LEO	26
2.6.5 Aplicaciones de satélites en órbita LEO	29
3 Megaconstelaciones satelitales.....	33
3.1 Iridium: Cobertura Global de Comunicaciones Móviles	33
3.1.1 Historia	34
3.1.2 Características.....	35
3.1.3 Carga útil alojada.....	39
3.2 Starlink: Revolucionando las Comunicaciones por Satélite	41
3.2.1 Historia	41
3.2.2 Características.....	42
3.3 Kuiper: Acceso Global a Internet de Amazon	47
3.3.1 Historia	47
3.3.2 Características.....	47

3.3.3 Previsiones futuras.....	52
3.4 OneWeb: Conectividad para Áreas Remotas.....	54
3.4.1 Historia	54
3.4.2 Características.....	54
3.4.3 Despliegue actual.....	59
3.5 IRIS ² : Sistema de Respuesta e Intercambio de Información	60
3.5.1 Historia	60
3.5.2 Características.....	60
3.5.3 Previsiones futuras.....	62
4 Aspectos de Defensa en las megaconstelaciones	64
4.1 Introducción	64
4.2 Comunicaciones	65
4.3 Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento.....	65
4.4 Monitorización meteorológica	66
4.5 PNT	66
4.6 Alerta temprana de misiles balísticos.....	67
4.7 Arquitectura Espacial de Defensa Nacional.....	68
5 Amenazas y Desafíos en las megaconstelaciones LEO	70
5.1 Introducción	70
5.2 Amenazas cibernéticas y medidas de seguridad	70
5.3 Acumulación de desechos espaciales en LEO	72
5.4 Interferencias del espectro radioeléctrico	74
5.5 Aspectos legales y regulatorios de las megaconstelaciones.....	76
5.6 ASAT (<i>Anti-satellite Weapon</i>).....	78
6 Conclusiones y Líneas Futuras.....	81
6.1 Conclusiones	81
6.2 Líneas futuras	83
6.2.1 IoT.....	83
6.2.2 Multi-user MIMO.....	84
6.2.3 Integración con redes terrestres	84
7 Bibliografía.....	85
Anexo I: Acrónimos	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Órbitas terrestres [19]	13
Figura 2-2 Excentricidad de una de órbita [19].....	14
Figura 2-3 (a) Vista frontal y ejes de los satélites y (b) vista superior de una constelación de estrella de Walker con 200 satélites y 5 planos orbitales [29]	20
Figura 3-1 Constelación de satélites Iridium [76]	33
Figura 3-2 Huellas de los satélites Iridium [83]	36
Figura 3-3 Componentes de la megaconstelación Iridium [87]	39
Figura 3-4 Satélite de segunda generación Iridium [88]	40
Figura 3-5 Megaconstelación Starlink de satélites Gen1 [33]	43
Figura 3-6 Satélite Starlink [112]	44
Figura 3-7 Terminales de usuario Starlink [122]	46
Figura 3-8 Ejemplo de cobertura del sistema Kuiper con varios haces [125].....	50
Figura 3-9 Diseño preliminar de los terminales de usuario de Kuiper [128]	51
Figura 3-10 Huella de cada satélite OneWeb [137]	56
Figura 3-11 Terminal de usuario OW1 [140].....	58
Figura 3-12 Línea de tiempo del programa IRIS ² [147].....	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Órbitas satelitales más comunes [19].....	13
Tabla 3-1 Bandas de frecuencias utilizadas por el sistema de satélites Iridium [81].....	35
Tabla 3-2 Bandas de frecuencia utilizadas por el sistema de satélites SpaceX [96] [100] [101] [102].....	42
Tabla 3-3 Distribución de satélites Kuiper en capas [125]	47
Tabla 3-4 Bandas de frecuencia utilizadas por el sistema de satélites Kuiper [124]	48
Tabla 3-5 Bandas de frecuencia utilizadas por el sistema de satélites OneWeb [137]	55
Tabla 5-1 Riesgos que afectan a las megaconstelaciones [173].....	72

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y justificación

Estamos en la antesala de la próxima gran revolución de Internet, una revolución que proporcionará acceso rápido y de baja latencia a Internet en cualquier lugar del mundo, permitiendo una sociedad global verdaderamente conectada.

Hoy en día, si bien la conectividad a Internet se ha vuelto esencial en muchos aspectos de la vida cotidiana, todavía hay más de 3.500 millones de personas sin acceso a Internet, es decir, casi el 40% de la población mundial [1]. Incluso en los países más desarrollados, el acceso a Internet no está disponible de manera uniforme, y algunas áreas sufren un acceso limitado, lento o nulo, incluidas ubicaciones rurales en las que puede no ser rentable conectarse.

Como resultado de los recientes avances tecnológicos, los satélites de órbita terrestre baja LEO de nueva generación tienen el potencial de ofrecer acceso a Internet rápido y asequible en cualquier parte del mundo, en tierra, mar o aire [2].

El acceso a Internet por satélite ha estado disponible desde hace más de 25 años desde satélites geoestacionarios en órbita terrestre alta GEO (*Geosynchronous Equatorial Orbit*). El desafío ha sido que los satélites que operan a esta altitud proporcionaran conexión a Internet con una latencia mínima de 500 a 600 ms, lo cual es necesario para muchas aplicaciones. De hecho, la comunicación eficaz con estos satélites GEO suele requerir el uso de una gran antena parabólica fija o una señal relativamente potente.

Los satélites LEO, la última generación de satélites que proporcionan acceso a Internet, son más pequeños, ligeros y menos costosos que los satélites GEO. Como ejemplo, los satélites Starlink miden aproximadamente 3,2 m. x 1,6 m. x 20 cm. y pesan 227 kg. Los satélites LEO más pequeños solo miden 11 cm. x 11 cm x 2,8 cm. y pesan menos de 1 kg. Además, los satélites LEO se producen en masa y pueden costar tan solo 7.000 euros cada uno, sin contar los costes de lanzamiento. En comparación, los satélites GEO de mayor tamaño pueden pesar hasta 6.500 kg. y costar entre 150 y 200 millones de euros sin los costos de lanzamiento.

Es importante destacar que los satélites LEO proporcionan baja latencia, de 2 ms a 27 ms, y acceso a Internet de banda ancha, lo que los convierte en una alternativa viable a Internet fija e inalámbrica para muchos servicios.

La migración hacia los satélites LEO para proporcionar acceso a Internet ha sido posible gracias al desarrollo de nuevas antenas en fase, pequeñas, de estado sólido y de bajo perfil. Estas antenas planas, conocidas como ESA (*Electronically-Steered Antenna*), facilitan el seguimiento de satélites LEO en rápido movimiento [3]. Estas antenas tienen la ventaja adicional de poder proporcionar conectividad a Internet en barcos, aviones, trenes y vehículos en movimiento.

Además, la disponibilidad de vehículos de lanzamiento reutilizables ha mejorado la economía en torno a la colocación de satélites en órbita terrestre baja, proporcionando la capacidad de poner hasta 60 satélites LEO en órbita terrestre baja en un solo lanzamiento [4].

Uno de los inconvenientes de los satélites LEO es que operan a altitudes bajas, por lo que sólo pueden cubrir áreas relativamente pequeñas. También se mueven rápidamente en el cielo, por lo que los proveedores de Internet por satélite necesitan desplegar cientos o miles de satélites para proporcionar la conectividad que necesitan los usuarios en tierra. En el lado positivo, la baja altitud reduce la potencia necesaria para comunicarse con ellos, en comparación con los satélites GEO.

Para aumentar la resiliencia de estas megaconstelaciones de satélites LEO, algunos operadores de megaconstelaciones han equipado sus satélites con ISL (*Inter-satellite Link*), comunicación satélite a satélite basada en láser [5]. Esto permite que los satélites de una constelación se comuniquen entre sí, proporcionando un servicio continuo incluso cuando algunos de ellos no tengan un enlace directo con una estación terrestre, por ejemplo, cuando pasan sobre el mar o cuando una estación terrestre está fuera de línea.

1.1.1 Las megaconstelaciones LEO

A fecha de 1 de enero de 2023 5.973 satélites LEO activos orbitan la Tierra, de los cuales más de 5.000 son de uso civil y el resto de uso militar o gubernamental [6]. Históricamente, las comunicaciones por satélite implicaban naves en órbitas GEO, grandes sistemas que han adquirido más capacidades a lo largo de los años. Pero ahora las constelaciones de comunicaciones en órbita NGSO (*Non-Geostationary Orbit*), incluidos los satélites de órbita LEO y MEO (*Medium Earth Orbit*), están ganando protagonismo frente a las situadas en órbitas GSO (*Geostationary Orbit*) y su número pronto podría dispararse. Si las actuales propuestas de Internet por satélite se hacen realidad, alrededor de 50.000 satélites activos orbitarán sobre la tierra dentro de 10 años. Incluso si los planes más ambiciosos no se hacen realidad, los satélites se fabricarán y lanzarán a una escala sin precedentes.

El concepto de megaconstelación de satélites en órbita LEO no es nada nuevo, surgió en la década de los 90, cuando varias empresas intentaron proporcionar conectividad global. Teledesic, Iridium, Odyssey y Globalstar tenían planes muy ambiciosos [7]. Al final, sin embargo, redujeron o cancelaron sus megaconstelaciones previstas debido a los altos costos y la demanda limitada. Iridium SSC se declaró en quiebra en 1999, Globalstar hizo lo mismo en 2002, Teledesic suspendió sus trabajos de construcción de satélites ese mismo año [8] o OneWeb, antes conocida como World Wu Satellites, también se declaró en quiebra en 2020. De algunas de estas empresas se hablará en profundidad en este trabajo. Después de esa experiencia, muchos analistas e inversores de la industria siguen siendo escépticos sobre la viabilidad de las grandes constelaciones LEO.

Pero muchas cosas han cambiado en los últimos 20 años. La tecnología satelital ha avanzado; la demanda de ancho de banda se ha disparado, sin que se vislumbre ninguna desaceleración; y las empresas han desarrollado modelos de negocio creativos para generar beneficios a partir de la conectividad. Además, tanto las empresas tecnológicas como los inversores cuentan ahora con reservas de capital mucho mayores para invertir, lo que les permite financiar grandes constelaciones, aunque es evidente que este capital no tiene una paciencia infinita.

Estos cambios bien podrían hacer que esta nueva conectividad satelital sea un éxito. Sin embargo, las empresas que planean grandes constelaciones de Internet por satélite LEO aún necesitan reducir significativamente una serie de costos para garantizar la viabilidad a largo plazo. Reducir los costos de lanzamiento es una parte de la ecuación, pero será igualmente o más crítico reducir el costo de fabricación de naves espaciales, equipos terrestres y equipos de usuario. Si los proveedores y propietarios de las constelaciones pueden lograr estos recortes, podrían desbloquear suficiente demanda de grandes constelaciones LEO para transformar los mercados de comunicaciones B2B (*Business-to-Business*) y B2C (*Business-to-Consumer*).

Los satélites de comunicaciones tradicionales en órbitas GEO han demostrado su eficacia desde los años 60. Aunque son costosos, tienen gran capacidad y una larga vida útil. Su altitud, a 35.786 km. de la Tierra, les proporciona un amplio campo de visión, lo que permite a los operadores cubrir la mayor parte de la superficie del planeta con tres satélites espaciados a intervalos adecuados. Los avances tecnológicos recientes, incluidos nuevos diseños reconfigurables y de alto rendimiento, han mejorado tanto la eficiencia como el rendimiento.

Los nuevos conceptos de satélites LEO, que orbitan entre 180 km. y 2.000 de la Tierra, ofrecen comunicaciones más rápidas, con menor latencia y a menudo proporcionan un mayor ancho de banda por usuario que los satélites GEO, incluso más que el cable, el cobre y los sistemas inalámbricos anteriores a 5G. La comunicación se produce a través de una constelación de satélites LEO; la cobertura global requiere una gran cantidad de satélites. Estos conceptos requerirán cambios importantes en las operaciones de los satélites, incluida la fabricación y la cadena de suministro, ya que exigen más de un satélite y con una vida media más corta, estimada, por ejemplo, en unos cinco años en los satélites de la constelación Starlink [9].

Una convergencia de avances tecnológicos hace que tanto el desarrollo como el éxito en el mercado de los grandes sistemas de comunicación LEO sean más probables ahora que en el pasado: avances tecnológicos, la aparición de nuevos modelos de negocio, mejor financiación y mayor demanda para ancho de banda de baja latencia.

1.1.1.1 Avances tecnológicos

1.1.1.1.1 Uso del espectro

Las megas constelaciones LEO utilizan principalmente las bandas Ku (12-18 GHz) y Ka (26,5-40 GHz), y en algunos casos también la banda L (1-2 GHz) y V (40-75 GHz). Estas frecuencias permiten velocidades de datos más altas, antenas más pequeñas, haces más estrechos y mayor seguridad. Las frecuencias más altas son más vulnerables al clima y al desvanecimiento de la señal de radiofrecuencia por la lluvia, la nieve o el hielo atmosférico; Las frecuencias superiores a 11 GHz son más vulnerables que las frecuencias más bajas. Afortunadamente, recursos como el diseño mejorado de las estaciones terrestres, la codificación adaptativa y la modulación de señales pueden reducir esta exposición [10]. La mejora de la eficiencia espectral y las tasas de reutilización del espectro también pueden aumentar la cantidad de datos que entrega un sistema.

1.1.1.1.2 Rendimiento de los satélites

A parte de un mejor uso del espectro, los avances en antenas activas y procesamiento de señales han aumentado el rendimiento por satélite, aumentando la capacidad de las constelaciones. Así, un satélite ahora puede desplegar más haces puntuales y se puede proporcionar mayor potencia a través de cada haz [11]. Además, los ISL mejoran la conectividad y aportan beneficios concretos como un mejor rendimiento y gestión [12]. Finalmente, los métodos mejorados de compresión de datos reducen los requisitos de ancho de banda sin reducir la calidad de las comunicaciones.

1.1.1.1.3 Terminales de usuario

Tradicionalmente, se ha accedido a los satélites y se les ha realizado su seguimiento mediante antenas parabólicas. Este equipo no es adecuado para las constelaciones LEO, en las que numerosos satélites cruzarán rápidamente el campo de visión de un receptor terrestre al mismo tiempo. Las antenas ESA, también llamadas antenas orientables electrónicamente, pueden cambiar los haces, y acceder a una gran cantidad de satélites, sin movimiento físico. Las ESA también pueden diseñarse para ensamblaje modular, lo que podría permitir a los fabricantes producir una gran cantidad de piezas básicas para su uso tanto en estaciones terrestres de constelaciones como en equipos de consumo, mejorando así las economías de escala [3]. Otros avances importantes en equipos terrestres incluyen nuevos análisis predictivos y técnicas de optimización de redes que utilizan los puntos de entrada terrestre disponibles de manera más efectiva.

1.1.1.1.4 Gestión de las constelaciones.

El operador de una megaconstelación LEO debe monitorear y gestionar el estado y el funcionamiento de miles de satélites. Los avances recientes en análisis, combinados con una potencia informática mejorada y algoritmos de inteligencia artificial, pueden ayudar con estas tareas y al mismo tiempo reducir los tiempos de respuesta y los costes operativos. Asimismo, los avances de ISL que aumentan el rendimiento también reducen los costos de las estaciones de retorno, *backhaul*, y mejoran el control satelital y la latencia de la red. La combinación de estos elementos facilita el control y la gestión autónomos y semiautónomos de los satélites, reduciendo las necesidades de personal.

1.1.1.2 Modelos de negocio

Así como la tecnología ha evolucionado, también lo han hecho las fuentes de ingresos derivadas de la conectividad a Internet. En la década de los 90, las empresas de comunicaciones generalmente seguían un modelo de negocios en el que los ingresos provenían de tarifas de servicio por ancho de banda y acceso; las tarifas a menudo se basaban en el uso. Con una demanda relativamente baja, este modelo no era viable para los conceptos de satélite de los años 90. Hoy en día, también sería arriesgado cobrar a los consumidores por el tiempo de uso, pero por una razón diferente: probablemente habría poca aceptación de dichos planes. La preferencia por el acceso ilimitado es clara en la industria de la telefonía móvil, donde la facturación por mensaje de texto o por minuto ha dado paso a los planes ilimitados.

Afortunadamente, las empresas tienen nuevas opciones para generar ingresos a partir de la conectividad.

Algunas empresas han estado utilizando adquisiciones para llevar el desarrollo y la distribución de contenido internamente. Las empresas que comenzaron como distribuidores, como Amazon y Netflix, buscan cada vez más el contenido original como fuente de ingresos. La creación interna también les permite ofrecer ofertas empaquetadas y obtener un flujo de ingresos que no depende del precio de acceso.

La publicidad *online* ahora exige más gasto que los anuncios impresos o televisivos. Al controlar un canal de distribución *online*, las empresas pueden complementar sus ingresos existentes ofreciendo espacio para contenido pago o cobrando a los anunciantes por la ubicación premium, opciones que no estaban disponibles para las empresas a finales de los años noventa.

En todas las industrias, muchas empresas ofrecen ahora servicios empaquetados en los que uno o más elementos son gratuitos, para aumentar los ingresos en otros servicios. Amazon Prime, con su envío gratuito, es el ejemplo clásico. Algunos proveedores de las megaconstelaciones pueden tomar un camino similar al ofrecer paquetes que incluyan conectividad gratuita para aumentar los ingresos en otros lugares: por ejemplo, una red social que ofreciera acceso a Internet de forma gratuita o a un precio reducido casi con certeza aumentaría el tiempo que los usuarios pasan en su sitio. Esto generaría

ingresos directos y potencialmente aumentaría la cantidad de personas que utilizan los servicios de la plataforma.

Para aumentar el impulso, es posible que las empresas y los inversores ahora estén dispuestos a esperar más para obtener beneficios de las megaconstelaciones LEO. En lugar de esperar un flujo de caja positivo inmediato, muchos se están centrando en modelos de negocio que faciliten la adquisición de clientes y el control de los ecosistemas, de modo que inicialmente puedan fijar precios bajos para sus ofertas para atraer negocios, incluso si eso elimina la posibilidad de obtener ganancias. Su objetivo es establecerse como líderes y crear una base para el éxito a largo plazo, siguiendo los pasos de muchos actores de alta tecnología durante los últimos 20 años. Estas empresas primero se concentraron en crear escala y adquirir una masa crítica de usuarios y luego cambiaron su enfoque a ganar dinero con la red.

1.1.1.3 Financiación

En la década de los 90, muchas empresas no pudieron encontrar suficientes inversores para financiar sus constelaciones de satélites. Teledesic, por ejemplo, propuso inicialmente gastar más de 9.000 millones de dólares para lanzar 840 satélites, pero luego redujo su plan a unos 300. Más tarde, la empresa suspendió por completo la producción de satélites después de gastar cientos de millones de dólares en costos de desarrollo [13].

Los conceptos de satélite actuales son inicialmente tan caros o más que sus predecesores. Aunque los costos continúan evolucionando y persisten muchas incertidumbres, las estimaciones para implementar un sistema que sea operativo generalmente oscilan entre 5.000 y 10.000 millones dólares. Los costos operativos anuales son elevados: sólo el costo de reemplazar los satélites ascenderá a entre 1.000 y 2.000 millones de dólares para una constelación grande si su vida útil es de unos cinco años. El segmento terrestre, incluso si está en gran medida automatizado, requerirá una cantidad sustancial de sitios y antenas, lo que implica importantes costos operativos y de capital [14]. Todo esto requerirá una inversión inicial sustancial y la capacidad de sostener los gastos hasta que se generen ingresos, especialmente si los proveedores ofrecen precios bajos para atraer negocios.

A pesar de los ecos de la baja inversión que siguió al estallido de la burbuja de las *puntocom*, el panorama de financiación es diferente al de hace 20 años. Algunas empresas tienen suficiente efectivo disponible para construir y desplegar una constelación directamente. Amazon, con 55.400 millones de dólares disponibles, es el único gran actor tecnológico con una constelación anunciada, pero Facebook ha presentado planes preliminares de satélites LEO [15]. Existen indicios que otras empresas están considerando proyectos similares, incluida Apple, que tiene reservas de 107.100 millones de dólares [16].

Otro aspecto diferente con respecto a la década de los 90, es que las empresas que necesitan inversión externa para respaldar sus planes de constelación tienen muchas oportunidades. El capital de riesgo se ha mostrado recientemente optimista respecto de los proyectos espaciales, invirtiendo más de 4.000 millones de dólares sólo en los últimos dos años. Sin embargo, la financiación de esa fuente podría disminuir. El ejemplo de OneWeb también muestra que el capital necesario para establecer un sistema puede ser mayor que la cantidad que los inversores de riesgo están dispuestos a aportar a una sola empresa. OneWeb recibió 3.400 millones de dólares de un consorcio de inversores que incluía a Airbus y Softbank, pero esto no fue suficiente [17].

Estos cambios, combinados con las nuevas oportunidades de ingresos, han creado un panorama de inversión muy diferente. A finales de la década de los 90, los entre 5.000 y 10.000 millones de dólares necesarios para desplegar una constelación, y los entre 1.000 y 2.000 millones de dólares necesarios para el mantenimiento anual, eran factores decisivos para los inversores, quizás ya no sea el caso.

1.1.1.4 Demanda de servicios de banda ancha a bajo coste

Las necesidades de ancho de banda eran modestas en la década de los 90, dada la incipiente Internet y la baja actividad del comercio electrónico y las redes sociales. La mayoría de los consumidores se aventuraban en línea por primera vez, generalmente en computadoras de escritorio con módems de acceso telefónico. El uso de teléfonos móviles estaba aumentando, pero la necesidad de conectarse globalmente, particularmente fuera de la cobertura terrestre normal, era relativamente baja.

Hoy en día, los consumidores no sólo descargan películas de alta definición, sino que también juegan y compran *online*, consumiendo mucho más ancho de banda. Además, han surgido segmentos de demanda completamente nuevos, incluida la conectividad de las aerolíneas a bordo. Otros mercados, como el *backhaul* de telecomunicaciones, se han expandido enormemente con el aumento del uso de dispositivos móviles.

Junto con la mayor demanda de conectividad, las expectativas de servicio han aumentado. Tanto las empresas como los consumidores buscan conexiones de gran ancho de banda y, para muchas aplicaciones, baja latencia. Es significativo que estas expectativas se hayan extendido más allá de los usuarios tecnológicamente sofisticados a prácticamente todos los consumidores de las economías desarrolladas y a muchos de los mercados emergentes. Sólo las poblaciones con opciones de conectividad limitadas aceptan un rendimiento inferior.

En la actualidad, la gran mayoría de los consumidores dependen de soluciones terrestres, y el uso B2B de satélites se limita a unos pocos mercados finales donde las soluciones terrestres no funcionan, por ejemplo: Internet a bordo, *backhaul* móvil de larga distancia, Internet marítimo, extracción remota de petróleo y gas, y determinadas aplicaciones militares. Esto es cierto en gran medida porque las opciones de conectividad satelital son muy caras. Pero si los proveedores de constelaciones pueden ofrecer precios competitivos, la demanda podría crecer.

1.1.2 Seguridad y Defensa

En los últimos años, los ejércitos de varios países han intentado lanzar sus programas de satélites en órbitas LEO. Estos satélites proporcionarían apoyo directo desde LEO para reconocimiento, navegación y comunicaciones avanzadas, y más, para estar en primera línea de las unidades tácticas en tierra desconocida para ellos. Estas pequeñas cargas útiles en la órbita terrestre baja serán una pieza importante para el concepto en evolución de operaciones multidominio de cualquier Ejército en términos tanto de defensa como de ataque. Los satélites LEO ayudan a combinar esfuerzos en tierra, aire, agua y espacio.

Otro uso notable del satélite LEO para las unidades militares es el alto avance técnico en el ciberespacio con una notable eficiencia en telecomunicaciones y sistemas de seguimiento específicos desde el espacio.

El lanzamiento asequible y el desarrollo con una operación más precisa son algunos de los factores que están impulsando la demanda de operaciones espaciales en LEO. Las aplicaciones que ofrecen los satélites LEO casi están dejando de lado a los satélites más tradicionales y costosos en órbitas más altas.

Así, a modo de ejemplo, la Fuerza Aérea de EE. UU. se está acercando a la industria espacial en busca de ideas sobre nuevas tecnologías habilitadoras, procesos de fabricación y materiales para grandes constelaciones de satélites de órbita terrestre baja de próxima generación para uso militar. La SDA (*Space Development Agency*) se creó en 2019 para disrumpir la producción de satélites militares poniendo en órbita un nuevo conjunto de capacidades mínimas viables cada dos años, emulando el enfoque de actualización de la industria TIC. Su enfoque para los próximos años es diseñar, construir y lanzar la NDSA (*National Defense Space Architecture*) de próxima generación del Departamento de Defensa de EE. UU [18].

1.2 Objetivos del trabajo

Como objetivos principales de este Trabajo Fin de Máster se establecen los siguientes:

- Realizar un estudio detallado de las diferentes megaconstelaciones LEO en funcionamiento a fecha de noviembre de 2023 y de otras que se encuentran en fase de desarrollo.
- Identificar y analizar los desafíos técnicos y operativos asociados con la gestión y operación de megaconstelaciones en órbita LEO en el contexto de la seguridad nacional y la defensa.
- Analizar el crecimiento y la evolución de las megaconstelaciones de satélites en órbita LEO y su impacto en la infraestructura espacial.

Además, como objetivos secundarios se establecen los siguientes:

- Evaluar las implicaciones geopolíticas de la proliferación de megaconstelaciones de satélites en órbita LEO y su influencia en las estrategias de defensa y seguridad de diferentes países.
- Evaluar las oportunidades que las megaconstelaciones de satélites en órbita LEO ofrecen para mejorar la comunicación, la observación de la Tierra y otras aplicaciones en el ámbito de la defensa y la seguridad.

1.3 Organización de la memoria

El presente trabajo se ha estructurado en dos grandes bloques: una primera teórica sobre los tipos de constelaciones; y una segunda parte en la que se presentan las megaconstelaciones más importantes, así como las oportunidades, desafíos y riesgos en el ámbito de la Defensa y la Seguridad.

1.4 Fuentes de información

La información se ha obtenido principalmente de fuentes abiertas en Internet, proporcionado esta una información muy amplia y actualizada en el ámbito de las constelaciones LEO, como puede verse en la extensa bibliografía de la presente memoria. Se ha utilizado información menos actual para la descripción de los diferentes tipos de órbitas y teoría satelital, ya que es un cuerpo de conocimiento desarrollado hace años. Para la descripción de las diferentes tecnologías sí se ha recurrido a fuentes de información más recientes, algunas de ellas coetáneas de esta memoria, al ser un entorno en pleno desarrollo y con informaciones y actualizaciones constantes.

Se señalarán dos dificultades en la obtención de información. La primera es la relativa a publicaciones en materia de defensa. Se da la paradoja que mientras se ha encontrado un número elevado de publicaciones sobre el tema en relación con las Fuerzas Armadas de EE. UU. pero muy pocas producida por la OTAN.

Por otro lado, el perfil mediático de la empresa SpaceX, matriz de la megaconstelación Starlink, hace que exista gran cantidad de información sobre ella, pero la mayoría con un enfoque más comercial o casi publibreportaje que técnico, lo que ha hecho difícil discernir la publicidad del dato objetivo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción a la comunicación satelital

Los satélites son objetos en órbitas alrededor de la Tierra. Una órbita es una trayectoria capaz de mantener el equilibrio gravitacional para rodear la Tierra sin asistencia de una fuente de energía. Las leyes físicas enunciadas por Newton y Kepler rigen la mecánica orbital.

La idea de los satélites de comunicaciones surgió de Sir Arthur C. Clark en 1945. La U. R. S. S. lanzó el primer satélite artificial, el Sputnik I, en 1957. El primer satélite de comunicaciones, un simple reflector, fue el Echo I puesto en órbita por los EE. UU. en 1960. El primer satélite geosíncrono, Syncom, fue lanzado en 1962. Actualmente hay más de 192.260 satélites operativos en órbita, 4.818 de los cuales son grandes satélites de comunicaciones [6].

Los satélites se han vuelto esenciales para la vida moderna. Entre las aplicaciones más importantes de la tecnología satelital se encuentran la voz, los datos IP, el video, la radio, la observación de la Tierra y el espacio, la monitorización de recursos globales, el uso militar, GNSS (*Global Navigation Satellite System*) y el estudio de la microgravedad entre otras.

Desde el acceso a Internet, pasando por la televisión directa al hogar hasta el telescopio Hubble, los satélites son una de las tecnologías definitorias de la era moderna.

Los servicios satelitales tienen grandes ventajas, como estar disponibles en casi todas partes de la Tierra sin cables, ser móviles, ser el medio de transmisión perfecto y ser independientes del protocolo. La desventaja de la tecnología satelital es que los satélites tienen una visibilidad limitada sobre un punto de la Tierra o un tiempo de viaje de ida y vuelta largo, y transmiten datos que pueden ser recibidos por cualquiera que esté debajo de ellos. Las transmisiones por satélite también se ven afectadas por la meteorología terrestre y espacial. Están sujetos a una tasa de error más alta que la fibra y son complejos tanto desde el punto de vista físico como regulatorio.

Los satélites se proyectan desde la Tierra mediante lanzaderas, aviones que vuelan a gran altura o cohetes. Una vez lanzadas, las cargas útiles deben alcanzar la elevación y la velocidad de escape adecuadas para ser impulsadas a la órbita. Para mantener una órbita adecuada, los satélites se controlan desde una estación terrestre en la Tierra que envía comandos y recibe el estado y la telemetría del satélite.

2.2 Órbitas satelitales

Los satélites se clasifican en tres amplios segmentos en función de la distancia de la órbita a la Tierra: HEO (*High Earth Orbit*) y GEO, MEO y LEO. También es común que los satélites utilicen órbitas excéntricas y no circulares, pasando así por una gama de altitudes en una órbita determinada.



Figura 2-1 Órbitas terrestres [19]

Alrededor de la Tierra hay dos cinturones de Van Allen, dos zonas de la magnetosfera terrestre donde se concentran grandes cantidades de partículas cargadas de alta energía, originadas en su mayor parte por el viento solar capturado por el campo magnético terrestre radiación. Estas zonas de intensa radiación deben evitarse al desplegar satélites. Las dos zonas separan las órbitas LEO y MEO.

Órbita	Distancia a la tierra (km.)	Velocidad (km./s.)	Uso	Comentarios
LEO	180 – 2.000	6,9-7,8	Observación de la tierra, Sensores, megaconstelaciones de telecomunicaciones.	Vida útil entre 3 y 10 años, órbitas, poca influencia de la radiación.
MEO	2.000 - 35.780	3,5	Observación de la tierra, GNSS.	Gran influencia de la radiación, órbitas ecuatoriales y polares.
GEO	≥35.786	3,1	TV Satélite, Telecomunicaciones, Satélites meteorológicos.	Permanece sobre el mismo punto de la tierra, órbitas ecuatoriales.

Tabla 2-1 Órbitas satelitales más comunes [19]

La altura de la órbita, o distancia entre el satélite y la superficie de la Tierra, determina la rapidez con la que el satélite se mueve alrededor de la Tierra. El movimiento de un satélite en órbita terrestre está controlado principalmente por la gravedad de la Tierra. A medida que los satélites se acercan a la Tierra, la atracción de la gravedad se vuelve más fuerte y el satélite se mueve más rápidamente.

El satélite Aqua de la NASA, por ejemplo, requiere unos 99 minutos para orbitar la Tierra a unos 705 kilómetros de altura, mientras que un satélite meteorológico a unos 36.000 km. de la superficie de la Tierra tarda 23 horas, 56 minutos y 4 segundos en completar una órbita. A 384.403 km. del centro de la Tierra, la Luna completa una única órbita en 28 días.

Cuanto más alta es la órbita de un satélite, más lento se mueve. Ciertas altitudes orbitales tienen propiedades especiales, como una órbita geosíncrona, en la que un satélite viaja alrededor de la Tierra exactamente una vez al día.

Cambiar la altura de un satélite también cambiará su velocidad orbital. Esto introduce una extraña paradoja. Si un operador de satélite quiere aumentar la velocidad orbital del satélite, no puede simplemente encender los propulsores para acelerar el satélite. Hacerlo impulsaría la órbita, aumentaría la altitud, lo que reduciría la velocidad orbital. En cambio, debe disparar los propulsores en una dirección opuesta al movimiento de avance del satélite, una acción que en tierra frenaría un vehículo en movimiento. Este cambio empujará al satélite a una órbita más baja, lo que aumentará su velocidad de avance.

Además de la altura, la excentricidad y la inclinación también determinan la órbita de un satélite. La excentricidad se refiere a la forma de la órbita. Un satélite con una órbita de baja excentricidad se mueve en un círculo cercano alrededor de la Tierra. Una órbita excéntrica es elíptica y la distancia del satélite a la Tierra cambia dependiendo de dónde se encuentre en su órbita.

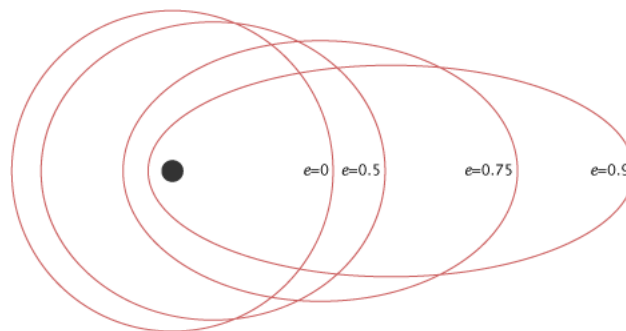


Figura 2-2 Excentricidad de una de órbita [19]

La excentricidad de una órbita indica la desviación de la órbita de un círculo perfecto. Una órbita circular tiene una excentricidad de 0, mientras que una órbita muy excéntrica está más cerca, pero siempre menos de 1. Un satélite en una órbita excéntrica se mueve alrededor de uno de los puntos focales de la elipse, no del centro.

Otra característica de una órbita es la inclinación es el ángulo de la órbita en relación con el ecuador de la Tierra. Un satélite que orbita directamente sobre el ecuador tiene inclinación 0° . Si un satélite orbita desde el polo norte geográfico hacia el polo sur, su inclinación es de 90° , y 180° orbita sobre el ecuador en la dirección opuesta al giro de la Tierra.

La altura, excentricidad e inclinación del satélite determinan la trayectoria del satélite y la vista que tendrá de la Tierra.

Los satélites LEO y MEO son visibles sólo durante un período de tiempo desde el punto de vista de un observador en la Tierra. Los satélites en estas órbitas pueden comunicarse con la Tierra funcionando en forma de flota o constelación de satélites que proporcionan cobertura total de la Tierra. También pueden utilizar un satélite geosíncrono como retransmisor, o enviar los datos a la Tierra cuando pasan sobre una estación terrestre. La mayoría de estos satélites en órbitas bajas están en órbitas que pasan por encima o cerca de los polos; algunos pasan por el mismo lugar de la Tierra al menos varias veces al día. La coordinación y ubicación de las estaciones terrestres para operar y tomar datos de estos satélites es una consideración importante en el ciclo de vida de un satélite.

La ventaja de los satélites por debajo de GEO sobre aquellas en órbita geosíncrona es que las órbitas más bajas son menos costosas de alcanzar, se necesita menos energía para enviar y recibir datos y el tiempo de viaje de ida y vuelta de los datos desde la Tierra es más rápido.

A continuación, se describen los diferentes tipos de órbitas según su distancia a la tierra [19]:

2.3 Órbita terrestre alta (HEO)

La órbita HEO es la región del espacio alrededor de la Tierra donde los satélites y otras naves espaciales se colocan en órbitas muy altas por encima de la atmósfera del planeta. Esta área se define como una altitud superior a 35.786 km. sobre la superficie de la tierra, que es el radio de una órbita geosíncrona circular. Las órbitas HEO se extiende hasta el final de la esfera de influencia de la Tierra. Un ejemplo es el satélite TESS, empleado para el estudio de exoplanetas [20] o Vela, utilizado para la detección de explosiones nucleares en aplicación del Tratado de prohibición parcial de ensayos nucleares [21].

Uno de los principales beneficios de HEO es que proporciona una vista casi sin obstáculos de la Tierra y el espacio profundo. Esto lo convierte en un lugar ideal para observaciones astronómicas y monitorización de la Tierra. Además, los satélites en HEO pueden proporcionar una cobertura continua de la superficie de la Tierra, lo que los hace muy útiles para fines de comunicación y navegación y aplicaciones militares.

Pero los satélites HEO requieren de 5 veces más energía para colocar una carga útil en HEO que colocarla en LEO, casi tanta energía como colocarlo en una órbita heliocéntrica. Además, los satélites HEO están a una distancia enorme de la Tierra por lo que hay un retraso constante en la comunicación al enviar señales hacia y desde el satélite, entre 0,1 y 4,5 segundos de retraso en cada sentido. Esto se debe a que las señales sólo pueden viajar a la velocidad de la luz. Esta característica hace a los satélites en órbita HEO nada útiles para proporcionar acceso a Internet o cualquier otra aplicación que requiera de baja latencia.

Las órbitas HEO está fuera del campo magnético de la Tierra y los satélites sufren más la radiación solar. Como resultado, las naves espaciales en HEO requieren equipo especializado y blindaje para protegerlas de la radiación, aumentando su coste, su peso y complejidad. Sólo los satélites que requieren las características únicas de HEO utilizan esta órbita.

A pesar de estos inconvenientes, el desarrollo de la tecnología HEO ha tenido un impacto significativo en la exploración espacial y ha allanado el camino para futuras misiones al espacio profundo. La capacidad de colocar satélites en HEO ha permitido a los científicos realizar descubrimientos innovadores en astronomía y ciencias de la Tierra, al tiempo que ha permitido sistemas globales de comunicación y navegación.

2.4 Órbitas Geosíncrona (GSO) y Geoestacionaria (GEO)

Cuando un satélite alcanza los 35.786 km. de la superficie terrestre, entra en punto óptimo en el que su órbita coincide con la rotación de la Tierra. Debido a que el satélite orbita a la misma velocidad y sentido que gira la Tierra, el satélite parece permanecer en su lugar en una sola longitud, aunque puede desplazarse de norte a sur. Esta órbita terrestre alta y especial se llama geosíncrona.

Una órbita geosíncrona es una órbita centrada en la Tierra con un período orbital que coincide con la rotación de la Tierra sobre su eje, 23 horas, 56 minutos y 4 segundos, un día sideral. La sincronización de la rotación y el período orbital significa que, para un observador en la superficie terrestre, un objeto en órbita geosíncrona regresa exactamente a la misma posición en el cielo después de un período de un día sidéreo. A lo largo de un día, la posición del objeto en el cielo puede permanecer inmóvil o trazar una trayectoria, normalmente en forma de 8, cuyas características precisas

dependen de la inclinación y la excentricidad de la órbita. Una órbita geosíncrona circular tiene una altitud constante de 35.786 km [22].

Las órbitas geosíncronas son las más deseables y las más caras de obtener. Estos satélites, debido a que brindan una cobertura continua, son muypreciadas por la industria de los satélites comerciales. Los satélites geosíncronos deben estar espaciados al menos 1/2 grado para evitar interferencias en la señal. Los *slots* están estrechamente regulados por la ITU (*International Telecommunications Union*). Son costosos de adquirir, y dado que las órbitas geosíncronas también son costosas de lanzar y mantener, la mayoría de los satélites en esta órbita son grandes y complejos.

Un caso particular de órbita geosíncrona es la órbita geoestacionaria, que es una órbita geosíncrona circular en el plano ecuatorial de la Tierra con inclinación y excentricidad iguales a 0.

Una órbita geoestacionaria es extremadamente valiosa para la obtención, por ejemplo, de imágenes en tiempo real de un conflicto armado ya que los satélites en esta órbita proporcionan una vista constante de la misma superficie. También se colocan satélites meteorológicos en esta órbita para monitorización y recopilación de datos en tiempo real, y satélites de navegación para proporcionar un punto de calibración conocido y mejorar la precisión de los GNSS. Los satélites de comunicaciones a menudo se colocan en una órbita geoestacionaria para que las antenas de las estaciones terrestres no tengan que girar para rastrearlos, sino que pueden apuntar permanentemente a la posición en el cielo donde se encuentran los satélites.

Las señales de los satélites en órbitas geosíncronas requieren al menos de un 1/4 de segundo de tiempo de ida y vuelta debido a la distancia a la Tierra más la distancia al ecuador desde la estación terrestre. También se necesita más potencia debido a la distancia, aunque una antena más grande en algunos satélites mitiga algo este factor. Dado que los satélites geosíncronos siempre están aproximadamente en el mismo lugar con respecto a la Tierra, es posible situar con precisión un satélite para que los usuarios puedan calibrar el equipo de la estación terrestre para minimizar la potencia y el ancho de banda.

Los satélites geosíncronos se mantienen con precisión en sus órbitas gastando combustible. A los satélites más antiguos a menudo se les permite desplazarse hacia el norte y el sur mientras se mantienen en sus *slots* este-oeste. A los satélites a los que se permite desviar tienen órbitas inclinadas. Esto podría requerir cierto seguimiento por parte de equipos terrestres, pero cuando la deriva es lo suficientemente grande, permite ver los satélites en las regiones polares.

Los satélites geoestacionarios se lanzan a través de una órbita temporal y se colocan en una posición sobre un punto particular de la superficie de la Tierra. La órbita requiere cierto mantenimiento de la posición para mantener su posición, y los satélites retirados modernos se colocan en una órbita *cementerio* más alta para evitar colisiones.

2.5 Órbita terrestre media (MEO)

Una órbita terrestre media es una órbita centrada en la Tierra con una altitud por encima de la órbita LEO y por debajo GEO, entre 2.000 y 35.786 km. sobre la superficie de la tierra. El límite entre MEO y LEO es una altitud arbitraria elegida por convención, mientras que el límite entre MEO y GEO es la altitud específica de la órbita GSO.

Todos los satélites en órbita MEO tienen un período orbital de menos de 24 horas, pero el más común es de 12 horas, con los satélites situados alrededor de 20.200 km. de la tierra, y siendo el período mínimo, para una órbita circular a la altitud más baja de MEO, aproximadamente de 2 horas [23].

Los satélites en órbitas MEO se ven perturbados por la presión de la radiación solar, que es la fuerza perturbadora no gravitacional dominante, y la radiación infrarroja de la Tierra [24]. Además, la región MEO incluye dos zonas de protones de alta energía sobre el ecuador conocidas como cinturones de radiación de Van Allen, que pueden dañar los sistemas electrónicos de los satélites sin un blindaje especial.

La principal razón por la que hay menos satélites en MEO que en LEO o GEO es la presencia de los cinturones de Van Allen. Los cinturones de Van Allen son dos regiones con forma toroidal que rodean la Tierra, centradas en su eje polar, donde el campo magnético de la Tierra atrapa partículas cargadas de los vientos solares y los rayos cósmicos, que pueden dañar los sistemas electrónicos a bordo de los satélites. Los entornos con alta radiación en general también pueden dañar los paneles solares, que convierten la energía en electricidad para alimentar los satélites una vez que han alcanzado la órbita deseada [25].

El cinturón interior se extiende desde aproximadamente 500 km. a 5.500 km. en el ecuador y el cinturón exterior se extiende desde 12.000 km. a 22.000 km. Los satélites de estas regiones pueden equiparse con blindaje para reducir el riesgo de daños durante su vida operativa.

Destacan dos órbitas MEO: la órbita semisíncrona y la órbita Molniya o THEO (*Twelve Hours Eccentric Orbit*).

La órbita semisíncrona es una órbita casi circular, con baja excentricidad a 26.560 km. del centro de la Tierra, a unos 20.200 kilómetros sobre la superficie. Un satélite a esta altura tarda 12 horas en completar una órbita. A medida que el satélite se mueve, la Tierra gira debajo de él. En 24 horas, el satélite cruza cada día los mismos dos puntos del ecuador. Esta órbita es consistente y altamente predecible. Es la órbita utilizada por los satélites GPS (*Global Positioning System*).

La segunda órbita MEO más común es la órbita de Molniya, que toma su nombre de los satélites rusos del mismo nombre, y funciona bien para observar latitudes altas. Una órbita geoestacionaria es valiosa por la vista constante que proporciona, pero los satélites en esa órbita están estacionados sobre el ecuador, por lo que no trabajan bien para ubicaciones lejanas al norte o al sur, que siempre están en el borde de la vista de un satélite geoestacionario. La órbita Molniya ofrece una alternativa a este problema [26].

La órbita de Molniya es muy excéntrica: el satélite se mueve en una elipse extrema con la Tierra cerca de un borde, con una inclinación de 63,4°, un apogeo de 40.000 km y un perigeo de 1.000 km. Debido a que es acelerado por la gravedad de la tierra, un satélite que siga esa órbita se mueve muy rápidamente cuando está cerca de la Tierra. A medida que se aleja, su velocidad disminuye, por lo que pasa más tiempo en la cima de su órbita más alejada de la Tierra.

Un satélite en órbita Molniya tarda 12 horas en completar su órbita, pero pasa aproximadamente dos tercios de ese tiempo sobre un hemisferio. Dado que tanto los EE. UU. como la U. R. S. S. se encuentran en el mismo hemisferio norte, las órbitas de Molniya eran ideales para el reconocimiento en la era de la Guerra Fría [25].

Al igual que en una órbita semisíncrona, un satélite en la órbita Molniya recorre la misma trayectoria cada 24 horas. Este tipo de órbita es útil para las comunicaciones en los extremos norte o sur.

2.6 Órbita terrestre baja (LEO)

Una órbita terrestre baja es una órbita alrededor de la Tierra, entre la atmósfera y el cinturón de radiación de Van Allen, entre 180 km. y 2.000 km. sobre su superficie, con un período de 128 minutos o menos, realizando al menos 11,25 órbitas por día, y una excentricidad inferior a 0,25.

Algunas fuentes [27] definen LEO en términos de altitud. La altitud de un objeto en una órbita elíptica puede variar significativamente a lo largo de la órbita. Incluso para órbitas circulares, la altitud sobre el suelo puede variar hasta 30 km., especialmente para órbitas polares, debido al achatamiento de la figura esferoide de la Tierra y la topografía local. Si bien las definiciones basadas en la altitud son intrínsecamente ambiguas, la mayoría de ellas se encuentran dentro del rango especificado por un período orbital de 128 minutos porque, según la tercera ley de Kepler, esto corresponde a un semieje mayor de 8.413 km. Para órbitas circulares, esto se corresponde con una altitud de 2.042 km. por encima del radio medio de la Tierra, lo que es consistente con algunos de los límites de altitud superiores en algunas definiciones de LEO.

Otras fuentes [28] definen la LEO como una región en el espacio que ocupan las órbitas LEO. Las órbitas muy elípticas pueden pasar a través de la región LEO cerca de su perigeo, pero no están en una órbita LEO porque su apogeo supera los 2.000 km. Los objetos suborbitales también pueden llegar a la región LEO, pero no están en una órbita LEO porque vuelven a entrar en la atmósfera. La distinción entre órbitas LEO y la región LEO es especialmente importante para el análisis de posibles colisiones entre objetos que pueden no estar en órbita LEO pero que podrían chocar con satélites o desechos en órbitas LEO.

La mayoría de los objetos artificiales en el espacio exterior se encuentran en LEO, con una altitud que nunca supera aproximadamente un tercio del radio de la Tierra [19]

El motivo por el que las órbitas LEO están altamente ocupadas es que las órbitas más bajas que LEO no son estables y los objetos decaen rápidamente debido al rozamiento con la atmósfera. Las órbitas más altas están sujetas a averías electrónicas debido a la radiación intensa y a la acumulación de carga eléctrica.

2.6.1 Características de la Órbita LEO

La velocidad orbital media necesaria para mantener una órbita terrestre baja estable es de aproximadamente 7,8 km/s o 28.000 k./h. Sin embargo, esto depende de la altitud exacta de la órbita. Calculada para una órbita circular de 200 km., la velocidad orbital es de 7,79 km/s, pero para una órbita superior de 1.500 km., la velocidad se reduce a 7,12 km/s.

La atracción de la gravedad en LEO es sólo ligeramente menor que en la superficie de la Tierra. Esto se debe a que la distancia a LEO desde la superficie de la Tierra es mucho menor que el radio de la Tierra. Sin embargo, un objeto en órbita está en caída libre permanente alrededor de la Tierra, porque en órbita la fuerza gravitacional y la fuerza centrífuga se equilibran entre sí. Como resultado, las naves espaciales continúan en órbita, y las personas dentro o fuera de tales naves experimentan continuamente ingravidez.

Los objetos en LEO encuentran resistencia atmosférica proveniente de gases en la termosfera, aproximadamente a 80 km. a 600 km. de la superficie, o de la exosfera, a 600 km. Las órbitas de los satélites que alcanzan altitudes inferiores a 300 km se desintegran rápidamente debido a la resistencia atmosférica. Los objetos en LEO orbitan la Tierra entre la parte más densa de la atmósfera y debajo del cinturón de radiación interior de Van Allen.

Las órbitas terrestres bajas ecuatoriales son un subconjunto de las órbitas LEO. Estas órbitas, con baja inclinación hacia el ecuador, permiten tiempos rápidos de revisita de lugares de baja latitud de la Tierra y tienen el menor requisito de delta-v de cualquier órbita, siempre que tengan la orientación directa con respecto a la rotación de la Tierra. Las órbitas con un ángulo de inclinación muy alto con respecto al ecuador suelen denominarse órbitas polares u órbitas helio sincrónicas.

En 2017, las órbitas terrestres VLEO comenzaron a aparecer en las solicitudes a los organismos regulatorios que gestionan el espacio radioeléctrico. Estas órbitas, por debajo de los 450 km., requieren el uso de tecnologías novedosas para elevar la órbita porque operan en órbitas que normalmente decaerían demasiado pronto para ser económicamente viables.

2.6.2 Comunicaciones ISL en órbita LEO

Como se ha visto en apartados anteriores, la posición de los satélites LEO con respecto a la Tierra no es fija. Además, las velocidades orbitales de los satélites LEO son de hasta 7,6 km/s; mucho mayores que los de los satélites en órbitas más altas. Por tanto, las constelaciones LEO suelen organizarse en grupos de satélites que orbitan la Tierra siguiendo la misma trayectoria llamados planos orbitales. Además, la baja altitud de despliegue impone una limitación importante a la cobertura terrestre de un satélite LEO individual [29].

Debido a las características descritas anteriormente, se necesitan despliegues LEO densos para proporcionar una cobertura global y continua. En combinación con la necesidad de reducir el costo general de despliegue de la constelación, esto fomenta el uso de satélites físicamente pequeños con bajas capacidades individuales de computación y conectividad. Además, las altas velocidades orbitales crean cambios frecuentes en la topología de la red de satélites y complican la comunicación entre satélites en diferentes planos orbitales.

La comunicación óptica inalámbrica en entornos exteriores se conoce FSO (*Free-Space Optical Communication*). Un enlace FSO se utiliza para transmitir una señal óptica desde un transmisor óptico a un receptor óptico a través de la atmósfera o el vacío del espacio, y se requiere una línea de visión clara entre el transmisor y el receptor. Los enlaces FSO pueden ser de cuatro tipos: terrestres, no terrestres, espaciales y del espacio profundo. Los enlaces FSO de satélite a satélite son ejemplos de FSO espacial y en este trabajo se denominan ISL [30].

La tecnología de radiofrecuencia se ha utilizado históricamente para la comunicación entre satélites, como el sistema Iridium en la banda Ka. Pero los sistemas más modernos utilizan cada vez más tecnología basada en láser, óptica, para comunicarse entre sí.

La comunicación entre satélites se realiza a través de ISL; como se puede ver en la Figura 2-3 para una constelación de estrella de Walker [31]. Las constelaciones de estrella de Walker distribuyen los nodos ascendentes en 180° mientras que para las constelaciones delta de Walker los nodos ascendentes se distribuyen de los planos orbitales en 360°. A modo de ejemplo, OneWeb ha adoptado el tipo estrella mientras que Starlink lo ha hecho por delta.

La comunicación entre satélites en el mismo plano orbital se produce a través de los ISL intraplano, utilizando antenas ubicadas a ambos lados del eje longitudinal. Los ISL intraplano son bastante estables debido a la distancia casi constante entre satélites vecinos en un mismo plano orbital, llamada distancia intraplano. Por otro lado, la comunicación entre satélites en diferentes planos orbitales se produce a través de los ISL entre planos, utilizando antenas ubicadas a ambos lados del eje transversal. A diferencia de los ISL intraplano, los ISL interplano son altamente dinámicos debido a los diferentes vectores de velocidad de los satélites [32].

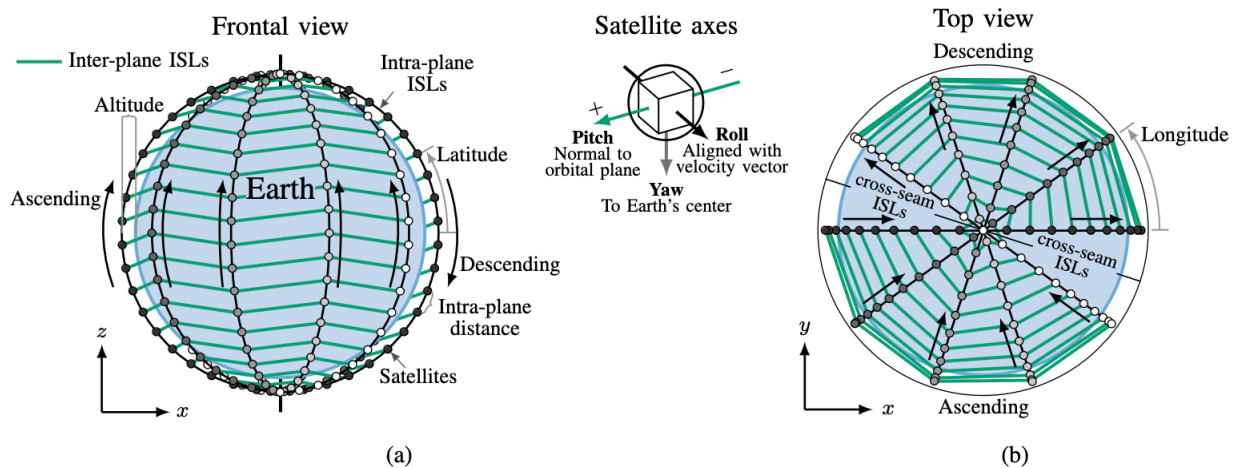


Figura 2-3 (a) Vista frontal y ejes de los satélites y (b) vista superior de una constelación de estrella de Walker con 200 satélites y 5 planos orbitales [29]

En la Figura 2-3, los satélites blanco y negro orbitan la Tierra en direcciones opuestas, lo que da como resultado grandes velocidades relativas entre ellos. Los ISL entre estos planos orbitales se conocen como ISL transversales, donde el efecto Doppler es considerablemente grande. Como consecuencia, es común encontrar constelaciones donde los ISL transversales no están implementados.

La mayor parte de la investigación teórica sobre comunicación y enrutamiento entre satélites considera una constelación perfectamente simétrica donde los planos orbitales se despliegan a la misma altitud y en longitudes uniformemente espaciadas (ver Figura 2-3). Naturalmente, una simetría perfecta simplifica enormemente la comunicación ISL.

Sin embargo, los planos orbitales de las constelaciones LEO comerciales suelen desplegarse a altitudes ligeramente diferentes. Estas diferencias, conocidas como separación orbital, minimizan en gran medida el riesgo de colisiones entre los satélites en los puntos de cruce de los planos orbitales. Si no se introducen estas separaciones orbitales, puede ser necesario el mantenimiento activo de la estación, lo que tiene un gran coste en términos de uso de propulsor. En el lado negativo, las separaciones orbitales conducen a períodos orbitales ligeramente diferentes en los planos orbitales, lo que conduce a una topología de red dinámica y hace imposible el uso de tablas fijas para establecer los ISL interplano. Por lo tanto, los ISL entre planos deben establecerse sobre la marcha.

Los sistemas ópticos para la comunicación entre satélites constan de tres componentes clave: un receptor, un transmisor y un módulo telescópico para la ampliación y dirección de los rayos láser salientes y entrantes.

En el transmisor, una señal de datos eléctrica se convierte al espectro óptico por medio de una referencia óptica y un modulador. En el receptor, se utiliza un telescopio para enfocar el haz entrante y convertirlo en una señal eléctrica combinándolo con una secuencia de ruido pseudoaleatoria alimentada a un oscilador local. Se utiliza un bucle de retroalimentación para garantizar que el oscilador local permanezca en la misma fase y frecuencia que la transmisión de datos entrante [5].

Dado que la comunicación basada en láser es punto a punto, también es esencial contar con un mecanismo de seguimiento en una constelación de satélites. De esta manera, un satélite transmisor puede localizar un satélite receptor. Esto se conoce como sistema de adquisición y seguimiento. En conjunto, el sistema de transmisión óptica y el sistema de seguimiento trabajan juntos para establecer enlaces de comunicación entre satélites.

Su mayor frecuencia, mayor ancho de banda y las características del láser otorgan a los ISL las siguientes ventajas significativas sobre los enlaces entre satélites basados en radiofrecuencia [33]:

- Dado que las ondas láser infrarrojas tienen una frecuencia más alta que las ondas de radio, pueden empaquetar más información en una sola transmisión, velocidad de datos mucho más alta.
- Tamaños de antena más pequeños, lo que resulta en menor peso y volumen. Los terminales ISL se pueden integrar fácilmente en plataformas satelitales, ya que requieren menos recursos a bordo debido a su menor tamaño, peso, volumen y requerimiento de energía. Los costos de lanzamiento e implementación de satélites también se reducen debido al factor de forma más pequeño de los terminales ISL.
- Los láseres tienen haces más estrechos y sufren una menor dispersión a largas distancias en comparación con las ondas de radio. Esto significa que son más difíciles de interceptar y sufrir *jamming*, aumentando la seguridad de la transmisión de datos.
- Menores requisitos de potencia de transmisión como resultado de una menor dispersión del haz y una mayor directividad.
- Reduce la cantidad de *gateways* y estaciones terrenas necesarias. Al eliminar la dependencia de la infraestructura terrestre para los enlaces de tráfico, el sistema se vuelve más autónomo.
- Además, no es necesario registrarse por la regulación de frecuencias de la ITU lo que facilita la planificación y el funcionamiento de la constelación [34].

La mayor ventaja de utilizar ISL es esencialmente la capacidad de una cobertura verdaderamente mundial sin latencia de señal, ya sea en modo de voz o de datos.

Los sistemas de comunicaciones entre satélites basados en láser ya están desplegados en constelaciones LEO, como Starlink y OneWeb para proporcionar acceso de banda ancha a Internet a través de la constelación. Además, los gobiernos y organismos de defensa también están interesados en desplegar sus propias redes de satélites ópticos LEO [35].

2.6.3 Ventajas de los satélites en órbita LEO

2.6.3.1 Costos de fabricación

Los satélites son mucho más baratos de fabricar que los satélites tradicionales de generaciones anteriores. En décadas anteriores, la fabricación de satélites normalmente llevaba varios años y costaba millones de dólares por satélite [36]. Con el auge de los satélites pequeños y las megaconstelaciones, estos costos se están reduciendo considerablemente. Esta reducción en el costo de construcción se debe a una multitud de factores. En primer lugar, el uso de tecnología COTS en lugar de componentes personalizados disminuye el costo de producción. Además, el uso de factores de forma estandarizados también permite economías en la fabricación relacionada con el montaje y la fijación. Se requiere menos endurecimiento de la radiación y redundancia del sistema en los satélites pequeños, ya que la mayoría de los satélites que utilizan órbitas LEO no se cruzan con los cinturones de radiación de Van Allen y hay menos necesidad de proteger la electrónica contra la interferencia de partículas altamente cargadas. Se obtienen mayores ahorros en los costos de fabricación al utilizar componentes que no necesitan ser tan robustos o duraderos dada su vida operativa planificada más corta [37].

Al considerar las megaconstelaciones, se encuentran ahorros de costos adicionales en la producción en masa de satélites más pequeños en lugar del diseño y construcción únicos de satélites especializados. Estos factores seguirán reduciendo el costo de producción de muchos satélites hasta el punto en que el costo medio es una décima parte del de los satélites anteriores.

2.6.3.2 Tiempo de producción más rápido

De manera similar a la reducción de costos, los satélites pequeños tienen una reducción en el cronograma de producción debido a muchos factores. Algunos de los cuales incluyen el uso de componentes COTS estandarizados y un factor de forma consistente que requiere menos personalización por satélite. Como resultado de estos factores, se estima que el tiempo de producción de los satélites puede reducirse de varios años a varias semanas.

2.6.3.3 Costos de lanzamiento

Uno de los factores más importantes que impulsan el renacimiento de los satélites pequeños es la reducción del costo de lanzamiento y la mayor disponibilidad de lanzamiento. En la historia de la exploración espacial, los costos de lanzamiento siempre han representado una parte importante del gasto. El costo del lanzamiento generalmente está determinado por la masa y el plano orbital, ya que un aumento en la masa y/o la altura de la órbita requiere un aumento en el combustible requerido. La entrada al mercado de los cohetes Falcon 9 y Falcon Heavy por parte de SpaceX a partir de 2010 redujo el costo de lanzamiento a LEO en un factor de 7 y 13, respectivamente, en comparación con los costos promedio de lanzamiento entre 1970 y 2000. La combinación de los Una órbita más cercana y un peso y tamaño reducidos hacen que los lanzamientos de satélites pequeños sean menos costosos que los satélites tradicionales. Como resultado de este tamaño y eficiencias orbitales, es posible lanzar cientos de satélites pequeños a la vez utilizando vehículos de lanzamiento más pequeños y baratos.

Además, los nuevos conceptos sobre cómo dar cabida a los satélites pequeños han reducido las barreras de entrada al mercado, lo que hace que el lanzamiento de los satélites pequeños sea aún más asequible. Estos incluyen oportunidades de viajes compartidos y vehículos de lanzamiento de satélites pequeños especializados. El aumento de la disponibilidad de lanzamiento y la reducción del costo de lanzamiento, particularmente para los satélites LEO, es una tendencia que probablemente continuará a medida que más lanzadores comerciales compitan por hacer negocios en el creciente mercado de satélites pequeños y megaconstelaciones.

2.6.3.4 Latencia de comunicación

Una de las mayores capacidades que ofrecen los satélites pequeños en LEO sobre los satélites MEO y GEO tradicionales es un aumento en la velocidad de comunicación. Dado que la altitud de los satélites LEO es inferior al 5% de la de los satélites GEO, el tiempo que tardan las señales de comunicación en llegar al satélite y regresar a la Tierra, latencia, se reduce significativamente. Los satélites de comunicaciones GEO tradicionales tienen una latencia de unos 500 ms. Por lo tanto, como los satélites en LEO están mucho más cerca de la Tierra y la señal tiene que cubrir mucha menos distancia, pueden tener una latencia casi 20 veces más rápida que los satélites de comunicaciones GEO tradicionales [38].

Si bien la latencia reducida de los satélites LEO se conoce y se utiliza desde hace algún tiempo, Iridium ha estado operando satélites de comunicaciones LEO durante más de 20 años, la nueva tecnología de la última década permite que los pequeños satélites actuales se lancen con procesadores más pequeños y potentes y mejores. antenas que permiten un mayor ancho de banda a través de los sistemas para atender a más clientes a mayores velocidades desde LEO con menores costos operativos. Varias propuestas de megaconstelaciones actualmente pendientes esperan una latencia tan baja como 25 ms. Esta latencia es comparable a la de los servicios 5G terrestres y algunos servicios de banda ancha.

2.6.3.5 Velocidad de comunicación y beneficios del sistema terrestre

Las megaconstelaciones LEO tienen la capacidad de aumentar el volumen y la velocidad del tráfico de comunicaciones a través del espacio. Este aumento beneficia a múltiples modos actuales de conectividad y también brindan ventajas a los sistemas terrestres que respaldan las constelaciones, lo que permite nuevas capacidades desde el espacio.

La banda ancha generalmente se refiere a Internet de alta velocidad con capacidad de transmisión de datos a alta velocidad. La banda ancha se puede ofrecer a través de una variedad de tecnologías que incluyen líneas telefónicas, líneas de cable coaxial, fibra óptica y de forma inalámbrica. La banda ancha proporcionada por satélite entra dentro de la categoría inalámbrica. Sin embargo, no toda la banda ancha es igual. Tradicionalmente, la banda ancha satelital ha tenido la velocidad más lenta y uno de los costos más altos para los consumidores. Las megaconstelaciones de banda ancha propuestas actualmente en desarrollo y puesta en marcha están tratando de llevar la banda ancha satelital al siguiente nivel; aumentando la velocidad de la conectividad y al mismo tiempo reduciendo el costo de conexión mediante el uso de megaconstelaciones LEO. SpaceX, por ejemplo, espera que su sistema Starlink proporcione Internet velocidades de Gigabit; velocidades comparables a las proporcionadas por la banda ancha por cable y 40 veces más rápido que los proveedores actuales de banda ancha satelital.

Como se mencionó anteriormente, los avances tecnológicos en el mundo IT que permiten la reducción del tamaño de los componentes han sido un factor clave que respalda este crecimiento. Estos mismos avances en potencia informática y miniaturización han llevado a que cada vez más elementos terrestres se modifiquen para tener la capacidad de conectarse a Internet. Esto incluye dispositivos domésticos inteligentes como cerraduras, luces y electrodomésticos inteligentes. También incluye equipos comerciales y agrícolas. Este fenómeno se conoce actualmente como internet de las cosas o IoT (*Internet of Things*). Se estima que el número de dispositivos IoT aumentará a 75.440 millones en todo el mundo para 2025. Una nueva ola de megaconstelaciones de satélites que soporten IoT podrá cubrir el 100% del planeta sin las limitaciones tradicionales de terreno e infraestructura y, debido a que están situadas en LEO, solo requieren una transmisión de baja potencia por parte de los sensores terrestres, lo que permite que los sensores sean más pequeños y tengan una mayor duración de la batería [39].

Por otro lado, 5G es la generación actual de redes móviles y conectividad a Internet con velocidades de conexión significativamente mayores, mayor ancho de banda y latencia reducida. Gran parte de la infraestructura para la conectividad móvil 5G seguirá siendo terrestre, al igual que ocurre con la cobertura 4G LTE actual, sin embargo, la velocidad del 5G, junto con la baja latencia de LEO, ha creado la oportunidad de brindar cobertura mediante megaconstelaciones. La parte satelital de 5G tendrá la capacidad de complementar las redes 5G terrestres en momentos de desastres naturales y saturación de la red, pero también tendrá la capacidad de llevar cobertura a plataformas móviles, áreas remotas/rurales y partes del mundo que actualmente están desatendidas por proveedores de telefonía móvil e Internet [40].

2.6.3.6 Resolución de imagen en satélites de teledetección

De manera similar a los beneficios en la velocidad de comunicación por la cercanía comparativa de LEO en comparación con MEO y GEO, la resolución de los satélites de teledetección también mejora por la proximidad de los satélites pequeños en LEO a los objetos terrestres que se detectan. La resolución, o la capacidad de resolver o diferenciar pequeños detalles, normalmente se divide en subcategorías; dos de los cuales están mejorados por satélites pequeños.

La resolución espacial es la descripción del tamaño de objeto más pequeño que se puede diferenciar dentro del área detectada por un sensor. Esta resolución se expresa generalmente en términos de GSD (*Ground Sample Distance*) para satélites de teledetección. Los primeros satélites de teledetección generalmente tenían una resolución baja de aproximadamente 30 metros GSD, o la capacidad de representar un cuadrado de 30 metros por 30 metros con un solo píxel, lo que permitía diferenciar las áreas urbanas de las áreas rurales circundantes.

La alta resolución moderna puede ser tan baja como 0,25 metros GSD, lo que permite ver las líneas pintadas en el pavimento de una calle. Si bien esta alta resolución se puede capturar desde el espacio, imágenes tan detalladas generalmente están restringidas únicamente a usos gubernamentales. Comercialmente, la resolución espacial está actualmente disponible regularmente en el rango de 1 a 2 metros.

Las megaconstelaciones de teledetección pueden proporcionar mejoras en la resolución espacial en función de su ubicación cerca de la Tierra. Además, la recopilación de información obtenida de múltiples satélites puede mejorar la calidad de la imagen. Por último, las megaconstelaciones pueden proporcionar imágenes tomadas desde diferentes ángulos al mismo tiempo, lo que puede proporcionar una diferenciación aún mayor de los objetos detectados.

La resolución temporal es la frecuencia con la que se produce la detección en un área determinada, o la frecuencia con la que se puede medir un área determinada para ver los cambios a lo largo del tiempo. Esta resolución generalmente está controlada por la órbita del sistema de satélites. Algunos satélites sólo pasan por un área determinada una vez cada dos semanas, mientras que otros pueden pasar por un área todos los días. Las megaconstelaciones pueden mejorar la resolución temporal y lograr una detección casi persistente de todo el planeta mediante un mayor tiempo de revisita, que se analiza a continuación [41].

2.6.3.7 Tiempo de revisita

Los satélites pequeños en LEO tienen que viajar mucho más rápido que los satélites GEO para poder permanecer en órbita tan cerca de la tierra. Cuanto más baja sea la órbita, mayor será la velocidad necesaria para mantener la órbita. Por ejemplo, los satélites Iridium LEO viajan a alrededor de 7,8 km/s, mientras que la mayoría de los satélites GEO viajan a cerca de 3,1 km/s. De esta manera, muchos satélites en órbita LEO pueden completar una órbita alrededor de la Tierra en unos 100 minutos. Con inclinaciones LEO cercanas a las polares, cruzando los polos norte y sur en lugar de girar cerca del ecuador, un satélite LEO puede pasar sobre casi toda la Tierra dos veces al día: un paso a la luz del sol y otro durante la noche. Esto permite que un solo satélite proporcione una frecuencia regular de visitas a una parte específica de la Tierra diariamente, si no en un período de tiempo más corto. En el contexto de las megaconstelaciones, el beneficio del tiempo de revisita rápida puede ser aún más significativo. Las megaconstelaciones en LEO pueden tener una cobertura casi continua y persistente de la Tierra, ya que cada uno de los satélites distribuidos en la constelación orbita la Tierra y se turna para pasar sobre la misma área determinada [42].

2.6.3.8 Vídeo en tiempo real

A medida que han mejorado las resoluciones de observación de la Tierra por satélite, el tiempo de revisita y las velocidades de comunicación, el vídeo en tiempo real desde el espacio se ha convertido en una posibilidad previsible. El vídeo en tiempo real se define como la transmisión de vídeo en directo con poco o ningún retraso desde la captura hasta la recepción. La Estación Espacial Internacional ha transmitido durante 5 años vídeos en tiempo real desde el espacio como parte del programa HDEV (*High-Definition Live Streaming Video of the Earth*) [43]. Si bien todavía no ha habido ningún servicio comercial de vídeo por satélite en tiempo real, Surrey Satellite Technology utiliza una tecnología de vídeo similar en los satélites de teledetección Carbonite [44]. Estos satélites emplean un modo de compensación FMC (*Forward Motion Compensation*) que procesa los datos capturados para hacer que su video GSD de 120 segundos y 1 m parezca como si estuviera tomado directamente desde arriba. China también lanzó el grupo de satélites Jilin; que incluye dos satélites para imágenes de vídeo 4k HD a 1.3 m GSD [45]. Si bien gran parte de esta captura de video actualmente requiere un procesamiento oportuno antes de que sea posible verla, la llegada de megaconstelaciones y las mejoras en la tecnología de comunicación, la compresión de video y la velocidad de comunicación hacen que el video persistente en tiempo real sea una posibilidad definitiva en el futuro cercano.

2.6.3.9 Cobertura global

El uso de LEO puede proporcionar una mayor cobertura de todo el mundo en comparación con muchos satélites MEO y GEO, a un costo reducido. Si bien los satélites en GEO tienen la ventaja de mantener una posición relativamente constante en comparación con la Tierra al girar en círculos directamente sobre el ecuador, ese beneficio viene acompañado de una falta de cobertura de las partes más septentrionales y meridionales de la Tierra. Por contrato, el lanzamiento a órbitas polares LEO puede proporcionar una cobertura satelital global rentable mediante el uso de satélites que pasan de polo a polo unas 12 veces al día mientras la Tierra gira debajo. Mediante el uso de satélites distribuidos en una megaconstelación, es posible una cobertura global completa.

2.6.3.10 Redundancia

Las megaconstelaciones utilizan una gran cantidad de satélites distribuidos en órbitas con la capacidad de intercambiar trabajo entre ellos para proporcionar una cobertura consistente de la superficie de la Tierra desde LEO. Estas grandes constelaciones proporcionan redundancia incorporada. Cuando un satélite de una constelación deja de funcionar, ya sea temporal o permanentemente, hay otro satélite que lo sigue de cerca para recuperar las capacidades perdidas. Esta distribución y proliferación de servicios lejos de un único punto de falla proporciona nuevos niveles de garantía de servicio continuo a los clientes de megaconstelaciones.

2.6.3.11 Propulsión

La gravedad terrestre, lunar y solar, la radiación, la resistencia atmosférica en LEO y otras fuerzas afectan constantemente la capacidad de un satélite para mantener su órbita. Los sistemas de propulsión a bordo se pueden utilizar para mantener la órbita, cambiar de órbita, mantener la orientación y salir de la órbita al final de la misión. Estos sistemas de propulsión generalmente dependen exclusivamente del combustible que se carga en el satélite en el momento del lanzamiento y, cuando se agota, el satélite ya no puede maniobrar. En 1994, los científicos de la NASA reconocieron que, para muchas misiones comerciales, científicas y del Departamento de Defensa cercanas a la Tierra, la propulsión a bordo es la masa predominante de la nave espacial y, como se analizó anteriormente, la masa de una nave espacial está directamente relacionada con los gastos de lanzamiento. Esto siempre ha llevado a que en el diseño y fabricación de satélites se requiera equilibrar la capacidad adicional de los sistemas de propulsión con la masa adicional requerida para operar el sistema.

Hasta hace poco, los sistemas de propulsión a bordo se consideraban casi innecesarios para las misiones de satélites pequeños en órbita terrestre baja porque el costo de agregar un sistema de propulsión y el consiguiente aumento del costo de la masa para el lanzamiento superaban el costo de la misión en sí y eran excesivamente prohibitivos dado que los sistemas naturales. La descomposición ocurriría dentro de 25 años. Esto llevó al lanzamiento de muchos satélites pequeños sin sistema de propulsión para ayudar a mantener la órbita, ni capacidad para salir activamente de la órbita al final de la misión.

Sin embargo, en los últimos años se ha hecho mayor hincapié en la investigación y el desarrollo tecnológicos en la industria de la propulsión de satélites, específicamente dirigidos a la industria de los satélites pequeños y LEO. Parte de este énfasis se debe a un movimiento por el uso responsable y sostenible del espacio para evitar dejar satélites que no funcionan en órbita más tiempo del necesario y correr el riesgo de colisiones. Además, agregar propulsión a los satélites pequeños puede aumentar la vida útil de su misión y aumentar sus capacidades. Hay varios tipos diferentes de sistemas de propulsión disponibles o en desarrollo para su uso con satélites pequeños: sistemas eléctricos, químicos, de plasma y de salida de órbita pasiva. Cada uno de estos sistemas tiene ventajas y desventajas que son demasiado complejas para discutir las aquí; sin embargo, es importante señalar que ha habido avances significativos en el sector de propulsión para satélites pequeños en la última década y es probable que la tendencia continúe como resultado. del creciente interés en las operaciones eficientes de las constelaciones de satélites pequeños LEO.

2.6.4 Desafíos de los satélites en órbita LEO

Se identifican 5 desafíos principales que enfrenta la tecnología de satélites LEO:

2.6.4.1 Órbitas disponibles

Hay un número finito de órbitas óptimas disponibles para las constelaciones de satélites LEO. Las órbitas se asignan a las redes por orden de llegada, lo que proporciona a los primeros participantes en el mercado una importante ventaja técnica y estratégica. Esto también limita el número de constelaciones viables que pueden ponerse en órbita, lo que a su vez limita inevitablemente el número de proveedores en el mercado. Para garantizar que los operadores potenciales soliciten órbitas, pero no las utilicen, por ejemplo, para bloquear otros proyectos, los miembros del Congreso Mundial de Radiocomunicaciones de la ITU acordaron en 2019 a través de la Resolución 35 [46] que los operadores de constelaciones de satélites LEO deberán desplegar:

- 10% de su constelación en órbita dentro de los primeros dos años después del inicio del despliegue.
- 50% dentro de los cinco años desde el inicio del desarrollo.
- 100% en un plazo de siete años desde el inicio del despliegue.

2.6.4.2 Espectro radioeléctrico

También hay un número finito de frecuencias de radio utilizables en el espectro para comunicaciones tierra-satélite, en las bandas L (1-2 GHz) y S (2-4 GHz) de frecuencia baja y las bandas Ku (12-18 GHz), Ka (26-40 GHz) y V (40-75 GHz) de frecuencia más alta. El acceso a estas frecuencias también está siendo cuestionado por los proveedores [47]. En otros lugares, las transmisiones terrestres están sujetas a regulaciones locales, lo que significa que algunos espectros de frecuencia no están disponibles en ciertos lugares. Algunos gobiernos ven las estaciones terrestres y la asignación de frecuencias locales como una oportunidad de ingresos, del mismo modo que algunos países han gravado fuertemente la principal infraestructura de Internet que opera en su territorio. Sin embargo, las comunicaciones láser de satélite a satélite pueden ayudar a minimizar los efectos de las limitaciones y desafíos locales.

2.6.4.3 Interoperabilidad

El mercado de Internet por satélite ya es muy competitivo. Al igual que en los inicios del mercado de telefonía móvil, diferentes proveedores operan de forma propietaria, buscando atrapar a los clientes en su ecosistema de proveedores individuales. Las empresas necesitan seleccionar el ecosistema de proveedores de hardware, software y servicios en torno al cual desean diseñar y desarrollar sus soluciones. La naturaleza patentada de las soluciones dificulta que los clientes se muevan entre proveedores sin incurrir en costos e interrupciones significativos.

Esto a menudo tiene el efecto de atar a las empresas a un proveedor en particular, reduciendo la presión competitiva de precios de los clientes existentes y reduciendo las tasas de abandono de suscriptores. La falta de interoperabilidad entre ecosistemas también hace que las fusiones y adquisiciones sean menos atractivas, reduciendo el potencial de consolidación del mercado.

2.6.4.4 Costes de los satélites y segmento terrestre

El coste es el mayor desafío para la rentabilidad y la viabilidad a largo plazo de las megaconstelaciones [48].

- Fabricación

Tradicionalmente, los satélites se han parecido más a artículos hechos a mano que a bienes producidos en masa. Ese tipo de personalización, combinado con requisitos de larga vida útil, explica por qué un gran satélite de comunicaciones cuesta entre 50.000 y 60.000 euros por kilo. Si los costos se mantienen en este nivel, las grandes constelaciones LEO serían completamente inasequibles.

Para que las megaconstelaciones LEO sean financieramente viables, sus costos de fabricación deben reducirse en más de un orden de magnitud con respecto a los de los satélites tradicionales. Esto probablemente sería al menos un 75 por ciento más bajo que los costos que cualquier empresa ha afirmado actualmente que puede lograr. Para reducir costos de esta manera, los fabricantes deben aprovechar todas las herramientas posibles, desde economías de escala hasta automatización y costos reducidos de componentes en toda la cadena de valor.

- Servicios de lanzamiento

Los costos de lanzamiento deberían ser el principal objetivo de las reducciones de costos en las grandes constelaciones LEO. Además de reducir el costo de materiales y fabricación, deberían reducir sus costos operativos, por ejemplo, maximizando los ahorros provenientes de la reutilización.

- Estaciones terrenas

Como se mencionó en la introducción, las grandes constelaciones LEO requieren muchas estaciones terrestres, mencionando aparte de los ISL de alta capacidad. Según una estimación, la versión de 4.400 satélites de Starlink requerirá 123 ubicaciones de estaciones terrestres y alrededor de 3.500 antenas de entrada para lograr el máximo rendimiento [14]. Las antenas deben ser más grandes y requerirán significativamente más energía que los terminales de usuario.

Las actuales *gateways*, para comunicaciones por satélite GEO son bastante caras: normalmente entre 1 y 2 millones de euros cada una [49]. No son directamente comparables con los *gateways* LEO, que tienen menores requisitos de energía, pero los costos de las pasarelas deben ser mucho más bajos para hacer manejables el coste del segmento terrestre. Los diseños de antenas modulares podrían ayudar, ya que permitirían reducciones de costos igualmente críticas en las antenas de los equipos de usuario [50].

El despliegue de estaciones terrenas tiene un impacto clave en el rendimiento del sistema para la red de constelaciones de satélites LEO. Sin embargo, la planificación del despliegue de estaciones terrenas es un desafío debido a la distribución espacial y temporal de las demandas de tráfico y la topología variable en el tiempo de los satélites LEO [51].

En los últimos años, los proyectos de megaconstelación de satélites LEO como Starlink o Oneweb han promovido una nueva ronda de desarrollo de redes de constelaciones de satélites LEO a gran escala. Es necesario implementar múltiples estaciones de puerta de enlace para satisfacer las necesidades de los usuarios, y su ubicación afecta en gran medida la capacidad del sistema y otros rendimientos. La mayoría de los factores considerados son el retraso, el número de saltos o la capacidad, pero la mayoría de ellos no consideran la interferencia entre los enlaces de la constelación. [52].

Además, diferentes ubicaciones de las estaciones terrenas pueden tener diversas condiciones de canal y demandas de servicio debido a las diferentes condiciones atmosféricas, poblaciones y cantidad de dispositivos terminales. También la ubicación de la puerta de enlace afecta aún más el desempeño de la cobertura del servicio y el desempeño del acceso de la red a las demandas del servicio. Las posiciones de las estaciones terrenas influyen en el retardo, el consumo de energía y el rendimiento de las redes de satélites LEO, por lo que es importante desplegar las infraestructuras terrenas en la mejor posición [53].

La comunicación vía satélite comienza cuando el satélite se posiciona en la posición orbital deseada. Las estaciones pueden comunicarse con los satélites LEO solo cuando el satélite se encuentra en su región de visibilidad. El plano del horizonte ideal de la estación terrestre es, de hecho, la región de visibilidad bajo un ángulo de elevación de 0° [54].

Debido a barreras naturales o edificios demasiado altos en las zonas urbanas, el plano del horizonte práctico visible difiere del ideal. La duración de la visibilidad y, por tanto, la duración de la comunicación varía con cada paso de un satélite LEO por la estación terrestre, ya que los satélites LEO se mueven demasiado rápido sobre la Tierra. El alcance entre la estación terrestre y el satélite LEO depende de la elevación máxima de la trayectoria del satélite sobre la estación terrestre. La dimensión del plano del horizonte depende de la actitud orbital del satélite [55].

Para las estaciones terrestres dedicadas a comunicarse con satélites LEO, el plano del horizonte ideal puede considerarse como un círculo plano con un diámetro que oscila aproximadamente entre 6.000 y 8.000 km. Debido a barreras naturales o edificios demasiado altos en áreas urbanas, el plano del horizonte práctico siempre difiere, es más pequeño, del ideal. Mediante simulación se confirma que el plano del horizonte se expande a medida que aumenta la actitud del satélite, proporcionando en consecuencia una comunicación más larga entre el satélite y la estación terrestre adecuada. Considerando el plano del horizonte ideal y la máscara respectiva debido a las barreras naturales, los diseñadores de estaciones terrestres, aplicando un margen de seguridad, definen con éxito el plano del horizonte diseñado para la estación terrestre satelital planificada que se instalará [56].

El segmento terrestre a menudo se pasa por alto en favor del segmento espacial, pero representa un eslabón vital en la cadena de la conectividad global que promete LEO.

El objetivo actual de los operadores LEO es garantizar que los satélites funcionen sin problemas; sin embargo, a medida que las constelaciones se expandan, será necesario volver a centrar la atención en la Tierra. Si bien los receptores ya están finalizados, la infraestructura del segmento terrestre no se ha desarrollado completamente. Sin embargo, hay una cosa en la que todos los que están en la fase de desarrollo están de acuerdo, debe ser asequible.

- Terminales de usuario

Para impulsar el mercado de consumo, el que tiene mayor potencial, el costo de las antenas ESA debe reducirse en un orden de magnitud o más. Las empresas que producen antenas ESA menos costosas tendrán que preservar su calidad, es decir, las ESA seguirán teniendo que proporcionar altas velocidades de datos, una dirección fiable del haz, una transferencia fluida de satélites y otras características que garanticen una buena experiencia para el cliente [57].

Como corolario, el desarrollo de megaconstelaciones comerciales de satélites LEO tiene un alto costo inicial y de mantenimiento, tanto en términos de los propios satélites como del mayor número de estaciones terrestres que necesitan las constelaciones. Los satélites de las constelaciones tienen que reponerse periódicamente a medida que se estropeen o lleguen al final de su vida útil. Los satélites pequeños también carecen del mismo nivel de blindaje que los satélites más grandes, lo que los hace más susceptibles a las tormentas solares, ya que tienen menos redundancia ante los daños.

De hecho, en 2022, Starlink perdió más de 40 satélites a causa de una sola tormenta solar [58].

2.6.4.5 Desechos espaciales

Los desechos espaciales representan un peligro creciente para los satélites, incluidos los satélites LEO. Se estima que hay hasta 160 millones de fragmentos de escombros en órbita, que viajan a velocidades de hasta 25.266 km/h. A estas velocidades, incluso un trozo de escombros de 1 cm. puede dañar o destruir un satélite. El uso de grandes constelaciones de satélites LEO intenta mitigar este riesgo mediante la redundancia de la red ante daños o pérdidas de satélites, incluso por colisiones.

Sin embargo, el problema de los desechos espaciales va en aumento, lo que genera un número cada vez mayor de riesgos de colisiones orbitales. Esto ha hecho que encontrar una forma rentable de eliminar los desechos espaciales sea una prioridad cada vez más urgente [59].

2.6.5 Aplicaciones de satélites en órbita LEO

Los usos del espacio para beneficio de la humanidad, así como de los militares, han ido en constante aumento desde que se puso en órbita el primer satélite. Hoy en día, se utilizan satélites con diversas capacidades para garantizar la Seguridad Nacional. Estos usos se dividen en 5 categorías principales: ISR (*Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance*); Vigilancia meteorológica y ambiental; Navegación; y Advertencia de Misiles. Si bien estos son los principales usos militares tradicionales de seguridad nacional que se analizarán a continuación se reconoce que muchos otros sistemas integrales para la seguridad nacional también cuentan con el respaldo de sistemas en el espacio. De hecho, los sistemas espaciales son parte integral de los sistemas bancarios, las redes eléctricas nacionales, los servicios públicos y mucho más.

2.6.5.1 Desarrollos militares

Las organizaciones militares de la OTAN, Rusia y China han invertido en tecnología de satélites pequeños y órbita LEO, y cada una de ellas ya está operando numerosos satélites de este tipo. Si bien normalmente hay poca información disponible sobre la naturaleza de estos activos, algunas actividades y planes se han hecho públicos, particularmente en los EE. UU.

El ejército estadounidense lleva varios años experimentando con el uso de pequeños satélites. Actualmente tiene en desarrollo tres programas diferentes de satélites LEO para los próximos años. El objetivo es brindar apoyo directo desde la órbita LEO en capacidades de reconocimiento, comunicaciones y navegación a las unidades tácticas de primera línea. Estos tres programas satelitales se llaman Gunsmoke, Lonestar y Polaris [60].

En el marco del programa Gunsmoke lanzó dos pequeños satélites en 2017 y 2018, diseñados para ofrecer imágenes en situaciones tácticas. Posteriormente se utilizaron otros tres satélites de ese programa en 2021. En una demostración de estos satélites, el Ejército pudo comprobar que podía tomar imágenes de satélites en órbita, procesarlas con inteligencia artificial para encontrar amenazas y entregar datos de objetivos a los sistemas de armas en unos 20 segundos. Esa velocidad está abriendo una gran cantidad de posibilidades para los comandantes, permitiéndoles "ver" más abajo en el campo de batalla casi en tiempo real como habrían podido hacer [61].

Por otro lado, el programa BlackJack de DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) tiene como objetivo estimular el desarrollo de capacidades de satélites pequeños en órbita LEO que beneficiarían a los usuarios de seguridad nacional. El programa proporcionó fondos a una amplia gama de empresas para desarrollar capacidades relacionadas con las comunicaciones, la selección de objetivos, la alerta de misiles y la navegación [62].

Además, la SDA ha presentado un ambicioso plan que involucra pequeños satélites como parte de su Arquitectura Espacial de Defensa Nacional. El amplio proyecto incluye siete constelaciones que brindan capacidades de múltiples capas para los usuarios de seguridad nacional. La capa de seguimiento incluirá satélites que pueden monitorear los acontecimientos en todo el mundo, incluidos los lanzamientos de misiles balísticos e hipersónicos.

La capa de transporte, compuesta por hasta 500 pequeños satélites de comunicaciones, utilizaría comunicaciones ópticas para recibir información de la capa de seguimiento y transmitirla de forma segura a los centros de mando militar. Se espera que los lanzamientos comiencen en 2024 [63].

De forma paralela, desde 2017, China lanza satélites para contribuir a su constelación Yaogon-30. Son satélites de detección remota y los expertos creen que pueden usarse para SIGINT (*Signals Intelligence*), además de imágenes ópticas, de radar y reconocimiento marítimo, que ayudan a las autoridades militares chinas a rastrear los movimientos navales extranjeros [64]. China utiliza el nombre Yaogan como nombre encubierto para los satélites militares. La constelación tiene capacidades de revisita frecuente [65].

2.6.5.2 Observación de la Tierra

Una de las nuevas capacidades emergentes de los satélites LEO es la observación de la Tierra. Los satélites LEO pueden proporcionar imágenes de alta resolución en tiempo real hasta una resolución de sólo 30 cm.

Los satélites de observación de la Tierra, también conocidos como satélites de teledetección, incluidos los satélites espía y otros satélites de imágenes de la Tierra, utilizan LEO porque pueden ver la superficie de la Tierra con mayor claridad al estar más cerca de ella. Los satélites también pueden aprovechar la iluminación constante de la superficie subyacente a través de órbitas LEO sincrónicas con el sol a una altitud de aproximadamente 800 km. y con una inclinación casi polar.

De hecho, la ISS (*International Space Station*) está situada en la órbita LEO, entre 400 y 420 km. de la superficie de la tierra.

Por otra parte, el uso de imágenes multiespectrales con IA (Inteligencia Artificial) puede mejorar el monitoreo ambiental, el pronóstico del rendimiento de los cultivos y el monitoreo y pronóstico del microclima. De esta manera, la observación de la Tierra puede ayudar a los agricultores a maximizar el rendimiento de los cultivos y minimizar el uso de fertilizantes e insecticidas, permitiéndoles centrarse sólo en las partes del campo que necesitan tratamiento con mayor precisión. En un entorno geopolítico en el que los recursos naturales y la manutención de la población son un aspecto clave de las políticas de Seguridad y Defensa de los gobiernos, esta aplicación no es desdeñable.

2.6.5.3 Comunicaciones Satelitales

Entidades comerciales han operado satélites de comunicaciones durante décadas. Sin embargo, una nueva ola de empresas está aprovechando la tecnología de pequeños satélites para desarrollar megaconstelaciones de cientos o miles de satélites en órbita terrestre baja. En comparación con los sistemas anteriores, estas constelaciones ofrecen una latencia muy baja y una cobertura global consistente. Muchas de estas empresas se están centrando en proporcionar conectividad a Internet en zonas del mundo que no cuentan con un buen servicio de redes terrestres, como zonas rurales o remotas. Pero estas empresas reconocen el potencial de las constelaciones de satélites privados no sólo para proporcionar conectividad a Internet a las zonas rurales sino también para satisfacer los servicios de redes globales del mañana.

En un mundo interconectado, las ciudades inteligentes utilizarán velocidades ultrarrápidas y de baja latencia para conectar todo lo que hay en ellas. Esto requiere pequeñas torres 5G ubicadas en áreas de alto tráfico que exigen mucho ancho de banda y que tengan una línea de visión directa para una velocidad y rendimiento óptimos.

Los satélites LEO desempeñarán un papel clave en la ampliación de las redes celulares 5G al aire, el mar y otras áreas remotas no cubiertas por redes de células pequeñas. Para el usuario final, los satélites ofrecen una extensión perfecta de los servicios 5G desde la ciudad hasta aviones, cruceros y otros vehículos en ubicaciones remotas. Los sensores de IoT y las conexiones M2M (*Machine-to-machine*) en granjas y lugares de trabajo remotos como las minas también pueden aprovechar las amplias áreas de cobertura que ofrecen los satélites 5G [66].

La integración de satélites con infraestructura 5G mejora la Calidad de Experiencia de aplicaciones de alta capacidad. Al enrutar y descargar el tráfico de forma inteligente, los satélites ahorran un espectro valioso y mejoran la resiliencia de cada red.

En caso de un desastre natural o provocado por el hombre en el que la infraestructura 5G resulte dañada, las redes satelitales pueden tomar el control y mantener viva la red. Si bien no podrán proporcionar un conjunto completo de servicios, aún pueden conservar servicios de comunicación críticos y que salvan vidas durante los desastres.

- Streaming

El principal mercado tradicional de las comunicaciones por satélite son los medios de difusión. Ahora, con la proliferación de dispositivos móviles, las tendencias de contenido multimedia se están alejando de las transmisiones de televisión lineales en vivo hacia la transmisión bajo demanda de baja latencia.

La transmisión multimedia, posiblemente el servicio 4G de mayor éxito, se convertirá en uno de los casos de uso clave para la nueva tecnología satelital. Con 5G, los usuarios consumirán aplicaciones de banda ancha móvil mejorada, como transmisión de video 8K y juegos VR (*Virtual Reality*)/AR (*Augmented Reality*) en línea. Con la ayuda de satélites habilitados para 5G, estas experiencias inmersivas pueden transmitir globalmente velocidades de datos más altas para respaldar una entrega fluida y una baja latencia a los dispositivos móviles.

- Satélites e IoT

Disponer de miles de millones de dispositivos IoT plantea un desafío operativo importante. Para combatir las vulnerabilidades de seguridad actuales, los dispositivos necesitan actualizaciones constantes y los futuros dispositivos 5G requerirán una distribución eficiente de datos a escala global.

Con una solución satelital-terrestre integrada, la capacidad adicional se puede utilizar como respaldo de IoT o como complemento al tráfico de datos congestionado. Esto permite tasas máximas más altas y más confiabilidad en la comunicación masiva entre máquinas.

- Servicios de *backhaul* de alta velocidad

Las comunicaciones por satélite tienen una larga trayectoria en el suministro de redes seguras para entornos de alta velocidad y de misión crítica, como los sistemas de navegación aérea. Con constelaciones LEO más grandes y una disminución del retardo de extremo a extremo, las redes satelitales pueden proporcionar el *backhaul* necesario para servicios de alta velocidad [67].

Los satélites pueden complementar el 5G y brindar servicios de *backhaul*, especialmente en áreas donde es difícil instalar infraestructura física.

Las megaconstelaciones de satélites LEO complementarán la infraestructura 5G terrestre para aumentar la cobertura de la red y proporcionar respaldo en caso de desastres naturales como terremotos, inundaciones y huracanes [68].

2.6.5.4 Navegación y Posicionamiento Global

Los automóviles están cada vez más conectados y dependen cada vez más de 5G. En el futuro la conectividad inalámbrica será esencial para el funcionamiento exitoso de los vehículos autónomos.

Los vehículos autónomos necesitan actualizar mapas, información sobre el tráfico, el clima y los incidentes en la carretera en tiempo real, además de recibir actualizaciones periódicas de software. En segundo plano, los sistemas remotos y centralizados de gestión del tráfico también necesitan información en tiempo real para mejorar la seguridad, mejorando la densidad del tráfico y la eficiencia de los flujos de tráfico [69].

Hoy en día, la única tecnología que puede ofrecer una conexión universalmente confiable a alta velocidad y baja latencia es la satelital. Los satélites LEO también facilitan RTK (*Real-time Kinematic Positioning*) [70]. Se espera que RTK desempeñe un papel clave a la hora de habilitar la próxima generación de vehículos autónomos en el ámbito militar y civil.

Además, el proveedor de servicios de telecomunicaciones O2 demostró mediante un estudio que se espera que los vehículos CAV (*Connected and Autonomous Vehicles*) generen 4 TB de datos por hora. El Proyecto Darwin, un proyecto de colaboración entre O2 y la Agencia Espacial Europea, es un programa de prueba de cuatro años para probar una nueva conectividad de extremo a extremo con 5G y comunicación por satélite [71].

Con la combinación adecuada de características económicas y de rendimiento, los satélites pueden proporcionar servicios adicionales a plataformas de alta velocidad y entornos de red que son difíciles de gestionar únicamente mediante sistemas terrestres, es decir, automóviles, aviones, drones, etc.

2.6.5.5 Monitorización del Clima Espacial

Los satélites en LEO contribuyen al monitoreo del clima espacial y la predicción de tormentas solares. Estos eventos pueden afectar las comunicaciones, la navegación y las redes eléctricas en la Tierra. Los satélites proporcionan datos sobre la actividad solar y los campos magnéticos, lo que permite prever y mitigar posibles impactos en la infraestructura terrestre [72].

3 MEGACONSTELACIONES SATELITALES

3.1 Iridium: Cobertura Global de Comunicaciones Móviles

La constelación de satélites Iridium proporciona cobertura de transmisión de voz y datos en banda L a teléfonos satelitales, dispositivos de comunicación de mensajería por satélite y transceptores integrados [73]. Fue concebido por Bary Bertiger, Raymond J. Leopold y Ken Peterson a finales de 1987 y más tarde desarrollado por Motorola. El sistema comenzó a comercializarse en 1998 [74].

La constelación consta de 66 satélites activos en órbita, necesarios para la cobertura global, y satélites de repuesto adicionales para servir en caso de fallo. Los satélites se colocan en órbita terrestre baja a una altura de 780 kilómetros y una inclinación de $86,4^\circ$. La órbita casi polar y la comunicación entre satélites a través de ISL proporcionan disponibilidad de servicio global, incluidos ambos polos, océanos y vías aéreas, independientemente de la posición de las estaciones terrenas y las puertas de enlace [75].

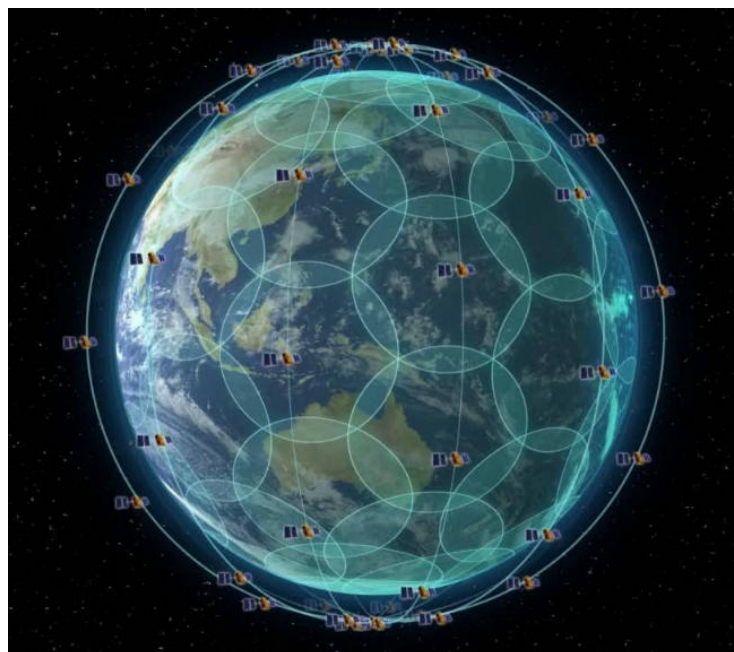


Figura 3-1 Constelación de satélites Iridium [76]

3.1.1 Historia

La megaconstelación de satélites Iridium fue concebida a principios de la década de 1990 como una forma de alcanzar altas latitudes de la Tierra con servicios confiables de comunicación por satélite [73]. Los primeros cálculos señalaban que para proporcionar esa cobertura se necesitarían 77 satélites, de ahí el nombre Iridium, en honor al metal con número atómico 77. Finalmente se llegó la conclusión que sólo es necesario menos 66 satélites, en 6 órbitas polares, para completar la cobertura global.

3.1.1.1 Primera generación

La primera generación de la constelación fue desarrollada por Iridium SSC y financiada por Motorola. Los satélites construyeron alrededor del autobús LM-700A de Lockheed Martin, con una vida útil de ocho años, y se desplegaron entre 1997 y 2002.

Uno de los inconvenientes de Iridium era que la constelación requería que todos sus satélites estuvieran en órbita antes de que pudiera comenzar el servicio comercial, lo que suponía un elevado desembolso inicial y años de inversión sin retorno. El coste de instalación de la constelación de primera generación de Iridium a finales de los años 1990 se estimó en unos 5.000 millones de dólares [77].

Para poner sus satélites en órbita lo más rápido posible, Iridium empleó una variada flota global de cohetes: 55 de los satélites fueron desplegados por 12 cohetes Delta II estadounidenses, que transportaban 5 satélites cada uno. Rusia lanzó 25 mediante 3 cohetes Proton-K/DM2 con 7 naves bordo, y 2 lanzamientos de satélites duales utilizando vehículos Rokot/Briz-KM. El Chang Zheng 2C/SD de China realizó 6 lanzamientos y desplegó un total de 12 naves espaciales.

La primera llamada telefónica de prueba se realizó a través de la red en 1998 y la cobertura global total se completó en 2002. Sin embargo, aunque el sistema cumplió con sus requisitos técnicos, no fue un éxito comercial. La mala recepción desde el interior de los edificios, los terminales voluminosos y caros y la competencia con el teléfono móvil convencional contribuyeron a su fracaso [78].

Detrás del fracaso se esconde una historia que muestra cómo un producto potencialmente revolucionario quedó paralizado por una planificación poco realista, un control de gestión insuficiente, un marketing fallido y una terquedad tecnológica.

No existía una demanda de mercado suficiente para el producto a los precios ofrecidos por Iridium. La empresa no logró obtener ingresos suficientes para pagar la deuda asociada con la construcción de la constelación e Iridium.

Entre 2002 y 2017, no se lanzaron más satélites para reponer la constelación. Esto cambió cuando en enero de 2017 se desplegaron los primeros diez satélites Iridium-NEXT de segunda generación

3.1.1.2 Segunda generación (Iridium NEXT).

Iridium NEXT es una constelación comercial de 66 satélites de comunicaciones operados por Iridium Communications Inc., nombre de la compañía tras ser rescatada de la bancarrota y sucesora de Iridium SSC, que proporciona el un servicio completo de cobertura global de comunicaciones por satélite.

El diseño se completó en 2010, e Iridium indicó que la constelación existente de satélites permanecería operativa hasta que Iridium NEXT esté en pleno funcionamiento, y se espera que muchos satélites permanezcan en servicio hasta 2020, mientras que los satélites NEXT mejorarán el ancho de banda. El nuevo sistema debía ser compatible con la primera generación [77].

Los nuevos satélites incorporan características como la transmisión de datos que no se destacaron en el diseño original. Los terminales y servicios de esta generación empezaron a estar disponibles comercialmente en 2018. Uno de los servicios de Iridium NEXT es Iridium Certus, banda ancha satelital disponible a nivel mundial, que es capaz de alcanzar hasta 704 Kbps de ancho de banda en aplicaciones marítimas, de aviación, móviles terrestres, gubernamentales y de IoT [79].

Iridium contrató a SpaceX para lanzar todos los satélites Iridium NEXT, que se han realizado mediante un lanzamiento de cohete Falcon 9 desde la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg en California. La construcción de 81 nuevos satélites fue adjudicada a Thales Alenia Space y Orbital ATK: de ellos 66 son unidades operativas, 9 repuestos en órbita y 6 repuestos terrestres [77].

Los satélites Iridium-NEXT de segunda generación se lanzaron en ocho etapas, y comenzó con el lanzamiento de los primeros diez satélites en la constelación existente en enero de 2017. El despliegue se extendió hasta enero de 2019, aunque el plan original era comenzar a lanzar nuevos satélites en 2014. Iridium Communications ha reemplazado con éxito a los satélites Iridium de la generación anterior [80]. Esta compleja tarea de reemplazar los satélites uno por uno se conoce como *slot swap*.

3.1.2 Características

Tipo de enlace	Banda	Frecuencias
Satélite a <i>Gateway</i>	Ka	19.4 - 19.6 GHz
Satélite a Satélite	Ka	23.18 - 23.38 GHz
<i>Gateway</i> a Satélite	Ka	29.1 - 29.3 GHz
Terminal de usuario a Satélite	L	1621.35 - 1626.5 MHz
Satélite a Terminal de usuario	L	

Tabla 3-1 Bandas de frecuencias utilizadas por el sistema de satélites Iridium [81]

Los satélites están contruidos sobre la plataforma de Thales ELiTeBus-1000. Cada uno tiene un peso de 860 kg. y una vida útil de al menos 20 años. Los satélites portan transpondedores de banda L para comunicaciones móviles y transpondedores de banda Ka para proporcionar enlaces cruzados entre satélites y enlaces descendentes a estaciones terrestres (Ver Tabla 3-1).

La capacidad de enlace cruzado de la constelación Iridium permite que cada satélite transmita datos directamente a otros cuatro satélites: los que están inmediatamente delante y detrás de él en el mismo plano orbital, y los que operan paralelos a él en los dos planos adyacentes.

Esto permite enrutar las llamadas por la red sin necesidad de pasar por estaciones terrenas, lo que reduce la latencia y también el costo, ya que se requieren menos estaciones terrenas.

3.1.2.1 Segmento espacial

Los 66 satélites Iridium operativos están dispuestos en 6 planos, orbitando a una altitud de 780 km. y una inclinación casi polar, 86,4°.

La velocidad orbital de los satélites es de aproximadamente 27.000 km/h y orbitan de polo a mismo polo con un período de 100 minutos y 28 segundos [82]. Este diseño permite una excelente visibilidad satelital y cobertura de servicio, especialmente en los polos norte y sur.

Los 11 satélites de cada uno de los 6 planos, que están espaciados uniformemente, actúan como nodos en la red de comunicaciones. Los seis planos están separados en 31,6° en longitud, lo que resulta en un espaciado de 22° entre el plano 6 y el plano 1. Las posiciones de los satélites en planos adyacentes con números pares e impares están desplazadas entre sí por la mitad del espaciado de los satélites. Esta configuración garantiza que todas las regiones del mundo estén cubiertas por al menos un satélite en todo momento. Actualmente hay 10 satélites adicionales en órbita de repuesto listos para reemplazar cualquier satélite fuera de servicio en caso de fallo.

Cada satélite se comunica con la superficie de la tierra a través de haces de antena muy enfocados que forman un patrón continuo en la superficie de la Tierra. Cada satélite utiliza tres antenas en fase para los enlaces de usuario, cada una de las cuales contiene una serie de antenas de módulos de transmisión y recepción.

Las antenas en fase de cada satélite crean 48 haces puntuales que cubren un área circular con un diámetro de aproximadamente 4.700 km. Estos *array* utilizan las frecuencias entre 1.616 y 1.626,5 MHz dentro de la banda L para comunicarse con los terminales de usuario.

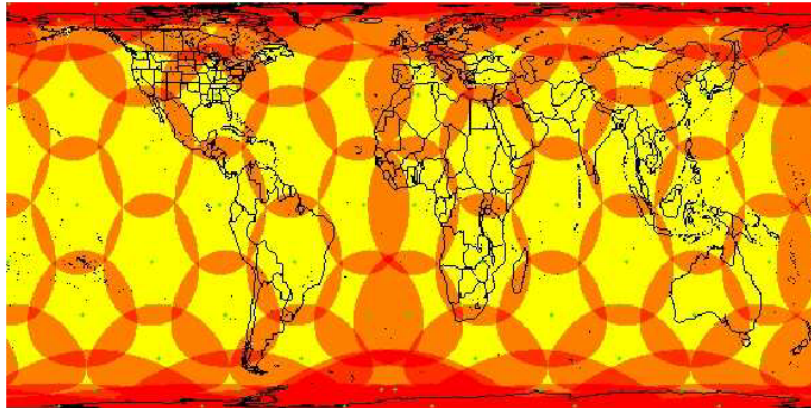


Figura 3-2 Huellas de los satélites Iridium [83]

Las órbitas casi polares hacen que los satélites estén más cerca entre sí a medida que aumenta la latitud subsatelital. Este movimiento orbital, a su vez, hace que la cobertura de los satélites vecinos se superponga cada vez más a medida que los satélites se acercan a los polos. En latitudes altas se mantiene un reparto constante de la carga entre los satélites desactivando selectivamente los haces puntuales del anillo exterior en cada satélite. Este control del haz también da como resultado una reducción de la interferencia entre satélites y una mayor disponibilidad en latitudes altas debido a la cobertura superpuesta.

La arquitectura de la red de satélites Iridium incorpora ciertas características que permiten que el enlace de comunicaciones del segmento espacial con el equipo del usuario se transfiera de un haz a otro y de un satélite a otro a medida que dichos satélites se mueven sobre el área donde se encuentra el abonado. Esta transferencia es transparente para el usuario, incluso durante comunicaciones en tiempo real.

Cada satélite tiene cuatro antenas de enlace cruzado que le permiten comunicarse y enrutar el tráfico a los dos satélites que están delante y detrás de él en el mismo plano orbital, así como a los satélites vecinos en los planos orbitales adyacentes. Estos ISL funcionan en la banda Ka, ver Tabla 3-1. La conexión en red entre satélites es una característica técnica importante de la megaconstelación Iridium que mejora la confiabilidad y la capacidad del sistema y reduce la cantidad de puertas de enlace o estaciones terrestres necesarias para brindar cobertura global con conmutador de respaldo redundante y una estación terminal terrestre que está físicamente separada del GES primario.

3.1.2.2 Formato de la señal

La comunicación entre satélites y teléfonos se realiza mediante un sistema basado en TDMA (*Time Division Multiple Access*) y FDMA (*Frequency-division Multiple Access*) que utiliza en la banda L entre 1.616 y 1.626,5 MHz [84]. Iridium controla exclusivamente 7.775 MHz de este rango y comparte otros 0,95 MHz para permitir a radioastrónomos observar las emisiones de hidroxilo.

Todas las transmisiones de enlace ascendente y descendente en la banda emplean variaciones de modulación QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) de 25 kbps y se implementan con una configuración del 40 % del pulso como coseno elevado a la raíz cuadrada. Las variaciones de QPSK utilizadas incluyen codificación diferencial y codificación BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), que se trata como un caso especial de QPSK [84].

Cada intervalo de tiempo tiene una duración de 8,28 milisegundos dentro de un *frame* de 90 milisegundos. En cada canal FDMA hay cuatro intervalos de tiempo TDMA en cada dirección. La trama TDMA comienza con un período de 20,32 milisegundos utilizado para mensajes simplex a dispositivos buscapersonas y para avisar a los teléfonos Iridium de una llamada entrante, seguido de cuatro slots ascendentes y cuatro *slots* descendentes. Esta técnica se conoce como multiplexación por división de tiempo. Se utilizan pequeños períodos de guardia entre franjas horarias. Independientemente del método de modulación utilizado, la comunicación entre unidades móviles y satélites se realiza a 25 Kbps [85].

El espectro total de 5,15 MHz se divide en 120 canales FDMA, cada uno con un ancho de banda de 31,5 kHz y una banda de guarda de 10,17 kHz para minimizar los efectos de intermodulación y dos bandas de guarda de 37,5 kHz para permitir cambios de frecuencia Doppler.

3.1.2.3 Transferencia de enlace

El sistema Iridium utiliza tres tipos de transferencia diferentes. A medida que un satélite viaja sobre la ubicación terrestre, las llamadas se transfieren a haces puntuales adyacentes; esto ocurre aproximadamente cada cincuenta segundos. Un satélite sólo permanece a la vista durante siete minutos en el ecuador. Cuando el satélite desaparece de la vista, se intenta transferir la llamada a otro satélite. Si no hay ningún otro satélite a la vista, la conexión se corta. Esto puede ocurrir cuando la señal de cualquiera de los satélites está bloqueada por un obstáculo. Cuando tiene éxito, la transferencia entre satélites puede notarse mediante una interrupción de un cuarto de segundo.

Los satélites también pueden transferir unidades móviles a diferentes canales y franjas horarias dentro del mismo haz puntual.

3.1.2.4 Terminales de usuario

La red satelital Iridium NEXT ofrece servicios de voz, datos y video para aplicaciones marítimas, terrestres y aeronáuticas, ofreciendo a los usuarios equipos tanto móviles como semifijos.

Los terminales de usuario con antenas omnidireccionales admiten búsqueda numérica y alfanumérica y transmisión de datos a 2,4 kbps. Todos los servicios de voz y mensajería se proporcionan independientemente de la ubicación del usuario o de la disponibilidad de acceso PSTN. Además, Iridium ofrece servicios de seguimiento y localización para aplicaciones marítimas, terrestres (carreteras y ferroviarias), aeronáuticas y personales.

Al igual que los teléfonos celulares, los teléfonos portátiles o de mano Iridium se utilizan para mensajes de voz y de texto, y sus dimensiones, peso y duración de la batería son similares a los de los teléfonos móviles. Por ejemplo, el dispositivo Motorola 9505 es pequeño, ligero y resistente al agua, lo que lo hace muy adecuado para entornos industriales y hostiles, además de atractivo para un profesional que viaja. El teléfono tiene una autonomía de 3,2 horas de conversación y 30 horas de espera.

El móvil Extreme 9575 de Iridium maneja voz, datos y SMS y es el único teléfono de Iridium con seguimiento GPS integrado. La capacidad GPS permite ver y enviar la posición del satélite GPS como un mensaje SMS a otro dispositivo o al portal de seguimiento StratosTrax utilizando por SBD (*Short Burst Data*). Como dispositivo SEND (*Satellite Emergency Notification*) certificado, el teléfono proporciona una señal SOS con un solo botón, solicita ayuda en caso de emergencia y notifica al usuario cuando la ayuda está en camino. El teléfono se puede configurar como un punto de acceso Wi-Fi utilizando Iridium para conectarse a Internet.

Iridium GO es un transceptor satelital flexible y multipropósito que incluye un enlace Wi-Fi, para que los usuarios puedan conectar sus teléfonos inteligentes, tabletas o computadoras portátiles para comunicaciones de voz y datos. Para mejorar los niveles de señal en instalaciones fijas, se pueden utilizar antenas externas: hay antenas helicoidales disponibles para montar en un barco o en el techo de un edificio y antenas planas de montaje magnético se utilizan para vehículos [83].

3.1.2.5 Estaciones terrenas

El segmento de control del sistema (SCS) y las estaciones terrenas (GES) o puerta de enlace conforman el segmento terrestre de Iridium. El SCS gestiona el sistema general, maneja el soporte operativo global y los servicios de control para la constelación de satélites y proporciona datos de seguimiento satelital a las puertas de enlace. y realizar la función de control de terminación para mensajería. El sistema SCS tiene tres componentes integrados: la Red de Apoyo Operacional, la Estación de Control de Red y cuatro centros TT&C (*Telemetry, Tracking and Command*).

Los cuatro TT&C están situados en Arizona y Alaska, EE. UU.; Svalbard, Noruega y Punta Arenas en Chile [86].

Las puertas de enlace, terminales terrestres con antenas de alta ganancia, conectan la red Iridium a la PSTN y otras redes terrestres. Las puertas de enlace generan y controlan la información de los usuarios registrados, como la identidad del usuario, su ubicación y su facturación. También rastrean los satélites para operaciones y gestión de soporte. Cada GES se conecta directamente con hasta cuatro satélites y, mediante enlaces cruzados, con el resto de los satélites de la red. Iridium tiene dos emplazamientos comerciales de GES, ubicados en Arizona, EE. UU. y en Fucino, Italia. El gobierno de EE. UU posee y opera su propia puerta de enlace en Oahu, Hawái.

A medida que un satélite orbita la Tierra, perderá la conexión con respecto a las puertas de enlace. Para mantener una llamada o conexión de datos, la constelación tiene la inteligencia para reenviar las tablas de enrutamiento y las tramas al siguiente satélite que aparece a la vista de la puerta de enlace. Al rastrear la ruta de una llamada entre usuarios de Iridium, una llamada desde un teléfono satelital va a uno de los satélites a la vista y la llamada se envía directamente al usuario receptor o, si el receptor no está en uno de los haces puntuales del satélite que recibe la llamada, ésta se enruta de satélite a satélite a través de enlaces entre satélites en banda K hasta llegar al satélite que cubre el receptor. Si una llamada desde un teléfono satelital se conecta a la PSTN (*Public Switched Telephone Network*), el teléfono satelital se vincula a uno de los satélites a la vista y la llamada se envía directamente al GES a través del enlace descendente o, si la puerta de enlace no está a la vista del satélite, la llamada se enruta de un satélite a otro a través del ISL de banda K hasta que llega a un satélite con conexión al GES, después se envía a través del enlace descendente para conectarse a la PSTN u otra red terrestre [83].

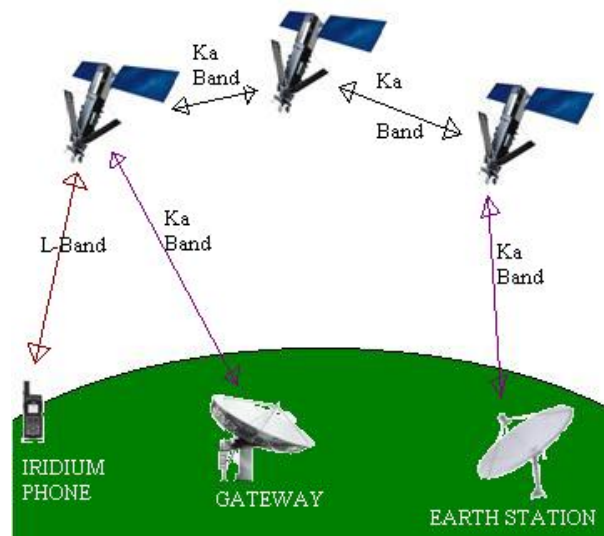


Figura 3-3 Componentes de la megaconstelación Iridium [87]

3.1.3 Carga útil alojada

La HPA (*Hosted Payload Alliance*), una alianza de la industria satelital diseñada para unir a las Administraciones Públicas y a la industria privada, define una carga útil alojada como: “Una parte de un satélite, como un sensor, instrumento o un conjunto de transpondedores de comunicaciones que son propiedad de una organización o agencia que no sea el operador satelital principal. La parte alojada del satélite opera independientemente de la nave espacial principal, pero comparte el suministro de energía, los transpondedores y, en algunos casos, los sistemas terrestres del satélite” [88].

Este modelo se está volviendo cada vez más popular debido a sus beneficios tanto para el anfitrión del satélite como para el propietario de la carga útil alojada. El anfitrión, como Iridium, se beneficia de capacidades ampliadas al aumentar su tamaño a un costo menor, ahorros por costos compartidos y oportunidades de ingresos adicionales. Mientras tanto, los propietarios de cargas útiles alojadas también obtienen beneficios, pueden llegar al espacio de forma rápida y menos costosa, ya que no tienen que desarrollar un sistema satelital completo.

Cada satélite Iridium-NEXT permite añadir la carga útil de un sensor secundario de 50 kg. y proporciona una potencia de 50 W para esa carga útil adicional. La transmisión de se realiza a través de la infraestructura de Iridium o de puertas de enlace privadas [89].

Como ejemplo, los satélites NEXT incorporan una carga útil secundaria para Aireon [90], un receptor de datos ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance–Broadcast*) apto para uso del control de tráfico aéreo y, a través de FlightAware, de las aerolíneas. Una carga útil adicional en 58 satélites es un receptor marino de seguimiento de barcos AIS para la empresa canadiense ExactEarth Ltd [91].

Por otro lado, Iridium obtuvo la certificación para su uso en el GMDSS (*Global Maritime Distress and Safety System*). La certificación puso fin al monopolio sobre la prestación de servicios de socorro marítimo que anteriormente había estado en manos de Inmarsat desde que el sistema entró en funcionamiento en 1999 [92].

Además, en junio de 2021 Iridium firmó un contrato con el Ejército de EE. UU. para desarrollar una carga útil que podría usarse tanto para transmitir datos como señales de sincronización o ubicación. El acuerdo, de 30 millones de euros, está destinado a trabajos de investigación y desarrollo. Iridium diseñará una pequeña carga útil satelital que será alojada en una constelación no especificada en órbita terrestre baja. El Ejército quiere un concepto que pueda operar en cualquier red LEO [93].

El objetivo es explorar realmente cómo los servicios que obtienen de una red como ésta pueden proliferar entre múltiples tipos de redes LEO. La carga útil está destinada a ayudar a los usuarios militares que dependen de las señales de GPS para el posicionamiento, la navegación y la sincronización.

Iridium trabajará con dos subcontratistas importantes: Satelles y SEAKR. El primero transmite señales de sincronización y ubicación a través de la constelación de banda L de Iridium. El servicio se ofrece como alternativa o respaldo al GPS.

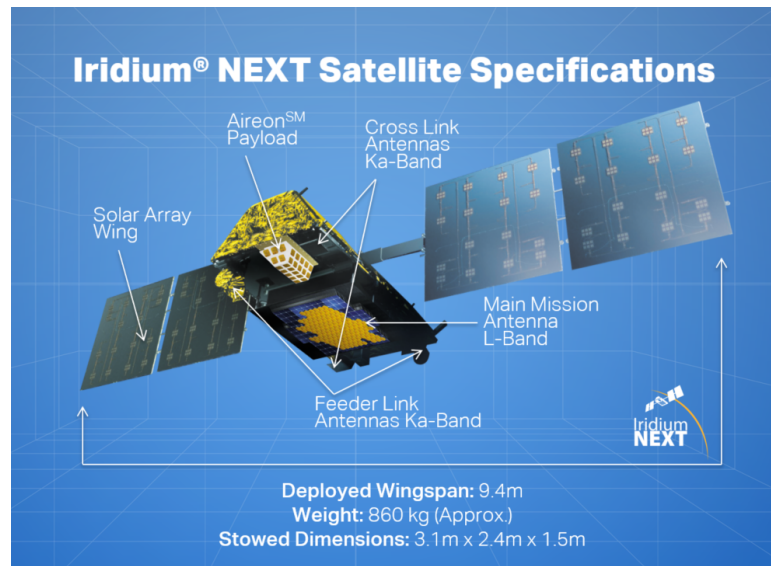


Figura 3-4 Satélite de segunda generación Iridium [88]

3.2 Starlink: Revolucionando las Comunicaciones por Satélite

Starlink es un proyecto de megaconstelación de satélites en órbita LEO de la empresa SpaceX [94], para implementar un nuevo sistema de comunicación por Internet satelital. SpaceX ofrece velocidades de hasta 1 Gbit/s, con latencias entre 25 ms. y 35 ms. Esas latencias hacen que el servicio de SpaceX sea comparable al de cable y fibra, mientras que los servicios de banda ancha satelital existentes tienen latencias de 600 ms. o superiores.

A fecha de 16 de diciembre de 2023 se encuentran operativos en órbita 5.168 satélites [95].

3.2.1 Historia

En noviembre de 2016, SpaceX presentó una solicitud ante la FCC (*Federal Communications Commission*) para obtener una licencia para operar una constelación de 4.425 satélites NGSO que oscilan entre 1.100 y 1.300 km. Sin embargo, cuando publicaron sus modificaciones a la citada solicitud en 2017, el plan preveía el despliegue de casi 12.000 satélites en órbita LEO [96].

Pero la competencia de otros proveedores de Internet por satélite, como OneWeb o Kuiper, obligó a SpaceX a acelerar sus planes. En noviembre de 2018, la compañía anunció un nuevo plan para desplegar su primer lote de 1.600 satélites a una altitud inferior a 550 km. El equipo de desarrollo también introdujo un diseño simplificado para que el primer lote estuviera listo en junio de 2019. En lugar de transmitir en las bandas Ka y Ku, el diseño simplificado del primer lote lo hace solo en la banda Ku [97].

En esa autorización la FCC específicamente permite a SpaceX a reducir ligeramente el número de satélites en esta constelación, a operar una porción sustancial de estos satélites a una altitud orbital más baja que la autorizada previamente, e incluir el uso de estaciones terrenas de entrada en banda Ku para menos de 75 de estos satélites de menor altitud. La concesión de esta modificación permitía a SpaceX hacer un uso eficiente de los recursos del espectro radioeléctrico de manera más segura, rápida y rentable a medida que inicia una nueva generación de servicios de banda ancha, incluidos aquellos en áreas anteriormente desatendido o incluso totalmente desatendidas por otras soluciones de banda ancha

Este despliegue presenta numerosos desafíos, entre ellos el hecho de que se necesitará realizar lanzamientos todos los meses durante los próximos 5 años, con un promedio de 44 satélites por lanzamiento [98].

Otro desafío es la cuestión del desgaste, ya que los satélites comenzarán a salir de órbita después de varios años y SpaceX necesitará reemplazarlos periódicamente para mantener su megaconstelación. De hecho, para mantener una constelación de 4.425 satélites, SpaceX tendrá que lanzar esa cantidad cada cinco años [99].

Sin embargo, SpaceX tiene la intención de utilizar esto a su favor reemplazando gradualmente los satélites inactivos por otros que ofrezcan un rendimiento superior. De esta forma, la constelación se irá modernizando progresivamente con la incorporación de satélites más pesados, capaces de transmitir más información y colocados en órbitas más altas y duraderas.

3.2.2 Características

Tipo de enlace	Banda	Frecuencias
Satélite a Terminal de usuario	Ku	10.7 - 12.7 GHz
		12.75 - 13.25 GHz
Terminal de usuario a Satélite	Ku	14.0 - 14.5 GHz
Satélite a <i>Gateway</i>	Ku	17.8 - 18.6 GHz
		18.8 - 19.3 GHz
<i>Gateway</i> a Satélite	Ka	27.5-29.1 GHz
		29.5-30 GHz
TT&C Bajada	Ku	12.15 - 12.25 GHz
		18.55 - 18.60 GHz
TT&C Subida	Ku	13.85 - 14.0 GHz

Tabla 3-2 Bandas de frecuencia utilizadas por el sistema de satélites SpaceX [96] [100] [101] [102]

Hasta ahora, la gran mayoría de los satélites Starlink se encuentran en órbitas a una altitud de 540-550 km y una inclinación de 53 °. Esta elección no es arbitraria. Una inclinación de 53 ° grados cubre las zonas donde vive la mayor parte de la población mundial, mientras que la altitud relativamente baja ayuda a resolver dos problemas. En primer lugar, reduce significativamente el retraso de la señal hasta el usuario final, mayor latencia. En segundo lugar, si el satélite Starlink falla, se saldrá de órbita y se quemará en la atmósfera de la Tierra en unos pocos años, reduciendo la probabilidad de que colisione con otras naves espaciales.

3.2.2.1 Segmento espacial

3.2.2.1.1 Gen1

La primera generación de satélite Starlink y sus características fue aprobada por la FCC en 2018 y modificada en 2021 [96] [101].

Se esperaba que los satélites Starlink fueran de la clase *Smallsat* [103] de 100 a 500 kg. de peso, y estaban destinados a estar en órbita terrestre baja de aproximadamente 1.100 km. según los primeros diseños en 2015. Sin embargo, en el primer gran despliegue de 60 satélites, la versión v0.9, en mayo de 2019 fue diferente.

Con un diseño de panel plano con múltiples antenas de alto rendimiento y un único panel solar, cada satélite Starlink pesa aproximadamente 227 kg, lo que permite a SpaceX maximizar la producción en masa y aprovechar al máximo las capacidades de lanzamiento de su plataforma Falcon 9. Para ajustar la posición en órbita, mantener la altitud prevista y salir de órbita, los satélites Starlink cuentan con propulsores Hall impulsados por criptón. Diseñada y construida sobre la herencia de Dragon, cada nave espacial está equipada con un sistema de navegación Startracker que permite a SpaceX apuntar los satélites con precisión. Los satélites Starlink son capaces de rastrear desechos en órbita y evitar colisiones de forma autónoma. Además, el 95 % de los componentes de este diseño arderán rápidamente en la atmósfera de la Tierra al final del ciclo de vida de cada satélite y los diseños iterativos futuros avanzarán hacia la desintegración completa [104].

En estos 60 primeros satélites no disponían de carga útil en banda Ka ni ISL ópticos.

Los satélites Starlink v1.0, lanzados desde noviembre de 2019, añaden la banda Ka y consiguen que el 100% de todos los componentes de este diseño desaparecerán por completo o se quemarán en la atmósfera de la Tierra al final de la vida de cada satélite. La masa aumenta hasta 260 kg. [105]

A uno de ellos, numerado 1130 y llamado *DarkSat*, se le redujo el albedo mediante un recubrimiento especial, pero el método se abandonó debido a problemas térmicos y reflectividad infrarroja. Todos los satélites lanzados desde el noveno lanzamiento en agosto de 2020 tienen visores para impedir que la luz solar se refleje en partes del satélite para reducir aún más su albedo y no interferir en las observaciones astronómicas [106].

Esta versión, además de aumentar el peso hasta 295 kg., utiliza ISL óptico. Estos ISL láser permite a SpaceX enrutar señales de comunicaciones entre los satélites de la constelación Starlink, eliminando que el equipo que envía el tráfico de Internet a una estación terrestre [107].

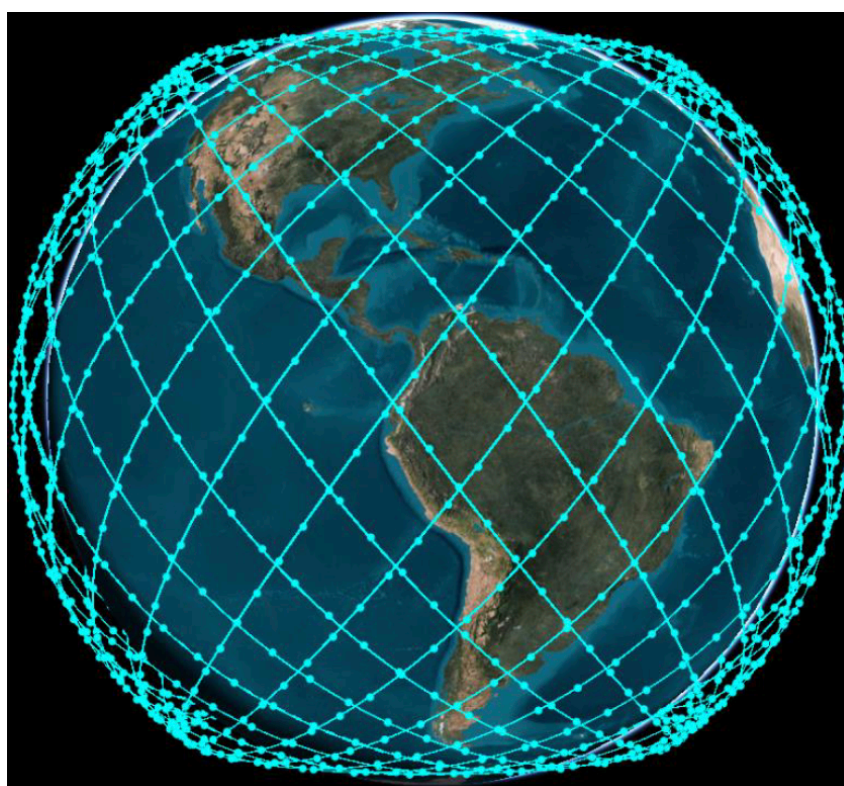


Figura 3-5 Megaconstelación Starlink de satélites Gen1 [33]

En la figura 3-5 se puede observar una representación de los 1.584 satélites, con una inclinación de 53° , una altitud de 550 km, 24 planos orbitales y 66 satélites en cada plano, con un espaciado entre planos orbitales de 15° (es decir, 24 planos en 360°), y el espaciado entre satélites en cada plano de $5,45^\circ$.

3.2.2.1.2 Gen2

En 2022 FCC aprobó parcialmente la segunda generación de satélites Starlink, pero solo 7.500 satélites de los 29.988 solicitados para operar a 525 km., 530 km. y 535 km. y 53° , 43° y 33° de inclinación utilizando las bandas Ka, Ku y E [100].

Esa autorización permite a SpaceX comenzar el despliegue de Starlink Gen2, que llevará la banda ancha satelital a todo el mundo, ayudando a cerrar la brecha digital a escala global. Al mismo tiempo, la limitación en el número de satélites y las condiciones asociadas protegen a otros operadores satelitales y terrestres de interferencias perjudiciales y mantendrán un entorno espacial seguro, promoviendo la competencia y protegiendo el espectro y los recursos orbitales para uso futuro.

Para abordar las preocupaciones sobre los desechos orbitales y la seguridad espacial, SpaceX se comprometió a solicitar la modificación de su licencia previamente otorgada para operaciones en la banda V para que pueda incorporar esas operaciones de banda V en su sistema Starlink Gen2, en lugar de operar un sistema separado en la banda V. Esto significa que no se aumenta la cantidad total de satélites que SpaceX está autorizado a desplegar y, de hecho, la reduce ligeramente, en comparación con la cantidad total de satélites que SpaceX potencialmente habría desplegado de otra manera.

SpaceX comenzó a producir los satélites Starlink Gen2 a principios de 2021 [108] y se esperaba que los lanzamientos comenzaran en 2022. Sin embargo, el tamaño de los satélites, 1.250 kg., hacía necesario utilizar la plataforma de lanzamiento Starship en lugar del Falcon 9, pero aquella no está todavía disponible. Como consecuencia, SpaceX diseñó la segunda generación en dos factores de forma diferentes, pero con las mismas características técnicas: uno con estructuras físicas adaptadas para el lanzamiento en Falcon 9, v2.0 mini, y uno diseñado para el lanzamiento mediante Starship [109]. Esta versión también incluye ISL ópticos.

Los satélites Starlink utilizan propulsores de efecto halo con gas criptón o argón como masa de reacción para elevar la órbita y mantener la posición. Los propulsores de criptón tienden a presentar una erosión significativamente mayor del canal de flujo en comparación con un sistema de propulsión eléctrica similar operado con xenón, pero el criptón es mucho más abundante y tiene un precio de mercado más bajo [110]. Los propulsores de segunda generación que utilizan argón tienen 2,4 veces el empuje y 1,5 veces el impulso específico del propulsor alimentado con criptón [111].



Figura 3-6 Satélite Starlink [112]

3.2.2.1.3 *Starshield*

En enero de 2022, SpaceX desplegó cuatro satélites de seguridad nacional para el gobierno de EE. UU. en su misión de viaje compartido en el Falcon-9 [113]. Su propósito no fue revelado, pero fue el primer paso el despliegue de Starshield.

En diciembre de 2022, SpaceX anunció Starshield, un programa para incorporar cargas útiles de entidades militares o gubernamentales a bordo de un bus satelital personalizado, posiblemente basado en la tecnología v1.5 y Gen2 [114]. Estos satélites son más pesados, con el doble de área que un solo Starlink v1.5 y tienen dos pares de paneles solares en comparación con uno en de v1.5. Starshield está diseñado para uso del gobierno de EE. UU. con un enfoque inicial en tres áreas: observación de la Tierra, comunicaciones y alojamiento de cargas útiles.

Diseñados para cumplir con diversos requisitos de misión, los satélites Starshield se anuncian como capaces de integrar una amplia variedad de cargas útiles, ofreciendo una versatilidad única a los usuarios. Los satélites Starshield serán compatibles con los satélites comerciales Starlink existentes y se interconectarán con ellos mediante ISL ópticos entre satélites [115].

En septiembre de 2023, el programa Starshield recibió su primer contrato de la Fuerza Espacial de EE. UU. para proporcionar comunicaciones por satélite personalizadas para el ejército [116]. Esto se enmarca en el nuevo programa PLEO (*Proliferated Low Earth Orbit*) de la SDA, donde se asignarán hasta 900 millones de dólares en contratos durante los próximos 10 años. Aunque 16 proveedores compiten por adjudicaciones, el contrato de SpaceX es el único que se ha emitido hasta la fecha [117].

3.2.2.2 Terminales de usuario

El sistema no conecta directamente los satélites a terminales de los usuarios, como las constelaciones de Iridium o Inmarsat. Los terminales pueden montarse en cualquier lugar, siempre tengan visión directa del cielo, incluso en objetos en movimiento como vehículos, trenes o barcos

Los terminales Starlink utilizan una conexión directa al usuario que se establece mediante una combinación de antenas terrestres y satélites. Las antenas del terminal apuntan hacia el cielo y, cuando el satélite pasa por encima, la antena se fija en el satélite y establece una conexión. A continuación, la conexión se transmite al enrutador del usuario, que a su vez proporciona acceso a Internet. La antena en sí está equipada con antenas ESA, que le permite rastrear y comunicarse con los satélites a medida que se mueven por el cielo, del que debe tener visión directa. Esta tecnología permite que el sistema mantenga conexión con los satélites, incluso si se mueven a altas velocidades [118].

Además de la antena, también proporciona un enrutador wifi que se encarga de hacer llegar el servicio de banda ancha a los dispositivos del usuario final [119].

Los terminales Starlink dispone de una CPU STMicroelectronics basada en ARM Cortex-A53 de cuatro núcleos que ejecuta un *kernel* de Linux y arranque mediante U-Boot. Además, el terminal cuenta con un receptor GPS, controladores de motor, generación de reloj síncrono y circuitos de alimentación a través de Ethernet [120].

Desde septiembre de 2023 SpaceX ya no está absorbiendo el costo de las antenas y eso es un paso clave para la rentabilidad de la empresa. Hasta ese momento la empresa subvencionaba los terminales de usuario, pero después de mejorar la producción ese subsidio ya no es necesario [121].



Figura 3-7 Terminales de usuario Starlink [122]

3.2.2.3 Estaciones terrenas

Otro elemento clave de la arquitectura de SpaceX son las estaciones terrestres necesarias para conectar a los usuarios. Cada satélite actúa como un repetidor, transmitiendo una señal desde la estación terrena al usuario con el terminal satelital y viceversa. Esto a su vez crea algunas limitaciones técnicas. Para un funcionamiento, la estación terrena y el usuario deben estar en el campo de visión del satélite al mismo tiempo. Por tanto, la distancia entre ellos no debe superar los 1.000 km.

Esto significa que para dar cobertura global es necesario desplegar una gran red de estaciones terrenas. Las estaciones terrestres son costosas de implementar y conllevan limitaciones geográficas, y a veces políticas, sobre dónde pueden ubicarse.

Sin embargo, SpaceX ya está trabajando para reducir la dependencia del sistema de la ubicación geográfica de las estaciones terrenas. Desde la generación Starlink v1.5 cuenta con ISL láser. Permite que los satélites intercambien datos entre sí, lo que excluye la necesidad de las estaciones terrenas intermedias y elimina las restricciones de distancia.

Así, el 24 de enero de 2021 SpaceX lanzó 10 satélites Starlink con ISL láser con una inclinación de 97,6°, en órbita casi polares, los primeros con esa capacidad, con lo que hace innecesario estaciones terrenas sobre los polos. Al permitir las comunicaciones de un satélite a otro en el mismo plano orbital o en uno adyacente, una estación terrena no tiene que estar en la misma huella satelital que los terminales de usuario. Además de reducir la cantidad de estaciones terrestres necesarias para la cobertura global, los ISL láser también pueden reducir la latencia porque reducen la cantidad de saltos entre satélites y estaciones terrenas.

A pesar de la introducción paulatina de los ISL láser que utilizan los satélites Starlink para comunicarse entre sí sigue siendo necesaria la utilización de infraestructura terrena para proporcionar servicio [123].

3.3 Kuiper: Acceso Global a Internet de Amazon

3.3.1 Historia

Kuiper es una megaconstelación de satélites en órbita LEO que proporcionará servicio utilizando servicios fijos por satélite y servicios móviles por satélite en la banda de frecuencias Ka (26.5 GHz - 40 GHz).

La impulsora de esta infraestructura es Kuiper Systems LLC, empresa subsidiaria de Amazon que se estableció en 2019 para implementar una megaconstelación LEO con el objetivo de proporcionar conectividad a Internet de banda ancha de baja latencia.

Según la autorización de la FCC [124] Kuiper lanzará y operará el 50% de sus satélites el 30 de julio de 2026, y deberá lanzar las restantes estaciones espaciales necesarias para completar su constelación de servicio autorizado, colocarlos en sus órbitas asignadas y operar cada uno de ellos de acuerdo con la autorización el 30 de julio de 2029.

3.3.2 Características

Kuiper ofrecerá servicios satelitales de alta velocidad y baja latencia mediante la puesta en órbita LEO de 3.236 satélites en 98 planos orbitales agrupados en tres capas: a 590 km., 610 km. y 630 km.

Altitud (km.)	Inclinación	Planos	Satélites por plano
590	33°	28	28
610	36°	36	36
630	51,9°	34	35

Tabla 3-3 Distribución de satélites Kuiper en capas [125]

La arquitectura orbital del sistema Kuiper está diseñada para maximizar la capacidad y la cobertura para los clientes cuando la constelación esté desplegada al completo. Al utilizar capas de altitud superpuestas con diferentes inclinaciones, el diseño de la constelación minimiza el número total de satélites necesarios para distribuir la cobertura de manera uniforme en latitudes geográficas y proporcionar diversidad de enlaces incluso cuando un satélite experimenta una interferencia con otros sistemas.

Kuiper está diseñado para maximizar la reutilización y la eficiencia del espectro radioeléctrico. Además, aprovecha la infraestructura de redes terrestres de Amazon para ofrecer servicios de banda ancha, de alta velocidad y de baja latencia a los clientes.

Tipo de enlace	Banda	Frecuencias
Satélite a Terminal de usuario	Ku	17.8-18.3 GHz
		18.3-18.6 GHz
		18.8-19.3 GHz
		19.7-20.2 GHz
Terminal de usuario a Satélite	Ku	28.5-28.6 GHz
		28.6-29.1 GHz
		29.5-30.0 GHz
Satélite a <i>Gateway</i>	Ku	19.3-19.4 GHz
		19.4-19.6 GHz
		19.6-19.7 GHz
		19.7-20.2 GHz
<i>Gateway</i> a Satélite	Ka	27.5-28.35 GHz
		28.35-28.5 GHz
		29.1-29.25 GHz
		29.25-29.5
		29.5-30.0 GHz
TT&C Bajada	Ku	19.25-19.3 GHz
		19.3-19.4 GHz
TT&C Subida	Ka	27.5-27.55 GHz
		27.95-28.0 GHz
		28.0-28.05 GHz
MSS (<i>Mobile Satellite Service</i>)	Ku, Ka	19.4-19.6 GHz, 29.1-29.5 GHz

Tabla 3-4 Bandas de frecuencia utilizadas por el sistema de satélites Kuiper [124]

La FCC [124], también autorizó a Kuiper a operar en las bandas 19.4-19.6 GHz and 29.1-29.5 GHz para proporcionar servicios MSS (Ver Tabla 3-4).

Iridium tiene licencia en esas frecuencias, sus satélites operan enlaces de conexión MMS en la banda de enlace descendente de 19,4-19,6 GHz y en la banda de enlace ascendente de 29,1-29,3 GHz en apoyo de sus enlaces a los usuarios en la banda L. Las estaciones terrenas de Iridium de Arizona, Hawái y Chile están dentro del rango de latitud atendido por Kuiper. Así, las de puerta de enlace de Kuiper se situarán en distintas localizaciones a las anteriores.

Tanto la constelación de Kuiper como la de Iridium emplean antenas de alta ganancia con haces estrechos tanto en sus satélites como en las estaciones terrenas para la conexión MSS. En consecuencia, las puertas de enlace que se encuentran a más de unos pocos cientos de kilómetros de distancia se beneficiarán de un aislamiento suficiente para garantizar que se eviten niveles inaceptables de interferencia.

Como primer paso, Kuiper no colocará sus estaciones terrenas cerca de ninguna estación terrena de Iridium existente o planificada. Además, cualquier estación terrena de Kuiper que esté ubicada lo suficientemente cerca de cualquier estación terrena de Iridium como para producir niveles ocasionales de interferencia inaceptable, será operado para evitar que se produzca cofrecuencia o copolarización durante cualquier momento en que se haya descartado el potencial de interferencia. predicho. Si se predice un evento de interferencia inevitable, Kuiper reducirá su potencia de emisión en las bandas o polarizaciones afectadas o cesará temporalmente las transmisiones en las bandas o polarizaciones mientras dure el evento de interferencia en línea.

3.3.2.1 Segmento espacial

KuiperSat 1 y 2 [126] son dos prototipos de cuyo objetivo es probar la tecnología que Amazon planea implementar en toda la constelación operativa, incluidas antenas parabólicas y en fase, sistemas de potencia y propulsión, y módems diseñados a medida. Fueron puestos en órbita el 6 de octubre de 2023 [127]. Se verificará el *hardware* y *software* de red de Amazon y cómo se transmitirán los datos entre satélites, las puertas de enlace terrestres, AWS (*Amazon Web Services*), Internet y los terminales de clientes.

KuiperSat 1 y 2 cuentan con un prototipo de carga útil de banda ancha en banda Ka, se han situado en una órbita a 590 km. con una inclinación de 30°. Los dos satélites no forman parte de la constelación operativa y serán desorbitados al final de su vida útil, una vez hayan finalizado las pruebas.

La carga útil del satélite Kuiper está construida sobre un bus satelital que proporciona control orbital, generación y almacenamiento de energía, control de vuelo y orientación satelital. La carga útil de comunicaciones incluye múltiples tipos de antenas, módems, un conmutador y enrutador de paquetes. La carga útil estará operativa una vez que el satélite esté en su posición orbital prevista, apuntando al nadir y configurado.

La carga útil se reprograma periódicamente para mejorar la capacidad en función de las necesidades del usuario dentro de las áreas con cobertura. El subsistema de enrutamiento es configurado por las estaciones terrenas para preprogramar los haces hacia puntos virtuales en la tierra. Todo el tráfico de enlace ascendente y descendente se regenera completamente en el satélite y las actividades de enrutamiento/conmutación/reempaquetado se realizan entre haces.

Los módems admiten una amplia gama de opciones de modulación y codificación para las comunicaciones, incluida la corrección de errores de reenvío del código LDPC (*Low-density Parity-Check*) de última generación. Cada módem admite codificación y modulación adaptativas por enlace de usuario y admite QoS (*Quality of Service*). El subsistema de redes y enrutamiento admite múltiples niveles de calidad de servicio, lo que permite el cumplimiento de los acuerdos de nivel de servicio.

Los satélites Kuiper utilizan antenas avanzadas en fase con múltiples haces de usuario. La tecnología de la antena y la funcionalidad de redes SDN (*Software-defined Networking*) permiten una asignación flexible de frecuencia y capacidad según las necesidades de los clientes dentro de una región determinada. Un conjunto separado de antenas en los satélites Kuiper se comunica con las estaciones terrenas.

Los haces de usuario del satélite proporcionan conectividad a múltiples clientes en lugares virtuales. El uso de antenas en fase de alta ganancia, orientables y moldeables, que funcionan a altitudes orbitales bajas, admite puntos virtuales de aproximadamente 300 km, un radio de aproximadamente 10 km. Se puede utilizar un haz de usuario más grande, de aproximadamente 500 km., con ~2 dB de directividad reducida, en los casos en que se necesitan tamaños de haz puntual para aumentar la cobertura para la cobertura.

Los haces de usuario mantienen un servicio continuo a los puntos virtuales asignados actualizándose constantemente para compensar el movimiento del satélite. Además, cuando los haces de usuario se conmutan entre satélites, el sistema de comunicaciones admite una transferencia y conmutación para mantener la conectividad del cliente [125].

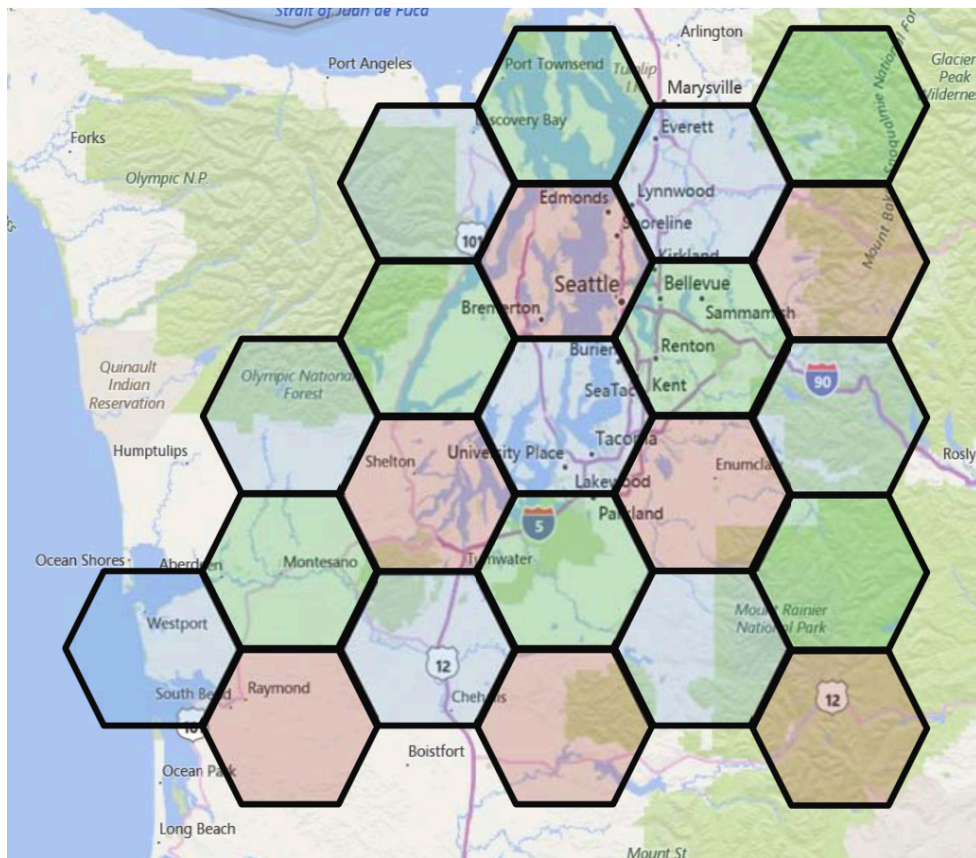


Figura 3-8 Ejemplo de cobertura del sistema Kuiper con varios haces [125]

La Figura 3-8 muestra un ejemplo de múltiples puntos virtuales, diferentes colores, de frecuencia múltiple superpuesto en un mapa del estado de Washington, EE. UU. Cada punto virtual puede ser atendido por cualquier satélite a la vista, pero sólo un satélite puede servir al mismo punto en una frecuencia específica en un momento dado.

Si bien los haces de usuario generalmente se centrarán en cada punto virtual, el sistema puede apuntar los haces lejos del centro del punto para optimizar el rendimiento, especialmente si la mayor parte del tráfico está destinado a clientes alejados del centro, utilizando una gestión de auto interferencia más avanzada.

Los clientes siempre verán una conexión persistente a aplicaciones de Internet y servicios de Amazon y no se darán cuenta del cambio de satélites, puertas de enlace o rutas a través de la red de Kuiper. Los clientes sólo utilizarán interfaz *Ethernet* estándar.

3.3.2.2 Terminales de usuario

Una antena cuadrada de 18 cm., con un peso de 0,5 kilos y una velocidad de hasta 100 Mbps será el terminal de cliente más pequeño y asequible de Kuiper. Un segundo modelo de 45 cm. y 1 Gbps podrá ser utilizado por empresas y organismos gubernamentales [128].

Las antenas funcionan con un chip diseñado por Amazon, bautizado como Prometheus. Este procesador combina la potencia de procesamiento de un chip de módem 5G que se encuentra en los teléfonos inteligentes modernos, la capacidad de una estación base celular para manejar el tráfico de miles de clientes a la vez y la capacidad de una antena de *backhaul* por microondas para admitir conexiones punto a punto y se incluye todo en un único chip dedicado.

Además, Prometheus también se utiliza en los satélites y antenas terrestres, lo que permite que el sistema procese hasta 1 Tbps de tráfico en cada satélite.

Las antenas ESA utilizadas por Kuiper implementan un enfoque diferente al tradicional adoptado hasta ahora. En lugar de colocar un conjunto de antenas uno al lado del otro, se utilizan pequeñas estructuras de elementos de antena para superponerlas unas sobre otras. Esto nunca se ha logrado en la banda Ka. El avance permite reducir el tamaño y el peso de todo el terminal, mientras se opera en una frecuencia que ofrece mayor ancho de banda y mejor rendimiento que otras bandas. Este diseño utiliza una combinación de componentes digitales y analógicos para dirigir electrónicamente haces de banda Ka hacia los satélites que pasan por encima.

El resultado es una antena de matriz en fase de apertura única que mide 30 cm. de diámetro, lo que la hace tres veces más pequeña y proporcionalmente más liviana que los diseños de antenas tradicionales. Esta reducción de tamaño de orden de magnitud reducirá los costes de producción en la misma medida, permitiendo a Amazon ofrecer a los clientes un terminal más asequible y fácil de instalar [129].

El diseño de Kuiper puede reducir en gran medida el costo y la complejidad de construir la infraestructura terrestre que será necesaria para brindar acceso a su red a los usuarios finales. También tiene baja latencia, y se ha descubierto durante sus pruebas que puede proporcionar capacidades de *streaming* 4K incluso con satélites geoestacionarios actuales, que están hasta 50 veces más lejos de donde se ubicarán los satélites del Proyecto Kuiper en órbita terrestre baja [129].



Figura 3-9 Diseño preliminar de los terminales de usuario de Kuiper [128]

3.3.2.3 Estaciones terrenas

Las estaciones terrenas se dividen en tres tipos: puertas de enlace, TT&C y Kuiper SDN.

El diseño del sistema Kuiper permite dos tipos de antenas, en fase y parabólicas, que admiten una variedad de ganancias. Los esquemas de codificación y modulación adaptativos en todos los módems permiten terminales de alto rendimiento y alta ganancia y terminales de bajo costo y baja ganancia.

Los emplazamientos de las estaciones terrenas se distribuyen en toda el área de servicio, para permitir que cada satélite acceda a dos estaciones diferentes para mejorar el rendimiento del sistema y reducir las interferencias. El tráfico de múltiples puertas de enlace se agrega a través de enlaces de retorno de fibra terrestre a un IXP (*Internet Exchange Point*). En cada sitio IXP, Kuiper interactúa con sistemas CDN (*Content Delivery Network*), *peering* de redes empresariales y de telecomunicaciones, conexiones a la red troncal de Internet o conexión directa a la infraestructura troncal de Amazon y a sus centros de datos.

La red del Sistema Kuiper se gestiona a través de un controlador de red SDN, el Kuiper SDN. Kuiper SDN es responsable de la asignación óptima de haces para clientes y puertas de enlace en todo el sistema y realiza una asignación de recursos a largo plazo según la demanda del cliente y el tipo de servicio, incluido el ajuste a corto plazo de los recursos según la hora del día o las necesidades de capacidad máxima. Kuiper SDN optimiza la red entre múltiples satélites si los recursos no están disponibles debido a ángulos de exclusión implementados para proteger los satélites GEO, restricciones de acuerdos de coordinación o limitaciones operativas de satélites. El control del tráfico dentro de un período de asignación, incluida la asignación de canales de enlace ascendente de los usuarios, se realiza por cada satélite Kuiper para cada haz y las puertas de enlace comunican a Kuiper SDN y la información de control a la constelación de satélites. La SDN de planificación de haces cambia los recursos satelitales para permitir una rápida reasignación de recursos y al mismo tiempo limitar el tráfico de control. En los casos en los que no se puedan asignar satélites alternativos, el sistema también admite la división del espectro cuando sea necesario.

Además, Kuiper emplea una red independiente de estaciones terrenas TT&C, antenas y radios separadas a bordo del satélite y múltiples centros de operaciones satelitales. La red TT&C se utiliza principalmente durante operaciones de lanzamiento, operaciones de salida de órbita y durante cualquier situación anómala. Dado que la mayoría de las operaciones de control de satélites utilizan la red de enlace de Kuiper, sólo se necesitan unos pocos sitios de TT&C en todo el mundo, y sólo unos pocos satélites se comunican activamente con las estaciones terrenas de TT&C en un momento dado.

Los enlaces TT&C en órbita no causarían más interferencia y no requerirían más protección que los enlaces de entrada en el espectro relevante. Los canales TT&C pueden variar en ancho de banda con tamaños de 11 canales de 1, 5, 10, 20 o 50 MHz, y se seleccionan diferentes canales para diferentes antenas, lo que permite el acceso a múltiples satélites desde un sitio común. Los enlaces TT&C utilizan modulación de portadora única o también podrán ensancharse cuando se utilicen canales de mayor tamaño. Las comunicaciones TT&C contendrán datos de posición y estado de los satélites y permitirán la carga de listas de tareas. El enlace también se utilizará para la recopilación de datos satelitales cuando sea necesario [125].

3.3.3 Previsiones futuras

Amazon prevé invertir de 10.000 millones de dólares [130] para el despliegue de esta megaconstelación al menos hasta el 30 de julio de 2029, como señala la autorización de la FCC [124].

Además, Amazon gastará 120 millones de dólares en una nueva instalación de procesamiento de satélites en el Centro Espacial John F. Kennedy de la NASA. Las nuevas estarán ubicadas estratégicamente cerca de los operadores de lanzamiento que enviarán los satélites Kuiper a la órbita: Blue Origin de Jeff Bezos, que opera un campus en el KSC y un complejo de lanzamiento en la Base de la Fuerza Espacial de Cabo Cañaveral, y *United Launch Alliance* [131].

Por otro lado, Kuiper está en conversaciones con el Departamento de Defensa de EE. UU. sobre la posibilidad de instalar terminales de comunicaciones láser en algunos de los satélites de Internet de la compañía para que puedan transferir datos desde satélites de teledetección directamente a la red militar en órbita terrestre baja.

El plan de la SDA es que algunos satélites Kuiper u otros satélites comerciales sirvan como repetidores para que puedan soportar la transferencia de datos de alta velocidad, por ejemplo, desde satélites comerciales de imágenes a usuarios militares en la tierra [132].

3.4 OneWeb: Conectividad para Áreas Remotas

3.4.1 Historia

OneWeb Network Access Associates Limited es una empresa de comunicaciones que tiene como objetivo crear servicios de Internet de banda ancha por satélite [133]. La empresa tiene su sede en Londres y oficinas en Virginia, EE.UU. y una planta de fabricación de satélites en Florida, Airbus OneWeb Satellites, que es una empresa conjunta con Airbus Defence and Space.

La empresa fue fundada como WorldVu Satellites Ltd. por Greg Wyler en 2012, tenía su sede en las Islas del Canal de Gran Bretaña y lanzó los primeros satélites en febrero de 2019. Entró en quiebra en marzo de 2020 después de no poder reunir el capital necesario para completar la construcción y el despliegue del 90% restante de la red [134]. La empresa salió del procedimiento de quiebra y reorganización en noviembre de 2020 con un nuevo grupo propietario. En 2021, la empresa multinacional india Bharti Global, el proveedor de servicios satelitales con sede en Francia Eutelsat y el Gobierno del Reino Unido eran los mayores accionistas de la empresa, mientras que el SoftBank de Japón conservaba una participación accionaria del 12%.

El 28 de septiembre de 2023 la empresa francesa Eutelsat completó la compra de OneWeb el 28 de septiembre, concluyendo la fusión anunciada un año antes. OneWeb pasa a denominarse Eutelsat OneWeb.

Esto se produce después de que los accionistas de Eutelsat aprobaran el acuerdo el jueves. Esta combinación ahora forma el Grupo Eutelsat. OneWeb y Eutelsat y los accionistas de OneWeb firmaron un Memorando de Entendimiento en julio de 2022 con miras a combinar Eutelsat y OneWeb en una transacción totalmente accionaria, mediante la cual Eutelsat y los accionistas de OneWeb poseerán cada uno el 50% de las acciones de Eutelsat. La fusión crea un líder global particularmente bien posicionado para capturar el mercado de conectividad satelital de rápido crecimiento al ofrecer el primer mercado global infraestructura combinada GEO y LEO [135].

3.4.2 Características

El sistema de satélites LEO OneWeb consta de 634 satélites operativos, a fecha de 20 de mayo de 2023, que operarán en 12 planos a 1.200 km de altitud, con una inclinación orbital casi polar, de 86,4° [136].

Inicialmente se planearon 49 satélites por cada uno de los 18 aviones orbitales lo que requería 882 satélites más algunos repuestos, pero la capacidad mejorada de cobertura satelital permitió que esto se redujera a 12 planos de 49 satélites que requerían 588 satélites más algunos repuestos en órbita [137].

OneWeb proporcionará acceso a Internet de banda ancha de alta calidad a pequeños terminales de usuario de bajo costo ubicados en cualquier parte de la Tierra. El servicio prestado será comparable a los servicios terrestres de banda ancha disponibles actualmente en las zonas densamente pobladas de los países desarrollados. Además, debido a que los satélites se encuentran a una altitud mucho más baja que los satélites GSO, los usuarios del sistema OneWeb experimentan una latencia de ida y vuelta de menos de 50 milisegundos, que es $1/13$ de la latencia de los satélites GSO, y es coherente con las tecnologías terrestres.

OneWeb se ha diseñado de tal manera que se puedan añadir más satélites a la constelación en el futuro más allá de los 720 satélites para aumentar la capacidad y al mismo tiempo proteger las redes de satélites GSO mediante el cumplimiento de los límites EPFD (*Equivalent Power-flux Density*). Además, extiende las redes de los operadores móviles y los proveedores de servicios de Internet para servir a nuevas áreas de cobertura, proporcionando acceso de voz y datos a clientes que no pueden ser atendidos técnica o económicamente a través de medios terrestres [137].

Tipo de enlace y sentido de la transmisión	Banda	Rango de frecuencias
<i>Gateway</i> a Satélite	Ka	27.5 – 29.1 GHz
		29.5 – 30.0 GHz
Satélite a <i>Gateway</i>	Ku	17.8 – 18.6 GHz
		18.8 – 19.3 GHz
		19.7 – 20.2 GHz
Terminal de Usuario a Satélite	Ku	12.75 – 13.25 GHz
		14.0 – 14.5 GHz
Satélite a Terminal de Usuario	Ku	10.7 – 12.7 GHz

Tabla 3-5 Bandas de frecuencia utilizadas por el sistema de satélites OneWeb [137]

3.4.2.1 Segmento espacial

Los satélites de la constelación OneWeb tienen aproximadamente 150 kg. de peso. [138]

Cada satélite OneWeb tiene 16 haces de usuario idénticos, que operarán en banda Ku, cada uno de los cuales consistirá en un haz puntual altamente elíptico no orientable. También dispone dos antenas con haz orientable idénticas, que funcionan en banda Ka y cada una de estas antenas crea un haz puntual circular orientable de forma independiente. Los 16 canales de enlace ascendente de banda Ka se convierten en 16 canales de enlace descendente de banda Ku, cada uno de los cuales se enruta a uno de los 16 haces de usuario, enlaces directos, con un ancho de banda de 250 MHz. Además, 16 canales de enlace ascendente de banda Ku diferentes de los mismos 16 haces de usuario se convierten en 16 canales de enlace descendente de banda Ka y se envían de vuelta al mismo haz de transmisión de puerta de enlace, enlaces de retorno, cada uno con un ancho de banda de canal de 125 MHz.

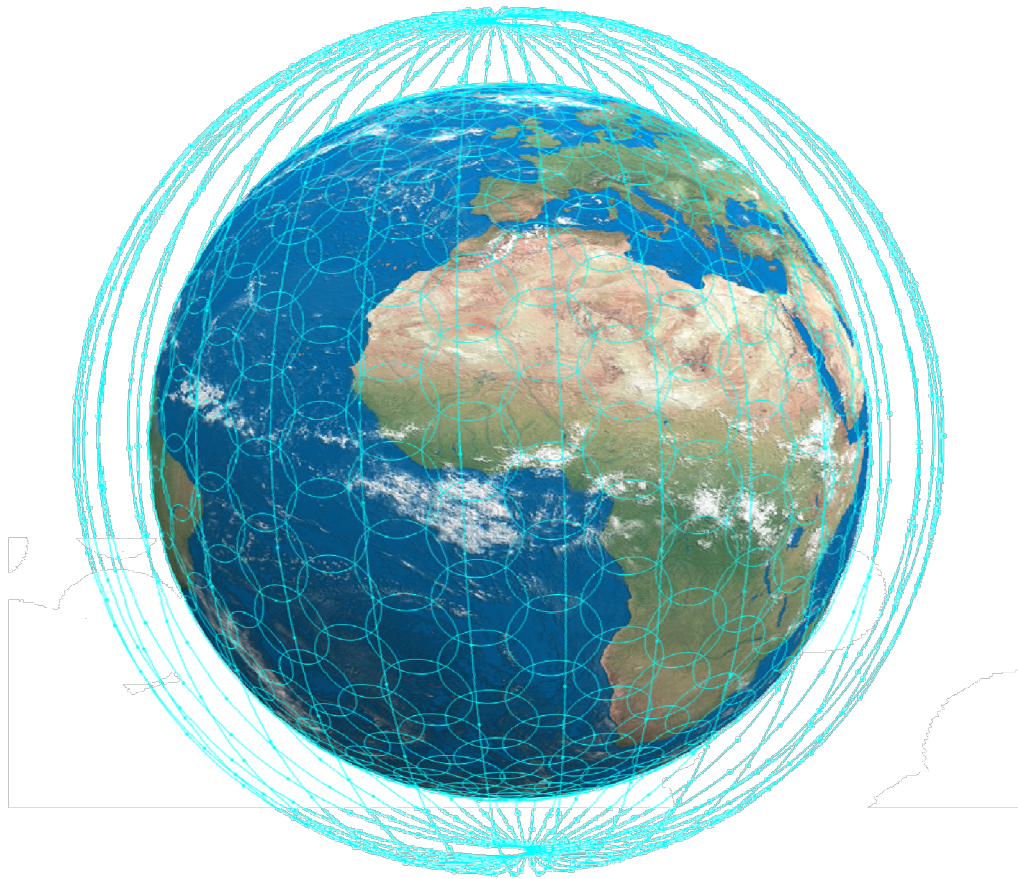


Figura 3-10 Huella de cada satélite OneWeb [137]

Para cada satélite OneWeb, la reutilización de frecuencias se logra de la siguiente forma:

- En la banda Ku, mediante la reutilización de las mismas frecuencias de banda Ku entre haces separados geográficamente del mismo satélite.
- En la banda Ka, se logra mediante la utilización de polarización circular ortogonal para las transmisiones a la estación terrena.

Una característica de los satélites Oneweb es que no dispone de ISL, por lo que sólo pueden proporcionar un servicio al usuario cuando también se encuentran dentro del alcance de una estación terrena de acceso. Esto supone una desventaja frente a otras megaconstelaciones LEO como Starlink o Kuiper.

3.4.2.2 Transferencia de enlace

La huella agregada total de los haces de banda Ku de la constelación proporciona cobertura a toda la superficie de la Tierra. El movimiento de los satélites en sus órbitas significa que un usuario será transferido progresivamente de un haz a otro dentro de un satélite y luego transferido a los haces del siguiente satélite en el mismo plano orbital, o según sea necesario a un satélite en el plano orbital adyacente. Este traspaso regular se produce sin problemas para que el usuario experimente un servicio continuo, al igual que los teléfonos móviles se transfieren de una torre de telefonía móvil a otra.

El traspaso del enlace de la pasarela de satélite OneWeb de una estación terrena de la pasarela a otra también se produce a medida que los satélites se muevan en sus órbitas. La segunda antena de pasarela de cada satélite se utiliza para permitir este traspaso, de modo que el enlace de pasarela alterne entre el primer haz de pasarela y el segundo haz de pasarela.

3.4.2.3 Formato de la señal

Cada canal directo admite una sola portadora de banda ancha. Los canales de retorno más estrechos emplean varias portadoras de anchura de banda media, que soportan una velocidad de datos de información variable, dependiendo de la modulación instantánea y el esquema de codificación empleado. Se utiliza ACM (*Adaptive Coding and Modulation*) para garantizar el rendimiento óptimo de los datos en función del margen de enlace disponible en ese momento, que varía en función del desvanecimiento debido a la lluvia, así como de la geometría variable en el tiempo del enlace debido al movimiento del satélite. ACM se adapta para cada ráfaga de transmisión hacia o desde un terminal de usuario en función de la calidad de enlace específica disponible.

Cada haz de usuario admite servicios a varios terminales de usuario. En el sentido de ida, puerta de enlace al terminal, está en funcionamiento un esquema de transmisión TDM (*Time Division Multiplexing*) en el que el haz de usuario soporta una única portadora de banda ancha de 250 MHz. Cada terminal de usuario en el haz recibe y demodula esta portadora y extrae solo los datos que están destinados a ella, que están determinados por las cabeceras de datos.

En el sentido de retorno, terminal a puerta de enlace, existe un esquema de transmisión TDMA/FDMA de portadora única (SCTDMA (*Single Carrier TDMA*)/FDMA) en el que cada terminal de usuario transmite ráfagas de tiempo de datos en una portadora de banda relativamente estrecha, normalmente de 1,25 MHz a 20 MHz de ancho, para reducir al mínimo los requisitos de potencia de transmisión de radiofrecuencia de cresta del terminal de usuario. Varios terminales de usuario pueden acceder al mismo operador de enlace ascendente en función de las franjas horarias asignadas desde el centro de control de la red. También pueden acceder a diferentes portadoras de enlace ascendente que ocupan la disposición de canales FDMA en el satélite. A continuación, la estación de enlace recibe los múltiples portadores de retorno. La información de control entre los terminales de usuario y el centro de control de la red se transporta a través de los mismos canales de radiofrecuencia utilizados para la información de comunicaciones [137].

3.4.2.4 Terminal de usuario

Los terminales de usuario de banda Ku de OneWeb consisten en antenas pequeñas, normalmente en el rango de 30 cm. a 75 cm., y económicas que incluyen terminales terrestres fijos y transportables, así como terminales móviles a bordo de aeronaves, buques marítimos y vehículos terrestres.

Los terminales de usuario emplean antenas reflectoras parabólicas orientables mecánicamente y antenas ESA. Los terminales pueden proporcionar un servicio continuo, lo que permitirá el tránsito entre satélites activos. En el caso de las antenas dirigidas mecánicamente, esto se logra mediante el uso de dos aberturas orientables independientemente o, para ciertas aplicaciones, con una sola apertura de antena que pueda cambiar rápidamente la dirección de apuntamiento entre los satélites activos, utilizando el almacenamiento en búfer de datos para garantizar que no se pierda la información transmitida. Para la implementación de antenas ESA, el haz orientable electrónicamente cambiará instantáneamente entre satélites activos utilizando una sola apertura de antena fija.

El terminal de usuario OW1, desarrollado en asociación con Intellian Technologies y Collins Aerospace, con antena compacta dirigida electrónicamente desempeña un papel clave en la realización de la visión de OneWeb de brindar servicios de comunicaciones asequibles, de alto rendimiento y de fácil instalación a los países menos conectados del mundo, regiones y sectores industriales [139].

La antena de panel plano se integra con un módem satelital OneWeb en una unidad exterior ambientalmente sellada, se puede instalar usando un soporte en J estabilizado opcional y se conecta mediante un único cable combinado de alimentación y datos a una unidad interior que a su vez proporcionará conectividad a los dispositivos del usuario final.

El terminal de usuario OneWeb también puede funcionar como una pequeña celda con *backhaul* integrado para extender las redes de los operadores móviles actuando como una estación base de bajo costo a la que los usuarios móviles pueden conectarse. OneWeb se ha asociado con operadores móviles para que todos sus clientes tengan los beneficios de alta velocidad, hasta 50 Mbps y baja latencia, menos de 50 ms, de la infraestructura de OneWeb en áreas como donde sus servicios móviles no están desplegados o la calidad del servicio es muy baja. A través de acuerdos de *roaming*, los clientes de otros operadores también pueden acceder a la infraestructura de OneWeb.



Figura 3-11 Terminal de usuario OW1 [140]

3.4.2.5 Estaciones terrenas

Hay 2 categorías de estaciones terrenas en el sistema OneWeb: las estaciones TT&C y las puertas de enlace. En los TT&C, que se ubican solo en latitudes altas, existen múltiples antenas de seguimiento activas cada uno de los cuales suele tener un diámetro de reflector de 2,4 m. o más. Las puertas de enlace también emplearán múltiples antenas de seguimiento activas, cada una de las cuales suele tener un diámetro de reflector de 2,4 m. Algunas estaciones de TT&C también pueden actuar como puertas de enlace.

Las puertas de enlace proporcionan la comunicación necesaria desde los satélites OneWeb a Internet. OneWeb pretende instalar suficientes puertas de enlace en todo el mundo para garantizar que los satélites tengan una estación terrena como puerta de enlace visible con la que puedan comunicarse desde todas las posiciones de sus órbitas.

Las TT&C proporciona comunicaciones durante las operaciones previas al lanzamiento, en órbita de transferencia y en la estación, así como durante emergencias de naves espaciales. El sistema de TT&C opera en los bordes de las atribuciones de frecuencias de banda Ka en los rangos de frecuencias de enlace ascendente y descendente de comunicaciones durante todas las fases de la misión.

El sistema de control de TT&C y de carga útil controla y supervisa todos los aspectos de la nave espacial necesarios para la configuración del equipo a bordo, las operaciones seguras y la supervisión de la salud. La información de control de la carga útil sensible al tiempo se transmite hacia y desde los satélites OneWeb utilizando las estaciones terrenas de puerta de enlace.

Las estaciones terrenas de TT&C están situadas únicamente en las latitudes septentrionales altas, donde es posible la máxima visibilidad simultánea de un gran número de satélites. Estas estaciones terrenas TT&C de alta latitud también pueden comunicarse con los satélites OneWeb a través de las antenas TT&C casi omnidireccionales de baja ganancia en los satélites OneWeb.

3.4.3 Despliegue actual

El 20 de mayo de 2023 OneWeb confirmó hoy el despliegue exitoso de 16 satélites que suman 634 con los que ya estaban en órbita. Así, OneWeb está en disposición de proporcionar cobertura global este año 2023 y ya está en el proceso de ampliar los servicios para clientes de todo el mundo. Con la incorporación de los satélites desplegados a partir de este lanzamiento, OneWeb aumenta la resiliencia y la redundancia en la constelación a medida que amplía los servicios a su base de clientes empresariales y gubernamentales [136].

Esta expansión se activó por primera vez a finales de mayo, agregando servicio a 37 nuevos países en Europa a la presencia de OneWeb, incluidos Austria, Italia, Francia y Portugal, así como toda la costa occidental de EE. UU., desde Washington hasta California, la costa noreste desde Maine hasta Virginia y por todo el Medio Oeste. Esta expansión también mejora aún más la conectividad en Canadá y otras regiones marítimas.

La disponibilidad ampliada de la red marca un paso significativo a medida que OneWeb avanza hacia los servicios globales.

La red de OneWeb ya ofrece conectividad a 50°, trabajando con socios de distribución para brindar soluciones comunitarias de banda ancha, *backhaul* celular, servicios empresariales corporativos y más en todo el Ártico para conectar ubicaciones en Alaska, Canadá, el Reino Unido y otros lugares. Con esta última expansión lanzada, los socios de OneWeb ahora están expandiendo las regiones en las que ofrecen servicios, además de permitir que nuevos socios de OneWeb enciendan e integren la red LEO de OneWeb en sus soluciones. [141].

3.5 IRIS²: Sistema de Respuesta e Intercambio de Información

3.5.1 Historia

IRIS² (Infraestructura para la resiliencia, la interconectividad y la seguridad por satélite) es una constelación de Internet por satélite multiórbita planificada que la Unión Europea implementará en 2027.

Su objetivo es proporcionar servicio a agencias gubernamentales, así como servicio comercial a entidades privadas. Su concepción es una respuesta directa a un número cada vez mayor de grandes constelaciones de Internet por satélite fuera del control de la UE, como Starlink o el próximo proyecto Kuiper, señalados anteriormente. Se prevé que el presupuesto total del proyecto ascenderá a 2.400 millones de euros, que se financiarán con cargo al marco financiero plurianual 2021-2027.

Además de su uso para comunicaciones, también hay planes para utilizar IRIS² para vigilancia espacial y para detectar globos espías a gran altitud.

IRIS² es parte de una estrategia espacial general de la Comisión Europea que incluirá la próxima Estrategia Espacial de la UE para la Seguridad y la Defensa y es la tercera constelación europea después de Galileo, posicionamiento GPS, y Copernicus, observación terrestre. El propósito es crear y aprovechar las sinergias entre estas tres constelaciones [142].

Así, IRIS² será una constelación soberana, que impone estrictos criterios de elegibilidad y requisitos de seguridad y será una constelación centrada en servicios gubernamentales, incluidas aplicaciones de defensa.

Su objetivo es proporcionar servicios de comunicación seguros a la UE y sus Estados miembros, así como conectividad de banda ancha para ciudadanos europeos, empresas privadas y autoridades gubernamentales. Este nuevo componente del Programa Espacial de la UE pondrá fin a las zonas muertas en las comunicaciones y aumentando la cohesión en los territorios de los Estados miembros, así como en toda África, utilizando las órbitas Norte-Sur de la constelación a través de un sistema espacial y terrestre resiliente y ultra seguro. Incluirá el desarrollo y lanzamiento de hasta 170 satélites LEO entre 2025 y 2027.

Será una constelación del *NewSpace* [143], integrando el conocimiento de las principales industrias espaciales europeas, pero también el dinamismo de las empresas emergentes, que construirán el 30% de la infraestructura.

Hispasat, junto con los gigantes Airbus, Thales-Alenia y las empresas de satélites SES y Eutelsat, serán los socios principales de un consorcio que se acaba de crear para presentarse a la licitación de la constelación IRIS² [144] [145].

3.5.2 Características

Esta megaconstelación combinará los beneficios que ofrecen los satélites LEO, MEO GEO. La infraestructura espacial IRIS² comprenderá una constelación multiórbita de satélites en LEO, complementado en su caso por satélites en MEO y/o GEO.

La fusión de las capacidades de los satélites MEO y LEO permite soluciones que varían en cobertura, rendimiento y latencia [146].

El sistema deberá tener las siguientes características [147]:

- Los centros de control, misión y servicio estarán ubicados y operados en la UE territorio continental. Las estaciones terrenas de TT&C y las puertas de enlace estarán ubicadas y operadas en territorio continental de la UE, sólo si es necesario, en las regiones ultraperiféricas y en los países y territorios de ultramar de los EE. UU.

- El sistema IRIS² será abierto y no se basará en soluciones patentadas. Deberá fomentar la interoperabilidad a nivel de usuario y, en la mejor medida posible, a nivel de infraestructura y, por lo tanto, apoyar los compromisos y la participación de la UE en la cooperación internacional. Además, debe admitir la implementación de estándares 5G NTN definidos en el dominio 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) en la mayor medida posible y mediante un enfoque de implementación gradual. Finalmente se desarrollarán terminales de usuario piloto con diferentes características.
- El diseño de la misión preverá estrategias para hacer frente a:
 - Colisiones dentro de la constelación.
 - Colisiones en órbita.
 - Colisiones entre constelaciones
 - Reingreso controlado y seguro.
 - Minimización del brillo visual que afecta a la observación astronómica.
 - Eliminación que garantice la sostenibilidad del entorno orbital
- El sistema IRIS² se registrará en los servicios EUSST (*EU Space Surveillance and Tracking*).

El sistema admitirá una gran variedad de aplicaciones gubernamentales, principalmente en los ámbitos de vigilancia (fronteras), gestión de crisis (ayuda humanitaria) y conexión y protección de infraestructuras clave (comunicaciones seguras para los organismos de la UE).

El sistema también permitirá aplicaciones de acceso masivo que incluyen acceso satelital de banda ancha fija y móvil, enlace satelital para servicios B2B, acceso satelital para transporte, redes reforzadas por satélite y banda ancha satelital y servicios basados en la nube.

Basándose en tecnologías disruptivas, incluida la cuántica, el sistema de conectividad segura de la UE garantizará la disponibilidad a largo plazo de servicios de comunicaciones por satélite fiables, seguros y rentables a escala mundial. Permitirá un mayor desarrollo de la banda ancha de alta velocidad y una conectividad fluida en toda la Unión, eliminando las zonas muertas en las comunicaciones y aumentando la cohesión en los territorios de los Estados miembros, y permitirá la conectividad en zonas geográficas de interés estratégico fuera de la Unión.

Además, la megaconstelación implementará medidas de resiliencia frente a las ciber amenazas. IRIS² integrará el segmento espacial y terrestre relacionado de la infraestructura europea de comunicación cuántica para permitir la transmisión segura de claves criptográficas.

IRIS² aprovechará las sinergias entre la observación de la Tierra, SATNAV (*Satellite Navigation*) y SATCOM (*Satellite Communications*) que puedan ser útiles, entre otras cosas, para abordar emergencias marítimas y apoyar la gestión de desastres naturales.

La Comisión Europea emitió una solicitud de propuestas preliminar el 23 de marzo de 2023 y fijó como fecha para las respuestas el 26 de abril del mismo año. Esa fecha se retrasó al 31 de julio de 2023 dado el número de consultas planteadas a los responsables del proyecto [148].

Sin embargo, los elementos clave con respecto a las demandas principales de la constelación incluyen una criptografía central de última generación y la capacidad de sacar de órbita de manera segura y eficiente a los satélites, ya sea al final de su vida útil o en caso de que haya problemas con un satélite específico [149].

Otros requisitos esenciales incluyen pruebas de antecedentes financieros sólidos para los licitadores, al menos 500 millones de euros en facturación anual durante los 3 años anteriores, así como estar domiciliados en la UE.

Existe poca información sobre el *payload* de los satélites, pero en el concurso deben especificar la disponibilidad, latencia, velocidad de datos, tipos de terminales de usuario, características de robustez y seguridad, perfiles de calidad de servicio, etc.

El coste total se ha declarado en 6.000 millones de euros repartidos en 12 años de operaciones. Parte de la financiación, 640 millones de euros, provendrá de los 22 gobiernos miembros de la ESA y estos fondos se distribuirán a lo largo de un período de tres años. La UE dice que ha destinado 380 millones de euros para trabajos de desarrollo y casi 1.000 millones de euros para despliegue y explotación [150].

3.5.3 Previsiones futuras

La implementación de IRIS² seguirá un enfoque incremental con la ambición de proporcionar servicios iniciales en 2024 para alcanzar la capacidad operativa total en 2027 incluyendo África y la región ártica [147].

La Comisión, de momento, ha rechazado cuatro consorcios más pequeños para la constelación IRIS² y ha seleccionado un consorcio formado por Airbus Defence & Space, Eutelsat, Hispasat, SES y Thales Alenia Space, respaldado también por Deutsche Telekom, OHB SE, Orange, Hisdesat, Telespazio y Thales Group [151].

Este importante grupo ahora afinará sus propuestas con la Comisión y, al final del proceso, creará una empresa operativa para dar vida al concepto IRIS².

Entre los solicitantes fallidos se encontraban Exotrail de Francia, Integrasys de España, CEA de Francia y Rivada Space Networks, con sede en Alemania. La Comisión rechazó a estos cuatro debido a preocupaciones sobre su capacidad financiera. Sin embargo, es posible que algunos de los cuatro terminen en el consorcio ganador más grande.

Existe una discriminación positiva a favor de que las empresas más pequeñas formen parte del consorcio final y la Comisión ha fijado un umbral mínimo de participación del 30 % a favor de los actores más pequeños con sede en Europa.

Se trata en gran medida de un proyecto de vía rápida. La Comisión fijó el siguiente calendario [150]:

- Comunicación de los interesados en la licitación antes del 26 de abril 2023.
- Evaluación por parte de la Comisión del 27 de abril al 17 de mayo 2023.
- Las invitaciones a candidatos seleccionados el 25 de mayo de 2023.
- El límite para respuestas a propuestas el 31 de julio de 2023.
- La evaluación adicional del 1 de agosto al 13 de octubre de 2023.
- Mejor oferta de proveedores candidatos del 30 de octubre y 13 de diciembre de 2023.
- La evaluación adicional del 14 de diciembre al 25 de enero de 2024.
- El fallo de adjudicación el 26 de enero de 2024.
- La firma de contratos el 9 de febrero de 2024.

La fecha límite de la Comisión fue el 31 de julio 2023 para las propuestas iniciales y el período del 1 de agosto al 13 de octubre para el diálogo competitivo entre el consorcio, y la mejor oferta final se acordará antes del 14 de diciembre. Pero debido a lo ajustado del calendario y la dificultad de cumplir con el mínimo de participación del 30% de pequeñas empresas europeas, la elección de la mejor oferta se ha retrasado hasta febrero de 2024 [152].

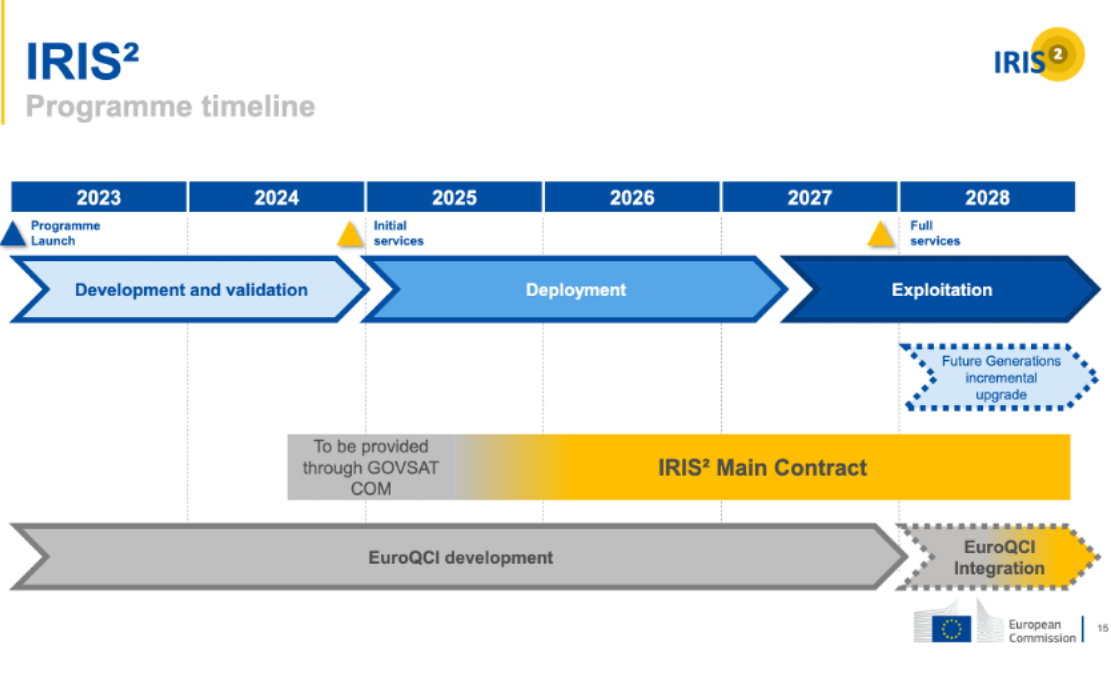


Figura 3-12 Línea de tiempo del programa IRIS² [147]

4 ASPECTOS DE DEFENSA EN LAS MEGACONSTELACIONES

4.1 Introducción

El despegue de las megaconstelaciones LEO está impactando en la industria espacial tanto en el ámbito comercial como en el de defensa. Aproximadamente un tercio de los satélites activos en órbita son satélites Starlink. En la próxima década, hasta 50.000 satélites podrían orbitar la Tierra. La mayoría serán operados comercialmente, pero al menos unos cientos pertenecerán a los ejércitos de diferentes países y organizaciones gubernamentales [153].

El concepto de megaconstelación LEO no siempre fue bienvenido en la comunidad de defensa. Durante años se ha debatido ese concepto de utilizar cientos de pequeños satélites repartidos por la órbita LEO para realizar comunicaciones, alertar de misiles y otras misiones militares. Pero a menudo se descartó como una quimera debido a las inmensas proyecciones de costos de lanzamiento y las limitaciones de tamaño, peso y energía necesarias para operar y mantener las capacidades en la órbita terrestre baja.

Pero gracias a un cambio tecnológico fundamental en los últimos años, liderado por compañías espaciales comerciales, está impulsando la proliferación de las megaconstelaciones LEO. Esto incluye los principios informáticos de la Ley de Moore, la mercantilización de piezas de satélites y avances en tecnologías clave como enlaces cruzados ópticos, procesadores integrados e Inteligencia Artificial. Actualmente, las empresas están construyendo instalaciones de producción en masa con líneas de montaje que pueden completar cientos de satélites por mes.

Pero no se trata sólo de los satélites o de los sensores a bordo de ellos. Como los costos de lanzamiento han bajado, la opción de enviar cientos de naves espaciales a la órbita es más aceptable para los gobiernos. Utilizar viajes compartidos permite construir satélites según sea necesario y reponerlos en órbita para mantener la red resistente a posibles ataques.

Por otra parte, una megaconstelación LEO se vuelve más resistente simplemente aumentando el número de objetivos potenciales. Para cualquiera que quiera derribar un satélite, el proyectil ahora cuesta más que el satélite. La nueva arquitectura también acelera la rapidez con la que los combatientes reciben datos en tierra.

Todos estos factores combinados han hecho que ahora sea una realidad tecnológica que se pueden construir y operar satélites LEO de manera asequible y rápida.

Además, la tecnología ISL es fundamental para esta nueva arquitectura. Los enlaces láser no sólo proporcionan las capacidades de rendimiento para hacer posible la red en malla, sino que la forma en que enrutan las señales a través de los satélites, evitando estaciones terrestres en territorios en disputa si es necesario, reduce el riesgo de interferencia y detección.

Eso hace que la tecnología de ISL sea una absoluta necesidad para las aplicaciones LEO relacionadas con la defensa.

4.2 Comunicaciones

Los ejércitos utilizan una variedad de satélites SATCOM diferentes para satisfacer sus necesidades de comunicación, incluidos contratos comerciales SATCOM para ancho de banda en satélites de comunicaciones comerciales. Los satélites militares de comunicaciones son generalmente costosos de producir, ya que están diseñados para proporcionar un servicio continuo, a pesar de interferencias u otros intentos de interrupción. Estos satélites generalmente se utilizan para las comunicaciones más críticas y sensibles.

Así como la latencia de las comunicaciones y el ancho de banda han sido la fuerza impulsora de las actuales megaconstelaciones de banda ancha como SpaceX, Kuiper y OneWeb, estas capacidades de comunicación tendrán un impacto directo en la Seguridad Nacional.

Por ejemplo, el ejército de los EE. UU. utiliza actualmente una combinación de satélites de comunicaciones gubernamentales y comerciales en órbita GEO para satisfacer sus necesidades de ancho de banda. Según el general de división Peter Gallagher, director del equipo de red del Comando Futuros del Ejército, los sistemas GEO actuales tienen insuficiente ancho de banda, alta latencia y es poco probable que satisfagan las necesidades del Ejército en el futuro. Además, añadió que el ejército estaba interesado en una alternativa LEO que pueda proporcionar “significativamente más rendimiento, más ancho de banda, más capacidad de su canal de transporte con menor latencia, por lo que los datos fluirán mucho más rápido de un extremo a otro” [154].

El aumento en el intercambio de datos y comunicaciones entre operadores avanzados, analistas, equipos de comando y servicios de soporte mediante el uso de megaconstelaciones LEO tiene el potencial de mejorar en gran medida la eficiencia de las operaciones. Además, estas constelaciones tienen la capacidad de aumentar las velocidades de transmisión para áreas actualmente desatendidas por las comunicaciones por satélite, como el Ártico y el océano Pacífico. Por supuesto, a través de las megaconstelaciones comerciales y de otras naciones, los adversarios de la OTAN también tienen un mayor potencial de comunicación para respaldar las operaciones globales. Por ejemplo, China podrá apoyar más directamente sus operaciones en África o sus operaciones navales en el Pacífico.

4.3 Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento

Las megaconstelaciones ofrecen una alta tasa de revisita para aplicaciones ISR. En particular, la detección de cambios o el monitoreo casi continuo hacen posibles servicios militares.

Las grandes constelaciones de satélites pequeños tienen una resolución terrestre limitada. El diseño pequeño y compacto de los satélites limita la óptica o los sensores de radar SAR (*Synthetic-aperture Radar*), ya sea en tamaño o en potencia de transmisión.

Sin embargo, una gran cantidad de activos basados en el espacio son más difíciles de contrarrestar, ya sea mediante deslumbramiento o interferencia, en comparación con una menor cantidad de sistemas de mayor capacidad, lo que aumenta la resiliencia de toda la arquitectura. Las aplicaciones que ofrecen detección de cambios o servicios de monitorización continuo se han vuelto más interesantes para el mercado comercial porque estos datos pueden combinarse con datos de navegación que proporcionan al usuario imágenes siempre reales del entorno.

Por otro lado, servicios como este aumentan el riesgo para las operaciones de la OTAN cuando oponentes potenciales pueden acceder a los datos. Hay que garantizar que los datos proporcionados por empresas comerciales registradas en países miembros de la OTAN o en países que mantienen una estrecha cooperación con la OTAN no ofrezcan datos militares relevantes y utilizables a oponentes potenciales, especialmente cuando estos datos cubren áreas de operaciones de la OTAN.

También el programa de sensores de satélites pequeños de DARPA está centrado en cómo una densa constelación de microsátélites LEO puede proporcionar nuevas capacidades ISR, que sean persistentes, con capacidad de supervivencia y estén disponibles bajo demanda para aplicaciones de guerra táctica [155].

La empresa Planet ya opera una megaconstelación que consta de más de 120 satélites pequeños. Esta constelación ofrece datos de monitoreo casi continuos en resolución media. La alta tasa de revisitas permite la detección de cambios y la empresa la anuncia para mitigar el riesgo con un monitoreo persistente. La empresa también opera una constelación de nanosatélites de alta resolución que interactúan con la megaconstelación.

La empresa Hawkeye360 es el primer proveedor comercial que ofrece el servicio SIGINT. La constelación se encuentra actualmente en fase de despliegue y estará compuesta por 18 satélites. Además del objetivo principal de detectar interferencias y apoyar la optimización de la frecuencia, los datos también se pueden utilizar para localizar emisores. Fuera de los países miembros de la OTAN actualmente no hay ningún proyecto en la etapa final de desarrollo, pero se espera que esté pronto cuando las constelaciones comerciales tengan éxito [156].

4.4 Monitorización meteorológica

La información meteorológica puede ser crítica para las operaciones militares. A través de una red de satélites GEO y de órbita polar, el ejército puede crear una imagen del clima en cualquier punto de la Tierra y monitorear los cambios ambientales para proporcionar información valiosa para la planificación de operaciones militares. El clima puede afectar muchas partes de las operaciones militares; desde el clima específico del área objetivo, guía de armas, aviación y viajes navales seguros, hasta reabastecimiento de combustible en el aire.

Las capacidades de detección meteorológica por satélite también permiten vigilar el uso y los efectos de las armas nucleares, biológicas y químicas en todo el mundo. También se puede utilizar para pronosticar mareas, condiciones del hielo marino y más para operaciones seguras de embarcaciones de superficie y submarinos. El sistema meteorológico militar también recopila datos sobre la actividad solar y el clima espacial para operaciones espaciales y satelitales seguras. Las megaconstelaciones tienen el potencial de aumentar la calidad y precisión de los datos meteorológicos gracias al aumento de la cantidad de sensores [157].

4.5 PNT

La obtención de información PNT (*Position, Navigation & Timing*) es, probablemente, la capacidad satelital militar más conocida. GPS Navstar, que inicialmente se desarrolló para fines de navegación militar, ahora se ha convertido en un sistema disponible públicamente conectado a teléfonos móviles, ordenadores, automóviles o aviones, y más utilizado por millones de personas cada día. Además del mencionado GPS, posteriormente se han desarrollado otros sistemas PNT como Glonass, Beidu o Galileo.

El sistema GPS estadounidense es una constelación de alrededor de 29 satélites que orbitan la Tierra en seis planos orbitales en MEO. Con esta configuración, un usuario debería poder recibir señales de cuatro satélites GPS en cualquier momento dado.

El GPS funciona cuando cada satélite transmite su ubicación, estado y hora precisa y un dispositivo GPS recibe estas señales de cuatro satélites y utiliza la geometría para determinar su dimensión tridimensional ubicación en la tierra. La información de ubicación GPS es utilizada por aviones, buques de guerra y tropas en tierra para una navegación y posicionamiento. También se utiliza para guiar municiones de precisión hacia sus objetivos y es más preciso que otras formas de guía de precisión ya que la señal GPS no se ve obstruida por las nubes.

El sistema GPS también proporciona información precisa sobre la hora. Los ejércitos utilizan UTC para operaciones en todo el mundo y la sincronización precisa es importante para muchas aplicaciones militares. Uno de esos usos son los cambios de frecuencia coordinados para los sistemas de comunicación militares. Estos sistemas cambian de frecuencia en momentos precisos para evitar que los adversarios intercepten las comunicaciones. Usando la información de sincronización de precisión de GPS, estos sistemas pueden funcionar sin problemas sin la participación del usuario [158].

El sistema GPS tiene una función adicional: la detección de detonaciones nucleares en apoyo del seguimiento Tratado de prohibición parcial de ensayos nucleares. Esta parte del sistema utiliza sensores ópticos, de rayos X, dosímetros y de pulso electromagnético para detectar, señalar y cuantificar el rendimiento de una detonación nuclear [159].

La promesa de utilizar satélites LEO con fines PNT ha sido objeto de extensos estudios. Estos estudios se pueden clasificar en tres grupos. El primero considera proporcionar una solución de navegación independiente mediante el lanzamiento de constelaciones LEO dedicadas a PNT o la transmisión de señales PNT a través de constelaciones LEO existentes [160]. El segundo considera la ampliación de los sistemas GNSS con constelaciones LEO [161]. El tercero explota las señales LEO de cualquier constelación de manera oportunista [162].

Los satélites LEO poseen 3 atributos deseables para ser utilizados como PNT:

- Están alrededor de veinte veces más cerca de la Tierra en comparación con los satélites GNSS tradicionales, que residen en la órbita MEO, lo que podría producir una relación portadora/ruido significativamente mayor.
- Están adquiriendo una gran importancia, ya que se espera que se instalen decenas de miles de satélites de Internet de banda ancha en LEO.
- Transmiten en diferentes bandas de frecuencias y están situadas en órbitas variables, lo que hace que las señales de los satélites LEO sean diversas en frecuencia y dirección.

Sin embargo, la explotación de las señales de los satélites LEO con fines PNT de manera oportunista conlleva desafíos, ya que estas constelaciones son propiedad de operadores privados que normalmente no divulgan información crucial sobre las efemérides de los satélites, la sincronización y estabilidad del reloj y las especificaciones de la señal [163].

4.6 Alerta temprana de misiles balísticos

Desde finales de la década de los 50 hasta la década de los 60, el sistema MIDAS (*Missile Defense Alarm System*) operaba para detectar gases de escape de ICBM (*Intercontinental Ballistic Missile*) y proporcionar una alerta temprana de su lanzamiento. Hoy en día, los satélites de vigilancia SBIRS en GEO y HEO, así como los satélites del Programa de Apoyo a la Defensa, realizan alertas tempranas para lanzamientos de misiles. SBIRS y la defensa antimisiles se consideran uno de los programas espaciales de mayor prioridad de EE.UU. La información relativa al lanzamiento de un misil recopilada por los sensores se procesa rápidamente con otros datos disponibles y proporciona a los comandantes combatientes detalles como la identificación del tipo, la ubicación del lanzamiento, los datos en vuelo y el punto de impacto previsto, que luego pueden ser utilizados por los activos militares de defensa antimisiles. para responder a un ataque.

Las megaconstelaciones LEO con capacidades de imágenes, radar y/o ELINT (*Electronic Intelligence*) serán beneficiosas para la alerta y la defensa contra misiles. Como las megaconstelaciones son capaces de proporcionar una cobertura casi continua de toda la Tierra, estas capacidades pueden utilizarse para proporcionar una cobertura continua de áreas conocidas de operación de misiles.

Además, la SDA ya está planeando utilizar la megaconstelación LEO NDSA para este propósito [164]. De esta forma, la capa de seguimiento se está diseñando para proporcionar advertencia, seguimiento y orientación global de amenazas de misiles para la defensa antimisiles e incluir sistemas avanzados de misiles hipersónicos [165]. La misma latencia reducida, cobertura global y redundancia que benefician la capacidad de comunicaciones de las megaconstelaciones LEO mejorarán la alerta y la defensa contra misiles.

4.7 Arquitectura Espacial de Defensa Nacional

El Departamento de Defensa de EE. UU. también está planeando su propia megaconstelación LEO. La SDA, establecida en marzo de 2019, está desarrollando la NDSA. La visión de la NDSA es “una capacidad militar resistente de detección y transporte de datos a través de una arquitectura espacial principalmente en la órbita LEO” [18].

Este sistema está diseñado para disponer de un crecimiento simplificado, facilidad de integración y prueba, y modernización continua. Si bien la NDSA aún se encuentra en las etapas de investigación y desarrollo, su capa de transporte de banda ancha se concibe actualmente como una constelación de 300 a 500 satélites en órbita LEO. Según los diseños iniciales, el 95% de la Tierra tendría dos satélites NDSA a la vista en todo momento, y el 99% tendría al menos uno a la vista.

La SDA también está desarrollando una capa de gestión de batalla, una capa de seguimiento de armas hiperespaciales, una capa de custodia para objetivos y una capa de navegación para PNT en áreas con GPS denegado [153].

SDA está trabajando con los principales contratistas militares, operadores de satélites comerciales y compañías de tecnología para demostrar finalmente la viabilidad de una PLEO.

La SDA se creó en 2019 para poner en órbita un nuevo conjunto de capacidades mínimas viables cada dos años, emulando el enfoque de actualización de la industria TIC. Su enfoque singular para los próximos años es diseñar, construir y lanzar NDSA.

Este nuevo ecosistema de cientos de satélites que operan en LEO diferirá significativamente de la forma en que el Departamento de Defensa de EE. UU. ha desplegado tradicionalmente una pequeña cantidad de sistemas enormes y con grandes capacidades, durante ciclos de producción de una década de duración para operar en gran medida en órbita GEO, así como otras órbitas.

Los nuevos satélites albergarán sensores que comprenden 8 capas de capacidad, para realizar comunicaciones de datos sin problemas, rastrear misiles hipersónicos y de crucero, y proporcionar una mejor gestión de batalla, navegación, apoyo terrestre y disuasión desde el espacio. Lockheed Martin y York Space Systems ha construido cada uno 10 satélites para la capa inicial de transporte de comunicaciones de datos, mientras que L3Harris Technologies y SpaceX han desarrollado cuatro satélites cada uno para una capa avanzada de seguimiento de misiles. El coste medio de estos satélites es de unos 14,1 millones de dólares.

En septiembre de 2023 SDA anunció el éxito del segundo lanzamiento satélites de la NDSA. El lanzamiento incluyó satélites de capa de transporte y seguimiento que utilizarán enlaces de datos tácticos de baja latencia para ofrecer capacidades espaciales al combate, incluido el seguimiento de amenazas de misiles avanzadas, a través de una constelación resistente en órbita LEO [166].

Los satélites se lanzaron a bordo de un cohete reutilizable SpaceX Falcon 9 desde la Base de la Fuerza Espacial Vandenberg, California. El manifiesto final incluía 10 satélites de transporte de Lockheed Martin Space, un satélite de transporte de York Space Systems y dos satélites de seguimiento de SpaceX.

Los satélites se desplegaron en una órbita donde SDA comenzará los procedimientos de prueba y verificación, que eventualmente incluirán la elevación de la órbita para alcanzar la órbita prevista a aproximadamente 1.000 km.

Está previsto que un tercer y último grupo de cuatro satélites de seguimiento se lance a finales de 2023. Con la constelación completa en órbita, la constelación incluirá 19 satélites de transporte de datos conectados ópticamente y 8 satélites de alerta y seguimiento de misiles equipados con sensores de amplio campo de visión [166].

La viabilidad de esta nueva arquitectura espacial militar dependerá en gran medida del trabajo de reducción de riesgos realizado por DARPA en su proyecto Blackjack, que ha estado en desarrollo desde 2018. La agencia de investigación y desarrollo pretende ilustrar si SDA puede aprovechar las constelaciones LEO comerciales emergentes que surgen de compañías como SpaceX, Kuiper y OneWeb para uso militar [155].

Las lecciones aprendidas a través de esos lanzamientos y pruebas se aplicarán luego a NDSA. El programa Blackjack se trata más de demostrar la viabilidad de la arquitectura que de poner en órbita el *hardware* real.

El equipo industrial de Blackjack es una mezcla de contratistas principales militares tradicionales, operadores de satélites comerciales, muchos de los cuales están involucrados en el desarrollo de su propia megaconstelación, y empresas de tecnología. Telesat, Airbus y Blue Canyon Technologies desarrollan satélites pequeños, mientras que SA Photonics, Mynaric y Raytheon proporcionan cargas útiles. Lockheed Martin será el encargado de integrar los sistemas [167].

Mynaric y otros proveedores de ISL trabajan con la SDA para desarrollar un estándar de interoperabilidad que garantice que los ISL en los satélites en la eventual NDSA puedan comunicarse con aquellos en futuras constelaciones comerciales, como Kuiper o Starlink. Ese estándar fue aprobado en forma de borrador a principios de 2020, y en abril, el Laboratorio de Investigación Naval y Mynaric conectaron con éxito sus módems compatibles con el estándar a través de fibra óptica por primera vez en un banco de pruebas alojado en SDA.

La capacidad de transferir datos sin problemas desde los satélites Starlink o Kuiper a los sistemas de transporte de datos del Departamento de Defensa es el núcleo del caso de uso LEO del ejército estadounidense. Es lo que permite una red híbrida donde los satélites comerciales proporcionan redes de alta velocidad extremadamente capaces a las que el ejército puede conectarse según sea necesario.

5 AMENAZAS Y DESAFÍOS EN LAS MEGACONSTELACIONES LEO

5.1 Introducción

Si bien EE. UU. parece ser actualmente el país del mundo que más depende del espacio, el uso de capacidades habilitadas por el espacio está aumentando en todo el mundo y está llevando a que el espacio sea un elemento esencial de la seguridad nacional de la mayoría de las naciones. Como se mencionó anteriormente, los avances tecnológicos están haciendo que el acceso al espacio sea más asequible y, por lo tanto, más accesible para los usuarios de todo el mundo [168]. Desde 2013, el número de satélites en funcionamiento ha aumentado casi un 50%. Los gobiernos, en particular, tienen la capacidad de desplegar satélites que apoyen sus propias actividades militares y de seguridad nacional. Actualmente, más de 50 países tienen satélites activos orbitando el planeta. De esos países, nueve tienen capacidad de lanzamiento independiente: China, India, Irán, Israel, Japón, Rusia, Corea del Norte, Corea del Sur y EE. UU. La Agencia Espacial Europea también proporciona capacidad de lanzamiento colectiva a sus miembros y socios: Austria, Bélgica, Canadá, República Checa, Dinamarca, Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Países Bajos, Noruega, Polonia, Portugal, Rumania, Eslovenia, España, Suecia, Suiza y Reino Unido [169].

5.2 Amenazas cibernéticas y medidas de seguridad

La ciberseguridad de los satélites ha sido durante mucho tiempo una prioridad para los activos espaciales de seguridad nacional. Garantizar que no se pudiera penetrar una red satelital fue una parte clave del diseño y dependía de múltiples capas de seguridad. Con el crecimiento de las megaconstelaciones y el mayor uso de servicios espaciales contratados para la seguridad nacional, existe la preocupación de que las entidades privadas no se preocupen tanto por la seguridad cibernética. En decir, los gobiernos temen utilizar sistemas que podrían permitir vulnerabilidades cibernéticas cuando se trata de capacidades críticas de seguridad nacional.

El problema es que los satélites son vulnerables a los ciberataques. Tanto los satélites como sus sistemas terrestres están basados en sistemas informáticos y, por lo tanto, generalmente son vulnerables a los mismos tipos de ciberataques que otros sistemas de similares características. La única diferencia es el acceso al sistema. A diferencia de la mayoría de los ordenadores que están conectados a Internet, muchos sistemas de control terrestre por satélite estaban aislados de Internet.

Por lo tanto, la única forma de obtener el control era obteniendo acceso físicamente, ya sea en persona o mediante la introducción de un virus a través de algún otro medio nefasto. De manera similar, la única manera de penetrar la arquitectura de un satélite era enviar una señal desde una antena terrestre especial y engañar a la computadora a bordo haciéndole creer que el atacante es el verdadero sistema de control terrestre.

Las megaconstelaciones cambian este paradigma y proporcionan tanto un beneficio en términos de resiliencia como una preocupación por una mayor vulnerabilidad. Al tener una arquitectura distribuida, no se depende de ningún satélite o sistema de satélites, lo que desincentiva cualquier ataque. Por otro lado, el aumento del número de satélites, así como el número de fabricantes, aumenta la superficie de exposición y el riesgo de que las vulnerabilidades de ciberseguridad dejen los sistemas abiertos frente a ataques. Estos ataques pueden presentarse en forma de vulnerabilidades incorporadas en componentes utilizados en satélites, o vulnerabilidades de factor humano, como una configuración inadecuada del sistema o la introducción accidental de *malware*.

Las capacidades cibernéticas pueden tener consecuencias muy perjudiciales para los activos espaciales a costos relativamente bajos. Además, debido a la dificultad de atribuir las actividades cibernéticas, tanto los Estados como los actores no estatales pueden acceder a dichas capacidades cibernéticas y llevar a cabo operaciones más hostiles contra todo tipo de infraestructura espacial, ya sea en tierra o en el espacio ultraterrestre. Las operaciones hostiles en el espacio se llevan a cabo violando el sistema de control terrestre o interceptando señales de satélites y atacando sensores, actuadores u otros dispositivos electrónicos. En el primer caso, el uso de servicios terrestres basados en la nube, AWS o Azure Cloud Services, ha aumentado el riesgo cibernético. En el segundo caso, los sensores remotos son vulnerables a ataques porque los protocolos de comunicación utilizados basados en modelos TCP/IP son accesibles a través de Internet. Para un ataque de satélite a satélite, es esencial tener una proximidad cercana o una línea de visión con el objetivo [170].

Según una presentación en la conferencia RSA de 2019 realizada por Bill Malik, vicepresidente de sistemas de infraestructura de Trend Micro, ha habido varios ataques reales o interferencias exitosas con las operaciones satelitales mediante ataques cibernéticos. Cinco de ellos fueron ataques a sistemas estadounidenses en 2007 y 2008, además de una infección mediante troyano que afectó a la ISS. En 1999, los ciberatacantes tomaron el control total de un satélite militar británico y exigieron un rescate después de modificar su posición. La tecnología que está impulsando el crecimiento de la industria satelital también está abaratando la tecnología de interferencia y adquisición para los atacantes, ya sean patrocinados por el Estado o independientes. La dependencia de los sistemas satelitales está haciendo que los ataques cibernéticos a estos sistemas parezcan más lucrativos. Estos ataques pueden adoptar muchas formas; desde demandas de rescate hasta el control de un satélite de imágenes, interceptación de comunicaciones, corrupción o alteración de datos, o desactivar un satélite por completo [171].

Las megaconstelaciones de satélites son sistemas multidominio, multisectoriales y multiactivos [172]. Las megaconstelaciones son posibles gracias a la miniaturización de la tecnología y requieren un esfuerzo coordinado para afrontar los límites tecnológicos en las operaciones espaciales. A medida que aumenta su importancia, también lo hacen los actores que atacan los sistemas espaciales. El NASIC (*National Air and Space Intel Center*) identificó las ciberamenazas y los riesgos cibernéticos en cuatro categorías: el segmento espacial, el segmento de usuarios, el segmento de enlace y el segmento terrestre [173]. La cadena de suministro también proporciona un punto de acceso clave adicional para un posible ciberataque, porque los satélites requieren múltiples fabricantes y un integrador de sistemas para que todos los subsistemas funcionen como uno solo.

Categoría	Riesgos	Mitigación
Segmento espacial	Intrusión, pérdida de control remoto, denegación de servicio, <i>malware</i>	Cifrado, autenticación integrada de comandos de enlace ascendente, IDS robusto, <i>logging</i> de accesos
Segmento de usuario	<i>Spoofing</i> , denegación de servicio, <i>malware</i>	Cifrado, pruebas de resiliencia a ciberataques antes del lanzamiento
Segmento de enlace	Intrusión, <i>spoofing</i> , <i>replay</i>	Cifrado, comunicaciones RF
Segmento terreno	<i>Hacking</i> , <i>hijacking</i> , <i>malware</i>	Evitar uso de proveedores Cloud, formación de personal, <i>logging</i> de accesos

Tabla 5-1 Riesgos que afectan a las megaconstelaciones [174]

Para los satélites militares que utilizan métodos de cifrado avanzados con una infraestructura terrestre bien protegida, el riesgo de un ciberataque ya está mitigado. Los principales riesgos asociados con estas categorías se enumeran en la Tabla 5-1. El seguimiento eficaz de los riesgos comienza con un diseño de postura ciber resiliente eficaz. Para lograr y mantener la ciberseguridad, los sistemas espaciales deben diseñarse para monitorear, anticipar y adaptarse continuamente a la situación, para mitigar las actividades cibernéticas que podrían manipular, negar, degradar, interrumpir, destruir, vigilar o escuchar clandestinamente las operaciones espaciales.

A pesar de las mitigaciones señaladas es difícil identificar si la atenuación de la señal, *jamming*, y la suplantación de identidad, *spoofing*, son causadas por operaciones cibernéticas, ya que esta identificación requiere identificar la dirección IP correcta para encontrar al atacante original en el momento en que comenzaron las operaciones cibernéticas con armas y objetivos intangibles [174].

Se pueden tomar acciones preventivas siguiendo la línea de la Política 12 [175] del CNSS (*Committee on National Security Systems*), cuyo objetivo es incorporar estándares de seguridad en los programas terrestres y espaciales durante el proceso de diseño, en lugar de tratar de implementar la seguridad después del lanzamiento del satélite.

Por otro lado, para garantizar la seguridad de los activos en el espacio la ESA ha establecido un instituto de formación ciber en el ESEC (*European Space Security and Education Centre*) en Bélgica [176]. El instituto ofrece formación y pruebas a sus empleados y socios y tiene como objetivo desarrollar conocimientos en materia de concienciación, detección, investigación, respuesta y análisis forense para contrarrestar las operaciones hostiles específicas de los sistemas espaciales.

5.3 Acumulación de desechos espaciales en LEO

Si bien el espacio ultraterrestre es vasto, los planos orbitales útiles en el espacio son relativamente pocos y ya los utilizan los aproximadamente 5.000 satélites operativos y los aproximadamente 1.400 satélites inactivos que se encuentran actualmente en órbita. Además, todas las naves espaciales destinadas a órbitas superiores deben volar a través de órbitas inferiores.

Hoy en día, se rastrean más de 500.000 pedazos de escombros del tamaño de una canica o más en órbita alrededor de la Tierra con muchos millones de pedazos de escombros que son tan pequeños que no se pueden rastrear. La mayoría de los desechos espaciales se encuentran en LEO, a través del cual ascienden todas las naves espaciales y muchas salen de órbita al final de la misión. Una colisión con cualquiera de estas piezas puede causar daños importantes a las naves espaciales. Entre el aumento de los lanzamientos y el crecimiento de los desechos espaciales, las partes útiles del espacio están cada vez más congestionadas.

Para la mayoría de los satélites, su vida útil está determinada por múltiples factores. Por ejemplo, en el caso de los satélites GEO, pequeñas fluctuaciones en los vientos solares y la gravedad terrestre requieren el uso regular de combustible para mantener la posición y actitud del satélite. Una vez que se agota el combustible, un satélite suele quedar inutilizado y fuera de servicio.

Sin embargo, debido a la altura GEO, dicho satélite permanecerá en órbita prácticamente para siempre debido a su altitud y a su resistencia atmosférica casi nula.). La existencia de vientos solares y radiación cósmica obliga a utilizar dispositivos electrónicos especializados y costosos para evitar esos riesgos [177].

Sobre los satélites en órbita MEO, debido a la presencia de los Cinturones de Van Allen, estos satélites pueden sufrir grandes cantidades de radiación y, por tanto, al igual que los satélites GEO, requieren de una electrónica especializada para su funcionamiento.

Los satélites LEO, por el contrario, pueden estar en un estado constante de muy poca resistencia atmosférica que requiera un aumento regular de su altitud, por ejemplo, quema de combustible, o un final de su vida útil causado por su reingreso y combustión similar a la de un meteoro que ingresa a la atmósfera de la Tierra. A modo de ejemplo, la ISS, que orbita a unos 425 km, pierde aproximadamente entre 2 y 4 km/mes de altitud y requiere un consumo regular de combustible para garantizar que se mantenga en la órbita adecuada. Pero la resistencia atmosférica sigue siendo muy baja y los satélites LEO pueden permanecer en órbita durante años sin utilizar combustible.

De hecho, se logra una mejora continua en el funcionamiento del sistema, ya que, al reducir la altitud de funcionamiento, los componentes del sistema, por ejemplo, óptica, electrónica, radar SAR o área requerida de paneles solares, se pueden hacer más pequeños, lo que a su vez reduce la velocidad del vehículo, tamaño y resistencia, lo que permite una altitud operativa aún menor. Si bien es deseable estar más cerca de la superficie de la Tierra, la densidad atmosférica establece un límite inferior en la altitud orbital; o fuerzas de sistemas de contrapeso pesados y costosos.

Esta vida relativamente larga es la fuente de la llamada basura espacial, en la que cualquier dispositivo en órbita puede potencialmente colisionar con un satélite útil, dañándolo o destruyéndolo y creando objetos en órbita adicionales. Es un problema ampliamente reconocido que, con cierta densidad de basura espacial, aumentan las probabilidades de colisiones, lo que eventualmente conduce a una órbita prácticamente inutilizable.

La amenaza de los desechos espaciales está aumentando con el lanzamiento de constelaciones de múltiples satélites, particularmente en LEO. Actualmente, la pauta general es que los satélites en LEO deben salir de órbita o colocarse en órbita cementerio en un plazo máximo de 25 años tras la finalización de su misión. Sin embargo, el 29 de septiembre de 2022, la FCC adoptó una nueva norma para reducir este requisito a 5 años para los satélites con licencia estadounidense, así como para aquellos de otros países que busquen acceder al mercado estadounidense [178]. Por lo tanto, las naves espaciales con una altitud inferior a 2.000 km deberán salir de órbita tan pronto como sea aplicable y no más de cinco años después del final de la misión. Este requisito se aplicará a las naves espaciales lanzadas dos años después de que se apruebe la norma. Hasta la fecha de publicación de esta memoria, esta regla no se aplica específicamente a los satélites de la NASA que no tienen licencia de la FCC [179].

La tasa de desintegración en LEO depende de varios factores. En particular, la asignación de la órbita inicial y el coeficiente balístico juegan un papel fundamental en la capacidad de cumplir con la normativa. Las estimaciones de la acumulación de desechos orbitales sugieren que aproximadamente 500.000 objetos con un diámetro de 1 a 10 cm, y más de 25.000 piezas con diámetros >10 cm, se encuentran en órbitas entre altitudes geoestacionarias ecuatoriales y de órbita terrestre baja. De los 11.370 satélites que se han puesto en órbita el 60% siguen en órbita y sólo el 35% siguen operativos. A noviembre de 2022, se estima que todos los desechos espaciales en órbita superan una masa de 9.000 toneladas métricas.

El objetivo de la ODPO (*Orbital Debris Program Office*) de la NASA junto con el IADC (*Inter-Agency Space Debris Coordination Committee*) es limitar la creación de desechos espaciales. La NASA exige que todos los satélites salgan de órbita en un plazo de 25 años o pasen a una órbita cementerio para su almacenamiento seguro, mientras que la IADC es una recomendación no vinculante. Sin embargo, como se explicó anteriormente, la nueva regla de la FCC reducirá este valor a solo 5 años para la mayoría de los objetos enviados al espacio. [180].

Las naves espaciales pequeñas lanzadas a la altitud de la ISS o sus alrededores se desintegran en menos de cinco años. Sin embargo, en altitudes orbitales superiores a 500 km, no hay garantía de que una nave espacial pequeña se desintegre naturalmente en 5 años para cumplir con la nueva regla de la FCC, debido a posibles condiciones de baja densidad atmosférica y las diferencias en el coeficiente balístico. Para garantizar el cumplimiento del requisito de 5 años, los satélites necesitarían aumentar su coeficiente balístico o relación área-masa. Las tecnologías de desorbitación, como los dispositivos de arrastre, son importantes en este contexto, ya que pueden proporcionar una manera de abordar esta cuestión de forma eficaz.

Además, las diferentes condiciones climáticas solares afectan el rendimiento de desorbitación para una altitud determinada. La fuerza de arrastre que experimentan los satélites aumenta cuando el Sol está en el máximo del ciclo solar, produciendo una desintegración más rápida. Cuando el Sol emite energía adicional en la atmósfera, capas de mayor densidad ocupan altitudes LEO, lo que produce como resultado una fuerza de arrastre más fuerte. El máximo solar suele ocurrir cada 11 años y puede tener un impacto severo en la vida orbital, por lo que algunas misiones planifican sus períodos de lanzamiento en torno al ciclo solar. Con la nueva regla de los 5 años, es posible que más empresas quieran considerar el ciclo solar para sus planes de lanzamiento, ya que el tiempo de desorbitación puede reducirse en más de 10 años en algunos casos.

Tradicionalmente, los sistemas pasivos eran la principal opción para la salida de órbita debido a su mayor simplicidad. Sin embargo, los métodos activos recientemente están ganando terreno. Por un lado, la desorbitación activa requiere control de actitud y, en algunos casos, también propulsor excedente después de la misión, como una vela de arrastre gobernada que depende de un sistema de control de actitud que funcione o de actuadores para apuntar la vela.

Por otro lado, algunas de las nuevas soluciones de desorbitación activa incluyen una nave espacial separada que puede unirse al satélite desaparecido para llevarlo a órbitas más bajas donde los satélites pueden completar la desorbitación utilizando su propia desintegración por arrastre. Algunas naves espaciales pequeñas recientes, como el proyecto europeo RemoveDebris, incluso han implementado una variedad de sistemas de desorbitación activos y pasivos dentro de la misma misión. Esta misión incluyó sistemas tanto activos como pasivos, como un experimento con red, un arpón y una vela de arrastre más tradicional. La misión probó estos sistemas para demostrar la viabilidad de dichas tecnologías en el espacio mediante el despliegue de dos CubeSats 2U separados desde la nave espacial principal para simular desechos espaciales. Una vez completada la misión, se desplegó el sistema pasivo y actualmente está desorbitando al satélite principal para quemarlo en la atmósfera.

5.4 Interferencias del espectro radioeléctrico

Desde principios de la década de los 2000, ha surgido un número creciente de interferencias destinadas a interrumpir o bloquear la recepción de señales, conocidas como *jamming*, afectando a los satélites de comunicaciones [181]. En algunos casos, las interferencias se han dirigido a las señales del GNSS utilizadas por la aviación civil y han amenazado el tráfico aéreo internacional con consecuencias nefastas, incluida la posible pérdida de vidas.

La ITU es responsable de administrar, organizar y determinar cómo funciona el procedimiento de distribución órbita/espectro. La ITU tiene numerosas funciones relacionadas con los satélites y las telecomunicaciones, incluida la asignación de posiciones. Las regulaciones de la ITU prohíben la interferencia intencionada, *jamming*, con señales de satélite basándose en la reciprocidad; en consecuencia, según las regulaciones de la ITU, todos los Estados miembros tienen la obligación de respetar el régimen regulatorio de la ITU y no causar interferencias perjudiciales según el artículo 6.1 de la Constitución de la ITU. Las normas técnicas mundiales para el uso, asignación y asignación de radiofrecuencias y normas técnicas están codificadas bajo el régimen regulatorio de la ITU.

El sistema de asignación de frecuencias de la ITU garantiza el acceso equitativo al espacio ultraterrestre y evita interferencias perjudiciales en la realización de actividades espaciales, definiendo la interferencia perjudicial como “(...) una interferencia con una señal de radio que pone en peligro el funcionamiento de un servicio de radio (o) degrada gravemente, obstruye o interrumpe repetidamente un servicio de comunicación por radio que funciona de conformidad con el Reglamento de Radiocomunicaciones de la ITU” [182].

El Reglamento de Radiocomunicaciones de la ITU establece en el Artículo 15.1.1 que “todas las estaciones tienen prohibido realizar transmisiones innecesarias de señales superfluas, falsas o engañosas” y en el Artículo 15.1.2 que “las estaciones transmisoras irradiarán sólo tanta potencia como sea necesaria para garantizar una transmisión satisfactoria del servicio”.

La ITU además también establece que “la prohibición de interferencia perjudicial por parte de un Estado en las comunicaciones y servicios cibernéticos inalámbricos de otro Estado se basa en el Artículo 45 de la Constitución de la ITU”. Este último informa que “todas las estaciones, cualquiera que sea su finalidad, deben establecerse y explotarse de manera que no causen interferencias perjudiciales a los servicios de radiocomunicaciones o a las comunicaciones de otros Estados miembros”. En 2013, la ITU inició un proceso de elaboración de un memorando de cooperación con administraciones y organizaciones que pueden monitorizar el uso del espectro asignado a los servicios satelitales para ayudar en la realización de mediciones relacionadas con casos de interferencias. En 2018, la ITU publicó una lista no exhaustiva de acciones e iniciativas en curso para combatir las interferencias perjudiciales [181].

La Constitución, el Convenio y los reglamentos de telecomunicaciones componen juntos el acuerdo internacional que rige el uso de radiofrecuencia, así como la asignación de posiciones orbitales. La convención reconoció que el espectro de frecuencias electromagnéticas y las posiciones orbitales son finitos, se deben establecer reglas para evitar conflictos y se debe lograr cierto nivel de distribución equitativa para garantizar que todo el espectro no sea utilizado únicamente por los países desarrollados, dejando a los países en desarrollo sin acceso. La ITU es el organismo de las Naciones Unidas que implementa el Convenio.

Con el crecimiento esperado del número de satélites en órbita, el riesgo de interferencias dañinas de radiofrecuencia también aumenta a medida que más satélites intentan utilizar este recurso limitado.

5.5 Aspectos legales y regulatorios de las megaconstelaciones

Los sistemas de satélite se rigen internacionalmente por la ONU a través de la ITU, basada en tratados. Entre los más importantes relacionados con la megaconstelaciones están:

- OST (*Outer Space Treaty*). Tratado sobre los principios que deben regir las actividades de los Estados en la exploración y utilización del espacio ultraterrestre, incluida la Luna y otros cuerpos celestes:
 - Artículo VI- Las actividades de las organizaciones no gubernamentales requerirán autorización y supervisión.
 - Artículo VIII. Un Estado Parte en el Tratado en cuyo registro esté llevado un objeto lanzado al espacio ultraterrestre conservará la jurisdicción y el control sobre dicho objeto.
- Convenio sobre el registro de objetos lanzados al espacio ultraterrestre (Convenio sobre registro).
 - Cuando un objeto espacial se lanza a la órbita terrestre o más allá, el Estado de lanzamiento registrará el objeto espacial.
- Convenio sobre Responsabilidad Internacional por Daños Causados por Objetos Espaciales (Convenio sobre Responsabilidad):
 - Describe la responsabilidad de los Estados de lanzamiento por los daños causados por sus objetos espaciales tanto en la Tierra como en el espacio.

Cada tres a cinco años, la ITU organiza las WRC (*World Radiocommunication Conference*), que es la culminación de un ciclo de revisión regulatoria de tres a cinco años. Durante los años entre las WRC, los grupos de trabajo y los grupos de estudio colaboran para realizar análisis y presentar propuestas sobre temas como la asignación de espectro, la concesión de licencias, la gestión de interferencias y estudios futuros. Las delegaciones de los países ante la WRC están formadas por reguladores nacionales, como la ECC en la Unión Europea, la FCC en EE. UU. o Ofcom en el Reino Unido, junto con la industria como Iridium, Globalsat, OneWeb, SpaceX y Amazon y entidades gubernamentales como la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) o la NASA.

El objetivo del Reglamento de Radiocomunicaciones de la ITU es evitar interferencias perjudiciales. La ITU aborda el uso de radiofrecuencias, pero no regula ni gestiona objetos físicos.

El derecho al reconocimiento internacional de cualquier asignación de frecuencia se deriva de las peticiones a la ITU, la coordinación con otros operadores y, en última instancia, la inscripción en el MIFR de la ITU con un resultado favorable.

En 2022, 51 países presentaron 322 nuevas solicitudes NGSO para un total de 1,76 millones de satélites. EE. UU. tiene la mayor cantidad de notificaciones y Ruanda tiene la mayor cantidad de satélites [183].

Durante la última década, los debates regulatorios internacionales y locales se han centrado en varios de temas. Entre los más importantes se encuentran las técnicas de mitigación de interferencias para proteger las redes terrestres establecidas mediante límites PFD (*Power Flux-density*) y los sistemas geoestacionarios mediante límites EPFD estadísticos basados en el tiempo. También los requisitos BIU (*Bringing into Use*), que definen el número de satélites necesarios en funcionamiento para evitar la expiración de una notificación de la ITU. Otras cuestiones importantes para la industria satelital giran en torno a la asignación del espectro terrestre para las tecnologías 5G y 6G, junto con las reglas de coordinación [184].

En la Unión Europea, el organismo responsable de organizar y asignar el espacio radioeléctrico es el ECC (*Electronic Communications Committee*), que forma parte de la CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*).

En la Decisión 15(04) [185], la ECC aborda el uso de las ESOMP (*Earth Stations on Mobile Platforms*) que operan con sistemas de satélites NGSO FSS (*Fixed Satellite Service*) en las bandas Ka 17,3-20,2 GHz, espacio a Tierra, 27,5 - 29,1 GHz y 29,5 - 30,0 GHz, Tierra a espacio. Los ESOMP son terminales con antenas direccionales que rastrean los satélites en las NGSO para la prestación de servicios de comunicaciones de banda ancha. Estos ESOMP pueden montarse en barcos, aviones o vehículos terrestres o pueden ser dispositivos transportables utilizados en movimiento o en paradas temporales. Los ESOMP en barcos o aeronaves pueden operar en aguas o espacio aéreo nacionales y también en aguas o espacio aéreo internacionales.

En esta Decisión establece la libre circulación y la exención de licencias individuales de los ESOMP que funcionan con sistemas de satélites NGSO FSS en las bandas Ka [185] referidas en el párrafo anterior.

En EE. UU., la FCC regula las comunicaciones interestatales e internacionales a través de cable, radio, televisión y satélite. El objetivo de la Comisión es promover la conectividad y garantizar un mercado sólido y competitivo [186]. Para facilitar el uso compartido del espectro, la FCC autoriza el derecho a transmitir señales en bandas específicas del espectro. A diferencia de los sistemas terrestres, la FCC implementa un enfoque de varias rondas de procesamiento para la asignación del espectro satelital.

Las rondas de procesamiento de la FCC se llevaron a cabo en 2016, 2017, 2020 y 2021, para cubrir las bandas Ka, Ku y V.

En 2016, OneWeb presentó una solicitud de acceso al mercado de EE. UU. ante la FCC, que inició la ronda de procesamiento de banda Ku/Ka de 2016 y catalizó una serie de rondas posteriores: Ronda de banda V de 2017, ronda de bandas Ku/Ka de 2020 y ronda de banda V de 2021. Más de veinte entidades distintas presentaron solicitudes en estas cuatro rondas de procesamiento buscando autorización para lanzar y operar más de 70.000 satélites. De las doce solicitudes presentadas en la Ronda de Banda Ku/Ka de 2016, diez han sido concedidas y dos han sido retiradas o han renunciado a su autorización. La FCC otorgó las diez solicitudes entre 1 y 3,8 años después de la presentación inicial con un tiempo de procesamiento promedio de 2 años. Todas las solicitudes en la Ronda de banda V de 2017 se procesaron y ocho recibieron autorizaciones de la FCC después de un tiempo de procesamiento promedio de 2,9 años. Solo se ha concedido una de las solicitudes de banda Ku/Ka de 2020, y todas las solicitudes de la Ronda de banda V de 2021 están pendientes de aprobación [187].

Para abordar este problema, el Comité de Energía y Comercio de la Cámara de Representantes de EE. UU. introdujo la Ley de Racionalización de Telecomunicaciones y Satélites y la Ley de Espacio Seguro para reformar las normas de concesión de licencias de la FCC [188].

Como consecuencia, en septiembre de 2023 la FCC adoptó nuevas reglas que acelerarán el procesamiento de aplicaciones de estaciones espaciales y terrestres. Las nuevas reglas permiten a los titulares de licencias NGSO la flexibilidad de tener más de un sistema sin construir sin que se desestimen sus solicitudes. La FCC tiene actualmente solicitudes pendientes para más de 56.000 satélites, el doble que hace cuatro años [189].

Esta tendencia de aumentar los tiempos de espera, junto con la escasez de recursos de espectro, ha creado un entorno competitivo entre las partes interesadas, lo que lleva a preguntarse cómo la FCC u otros organismos deberían considerar las reglas de reparto. Afortunadamente, algunos de los principales actores en el campo satelital han llegado a acuerdos de coordinación. que permitan la coexistencia de sus redes de banda ancha actuales y de segunda generación.

Así, el 13 de junio de 2022, OneWeb y Starlink solicitaron que la FCC desestimara las quejas de coexistencia anteriores que habían presentado entre sí y que, a cambio, la FCC se concentrara en aprobar ambos sistemas de segunda ronda lo más rápido posible [190]. De manera similar, el 24 de septiembre de 2022, Amazon y Telesat llegaron a un acuerdo [191].

Respecto a los criterios BIU, según las normas de la FCC y siguiendo la Resolución 35 de la ITU-R [46] el destinatario de una autorización inicial para un sistema satelital NGSO, debe lanzar el 50 % del número máximo de satélites autorizados para el servicio, colocarlos en sus órbitas asignadas y operarlas. de acuerdo con la autorización de la estación a más tardar 6 años después de la concesión de la autorización. Esta norma no se aplica a los satélites de reemplazo. Un titular de licencia que cumpla con el requisito anterior debe lanzar los satélites restantes necesarias para completar su constelación de servicio autorizada, colocarlas en sus órbitas asignadas y operar cada una de ellas de acuerdo con la autorización a más tardar de nueve años desde la concesión de la autorización [192].

Por ejemplo, la solicitud de OneWeb se concedió el 23 de junio de 2017, por lo que el 50% de su constelación, 324 satélites, debían haberse lanzado antes del 23.06.2023, requisito que sí se ha cumplido [193], y el sistema completo, 648 satélites antes del 23.06.2026. También es importante señalar que una vez alcanzado el hito del 50%, la FCC devuelve la fianza 5 millones depositada por el solicitante.

Dados los requisitos de los hitos de la FCC, todas las constelaciones deben estar operativas en 2034.

5.6 ASAT (*Anti-satellite Weapon*)

Una de las mayores ventajas de las megaconstelaciones para la seguridad nacional es la resiliencia que brindan en respuesta a las operaciones ASAT. En primer lugar, los sistemas LEO son más resistentes a los ataques electrónicos, como las interferencias, debido a su relativa cercanía a la Tierra, lo que permite una mayor intensidad de la señal. Además, el uso de antenas de alta ganancia capaces de crear haces puntuales junto con la velocidad relativa a la que pasan sobre el cielo aumentará la dificultad de los ataques y limitará los lugares donde podrían ocurrir ataques exitosos.

Más importante aún, la proliferación o expansión de la capacidad entre cientos o miles de satélites, donde múltiples satélites pueden dar servicio a la mayoría de los lugares de la Tierra en cualquier momento, significa que el sistema podría resistir ataques a un número relativamente grande de satélites antes de perder una capacidad significativa. Además, la mayoría de estas constelaciones que desempeñan funciones de seguridad nacional seguirán teniendo sistemas alternativos de respaldo que podrían continuar con la capacidad a pesar de un ataque. Esto tiene el efecto de reducir el valor de cada satélite individual para un adversario. Además, estos satélites son pequeños, más baratos de construir y de reemplazar, lo que desincentiva aún más los ataques.

Desde el punto de vista legal se puede examinar la responsabilidad de un Estado por las operaciones de una compañía privada según el OST, la ley de neutralidad y cobelligerancia [194]. Estas cuestiones guardan relación con el riesgo jurídico de que un Estado se vea arrastrado a un conflicto armado por las acciones de actores comerciales en el espacio. Véase el caso de EE. UU. y Starlink que se estudia a continuación.

EE. UU., Ucrania y Rusia son tres de los 110 Estados que han ratificado el OST, y otros veintitrés Estados son signatarios del mismo. Además de su estatus de tratado, algunos Estados creen que todo el OST tiene estatus de derecho internacional consuetudinario. Otros Estados sólo aceptan que las normas “fundamentales” del OST hayan alcanzado ese estatus.

Según el artículo VI del OST, los Estados asumen la responsabilidad internacional por las “actividades nacionales” en el espacio ultraterrestre, ya sea que dichas actividades sean realizadas por agencias gubernamentales o por entidades no gubernamentales o no.

El término “responsabilidad internacional” se considera ampliamente como sinónimo de “responsabilidad del Estado” en el proyecto de artículos sobre la responsabilidad de los Estados por hechos internacionalmente ilícitos, que se encontraba en proceso de redacción durante décadas cuando se abrió el OST para la firma. Además, según el Artículo VI del OST, los Estados son responsables de “asegurar que las actividades nacionales se lleven a cabo de conformidad con las disposiciones establecidas en el presente Tratado”, lo que incluye, mediante la aplicación del Artículo III del OST, el cumplimiento “de las normas internacionales ley.” Cuando las actividades son llevadas a cabo por entidades no gubernamentales, el Artículo VI amplifica que los Estados deben autorizar y supervisar continuamente dichas actividades.

El cumplimiento de las disposiciones del OST también incluye el Artículo III del OST, que requiere que los Estados lleven a cabo actividades de conformidad con el derecho internacional en general, incluido el de la Carta de las Naciones Unidas, como la obligación establecida en el Artículo 2 (4) de la Carta de prohibir la amenaza o el uso de la fuerza.

En cuanto al concepto de responsabilidad internacional en el artículo VI del OST, hay tres cuestiones clave que requieren consideración: (1) la responsabilidad del Estado por las actividades nacionales, (2) la obligación de los Estados de garantizar que las actividades nacionales se ajusten a las disposiciones del OST, y el derecho internacional en términos más amplios y, (3) la obligación de los Estados de garantizar que autorizan y supervisan continuamente las actividades de las entidades no gubernamentales.

La cuestión de si los satélites Starlink son objetivos militares válidos es importante porque los Estados están prestando atención al sistema Starlink y sus implicaciones para conflictos futuros. El Ejército Popular de Liberación de China acusó a EE. UU. de “militarizar” el programa Starlink y aseguró que debía tener la capacidad de destruir Starlink si amenaza su Seguridad Nacional. Sin duda, China es muy consciente del potencial de Starlink para ayudar a Taiwán, como ha ayudado a Ucrania, en un posible futuro conflicto armado entre China y Taiwán. Por lo tanto, la cuestión legal subyacente de la posible caracterización de Starlink como un objetivo militar tiene implicaciones más amplias que solo en el contexto de la actual guerra entre Rusia y Ucrania.

El artículo 52(2) del Protocolo Adicional I, que refleja el derecho internacional establece la definición de objetivo militar. Para calificar como tal, Starlink debe, por su naturaleza, ubicación, propósito o uso, hacer una contribución efectiva a la acción militar, de Ucrania, y su destrucción, captura o neutralización total o parcial, en las circunstancias que prevalezcan en ese momento, debe ofrecer, a Rusia, una clara ventaja militar.

En el contexto de la guerra entre Rusia y Ucrania, estos requisitos se cumplen: Starlink se utiliza para proporcionar a las fuerzas militares ucranianas Internet y comunicaciones de alta velocidad, lo que contribuye eficazmente a sus operaciones militares. Por ejemplo, ha permitido la interceptación de las comunicaciones del campo de batalla ruso, ha facilitado operaciones de información ucranianas y ha ayudado a una unidad de drones ucraniana a destruir tanques rusos. Un soldado ucraniano describió que Starlink había cambiado la guerra a favor de Ucrania. Negarle a Ucrania esta capacidad sin duda ofrecería a Rusia una ventaja militar definitiva.

Es la agilidad de Starlink lo que lo diferencia de sus competidores. También es un aspecto que incide en el análisis jurídico. Actualmente hay más de 4.000 satélites funcionales dentro de la constelación y, como opera en la órbita LEO, SpaceX puede reemplazar rápidamente un satélite si es necesario. Es poco probable que un ataque a un solo satélite cause algo más que una interrupción insignificante o mínima del sistema. Por tanto, es difícil ver cómo un ataque aislado a un satélite Starlink proporcionaría una ventaja militar definitiva.

EE. UU. desea evitar que el conflicto se extienda al espacio exterior. Como demostración de este compromiso, se comprometieron unilateralmente a no realizar más pruebas ASAT y también están desarrollando principios de comportamiento espacial responsable. Sin embargo, los Estados también deben ser conscientes del riesgo de que los sistemas de satélites comerciales se conviertan en objetivos militares válidos, en particular cuando el Estado depende de ese sistema para sus propias actividades militares. El ejército estadounidense ya tiene contrato con Starlink. De manera similar, la Fuerza Área de EE. UU. ha financiado pruebas de interoperabilidad de Starlink con aviones militares bajo el programa Starshield, y se están llevando a cabo más pruebas con un contrato por valor de alrededor de 40 millones de dólares por experimento. El general Dickinson, jefe del Comando Espacial de EE. UU., ha reconocido públicamente todo lo que Starlink ofrece en términos de capacidad y redundancia [195].

La constelación Starlink es un objetivo militar válido pero un ataque cinético contra una constelación entera, por parte de Rusia, por ejemplo, sería de tal escala que es difícil imaginar que el ataque no violaría el principio de proporcionalidad [196].

Sin embargo, si bien Rusia aún no ha logrado desplegar métodos de ataque no cinéticos en el espacio, China ya posee un sólido arsenal de capacidades espaciales. El ejército de EE. UU. desea preservar y proteger la megaconstelación de Starlink y evitar una situación en la que China emplee tal capacidad.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones

Nuestro mundo ha entrado en una nueva era digital, lo que hace que nuestra economía y nuestra seguridad dependan cada vez más de una conectividad segura y resiliente.

Caracterizada por necesidades cada vez mayores de hiperconectividad, importantes transformaciones tecnológicas y la búsqueda de soberanía digital, los últimos años han visto cómo la conectividad, segura, se ha convertido en un bien público, con un aumento sin precedentes de la demanda de servicios de comunicación por satélite.

En un contexto geopolítico en el que las amenazas cibernéticas e híbridas se multiplican, las preocupaciones sobre la seguridad y la resiliencia aumentan y exigen una mejora cuantitativa y cualitativa de las capacidades gubernamentales de comunicaciones por satélite avanzando hacia soluciones de mayor seguridad, baja latencia y mayor ancho de banda.

El boom de las megaconstelaciones LEO ha comenzado. Hoy en día, entre las principales propuestas de megaconstelaciones comerciales, se añadirán más de 50.000 satélites al espacio en los próximos años. Estas megaconstelaciones por sí solas tienen el potencial de lanzar casi diez veces el número total de satélites jamás lanzados en la historia de la humanidad. El crecimiento de las megaconstelaciones de satélites pequeños y LEO en la próxima década tiene el potencial de crear una igualdad de acceso a Internet de alta velocidad en todo el mundo como nunca.

Actualmente, la industria se encuentra en un periodo de transición en el que se impone el modelo de arquitectura multicapa. Pero a medida que los sistemas se vuelven más pequeños y potentes, muchas de las capacidades que actualmente funcionan en GEO y en MEO pasarán en gran medida a LEO en los próximos 10 a 15 años.

Estas megaconstelaciones son posibles gracias a los desarrollos tecnológicos y las tendencias de la industria satelital. Estos incluyen la miniaturización de los componentes, el uso de componentes COTS y el desarrollo de un factor de forma estandarizado para satélites pequeños. La nueva ola de satélites LEO se beneficia de los desarrollos de la industria y se centra en la reducción de los costes de lanzamiento. Al final, estos satélites LEO se pueden fabricar de forma más rápida y barata, ponerse en órbita de forma más rápida y barata, y proporcionar una cobertura global con velocidades de comunicación mayores.

La revolución de los satélites en órbita LEO está en marcha, liderada principalmente por el sector privado. Las estructuras de Defensa deben buscar formas de aprovechar estas tendencias en su beneficio, tanto haciendo uso de proyectos comerciales como estudiando soluciones específicas para el ejército. Estas megaconstelaciones permitirán a los ejércitos ahorrar costos y aprovechar aún más las tecnologías más novedosas.

Los principales beneficios se derivan de las mejoras tecnológicas y las capacidades de los nuevos satélites y de la mayor resiliencia que proporcionan las megaconstelaciones por el gran número de satélites.

El espacio sigue desempeñando un papel cada vez más importante en la vida cotidiana de los ciudadanos y empresas, pero también en lo que respecta a la Seguridad Nacional. Las capacidades que pueden proporcionar los satélites no tienen comparación con las alternativas terrestres. Los nuevos avances tecnológicos que han hecho que el espacio sea más accesible para un mayor número de agentes, incluidos otros países y agentes no estatales, también han aumentado los riesgos asociados a las operaciones en el espacio.

Estos riesgos incluyen colisiones con otros satélites o desechos orbitales, pero también el mayor riesgo de interferencia intencionada por parte de adversarios. Cada vez son más los países que desarrollan armas antisatélite cinéticas, no cinéticas, electrónicas y cibernéticas que suponen un riesgo para el uso pacífico y continuado de los activos espaciales de Seguridad Nacional.

Los estados han respondido a estos riesgos con un enfoque de múltiples niveles que van desde los compromisos diplomáticos hasta la creación de una nueva rama militar y un nuevo mando de combate con el único objetivo de garantizar la seguridad espacial.

Actores como el Departamento de Defensa de EE. UU. están desplegando una megaconstelación propia en LEO para aprovecharse de sus beneficios y abordar el creciente riesgo de interferencia en el espacio.

Por su parte, la UE, para abordar los desafíos actuales y futuros, al tiempo que apoya la autonomía y la soberanía digital de la organización y sus ciudadanos, está desarrollando un ambicioso plan para el desarrollo de IRIS², el nuevo sistema de conectividad segura basado en una megaconstelación LEO, que constituirá un nuevo pilar espacial para una Europa digital, resiliente y más segura.

Los estados dependen de los activos espaciales para proporcionar capacidades esenciales en apoyo de la Seguridad Nacional. Las capacidades incluyen SATCOM, ISR, monitorización meteorológica y ambiental, PNT, advertencia de misiles y operaciones de disuasión nuclear. La integración de las capacidades proporcionadas por las megaconstelaciones en la arquitectura de Seguridad Nacional, a través de contratos comerciales o constelaciones gubernamentales, tiene el potencial de proporcionar muchos beneficios.

Las tasas rápidas de revisitas permitirán una vigilancia casi constante de las áreas de interés, aumentando aún más la fiabilidad y permitiendo imágenes satelitales tácticamente relevantes. Las megaconstelaciones de pequeños satélites de comunicaciones permitirán la transferencia de esta y otra información crítica en mayores volúmenes y en escalas de tiempo más cortas, proporcionando una capacidad central para la digitalización de las fuerzas militares.

Estas nuevas capacidades y riesgos para la seguridad nacional plantean varias cuestiones legales y regulatorias. El derecho internacional del espacio no ha evolucionado mucho en los últimos 50 años, desde que se firmaron los cinco principales tratados relacionados con el espacio. Si bien la cooperación internacional en cuestiones como los desechos espaciales, la gestión del tráfico espacial y el conocimiento de la situación espacial sería la mejor solución, el entorno internacional no parece propicio para la celebración de acuerdos vinculantes serios sobre estas cuestiones en los próximos años.

Como tal, la mayor parte del desarrollo se ha completado y se completará a nivel nacional. EE. UU. ha sido durante mucho tiempo un líder en la regulación de las actividades espaciales y seguirá teniendo ese papel para proteger la seguridad nacional a la luz del despliegue de las megaconstelaciones.

Si bien la ITU y la FCC parecen tener un proceso viable para la resolución de interferencias perjudiciales, contar con una definición de umbral y un mayor poder de decisión internacional mejoraría enormemente el proceso. Las normas de teledetección recientemente actualizadas para la ISR, así como las normas de ciberseguridad, parecen muy adecuadas para gestionar el movimiento de megaconstelaciones que se avecina, mientras que las normas sobre operaciones de proximidad son actualmente inexistentes.

Por último, la aplicación del Derecho Internacional de los Conflictos Armados será difícil, con nuevas complejidades. Esto resume muchos de los problemas legales y las deficiencias que deberían abordarse de aquí a la implementación de las megaconstelaciones para garantizar que la Seguridad Nacional permanezca protegida durante este cambio exponencial en el entorno espacial.

Al final, el aumento de los riesgos que plantea la megaconstelación para la seguridad nacional puede tener un efecto positivo no deseado: el aumento de estos riesgos para todas las naciones del mundo puede ser el catalizador necesario para iniciar debates internacionales serios sobre normas vinculantes de mitigación de los desechos espaciales, gestión del tráfico espacial, rendición de cuentas sobre interferencias perjudiciales y otros que puedan utilizarse para aumentar la seguridad nacional de todas las naciones mediante una mejor coordinación y procedimientos basados en normas que mejoren la seguridad y sostenibilidad de las operaciones espaciales.

Para hacer una comparación, aumentar la seguridad en las carreteras no depende necesariamente de limitar el número de automóviles que acceden a una carretera, sino más bien de mejoras tecnológicas y regulatorias que ayuden a garantizar la seguridad en las carreteras.

6.2 Líneas futuras

6.2.1 IoT

IoT ha cobrado un impulso significativo en la última década, sirviendo a muchas aplicaciones que dependen de redes masivas de sensores inalámbricos, como ciudades inteligentes, transporte, agricultura remota y monitoreo marítimo. Las redes WAN (*Wide-area Network*) de baja potencia han tenido un gran éxito en abordar la conectividad IoT a través de redes terrestres y son adecuadas para dispositivos que funcionan con baterías. Sin embargo, muchos otros casos de uso requieren conectividad en regiones rurales y remotas, lo que es difícil de lograr utilizando enlaces terrestres convencionales. Así, se ha propuesto constelaciones de satélites para soportar redes de IoT. Sin embargo, surgen desafíos:

- Los protocolos populares de IoT se basan principalmente en técnicas de acceso aleatorio, lo que da lugar a una mayor interferencia co canal, generada por el gran número de dispositivos que compiten por el acceso al espectro en el enlace ascendente, que se ve exacerbado por la gran área de cobertura del satélite.
- Los dispositivos IoT suelen tener una potencia limitada, lo que hace que el diseño del consumo de energía del enlace ascendente sea extremadamente difícil, incluso para los satélites LEO. Como resultado, los protocolos dedicados a IoT a través de satélites deben implementar mecanismos compatibles para mitigar la interferencia co canal con presupuestos de energía mínimos.

6.2.2 *Multi-user MIMO*

Se ha demostrado que los sistemas inalámbricos de entrada y salida múltiples pueden aumentar significativamente la eficiencia espectral aprovechando la ganancia de multiplexación espacial. A fin de lograr una alta ganancia de multiplexación espacial, se requiere una baja correlación espacial entre las antenas, lo que normalmente puede lograrse cuando las antenas están suficientemente espaciadas. Para un MIMO multiusuario, se pueden considerar varias configuraciones para formar un conjunto de antenas en los satélites:

- Un solo satélite se considera un satélite con múltiples antenas.
- Los satélites colocados consideran múltiples satélites, cada uno equipado con una sola antena, en el mismo plano orbital.
- Los satélites múltiples consideran que cada satélite está equipado con una sola antena en un plano orbital diferente.

Cuando varios satélites forman un conjunto de antenas, la sincronización a través de enlaces entre satélites se vuelve crítica a medida que los satélites se distribuyen. Por otro lado, el número de antenas posibles es limitado cuando se utiliza un solo satélite en un esquema MIMO multiusuario. La adquisición de información del estado del canal se logra mediante el despliegue de señales ortogonales predefinidas antes de los datos. Sin embargo, esto es un desafío debido a la naturaleza rápidamente cambiante de los canales móviles terrestres.

6.2.3 *Integración con redes terrestres*

Se espera que las redes integradas terrestres y satelitales incluyan de manera cooperativa tanto las redes terrestres como las satelitales para combinar sus beneficios. En un esquema híbrido de este tipo, las altas velocidades de datos de las redes terrestres y la gran huella de cobertura de los satélites se combinan para producir una transmisión de datos sin interrupciones. Los protocolos de comunicación por satélite, incluidas las capas físicas y de acceso, que se utilizan actualmente en las redes desplegadas son principalmente propietarios. 3GPP está desarrollando la integración de NTN en futuras versiones de 5G y 6G, incluida la capa física y las diferentes arquitecturas de red, pero presentan los siguientes desafíos:

- Coordinación de los recursos radioeléctricos entre los satélites y la Tierra.
- Traspaso multiplataforma.
- Modelado, validación y optimización del rendimiento.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Miniwatts Marketing Group, «Internet usage statistics the internet big picture,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.internetworldstats.com/stats.htm>.
- [2] A. Raj, «Are low earth orbit satellites the future of internet connectivity?,» Tech Wire Asia, 2022. [En línea]. Available: <https://techwireasia.com/2022/04/are-low-earth-orbit-satellites-the-future-of-internet-connectivity/>.
- [3] R. Adefioye, «Electronically-Steered Antenna Successfully Tracks LEO Satellite,» engineering.com, 6 febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.engineering.com/story/electronically-steered-antenna-successfully-tracks-leo-satellite>.
- [4] E. Winick, «SpaceX has launched the first 60 satellites of its space internet system,» MIT Technology Review, 2019. [En línea]. Available: <https://www.technologyreview.com/2019/05/24/135223/spacex-has-launched-the-first-60-satellites-of-its-space-internet-system/>.
- [5] A. Nijhawan, «Inter-satellite Optical Links: A New Frontier for Communications Technology,» All about circuits, 24 marzo 2022. [En línea]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/news/inter-satellite-optical-links-a-new-frontier-for-communications-technology/>.
- [6] Union of Concerned Scientists, «UCS-Satellite-Database-1-1-2023,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.ucsusa.org/sites/default/files/2023-06/UCS-Satellite-Database-1-1-2023.xlsx>.
- [7] L. Wood, «Big LEO overview,» 14 enero 2000. [En línea]. Available: <http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/constellations/tables/overview.html>.
- [8] H. Jung, «Teledesic Halts Work on Satellites,» The Edwardsville Intelligencer, 1 octubre 2002. [En línea]. Available: <https://www.theintelligencer.com/news/article/Teledesic-Halts-Work-on-Satellites-10511532.php>.
- [9] T. Malik, «How to Spot SpaceX's 60 New Starlink Satellites in the Night Sky,» 15 noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.space.com/see-spacex-starlink>

satellites-in-night-sky.html.

- [10] S. Hongrong, Q. Ning y B. Chen, «Adaptive coding modulation selection optimisation scheme for Ka-band LEO mobile satellites,» *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 41, nº 4, pp. 406-425, 2023.
- [11] S. Guo, K. Han, W. Gong, L. Li, F. Tian y X. Jiang, «An Efficient Multi-Dimensional Resource Allocation Mechanism for Beam-Hopping in LEO Satellite Network,» *6G Space-Air-Ground Communication Networks and Key*, 2022.
- [12] L. Bernstein, «Inter-Satellite Links Are Making Space Networks a Reality,» Kratos Defense, 26 julio 2022. [En línea]. Available: <https://www.kratosdefense.com/constellations/articles/inter-satellite-links-are-making-space-networks-a-reality>.
- [13] R. Goodwins, «Teledesic backs away from satellite push,» ZDNET, 3 octubre 2002. [En línea]. Available: <https://www.zdnet.com/article/teledesic-backs-away-from-satellite-push/>.
- [14] I. del Portillo, B. G. Cameron y E. F. Crawley, «A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband,» *Acta Astronautica*, vol. 159, pp. 123-135, 3 2019.
- [15] M. Harris, «Facebook May Have Secret Plans to Build a Satellite-Based Internet,» IEEE, 2 mayo 2018. [En línea]. Available: <https://spectrum.ieee.org/facebook-may-have-secret-plans-to-launch-a-internet-satellite>.
- [16] M. Gurman, «Apple Has Secret Team Working on Satellites to Beam Data to Devices,» Bloomberg, 20 diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-12-20/apple-has-top-secret-team-working-on-internet-satellites#xj4y7vzkg>.
- [17] C. Henry, «OneWeb raises \$1.25 billion from returning investors,» Space News, 18 marzo 2019. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/oneweb-raises-1-25-billion-from-returning-investors>.
- [18] «About Us,» SDA, 3 agosto 2020. [En línea]. Available: <https://www.sda.mil/home/about-us/>.
- [19] NASA, «Catalog of Earth Satellite Orbits,» [En línea]. Available: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/OrbitsCatalog>.
- [20] MIT, «TESS,» [En línea]. Available: <https://tess.mit.edu/>.
- [21] NASA, «Vela 1A,» 28 octubre 2022. [En línea]. Available: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1963-039A>.
- [22] AcademiaLab, «Órbita geosíncrona,» AcademiaLab, 2023. [En línea]. Available: <https://academia-lab.com/enciclopedia/orbita-geosincrona/>.
- [23] NASA Goddard Space Flight Center, «User support guide: platforms,» 27 mayo 2010. [En línea]. Available: Definitions of geocentric orbits from the Goddard Space Flight Center".
- [24] G. Bury, K. Sośnica, R. Zajdel y D. Strugarek, «Toward the 1-cm Galileo orbits: challenges in modeling of perturbing forces,» *Journal of Geodesy*, vol. 94, nº 2, 2020.

- [25] T. G. Roberts, «Popular Orbits 101,» CSIS Aerospace, 14 junio 2022. [En línea]. Available: <https://aerospace.csis.org/aerospace101/earth-orbit-101/>.
- [26] Y. F. Kolyuka, N. Ivanov, T. Afanasieva y T. Gridchina, «Examination of the Lifetime, Evolution and Re-Entry Features for the "Molniya" Type Orbits,» de *21st International Symposium of Space Flight Dynamics*, Toulouse, 2009.
- [27] NASA, «SCaN Glossary,» [En línea]. Available: <https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/definitions/glossary/index.html>.
- [28] Steering Group and Working Group 4, «IADC Space Debris Mitigation Guidelines,» 4 septiembre 2007. [En línea]. Available: https://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/IADC-2002-01-IADC-Space_Debris-Guidelines-Revision1.pdf.
- [29] I. Leyva-Mayorga, B. Soret y P. Popovski, «Inter-Plane Inter-Satellite Connectivity in Dense LEO Constellations,» *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1-6, 2019.
- [30] V. W. S. Chan, «Free-Space Optical Communications,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, nº 12, pp. 4750-4762, 2006.
- [31] W. Yanbo, H. Li y X. Du, «An Efficient LEO Global Navigation Constellation Design Based on Walker Constellation,» *2020 IEEE Computing, Communications and IoT Applications (ComComAp)*, 2020.
- [32] M. Mitry, «Building an Orbiting Internet Just for Satellites,» IEEE, 23 enero 2020. [En línea]. Available: <https://spectrum.ieee.org/building-an-orbiting-internet-just-for-satellites>.
- [33] A. U. Chaudhry y H. Yanikomeroglu, «Laser Intersatellite Links in a Starlink Constellation: A Classification and Analysis,» *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 16, nº 2, pp. 48-56, June 2021.
- [34] M. Motzigemba, H. Zech y P. Biller, «Optical Inter Satellite Links for Broadband Networks,» de *2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, Istanbul, 2019.
- [35] V. Machi, «US Military Places a Bet on LEO for Space Security,» *Satellite Today*, 25 mayo 2021. [En línea]. Available: <https://interactive.satellitetoday.com/via/june-2021/us-military-places-a-bet-on-leo-for-space-security/>.
- [36] T. Segert y S. Attara, «Mass Manufacturing of Small Satellites, Gearing up for the Henry Ford Moment,» *Digital Commons*, 16 julio 2019. [En línea]. Available: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2019/all2019/265/>.
- [37] NASA, «State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa>.
- [38] F. Rayal, «Latency in LEO Satellites vs. Terrestrial Fiber,» 7 julio 2021. [En línea]. Available: <https://frankrayal.com/2021/07/07/latency-in-leo-satellites-vs-terrestrial-fiber/>.
- [39] M. Seibel, «Agriculture's Digital Revolution From Space,» *Medium*, 20 mayo 2019. [En línea]. Available: <https://medium.com/swarm-technologies/agricultures-digital-revolution-from-space-8b4a0d46b643>.

- [40] J. Hollington, «What is 5G? Speeds, coverage, comparisons, and more,» Digital Trends, 18 marzo 2023. [En línea]. Available: <https://www.digitaltrends.com/mobile/what-is-5g/>.
- [41] M. Frackiewicz, «LEO Satellites and Their Applications in Earth Observation,» TS2, 5 junio 2023. [En línea]. Available: <https://ts2.space/en/leo-satellites-and-their-applications-in-earth-observation/>.
- [42] H. Asadov, P. Zong y S. Kohani, «Optimal Satellite LEO Constellation Design Based on Global Coverage in One Revisit Time,» *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2019, 2019.
- [43] S. Runco, C. Fontanot y C. Getteau, «High Definition Earth Viewing (HDEV) Final Report June 2020,» NASA, 1 junio 2020. [En línea]. Available: https://eol.jsc.nasa.gov/ESRS/HDEV/files/HDEV-Final-Report_20200715.pdf.
- [44] SSTL, «CARBONITE-2: Launched 2018,» SSTL, [En línea]. Available: <https://www.sstl.co.uk/space-portfolio/launched-missions/2010-2019/carbonite-2-launched-2018>.
- [45] eoPortal, «Jilin Constellation,» eoPortal, 10 julio 2023. [En línea]. Available: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/jilin-con#eop-quick-facts-section>.
- [46] ITU-R, «World Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19) Final Acts,» ITU-R, 2019. [En línea]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.14-2019-PDF-E.pdf.
- [47] E. Eicher, «Amazon Spars With AT&T and Verizon at FCC Over Project Kuiper Spectrum,» Broadband Breakfast, 2023. [En línea]. Available: <https://broadbandbreakfast.com/2023/07/amazons-spars-with-att-and-verizon-at-fcc-over-project-kuiper-spectrum/>.
- [48] S. Masunaga, «SpaceX faces daunting challenges if it's going to win the internet space race,» Los Angeles Times, 28 junio 2019. [En línea]. Available: <https://www.latimes.com/business/la-fi-spacex-starlink-constellation-20190628-story.html>.
- [49] C. Henry, «ViaSat plans massive ground network of smaller gateways for ViaSat-2 and ViaSat-3 satellites,» Space News, 25 mayo 2017. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/viasat-plans-massive-ground-network-of-smaller-gateways-for-viasat-2-and-viasat-3-satellites>.
- [50] A. Wainscott-Sargent, «LEO Advances on the Ground,» 2020. [En línea]. Available: <https://interactive.satellitetoday.com/leo-advances-on-the-ground/>.
- [51] L. Shuaijun, W. Tong, X. Yichen, W. Dapeng y L. Lixiang, «Throughput Evaluation and Ground Station Planning for LEO Satellite Constellation Networks,» 2020. [En línea]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-15-3442-3_1.
- [52] L. Cheng y L. Shuaijun, «Study on Gateway Station Deployment for Large Scale LEO Satellite Constellation Networks,» de *IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom)*, Wuhan, 2022.
- [53] Z. Di, S. Min, W. Jianxin, L. Jiandong y H. Zhu, «Gateway Placement in Integrated Satellite–Terrestrial Networks: Supporting Communications and Internet of Remote Things,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, nº 6, pp. 4421-4434, 2022.
- [54] Z. Chaoyi, L. Yitao, Z. Manqing, Q. Wang y Z. Wuyang, «"An Optimization Method

- for the Gateway Station Deployment in LEO Satellite Systems,» de *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, Antwerp, 2023.
- [55] A. Gomez, «LEO & The Impact On The Ground Segment,» WTA, 2020. [En línea]. Available: <https://www.worldteleport.org/news/516701/LEO--The-Impact-On-The-Ground-Segment.htm>.
- [56] S. Cakaj, B. Kamo, V. Koliçi y O. Shurd, «The Range and Horizon Plane Simulation for Ground Stations of Low Earth Orbiting (LEO) Satellites,» 5 septiembre 2011. [En línea]. Available: https://file.scirp.org/pdf/IJCNS20110900004_79507510.pdf.
- [57] C. Henry, «Wyler claims breakthrough in low-cost antenna for OneWeb, other satellite systems,» Space News, 25 enero 2019. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/wyler-claims-breakthrough-in-low-cost-antenna-for-oneweb-other-satellite-systems>.
- [58] R. G. Andrews, «Geomagnetic Storm Destroys 40 New SpaceX Satellites in Orbit,» New York Times, 9 febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.nytimes.com/2022/02/09/science/spacex-satellites-storm.html>.
- [59] C. Saran, «Fujitsu uses quantum-inspired algorithm to tackle space waste,» Computer Weekly, 2021. [En línea]. Available: <https://www.computerweekly.com/news/252504234/Fujitsu-uses-quantum-inspired-algorithm-to-tackle-space-waste>.
- [60] T. Hitchens y S. J. Freedberg, «Army Seeks Small Satellites To Support Ground Troops,» Breaking Defense, 7 agosto 2019. [En línea]. Available: <https://breakingdefense.com/2019/08/army-seeks-small-satellites-to-support-ground-troops/>.
- [61] N. Strout, «With all three Gunsmoke-J satellites on orbit, the Army is ready to test space-based targeting,» C4isrnet, 12 julio 2021. [En línea]. Available: <https://www.c4isrnet.com/battlefield-tech/space/2021/07/12/with-all-three-gunsmoke-j-satellites-on-orbit-the-army-is-ready-to-test-space-based-targeting/>.
- [62] S. Erwin, «Parsons to develop ground operations center for DARPA's Blackjack satellites,» Space News, 11 diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/parsons-to-develop-prototype-ground-operations-center-for-darpas-blackjack-satellites/>.
- [63] S. Erwin, «Space Development Agency to acquire 28 missile-tracking satellites to launch in late 2024,» Space News, 8 diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/space-development-agency-to-acquire-28-missile-tracking-satellites-to-launch-in-late-2024/>.
- [64] S. Clark, «China launches military spy satellite trio into orbit,» Spaceflight Now, 29 enero 2021. [En línea]. Available: <https://spaceflightnow.com/2021/01/29/china-launches-military-spy-satellite-trio-into-orbit/>.
- [65] A. Jones, «China launches new group of classified Yaogan-30 satellites,» Space News, 18 junio 2021. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/china-launches-new-group-of-classified-yaogan-30-satellites/>.
- [66] Nokia, «5G from space - The role of satellites in 5G,» Nokia, [En línea]. Available: <https://www.nokia.com/thought-leadership/articles/5g-space-satellites/>.
- [67] X. Lin, S. Rommer, S. Euler, E. A. Yavuz y R. S. Karlsson, «5G from Space: An

- Overview of 3GPP Non-Terrestrial Networks,» *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 5, nº 4, pp. 147-153, 2021.
- [68] D. Jones, «LEO satellite communications come to Earth,» Tech Target, 22 noviembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/tip/LEO-satellite-communications-come-to-Earth>.
- [69] R. Lancot, «Satellites and Autonomous Vehicles,» Via Satellite, 2019. [En línea]. Available: <https://interactive.satellitetoday.com/satellites-and-autonomous-vehicles/>.
- [70] L. Xingxing, L. Hongbo, M. Fujian, L. Xin, L. Jinghui y J. Zihao, «GNSS RTK Positioning Augmented with Large LEO Constellation,» School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 2019. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/3/228>.
- [71] ESA, «5G lab to accelerate self-driving cars,» ESA, 22 octubre 2020. [En línea]. Available: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/United_Kingdom/5G_lab_to_accelerate_self-driving_cars.
- [72] C. J. Schrijver y G. L. Siscoe, *Heliophysics: Evolving Solar Activity and the Climates of Space and Earth.*, Cambridge University Press, 2010.
- [73] Multivu, «Iridium NEXT Satellite Constellation,» 2010. [En línea]. Available: http://multivu.prnewswire.com/mnr/iridium/44300/docs/44300-Iridium_NEXT_Brochure.pdf.
- [74] B. Schweber, «Iridium global satcom system: Brilliant design, terrible business, last-minute reprieve, Part 1,» Microcontroller tips, 3 noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.microcontrollertips.com/iridium-global-satcom-system-brilliant-design-terrible-business-last-minute-reprieve-part-1-faq/>.
- [75] Orbital ATK, «Iridium NEXT,» 26 septiembre 2015. [En línea]. Available: https://web.archive.org/web/20150926094943/https://www.orbitalatk.com/space-systems/commercial-satellites/communications-satellites/docs/FS002_11_OA_3862%20IridiumNEXT.pdf.
- [76] Iridium, «The Iridium Constellation,» Iridium Where, [En línea]. Available: <https://iridiumwhere.com/about/>.
- [77] W. Graham, «Iridium NEXT-5 satellites ride to orbit on SpaceX Falcon 9,» NASA Spaceflight, 29 marzo 2018. [En línea]. Available: <https://web.archive.org/web/20180330213815/https://www.nasaspaceflight.com/2018/03/iridium-next-5-satellites-spacex-falcon-9/>.
- [78] B. McIntosh, «Down to earth reasons for Iridium failure,» The Independent, 18 agosto 1999. [En línea]. Available: <https://www.independent.co.uk/news/business/down-to-earth-reasons-for-iridium-failure-1113638.html#lndgr2mlqsb1wj062s>.
- [79] R. Mann, «Iridium Certus,» Skytrac, 8 abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.skytrac.ca/resources/magazine/what-is-iridium-certus/>.
- [80] Iridium, «Witness Space History in the Making,» 11 enero 2019. [En línea]. Available: <https://web.archive.org/web/20191015225141/https://www.iridiumnext.com/>.
- [81] FCC, «Order and authorization,» 1 agosto 2016. [En línea]. Available:

- <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DA-16-875A1.pdf>.
- [82] eoPortal, «The CEOS Database,» 2023. [En línea]. Available: <https://database.eohandbook.com/database/missionsummary.aspx?missionID=1020>.
- [83] D. S. Ilcev, «The Iridium LEO Satellite System for Global Mobile Communications,» *Microvawe Journal*, 9 febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.microwavejournal.com/articles/37587-the-iridium-leo-satellite-system-for-global-mobile-communications>.
- [84] Iridium, «Manual for icao aeronautical mobile satellite (route) service,» 21 marzo 2007. [En línea]. Available: http://legacy.icao.int/anb/panels/acp/wg/m/iridium_swg/ird-08/ird-swg08-ip05%20-%20ams%28r%29s%20manual%20part%20ii%20v4.0.pdf.
- [85] D. Veeneman, «Iridium,» 21 noviembre 2021. [En línea]. Available: <http://www.decodesystems.com/iridium.html>.
- [86] A. Nyirady, «Iridium Unveils New Ground Station in Chile,» *Satellite Today*, 28 marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.satellitetoday.com/ground-systems/2019/03/28/iridium-unveils-new-ground-station-in-chile/>.
- [87] R. W. World, «Iridium Satellite system | Iridium satellite constellation,» *RF Wireless World*, [En línea]. Available: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Iridium-Satellite-System-Constellation.html>.
- [88] Iridium, «What is a Hosted Payload?,» *Iridium*, 21 abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.iridium.com/blog/what-is-a-hosted-payload-iridium-aireon/>.
- [89] G. D. Krebs, «Iridium-NEXT,» *Gunter's Space Page*, 5 octubre 2023. [En línea]. Available: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/iridium-next.htm.
- [90] A. Eames, «Iridium to revolutionize global air traffic surveillance with the launch of Aireon,» 19 junio 2012. [En línea]. Available: <https://web.archive.org/web/20150321043202/http://www.aireon.com/NewsEvents/NewsReleases/NewsReleaseDetail?pid=18>.
- [91] Exact Earth, «exactEarth and Harris Corporation Form Strategic Alliance to Provide Real-Time Global Maritime Tracking and Information Solutions,» 8 junio 2015. [En línea]. Available: <http://investors.exactearth.com/2015-06-08-exactEarth-and-Harris-Corporation-Form-Strategic-Alliance-to-Provide-Real-Time-Global-Maritime-Tracking-and-Information-Solutions>.
- [92] C. Gebhardt, «Iridium marks major milestone with maritime safety, breaks monopoly,» *Nasa Space Flight*, 2020. [En línea]. Available: <https://www.nasaspaceflight.com/2020/01/iridium-milestone-maritime-safety-breaks-monopoly/>.
- [93] S. Erwin, «U.S. Army selects Iridium to develop payload for low Earth orbit satellite navigation system,» *Space News*, 24 junio 2021. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/u-s-army-selects-iridium-to-develop-payload-for-low-earth-orbit-satellite-navigation-system/>.
- [94] SpaceX, «Starlink,» [En línea]. Available: <https://www.starlink.com/>.
- [95] J. McDowell, «Starlink Statistics,» *Jonathan's Space Pages*, 4 noviembre 2023. [En

- línea]. Available: <https://planet4589.org/space/con/star/stats.html>.
- [96] FCC, «FCC Authorizes SpaceX to Provide Broadband Satellite Services,» 29 marzo 2018. [En línea]. Available: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-18-38A1.pdf>.
- [97] FCC, «Order and authorization,» 26 abril 2019. [En línea]. Available: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20181108-00083/1666723.pdf>.
- [98] eoPortal, «Starlink Satellite Constellation,» 24 mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/starlink#background>.
- [99] D. Heaven, «The first detailed look at how Elon Musk's space internet could work,» 7 noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.newscientist.com/article/mg24032033-300-the-first-detailed-look-at-how-elon-musks-space-internet-could-work/>.
- [100] FCC, «FCC Partially Grants SpaceX Gen2 Broadband Satellite Application,» 29 noviembre 2022. [En línea]. Available: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-22-91A1.pdf>.
- [101] FCC, «Order and authorization and order on reconsideration,» 23 abril 2021. [En línea]. Available: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-21-48A1.pdf>.
- [102] «Topic: Starlink : General Discussion,» [En línea]. Available: <https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?topic=36552.2080>.
- [103] Bryce Space and Technology, «Smallsats by the Numbers,» 5 febrero 2020. [En línea]. Available: https://brycetechnology.com/reports/report-documents/Bryce_Smallsats_2020.pdf.
- [104] SpaceX, «Starlink Mission,» 15 mayo 2019. [En línea]. Available: https://www.spacex.com/sites/spacex/files/starlink_press_kit.pdf.
- [105] G. D. Krebs, «Starlink Block v1.0,» Gunter's Space Page, 9 octubre 2023. [En línea]. Available: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v1-0.htm.
- [106] C. Henry, «SpaceX to add sunshades to all future Starlink satellites,» Space News, 27 mayo 2020. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/spacex-to-add-sunshades-to-all-future-starlink-satellites/>.
- [107] S. Clark, «SpaceX to ramp up Vandenberg launch cadence with Starlink missions,» Spaceflight Now, 6 abril 2021. [En línea]. Available: <https://spaceflightnow.com/2021/04/06/spacex-to-ramp-up-vandenberg-launch-cadence-with-starlink-missions/>.
- [108] M. Sheetz, «SpaceX looks to build next-generation Starlink internet satellites after launching 1,000 so far,» CNBC, 29 enero 2021. [En línea]. Available: <https://www.cnbc.com/2021/01/28/spacex-plans-next-generation-starlink-satellites-with-1000-launched.html>.
- [109] E. Ralph, «SpaceX might launch first Starlink Gen2 satellites next week,» Teslarati, 21 diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.teslarati.com/spacex-first-starlink-gen2-satellite-launch-2022/>.
- [110] European Space Agency, «KHT - Krypton Hall Thrusters,» ESA, 6 septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://connectivity.esa.int/projects/kht-krypton-hall-thrusters>.
- [111] D. Patrascu, «Gen2 Starlink Internet Satellites to Hit Orbit Powered by New Argon Hall Thrusters,» Autoevolution, 27 febrero 2023. [En línea]. Available:

- <https://www.autoevolution.com/news/gen2-starlink-internet-satellites-to-hit-orbit-powered-by-new-argon-hall-thrusters-211005.html>.
- [112] L. Głogulskai, «SpaceX Plans to Launch 22 Starlink Satellites, Weather May Cause Delay,» TS2 Space, 29 septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://ts2.space/en/spacex-plans-to-launch-22-starlink-satellites-weather-may-cause-delay/>.
- [113] G. D. Krebs, «USA 320, ..., 323, 328, ..., 331,» 13 octubre 2013. [En línea]. Available: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/usa-320.htm.
- [114] M. Wall, «SpaceX reveals 'Starshield' satellite project for national security use,» space.com, 7 diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.space.com/spacex-starshield-satellite-internet-military-starlink>.
- [115] E. J. Arevalo, «SpaceX Releases 'Starshield' Satellite Services Designed For Government Use To Support National Security,» 2 diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.tesmanian.com/blogs/tesmanian-blog/starshield>.
- [116] M. Merano, «Starlink's Starshield wins contract with US Space Force,» Teslarati, 27 septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.teslarati.com/spacex-starshield-us-space-force/>.
- [117] S. Erwin, «SpaceX providing Starlink services to DoD under 'unique terms and conditions',» Space News, 3 octubre 2023. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/spacex-providing-starlink-services-to-dod-under-unique-terms-and-conditions/>.
- [118] E. Arevalo, «SpaceX's Starlink 'UFO on a stick' User Terminal Prototypes Revealed In Photos,» 19 junio 2020. [En línea]. Available: <https://www.tesmanian.com/blogs/tesmanian-blog/ufo-starlink-terminal>.
- [119] M. Frąckiewicz, «How does Starlink terminals work?,» TS2 Space, 5 marzo 2023. [En línea]. Available: <https://ts2.space/en/how-does-starlink-terminals-work/>.
- [120] L. Wouters, «Glitched on Earth by Humans: A Black-Box Security Evaluation of the SpaceX Starlink User Terminal,» de *Black Hat USA*, 2022.
- [121] M. Sheetz, «SpaceX no longer taking losses to produce Starlink satellite antennas, a key step to improving profitability,» CNBC, 13 septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.cnbc.com/2023/09/13/spacex-no-longer-taking-losses-to-produce-starlink-satellite-antennas.html>.
- [122] Starlink, «Specifications,» [En línea]. Available: <https://www.starlink.com/specifications>.
- [123] J. Rainbow, «All future Starlink satellites will have laser crosslinks,» Space News, 26 agosto 2021. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/all-future-starlink-satellites-will-have-laser-crosslinks/>.
- [124] FCC, «In the Matter of Kuiper Systems LLC Application for Authority to Deploy and Operate a Ka-band Non-Geostationary Satellite Orbit System,» 30 julio 2020. [En línea]. Available: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-20-102A1.pdf>.
- [125] Kuiper Systems LLC, «Application of Kuiper Systems LLC for Authority to Launch and Operate a Non-Geostationary Satellite Orbit System in Ka-band Frequencies,» Kuiper

- Systems LLC, 4 julio 2019. [En línea]. Available: <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20190704-00057/1773885>.
- [126] G. D. Krebs, «KuiperSat 1, 2,» Gunter's Space Page, 7 octubre 2023. [En línea]. Available: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/kuipersat-1.htm.
- [127] R. Jewett, «ULA Launches the First 2 Kuiper Prototype Satellites for Amazon,» Via Satellite, 6 octubre 2023. [En línea]. Available: <https://www.satellitetoday.com/launch/2023/10/06/ula-set-to-launch-the-first-2-kuiper-prototype-satellites-for-amazon/>.
- [128] Amazon, «Here's your first look at Project Kuiper's low-cost customer terminals,» 14 marzo 2023. [En línea]. Available: <https://www.aboutamazon.com/news/innovation-at-amazon/heres-your-first-look-at-project-kuipers-low-cost-customer-terminals>.
- [129] D. Etherington, «Amazon's Project Kuiper has developed a small, low-cost customer terminal for its broadband satellite network,» 16 diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://techcrunch.com/2020/12/16/amazons-project-kuiper-has-developed-a-small-low-cost-customer-terminal-for-its-broadband-satellite-network/>.
- [130] A. S. «Amazon receives FCC approval for Project Kuiper satellite constellation,» 31 julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.aboutamazon.com/news/company-news/amazon-receives-fcc-approval-for-project-kuiper-satellite-constellation>.
- [131] A. Alamalhodaie, «Amazon is building a \$120M facility in Florida for Project Kuiper satellite processing,» TechCrunch, 21 julio 2023. [En línea]. Available: <https://techcrunch.com/2023/07/21/amazon-is-building-a-120m-facility-in-florida-for-project-kuiper-satellite-processing/>.
- [132] S. Erwin, «Amazon to link Kuiper satellites to DoD's mesh network in space,» SpaceNews, 14 octubre 2022. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/amazon-to-link-kuiper-satellites-to-dods-mesh-network-in-space/>.
- [133] OneWeb, «Our story,» OneWeb, [En línea]. Available: <https://oneweb.net/about-us/our-story>.
- [134] OneWeb, «OneWeb goes bankrupt, lays off staff, will sell satellite-broadband business,» OneWeb, 20 noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://oneweb.net/resources/oneweb-successfully-emerges-chapter-11-announces-new-ceo-and-recommences-satellite>.
- [135] Eutelsat, «Eutelsat Strategy Update on the proposed combination with OneWeb,» 12 octubre 2022. [En línea]. Available: https://www.eutelsat.com/files/PDF/investors/2021-22/PR_121022%20strategic%20update%20Eng%20-%20VF.pdf.
- [136] OneWeb, «OneWeb confirms successful deployment of 16 satellites including next-generation JoeySat,» OneWeb, 20 mayo 2023. [En línea]. Available: <https://oneweb.net/resources/oneweb-confirms-successful-deployment-16-satellites-including-next-generation-joeysat>.
- [137] FCC, «OneWeb Non-Geostationary Satellite System,» 28 abril 2016. [En línea]. Available: <https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?action=dlattach;topic=37814.0;attach=1345367>.

- [138] P. B. de Selding, «Competition To Build OneWeb Constellation Draws 2 U.S., 3 European Companies,» Space News, 19 marzo 2015. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/competition-to-build-oneweb-constellation-draws-2-u-s-3-european-companies/>.
- [139] SatNews, «OneWeb's New, Small, User Terminal Debuts,» SatNews, 24 agosto 2021. [En línea]. Available: <https://news.satnews.com/2021/08/24/onewebs-new-small-user-terminal-debuts/>.
- [140] J. Rainbow, «OneWeb unveils its smallest user terminal for LEO broadband,» Space News, 2021. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/oneweb-unveils-its-smallest-user-terminal-for-leo-broadband/>.
- [141] OneWeb, «OneWeb expands services, launches commercial service across large parts of Europe and the US,» OneWeb, 28 junio 2023. [En línea]. Available: <https://oneweb.net/resources/oneweb-expands-services-launches-commercial-service-across-large-parts-europe-and-us>.
- [142] T. Breton, «Welcome to IRIS², Europe's new Infrastructure for Resilience, Interconnection & Security by Satellites,» European Commission, 17 noviembre 2022. [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/STATEMENT_22_6999.
- [143] Latvian space sector, «Welcome IRIS²: EU's new communication satellite infrastructure,» Latvian space sector, 2023. [En línea]. Available: <https://latviaspace.gov.lv/en/news-events/welcome-iris-eus-new-communication-satellite-infrastructure/>.
- [144] I. Del Castillo, «Hispasat será socio principal del proyecto IRIS², el 'starlink' europeo,» Expansion, 2 mayo 2023. [En línea]. Available: <https://www.expansion.com/empresas/tecnologia/2023/05/02/64512e81e5fdea293a8b4612.html>.
- [145] Redacción, «Airbus, Eutelsat, Hispasat, SES y Thales buscan construir la constelación IRIS²,» Panorama Audiovisual, 3 mayo 2023. [En línea]. Available: <https://www.panoramaaudiovisual.com/2023/05/03/airbus-eutelsat-hispasat-ses-thales-constelacion-iris2/>.
- [146] Advanced Television, «EU sets out IRIS² tender rules,» Advanced Television, 19 abril 2023. [En línea]. Available: <https://advanced-television.com/2023/04/19/eu-sets-out-iris2-tender-rules/>.
- [147] T. Breton, «IRIS² Industry Information Day,» 30 marzo 2023. [En línea]. Available: <https://defence-industry-space.ec.europa.eu/system/files/2023-03/IRIS2%20Industry%20Information%20Day%20-%2030%20March%202023.pdf>.
- [148] D. D. I. a. S. (. Contracting authority: European Commission, «Concession contract for the implementation of the Union Secure Connectivity Programme,» [En línea]. Available: <https://etendering.ted.europa.eu/cft/cft-document.html?docId=142389>.
- [149] E. G. Agency, «SPIDER Networks w/ Filkrypto Key Management Plan,» 22 marzo 2023. [En línea]. Available: <https://etendering.ted.europa.eu/cft/cft-document.html?docId=142396>.

- [150] Advanced Television, «EU unveils IRIS² tender documents,» 27 marzo 2023. [En línea]. Available: <https://advanced-television.com/2023/03/27/eu-unveils-iris2-tender-documents/>.
- [151] C. Forrester, «IRIS² Consortium named,» Advanced Television, 2023. [En línea]. Available: <https://advanced-television.com/2023/06/16/iris2-consortium-named/>.
- [152] P. B. de Selding, «EU Iris2 constellation schedule slips; system-level bids now due mid-Feb; selecting NewSpace contractors will take months,» Space Intel Report, 15 diciembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.spaceintelreport.com/eu-iris2-constellation-schedule-slips-system-level-bids-now-due-mid-feb-selecting-newspace-contractors-will-take-months/>.
- [153] M. A. Hallex y T. S. Cottom, «Proliferated Commercial Satellite Constellations: Implications for National Security,» National Defense University Press, 31 marzo 2020. [En línea]. Available: <https://ndupress.ndu.edu/Media/News/News-Article-View/Article/2106495/proliferated-commercial-satellite-constellations-implications-for-national-secu/>.
- [154] S. Erwin, «Army eyes commercial megaconstellations to support its future battlefield network,» Spacenews, 15 octubre 2019. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/army-eyes-commercial-megaconstellations-to-support-its-future-battlefield-network/>.
- [155] T. Hitchens, «Project Blackjack: DARPA's test of satellite laser links delayed,» Breaking defense, 15 marzo 2023. [En línea]. Available: <https://breakingdefense.com/2023/03/project-blackjack-darpas-test-of-satellite-laser-links-delayed/>.
- [156] T. Vasen, «Mega-Constellations: Commercial Small Satellite Constellation in Low Earth Orbit,» JAPCC, junio 2023. [En línea]. Available: <https://www.japcc.org/essays/mega-constellations/>.
- [157] «Low Earth orbit: disruptive military technologies,» Airforce Technology, 11 junio 2023. [En línea]. Available: https://www.airforce-technology.com/comment/low_earth_orbit_disruptive_military_technologies/?cf-view.
- [158] U.S. Space Force, «GPS Interface Specification IS-GPS-200, Revision M - May 2021,» U.S. Space Force, 13 abril 2021. [En línea]. Available: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200M.pdf>.
- [159] A. J. Bell, «Analysis of GPS Satellite Allocation for the United States Nuclear Detonation Detection System (USNDS),» Air Force Institute of Technology, 2 marzo 2002. [En línea]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA401805.pdf>.
- [160] P. Zhang, W. Ding, X. Qu y Y. Yuan, «Simulation Analysis of LEO Constellation Augmented GNSS (LeGNSS) Zenith Troposphere Delay and Gradients Estimation,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 62, pp. 1-12, 2023.
- [161] M. Jiang, H. Qin, Y. Su, F. Li y J. Mao, «A Design of Differential-Low Earth Orbit Opportunistically Enhanced GNSS (D-LoeGNSS) Navigation Framework,» *Remote Sensing*, vol. 15, 2023.
- [162] N. Jardak y R. Adam, «Practical Use of Starlink Downlink Tones for Positioning,» *Sensors*, vol. 23, n° 6, 2023.

- [163] Z. M. Kassas, S. Kozhaya, H. Kanj, J. Saroufim, S. W. Hayek, M. Neinavaie, N. Khairallah y J. Khalife, «Navigation with Multi-Constellation LEO Satellite Signals of Opportunity: Starlink, OneWeb, Orbcomm, and Iridium,» *2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, pp. 338-343, 2023.
- [164] T. Hitchens, «Thompson: AFSPC Will Use Mega Constellations,» *Breaking Defense*, 30 abril 2019. [En línea]. Available: breakingdefense.com/2019/04/thompson-afspc-will-use-mega-constellations.
- [165] «Tracking,» SDA, [En línea]. Available: <https://www.sda.mil/tracking/>.
- [166] SDA, «Space Development Agency Completes Second Successful Launch of Tranche 0 Satellites,» SDA, 2 septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.sda.mil/space-development-agency-completes-second-successful-launch-of-tranche-0-satellites/>.
- [167] C. McFadden, «DARPA launches first, and now only, 'Blackjack' satellites,» *Interesting Engineering*, 14 junio 2023. [En línea]. Available: <https://interestingengineering.com/innovation/darpa-launches-first-blackjack-satellites>.
- [168] Air and Space Intelligence Center, «Competing In Space,» 16 enero 2019. [En línea]. Available: <https://media.defense.gov/2019/Jan/16/2002080386/-1/-1/1/190115-F-NV711-0002.PDF>.
- [169] ESA, «Current ESA Member States,» [En línea]. Available: https://www.esa.int/Education/Current_ESA_Member_States.
- [170] G. Falco, «When Satellites Attack: Satellite-to-Satellite Cyber Attack, Defense and Resilience,» *AIAA 2020-4014. ASCEND 2020*, noviembre 2020.
- [171] W. J. Malik, «Attack Vectors in Orbit: The Need for IoT and Satellite Security,» 6 marzo 2019. [En línea]. Available: https://static.rainfocus.com/rsa/presentations/USA19/2019_USA19_mbs-w03_01_attack-vectors-in-orbit-the-need-for-iot-and-satellite-security.pdf.
- [172] NASIC, «Competing in Space,» diciembre 2018. [En línea]. Available: https://www.nasic.af.mil/Portals/19/documents/Space_Glossy_FINAL--15Jan_Single_Page.pdf?ver=2019-01-23-150035-697.
- [173] Executive Office of the President, «Cybersecurity Principles for Space Systems,» 9 octubre 2020. [En línea]. Available: <https://www.federalregister.gov/documents/2020/09/10/2020-20150/cybersecurity-principles-for-space-systems>.
- [174] D. Jha, N. P. Manti, A. Carlo y L. C. Zarkan, «Safeguarding the Final Frontier: Analyzing the Legal and Technical Challenges to Mega-Constellations,» *Journal of Space Safety Engineering*, 2022.
- [175] Committee on National Security Systems, «Cybersecurity policy for space systems used to support National Security missions,» 6 febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.cnss.gov/CNSS/openDoc.cfm?a=4INkB4EpvRQA8EKA1M3NTw%3D%3D&b=360EA2507F4B4148A0BCBD97B8A5E1B3CC0D1BD1EC4433F3DB0E496BAE018621B8267AC17EB54C9E2298A6754D80F7AB>.
- [176] ESA / Space Safety, «ESA practices cybersecurity,» ESA, 7 noviembre 2019. [En línea]. Available: https://www.esa.int/Space_Safety/ESA_practices_cybersecurity.

- [177] T. E. Schwartzentruber y R. E. Reedy, «Satellite system,» Skeyeon Inc, 22 2 2017. [En línea]. Available: <https://patents.google.com/patent/US10351267B2/en?q=10351267>.
- [178] J. Foust, «FCC approves new orbital debris rule,» Spacenews, 2022. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/fcc-approves-new-orbital-debris-rule/>.
- [179] NASA, «Process for Limiting Orbital Debris,» 2021. [En línea]. Available: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/process_for_limiting_orbital_debris.pdf.
- [180] NASA, «Deorbit Systems,» [En línea]. Available: https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/deorbit-systems#_Toc96425747.
- [181] ITU-R, «Harmful interference to satellite systems,» 30 octubre 2018. [En línea]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/md/15/wrs18/c/R15-WRS18-C-0005!!PDF-E.pdf.
- [182] J. Restrepo, «Radio Regulations,» 4 diciembre 2018. [En línea]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/md/15/wrs18/sp/R15-WRS18-SP-0003!!PDF-E.pdf.
- [183] USTTI, «Project Kuiper,» junio 2023. [En línea]. Available: <https://ustti.org/wp-content/uploads/2023/06/Amazon-USTTI-Training.pdf>.
- [184] A. Omer, A. Kriezis, C. Lisy, K. Fleming, P. Post y W. Q. Lohmeyer, «Home » A Review of the Current Broadband Satellite Communications Market A Review of the Current Broadband Satellite Communications Market,» 10 febrero 2023. [En línea]. Available: <https://www.microwavejournal.com/articles/39582-a-review-of-the-current-broadband-satellite-communications-market?page=2>.
- [185] ECC, «ECC Decision (15)04,» 20 noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://docdb.cept.org/download/1496>.
- [186] FCC, «Federal Communications Commission (FCC),» [En línea]. Available: <https://www.usa.gov/agencies/federal-communications-commission#:~:text=The%20Federal%20Communications%20Commission%20regulates,a%20robust%20and%20competitive%20market>.
- [187] A. Kriezis y W. Q. Lohmeyer, «U.S. Market Access Authorization Timeline Analysis for Megaconstellation Networks,» abril 2022. [En línea]. Available: <blob:https://wixlabs-pdf-dev.appspot.com/de0892e3-d57b-4f33-88c3-2cdef5840939>.
- [188] «House committee leaders introduce bipartisan bills to update satellite rules,» Space News, 9 diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/house-committee-leaders-introduce-bipartisan-bills-to-update-satellite-rules/>.
- [189] R. Jewett, «FCC Makes Changes to Satellite Application Processing,» Satellite Today, 21 septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.satellitetoday.com/government-military/2023/09/21/fcc-makes-changes-to-satellite-application-processing/>.
- [190] J. Rainbow, «Starlink and OneWeb reach spectrum coordination plan,» Space News, 14 junio 2022. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/starlink-and-oneweb-reach-spectrum-coordination-plan/>.
- [191] J. Rainbow, «Amazon and Telesat coordinate their planned NGSO constellations,» Space News, 21 septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/amazon-and-telesat-coordinate-their-planned-ngso-constellations/>.

- [192] «47 CFR § 25.164 - Milestones,» Cornell University, 27 agosto 2003. [En línea]. Available: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/47/25.164>.
- [193] S. Clark, «SpaceX sends 40 more OneWeb internet satellites into orbit,» Spaceflight Now, 10 enero 2023. [En línea]. Available: <https://spaceflightnow.com/2023/01/10/falcon-9-oneweb-16-live-coverage/>.
- [194] T. Brown, «Ukraine Symposium – The Risk of Commercial Actors in Outer Space Drawing States into Armed Conflict,» Lieber Institute, 22 julio 2022. [En línea]. Available: <https://lieber.westpoint.edu/commercial-actors-outer-space-armed-conflict/>.
- [195] S. Erwin, «U.S. general: Starlink in Ukraine showing what megaconstellations can do,» Space News, 8 marzo 2022. [En línea]. Available: <https://spacenews.com/u-s-general-starlink-in-ukraine-showing-us-what-megaconstellations-can-do/>.
- [196] T. Brown, «Can Starlink Satellites Be Lawfully Targeted?,» Lieber Institute, 5 agosto 2022. [En línea]. Available: <https://lieber.westpoint.edu/can-starlink-satellites-be-lawfully-targeted/>.

ANEXO I: ACRÓNIMOS

3GPP - 3rd Generation Partnership Project
ACM – Adaptive Coding and Modulation
ADS-B – Automatic Dependent Surveillance–Broadcast
AIS – Automatic Identification System
AR – Augmented Reality
ASAT – Anti-satellite Weapon
AWS – Amazon Web Services
B2B – Business-to-Business
B2C – Business-to-consumer
BIU – Bringing into Use
BPSK – Binary Phase Shift Keying
CAV – Connected and Autonomous Vehicles
CDN – Content Delivery Network
CEPT – European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CNSS – Committee on National Security Systems
COTS – Commercial Off the Shelf
DARPA – Defense Advanced Research Projects Agency
ECC – Electronic Communications Committee
ELINT – Electronic Intelligence
EPFD – Equivalent Power-flux Density
ESA – Electronically Steerable Antenna
ESA – European Space Agency
ESEC – European Space Security and Education Centre
ESOMP – Earth Stations on Mobile Platforms
EUSST – EU Space Surveillance and Tracking
FCC – Federal Communications Commission
FDMA – Frequency-division Multiple Access
FMC – Forward Motion Compensation
FSO – Free Space Optical
FSS – Fixed Satellite Service
GEO – Geosynchronous Equatorial Orbit
GMDSS – Global Maritime Distress and Safety System
GNSS – Global Navigation Satellite System
GPS – Global Positioning System

GSD – Ground Sampling Distance
GSO – Geostationary Orbit
HDEV – High-Definition Live Streaming Video of the Earth
HEO – Highly Elliptical Orbit
HPA - Hosted Payload Alliance
IADC – Inter-Agency Space Debris Coordination Committee
ICBM – Intercontinental Ballistic Missile
IoT – Internet of Things
ISL – Inter-satellite Link
ISR – Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance
ISS – International Space Station
IT – Information Technology
ITU – International Telecommunications Union
IXP – Internet Exchange Point
LEO – Low Earth Orbit
LDPC - Low-density Parity-check
M2M - Machine-to-machine
MEO – Medium Earth Orbit
MIDAS – Missile Defense Alarm System
MIFR – Master International Frequency Register
MSS – Mobile Satellite Service
NASA – National Aeronautics and Space Administration
NASIC – National Air and Space Intel Center
NATO – North Atlantic Treaty Organization
NDSA – National Defense Space Architecture
NGSO – Non-Geostationary Orbit
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
NTN – Non-Terrestrial Network
ODPO – Orbital Debris Program Office
OST – Outer Space Treaty
PFD – Power Flux-density
PLEO – Proliferated Low Earth Orbit
PNT – Position, Navigation & Timing
PSTN – Public Switched Telephone Network
QoS - Quality of Service

QPSK – Quadrature Phase Shift Keying
RTK – Real-time Kinematic Positioning
SAR – Synthetic-aperture Radar
SATCOM – Satellite Communications
SATNAV – Satellite Navigation
SBD – Short Burst Data
SBIRS – Space Based Infrared System
SCTDMA – Single Carrier TDMA
SDA – Space Development Agency
SDN – Software-defined Networking
SEND – Satellite Emergency Notification Device
SIGINT – Signals Intelligence
SMS – Short Message Service
TDM – Time Division Multiplexing
TDMA – Time Division Multiple Access
THEO – Twelve Hours Eccentric Orbit
TT&C – Telemetry, Tracking and Command
UTC – Universal Coordinated Time
VLEO – Very Low Earth Orbit
VR – Virtual Reality
WAN – Wide-area Network
WRC – World Radiocommunication Conference