



Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

USO Y ADAPTACIÓN DEL SISTEMA STARLINK EN LOS BUQUES DE LA ARMADA

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa

ALUMNO: Ricardo Fonticoba Abrodes

DIRECTORES: José María Núñez Ortuño

**CURSO
ACADÉMICO:** 2024-2025

Universida_{de}Vigo

PÁGINA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO



Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

USO Y ADAPTACIÓN DEL SISTEMA STARLINK EN LOS BUQUES DE LA ARMADA

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa

Especialidad de Sistemas y Tecnologías de Telecomunicación

UniversidadeVigo

PÁGINA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

RESUMEN

Las comunicaciones vía satélite que actualmente poseen los buques de la Armada se basan fundamentalmente en un sistema militar (SECOMSAT) y en un sistema civil de respaldo (normalmente proporcionado por Inmarsat Global Xpress - IGX) que le da la cobertura y redundancia necesaria para mantener las comunicaciones satelitales en cualquier zona del Planeta.

En este trabajo de fin de Máster, se enfoca en los distintos sistemas de comunicaciones satelitales con que se equipan los buques de la Armada. Comenzaremos con los servicios que ofrece el sistema SECOMSAT, continuaremos con el servicio de respaldo proporcionado por Inmarsat Global Express (IGX), y finalizaremos con el innovador servicio que proporciona Starlink, utilizado tanto para el Servicio de Apoyo al Personal en Zona de Operaciones (SAPZO)¹ como para el respaldo de los servicios de Mando y Control².

El trabajo comienza con una reseña histórica de las comunicaciones militares hasta la irrupción de los sistemas satelitales en los buques de la Armada. Llegaremos a los satélites de uso militar que dan servicio al Ministerio de Defensa español y finalizaremos con los novedosos sistemas satelitales de órbita baja o LEO “Low Earth Orbit” en inglés.

Para llevar a cabo el estudio, se ha recopilado información técnica de los buques que ya han desplegado Starlink en Zona de Operaciones. Se analizarán los resultados obtenidos durante los citados despliegues en cuanto a conectividad y calidad del servicio prestado. También se contrastarán las opiniones de las dotaciones de los buques que han embarcado el Sistema y su comparación con el IGX que proporcionaba los servicios civiles de conexión satelital a bordo.

Del análisis de la información recopilada se deducirá que Starlink mejora significativamente la conectividad y operatividad de los buques de la Armada, permitiendo una comunicación más rápida y confiable en cualquier punto del globo. Aunque, al ser un proyecto en pruebas, se ha enfrentado a diferentes retos, como la integración de esta tecnología en los sistemas existentes.

De las conclusiones obtenidas se pretende ofrecer un plan de mejora en la implementación e integración de Starlink en los buques de la Armada, para dotarlos de mayor capacidad de comunicación; así como, otros sistemas satelitales de órbita baja que compitan con la oferta de Starlink.

¹ SAPZO.- consistente en la implantación del sistema Inmarsat Global Xpress (IGX) junto a unos servidores de contenido multimedia para el personal que realiza despliegues de larga duración (entendiendo estos como duración mínima de un mes) a bordo de unidades a flote.

² Servicios de Mando y Control.- son todos aquellos servicios necesarios para proporcionar al mando en tiempo y forma la información necesaria para la conducción de las Operaciones Navales.

PALABRAS CLAVE

Sistema satelital, ancho de banda, SECOMSAT, Starlink e IGX.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor José María, por su inestimable orientación en la elaboración del TFM, sin su ayuda no hubiera sido posible llevarlo a buen puerto.

A mi mujer Encarna, por su paciencia a la hora de soportar mis ausencias debido al nombramiento para este Curso de la Especialidad de Segundo Tramo que incluye este Máster.

Al Teniente Coronel de I.M., Juan Pablo Mesa Fernández, por su paciencia al soportar mi inquisitiva necesidad de información sobre Starlink.

Al personal de Comunicaciones de las fragatas “Navarra” y “Cristóbal Colón” por facilitarme sus experiencias con la puesta en producción del sistema Starlink durante sus despliegues operativos en la SNMG-2.

A mis compañeros del Máster por su generalizada bonomía y compañerismo.

A los profesores que nos han impartido las asignaturas del Máster, por su dedicación y esfuerzo diario en mantener nuestra atención a pesar de estar viendo una pantalla sin apenas interacción por parte de los alumnos. También por hacer lo mas llevaderos posible los periodos presenciales en la Escuela Naval Militar.

Contenido

Índice de figuras	4
Índice de Tablas.....	6
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.	7
1.1 INTRODUCCIÓN	7
1.2 OBJETIVOS	7
2. ESTADO DEL ARTE.....	8
2.1 LAS COMUNICACIONES SATÉLITE	8
2.2 COMUNICACIONES SATELITALES MILITARES	9
2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE SATÉLITE	10
2.3.1 SEGÚN SU ÓRBITA	10
2.3.2 SEGÚN SU EMPLEO/USO.....	12
2.3.3 ORIGEN DE LA COMUNICACIONES SATÉLITE EN ESPAÑA.....	13
2.3.4 SEGMENTO ESPACIAL SISTEMA SECOMSAT	14
2.4 FUTURO DE LAS COMUNICACIONES SATELITALES	18
2.5 RELACIÓN CON LA INVESTIGACIÓN.....	19
2.6 APORTES DEL ESTUDIO	19
2.7 TERMINALES SECOMSAT INSTALADOS EN LOS BUQUES DE LA ARMADA.....	20
2.8 COMUNICACIONES STAÉLITE COMERCIALES UTILIZADOS POR LAS FUERZAS ARMADAS	23
2.8.1 Inmarsat Global Xpres (IGX)	23
2.8.2 IRIDIUM	24
2.8.3 EL SISTEMA STARLINK.....	24
2.8.4 SEGMENTO ESPACIAL STARLINK.....	30
3. USO SE STARLINK EN LOS BUQUES DE LA ARMADA	32
3.1 CÓMO LLEGAMOS A STARLINK	32
3.2 PRUEBAS INICIALES	33
4. RESULTADOS Y VALIDACIONES	35
4.1 PRUEBAS EN LA FRAGATA “NAVARRA”	36
4.2 PRUEBAS EN LA FRAGATA “CRISTÓBAL COLÓN	43

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	48
5.1 CONCLUSIONES	48
5.1.1 PRUEBAS EN LA FRAGATA “NAVARRA”	48
5.1.2 PRUEBAS EN LA FRAGATA “CRISTÓBAL COLÓN”	48
5.1.3 ENCUESTA DE SATISFACCIÓN DEL SERVICIO STARLINK	50
5.2 LÍNEAS FUTURAS	50
6. BIBLIOGRAFÍA.....	53
7. ANEXOS.....	54
Anexo I: TEST SATISFACCIÓN DEL SERVICIO STARLINK	55
Anexo II: TABLA DE MUESTREO DE COBERTURA DURANTE DESPLIEGUE ATALANTA 2023 FRAGATA “NAVARRA”.....	59

PÁGINA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Imagen del Sputnik I, junto a un ingeniero ruso. Fuente.- Wikipedia.	8
Figura 2.- Ilustración de comunicación EME. Fuente.- Abiertas	9
Figura 3.- USS Liberty con su antena parabólica del TRSSCOM, año 1967. Fuente.- Revista General de Marina.....	10
Figura 4.- Ilustración constelaciones satelitales. Fuente.- Abiertas.....	11
Figura 5.- Latencias de retransmisión de datos según la órbita de operación. Fuente.- Tema 1- Sistemas SATCOM – Asignatura Máster: TEL 3. Autor: Jose María Núñez Ortuño.....	12
Figura 6.- Vista artística de un satélite de la serie NATO IV. Fuente.- Revista Aeronáutica y Astronáutica/Diciembre 1991.....	13
Figura 7.- Representación gráfica del satélite SPAINSAT con sus coberturas. Fuente.- Tema 2. - Sistemas SATCOM – Asignatura Máster: TEL 3. Autor: Jose María Núñez Ortuño	15
Figura 8.- Segmento Espacial y Segmento Terreno HISDESAT. Fuente.- https://www.hisdesat.es/satelites_comunic-spainsat/ . Autor: hisdeSAT.....	16
Figura 9.- Representación gráfica del satélite XTAR-EUR con sus coberturas. Fuente.- Tema 2. - Sistemas SATCOM – Asignatura Máster: TEL 3. Autor: Jose María Núñez Ortuño	16
Figura 10.- Representación del satélite SPAINSAT NG. Fuente.- https://www.hisdesat.es/satelites_comunic-spainsat/ . Autor: hisdeSAT.....	17
Figura 11.- Representación gráfica del concepto de “Beam-hopping”. Fuente.- Tema 2. - Sistemas SATCOM – Asignatura Máster: TEL 3. Autor: Jose María Núñez Ortuño.....	18
Figura 12.- Comparativa latencias satélites GEO y LEO (Starlink). Fuente: https://www.starlink.com/es/technology . Última visita: 12/11/2024.....	25
Figura 13.- Antena Starlink instalada en buque de la Armada. Fuente: Oficial de Comunicaciones de la fragata F-102. Última visita: 12/11/2024	26
Figura 14.- Enrutador del kit Starlink. Fuente: https://www.starlink.com/es/technology . Última visita: 12/11/2024.....	27
Figura 15.- Fuente de alimentación del kit Starlink. Fuente: https://www.starlink.com/es/technology . Última visita: 12/11/2024.....	28
Figura 16.- Cable de datos del kit Starlink. Fuente: https://www.starlink.com/es/technology . Última visita: 12/11/2024	29
Figura 17.- Interconexión láser entre satélites Starlink. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 18.- Modelo de satélite Starlink. Fuente: https://www.starlink.com/es/technology . Última visita: 12/11/2024.....	31
Figura 19.- Esquema simplificado del funcionamiento de la red Starlink y frecuencias empleadas en España. Fuente.- https://bandaancha.eu/articulos/starlink-sera-mas-carro-espana-senala-10131 - Última visita.- 04/11/2024	31
Figura 20.- Cobertura servicios Starlink. Fuente.- Fuente: https://www.starlink.com/es/map - Última visita.- 13/11/2024.....	35

Figura 21.- Constelación satélites Starlink. Fuente.- Fuente: https://www.xataka.com/basics/satelites-starlink-que-como-verlos - Última visita.- 13/11/2024	35
Figura 22.- Cobertura del satélite XTAR-EUR.- Fuente: https://www.isdefe.es/files/Cuaderno%20Capacidades.pdf - Última visita.- 14/11/2024	36
Figura 23.- Características de la Antena Starlink de Altas Prestaciones.- Fuente: Informe Núm. 03/2023, de 23 de noviembre de 2023, del CF., Comandante de la fragata “Navarra”	37
Figura 24.- Arquitectura de Red Starlink.- Fuente: Informe Núm. 03/2023, de 23 de nov. de 2023, del CF., Comte. de la fragata “Navarra”	37
Figura 25.- Arquitectura de Red Starlink con Servidor Dell.- Fuente: Informe Núm. 03/2023, de 23 de nov. de 2023, del CF., Comte. de la fragata “Navarra”	39
Figura 26.- Ejemplo de configuración RAID 10 del Servidor Dell.- Fuente: Wikipedia	39
Figura 27.- Captura de pantalla del Aplicativo PROXMOX.- Fuente: https://somebooks.es/cambiar-logos-en-proxmox-ve-8-usando-un-ordenador-con-ubuntu/	40
Figura 28.- Captura de pantalla de “Play Store” de un dispositivo Android.- Fuente: Propia	41
Figura 29.- Cobertura Starlink en Zona Operaciones. Fuente: Informe Núm. 03/2023, de 23 de nov. de 2023, del CF., Comte. de la fragata “Navarra”	41
Figura 30.- Arquitectura de red Respaldo con Starlink. Fuente: PLN-01-24 del CESTIC.- Plan de Transición COMSATCOM - LEO	43
Figura 31.- Instalación antena Starlink en la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque.....	43
Figura 32.- Cobertura antena Starlink en la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque.....	44
Figura 33.- Instalación en local Radio Principal del Sistema Starlink en la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque.....	44
Figura 34.- Instalación en local Radio Principal del Sistema Starlink en la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque.....	45
Figura 35.- Mediciones router Starlink en la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque.....	45
Figura 36.- Test velocidad desde router Starlink en la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque.....	46
Figura 37.- Test velocidad desde router Starlink a toma red Radio Principal de la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque.	46
Figura 38.- Test velocidad desde toma de red Radio Principal a Switch Netgear de distribución de la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque.....	47
Figura 39.- Plan de transición de GEO a LEO en contexto con el Acuerdo Marco de Telecomunicaciones. Fuente: PLN-01-24 del CESTIC – Plan de Transición COMSATCOM-LEO.	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Bandas de frecuencia satélites comerciales.	9
Tabla 2.- Bandas de frecuencia satélites militares.....	14
Tabla 3.- Terminales navales satélite instalados en los buques de la Armada.	22
Tabla 4.- Características técnicas del Servidor DELL R620 8SFF.	38
Tabla 5.- Tabla de concesión de cupo de datos según Operación/tipo de buque.	42
Tabla 6.- Resultados pruebas con Starlink como sistema de respaldo.	49

1.INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

1.1 INTRODUCCIÓN

El uso de comunicaciones satelitales en la Armada ha evolucionado significativamente desde sus primeros sistemas hasta la implementación de soluciones avanzadas como Starlink. Este sistema, desarrollado por SpaceX, ofrece servicios de internet de alta velocidad, baja latencia y cobertura global mediante satélites en órbita baja (LEO). En este contexto, la Armada busca integrar Starlink en sus buques como una solución innovadora para mejorar la conectividad en zonas de operaciones, complementando y, en algunos casos, superando las capacidades de los sistemas tradicionales como SECOMSAT e Inmarsat Global Xpress (IGX).

El trabajo analiza la implementación de Starlink en buques de la Armada, explorando su impacto en las comunicaciones militares y civiles, especialmente en entornos de alta demanda y condiciones operativas desafiantes. El objetivo es evaluar la viabilidad técnica y operativa de esta tecnología, así como proponer mejoras para su integración y uso efectivo en el contexto naval.

1.2 OBJETIVOS

Este Trabajo de Fin de Máster se centra solamente en los sistemas de comunicaciones satelitales, sin querer entrar en detalles propios de la industria aeroespacial, a los que sólo se hará referencia para acotar los tiempos de vida de los satélites.

Los objetivos que se pretenden alcanzar, son los siguientes:

- Evaluar las capacidades de Starlink en comparación con los sistemas satelitales actuales (SECOMSAT e IGX), considerando parámetros como la latencia, el ancho de banda y la confiabilidad en las comunicaciones en escenarios marítimos.
- Analizar la experiencia de uso de las dotaciones de los buques que han implementado Starlink, evaluando su impacto en términos de operatividad y calidad de la vida a bordo.
- Identificar retos y oportunidades en la integración de Starlink con los sistemas de mando y control existentes en la Armada.
- Proponer recomendaciones y un plan de mejora para optimizar la implementación de Starlink y otros sistemas LEO en buques de la Armada.
- Explorar el potencial futuro de los sistemas satelitales de órbita baja como herramienta estratégica en las comunicaciones militares y civiles.

Este trabajo aspira a contribuir al desarrollo de soluciones tecnológicas que refuercen la capacidad operativa y estratégica de la Armada en un entorno global cada vez más dependiente de comunicaciones vía satélite.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 LAS COMUNICACIONES SATÉLITE

Las comunicaciones por satélite comenzaron a desarrollarse en el contexto de la carrera espacial y los avances tecnológicos posteriores a la Segunda Guerra Mundial. El verdadero punto de partida fue en 1957, cuando la Unión Soviética lanzó el Sputnik 1 (Figura 1), el primer satélite artificial de la historia, el 4 de octubre en un cohete soviético R-7. Orbitaba la Tierra en 96 segundos a unos 29.000 kilómetros por hora. El satélite era esférico de 58 centímetros de diámetro y con un peso de 83 kilogramos. Completó 1.440 órbitas antes de su reentrada, quemándose en este proceso el 4 de enero de 1958.

Poseía cuatro antenas, dos de 2,89 metros y dos de 2,38 metros de longitud. Aunque este satélite solo emitía señales simples, abrió la puerta a la posibilidad de utilizar satélites para las comunicaciones a larga distancia. [1]



Figura 1.- Imagen del Sputnik I, junto a un ingeniero ruso. Fuente.- Wikipedia.

Después del Sputnik, el primer gran avance tecnológico vino con el lanzamiento del TELSTAR I en 1962, un satélite activo que permitió por primera vez la transmisión de televisión y llamadas telefónicas transatlánticas. Este hito marcó el comienzo de las comunicaciones globales por satélite tal como las conocemos hoy. [1].

A partir de aquí, los desarrollos se sucedieron rápidamente. En 1963, el lanzamiento del SYNCOM I, el primer satélite en órbita geoestacionaria, permitió mantener una posición fija sobre la Tierra, lo que facilitó enormemente las comunicaciones continuas sin necesidad de rastrear el satélite. Esta tecnología se consolidó con el INTELSAT I (Early Bird) en 1965, que fue el primer satélite geoestacionario comercial, usado para comunicaciones de larga distancia entre Europa y América.

Este tipo de satélites fue ganando cada vez más importancia, y hoy en día, los satélites geoestacionarios son esenciales para la transmisión de datos, televisión y comunicaciones telefónicas. Con el tiempo, la capacidad de estos satélites ha aumentado enormemente; por ejemplo, el INTELSAT VI, lanzado en 1986, podía gestionar hasta 80.000 canales de voz, una capacidad impensable en los primeros satélites.

Estos satélites comerciales funcionan en tres bandas de frecuencias, llamadas C, Ku y Ka.

Banda	Rango de Frecuencias de operación (GHz)		Longitudes de onda (mm)
	Tx	Rx	
C	5.9 – 6.4	3.7 – 4.2	75,0 – 37,5
Ku	14.0 – 14.5	11.7 – 12.2	15,0 – 7,5
Ka	30.0 – 31.0	20.2 – 21.2	5,0 – 11,3 (microondas)

Tabla 1.- Bandas de frecuencia satélites comerciales.

2.2 COMUNICACIONES SATELITALES MILITARES

Como en casi todos los ámbitos, los experimentos militares sirven de punto de partida para que se desarrolle una tecnología que después sea utilizable en el ámbito civil. Este es el caso de las comunicaciones satélite. En la década de los años 60, se realizaron importantes experimentos que demostraron que era posible enviar señales entre continentes usando la Luna como un reflector natural (Figura 2). Este experimento se denominó sistema de comunicación “*Moon Relay*” de la Marina estadounidense, también conocido como Operación “*Moon Bounce*” (Rebote Lunar), que utilizó la ruta EME (Earth-Moon-Earth) para las comunicaciones militares. En enero de 1960 se inauguró el sistema con un enlace mediante rebote lunar entre Hawái y Washington D.C.

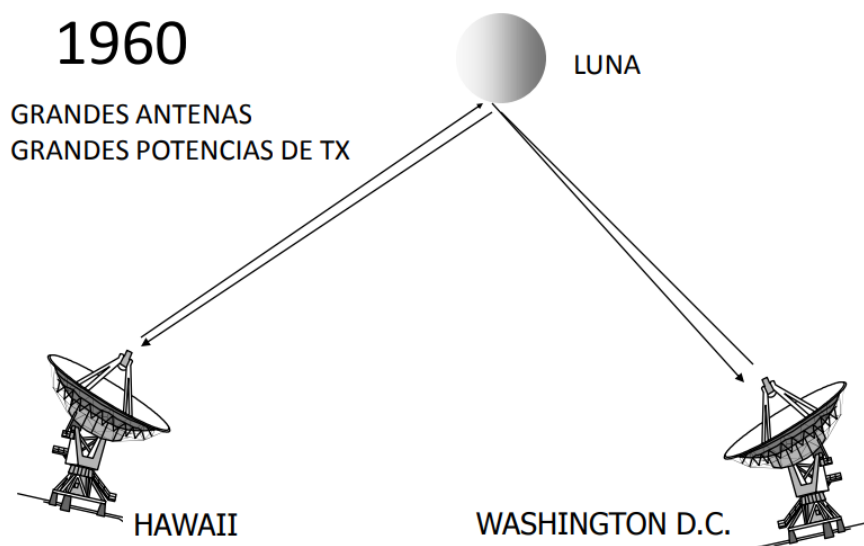


Figura 2.- Ilustración de comunicación EME. Fuente.- Abiertas

Este programa fue abandonado por la US Navy con la llegada de los satélites de comunicaciones entre la década de los años 60 y 70, aunque su uso militar se mantuvo unos años como demuestra la instalación de antenas parabólicas en buques de la armada estadounidense (Figura 3).



Figura 3.- USS Liberty con su antena parabólica del TRSSCOM³, año 1967. Fuente.- Revista General de Marina.

La primera generación de satélites de comunicación de uso exclusivo militar fueron los NATO 2A y 2B. Pertenecían a la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN). Tanto el programa de satélites Skynet-1 del Reino Unido como el de la OTAN, NATO-2, fueron el resultado de la invitación de Estados Unidos para unirse al sistema de satélites de comunicación IDCSP (*Initial Defense Communications Satellite Program*). Los satélites debían ser interoperables con el satélite IDCSP. Este programa se llamó inicialmente IDCSP/A (La “A” es de Ampliado) [2].

2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE SATÉLITE

A continuación se va a realizar una breve descripción de los sistemas de comunicaciones satélite existentes en la actualidad, dando una somera descripción de las características principales de cada uno de ellos, de sus principales funciones de empleo (como se muestra en la Figura 4).

2.3.1 SEGÚN SU ÓRBITA

Los satélites se pueden clasificar en relación a su órbita de operación:

- **GEO:** Geostationary Earth Orbit (su órbita se sitúa a 35.786 Km de altura).
 - El tipo de órbita que describe es circular en el plano ecuatorial.
 - Con tres satélites se puede tener cobertura global.
 - El retardo en las comunicaciones es del orden de 250 milisegundos.
 - Estos satélites parecen estar inmóviles en relación a la Tierra.
- **MEO:** Medium Earth Orbit (su órbita se halla entre los 2.000 Km y 36.000 Km de altura).
 - Se requieren doce satélites para tener cobertura global terrestre.
 - Utilizados principalmente para comunicaciones de Voz y móviles.
 - También se encuentran en esta órbita los satélites específicos de geolocalización (GPS, Galileo y Glonas).
- **HEO:** Highly Elliptical Orbit (órbita elíptica entre los 2.000 Km de altura en su Perigeo⁴ y supera con creces los 36.000 Km de altura en su Apogeo⁵).

³ *Technical Research Ship Special Communications* (Comunicaciones Especiales de Barco de Investigación Técnica), o TRSSCOM. Este sistema de comunicaciones mediante rebote lunar empleaba una antena parabólica especial de 4,87 m (6 pies) de diámetro estabilizada por giróscopo, que puede verse detrás de la superestructura principal en la fotografía del USS Liberty. Las señales de radio eran transmitidas hacia la luna, donde rebotaban de vuelta a la Tierra y eran captadas por una gran antena parabólica de 19,5 m (64 pies) de diámetro en la Estación Naval de Comunicaciones de Cheltenham, Maryland (cerca de Washington D. C.) o la de Wahiawa, Hawái.

⁴ Perigeo.- Es el punto de la órbita más cercano a la Tierra.

⁵ Apogeo.- Es el punto de la órbita más lejano a la Tierra.

- Estos satélites no siguen una órbita circular, sino que su órbita es elíptica de inclinación 63° (también se le denomina órbita Molniya⁶).
 - Al tener órbita elíptica estos satélites sobrevuelan durante más tiempo las zonas del planeta que coinciden con su órbita más lejana, lo que es muy útil para las comunicaciones y la observación.
 - Utilizados principalmente para comunicaciones de Voz y móviles.
 - También se encuentran en esta órbita los satélites específicos de localización (GPS, Galileo y Glonas).
- **LEO:** Low Earth Orbit (órbita comprendida entre los 160 Km y los 2.000 Km de altura).
- Necesitan más de 50 satélites para poder tener cobertura global.
 - Principalmente utilizados en experimentación científica (ISS).
 - También se utilizan para seguimiento de la situación atmosférica (NOAA).
 - Existen satélites dedicados al rescate y vigilancia (Landsat y SPOT).
 - Cada vez con mayor auge, los utilizados para comunicaciones móviles (Starlink, OneWeb, Globalstar, Orbcomm, Iridium, etc.).
 - Estos satélites se mueven a velocidades orbitales muy altas (27.600 Km/h la Estación Espacial Internacional que se encuentra en esta órbita) para contrarrestar la atracción terrestre y evitar que se desvíen de su órbita por este motivo.

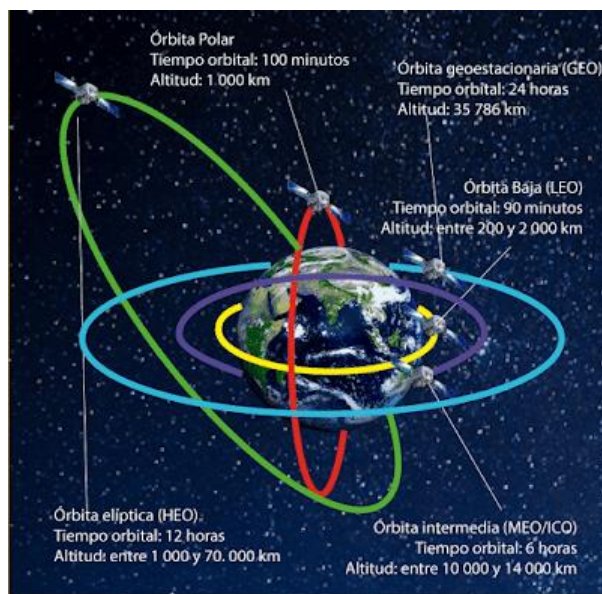


Figura 4.- Ilustración constelaciones satelitales. Fuente.- Abiertas.

En función de la órbita en la que operen estos satélites, varía la latencia con la que retransmiten la información (Figura 5):

⁶ Molniya.- es un tipo de órbita satelital diseñada para proporcionar comunicaciones y cobertura de detección remota en latitudes altas. El nombre proviene de los satélites Mólniya, una serie de satélites de comunicaciones civiles y militares soviéticos/rusos que han utilizado este tipo de órbita desde mediados de la década de 1960.

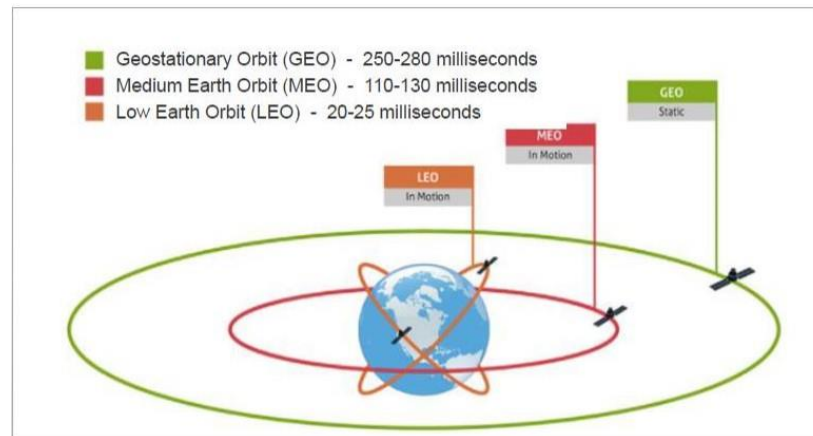


Figura 5.- Latencias de retransmisión de datos según la órbita de operación. Fuente.- Tema 1- Sistemas SATCOM – Asignatura Máster: TEL 3. Autor: Jose María Núñez Ortuño [5]

2.3.2 SEGÚN SU EMPLEO/USO

En la década de los 60, Estados Unidos desarrolló una red avanzada de satélites de comunicaciones militares que le permitió mantener unas comunicaciones fiables y seguras entre el mando y las tropas desplegadas, en zonas remotas del mundo en donde las comunicaciones radio tradicionales no llegaban.

Los satélites **I.D.S.C.S. (Initial Defence Satellite Communications System)** fueron los primeros en establecer un sistema global de telecomunicaciones seguras. Estos satélites operaban mediante un sistema de transmisión en múltiples frecuencias.

En el marco de la OTAN, se diseñaron los satélites **NATO-1** y **NATO-2**, compatibles con los satélites I.D.S.C.S., con un motor de apogeo que les permitió posicionarse en órbitas geosincrónicas. Estaban equipados con canales de comunicación que operaban en frecuencias entre **7.257,3 MHz y 7.286,4 MHz**, lo que garantizaba enlaces de alta calidad entre Turquía y la costa oeste de Estados Unidos. Estas frecuencias permitieron transmisiones de datos y voz seguras, esenciales para las operaciones transatlánticas de los aliados.

La segunda generación de satélites, los **NATO-III**, incrementó significativamente las capacidades de comunicación. Equipados con tres canales independientes en la banda **SHF (Super High Frequency)**, estos satélites podían manejar cientos de transmisiones simultáneas, incluyendo emisiones telegráficas, voz amplificada y facsímiles. Además, integraron tecnologías para aumentar el alcance y la estabilidad de las transmisiones, lo que mejoró la interoperabilidad con los sistemas estadounidenses **D.S.C.S. II** y más tarde **D.S.C.S. III**.

La tercera generación, los **NATO-IV** (Figura 6), representó un salto cualitativo en las comunicaciones militares. Estos satélites empleaban una innovadora antena helicoidal para la transmisión en banda **UHF**, diseñada especialmente para comunicarse con submarinos. Simultáneamente, sus antenas parabólicas proporcionaban cobertura terrestre en banda **SHF**, posibilitando comunicaciones estratégicas y tácticas. El diseño de sus sistemas les permitió mantener enlaces estables y eficientes, garantizando una comunicación constante entre las bases terrestres, sus aliados de la OTAN.

Estos satélites destacaron por su capacidad de mantener un canal de comunicación global y seguro, gestionando simultáneamente comunicaciones tácticas (submarinos, buques) y estratégicas (enlaces entre naciones y mandos aliados). Su tecnología de estabilización y orientación hacia la Tierra aseguraba un servicio ininterrumpido, mientras que las frecuencias utilizadas y los sistemas redundantes permitieron su operatividad en situaciones críticas [3].

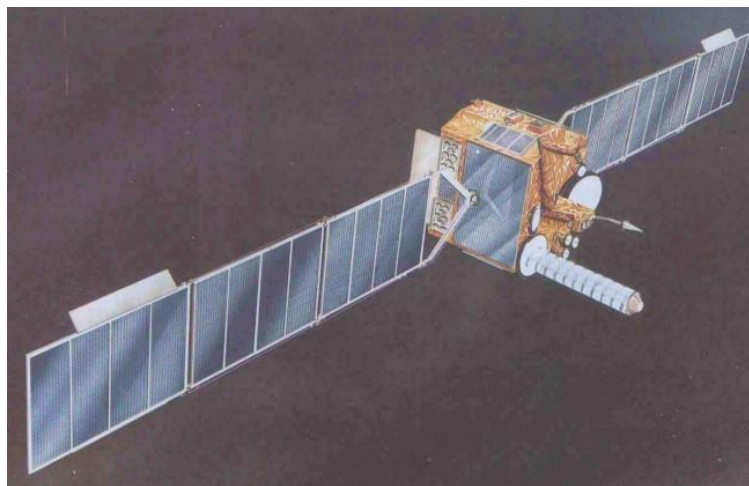


Figura 6.- Vista artística de un satélite de la serie NATO IV. Fuente.- Revista Aeronáutica y Astronáutica/Diciembre 1991 [3].

2.3.3 ORIGEN DE LA COMUNICACIONES SATÉLITE EN ESPAÑA

Para España, el punto de inflexión en las comunicaciones satelitales militares fue el aprovechamiento de dos satélites comerciales el HISPASAT 1A y el 1B (de reserva); a los cuales se les dotó de una carga de pago gubernamental y la formalización con la operadora para utilizar posiciones orbitales y frecuencias exclusivas de la banda X. Esto permitió brindar comunicaciones a las Fuerzas Armadas en zonas de operaciones donde el Sistema de Telecomunicaciones Militares (STM) no llegaba.

Como consecuencia del avance que supuso HISDESAT para las comunicaciones de las Fuerzas Armadas, propició el desarrollo del programa SECOMSAT (Sistema Español de COMunicaciones SATélite) para extender el Sistema Conjunto de Telecomunicaciones Militares (SCTM) a zonas remotas del planeta.

En el año 2001 se pone en marcha el citado programa SECOMSAT, con dos satélites tipo GEO denominados: SPAINSAT y XTAR-EUR.

El XTAR-EUR (29°E)⁷ se puso en órbita en el año 2005 y el SPAINSAT (30°W)⁸ en el año 2006.

Ambos tienen la capacidad de operar en banda X y Ka. La banda X es de uso exclusivo militar y la banda Ka es de servicio intersatélite.

⁷ La designación **29°E** indica la posición orbital geostacionaria del satélite **XTAR-EUR** en relación con el meridiano de Greenwich. Específicamente, significa que el satélite está ubicado a 29 grados al este de dicho meridiano.

⁸ La designación **30°W** indica la posición orbital geostacionaria del satélite **Spainsat** en relación con el meridiano de Greenwich, situándolo a 30 grados al oeste de dicho meridiano.

Banda	Rango de Frecuencias de operación (GHz)		Longitudes de onda (mm)
	Tx	Rx	
X	7.9 – 8.4	7.25 – 7.75	25,0 – 37,5
Ka	30.0 – 31.0	20.2 – 21.2	5,0 – 11,3 (microondas)

Tabla 2.- Bandas de frecuencia satélites militares.

Estas bandas, proporcionan comunicaciones seguras para las Fuerzas Armadas y otros organismos gubernamentales, tanto en territorio nacional como en operaciones internacionales. Son especialmente importantes para la Armada, permitiendo la comunicación entre barcos en el mar y el segmento terrestre⁹, así como con fuerzas aliadas (OTAN, EU, etc.) mediante pasarelas terrestres con otros sistemas como la NATO Secret WAN (NSWAN).

Estos satélites no solo aseguran comunicaciones de voz y datos, sino que también son vitales para el mando y control de las operaciones militares. La capacidad de ofrecer enlaces de alta calidad en zonas remotas o en entornos donde la infraestructura terrestre es limitada o inexistente es fundamental para el éxito de las misiones.

La vida útil estimada para estos satélites fue hasta el año 2024. [4]

2.3.4 SEGMENTO ESPACIAL SISTEMA SECOMSAT

El satélite SPAINSAT (representado gráficamente en la Figura 7), propiedad de Hisdesat, es un satélite de comunicaciones de uso militar y gubernamental lanzado el 11 de marzo de 2006, y ubicado en una órbita geoestacionaria a 30° W [2]. Está diseñado para proporcionar servicio de comunicación segura y de alta disponibilidad al Ministerio de Defensa español y otras agencias gubernamentales, utilizando principalmente la banda X, con capacidades adicionales en Banda Ka [3].

Este satélite tenía una vida útil de aproximadamente 15 años, aunque se ha extendido hasta 20 años. Su plataforma, basada en el modelo LS-1300 de Space Systems/Loral, incluye antenas configuradas para ofrecer diferentes tipos de cobertura, incluyendo haces fijos y orientables que permiten adaptar el servicio a las necesidades operativas. Spainsat cuenta con una antena IRMA (In-Orbit Reconfigurable Multi-Beam Antenna), que permite reconfigurar los haces para cubrir distintas zonas estratégicas y gestionar interferencias mediante zonas de sombra (nulling).

Spainsat proporciona cobertura desde su posición orbital a gran parte de Europa, África y América, gracias a sus haces globales y orientables. Dispone de 13 transpondedores de alta potencia: doce en Banda X y uno en Banda Ka, con capacidades de cobertura fija para España y cobertura móvil para zonas operacionales. [3].

⁹ Son todos aquellos equipos, sistemas y dispositivos (fijos o móviles) que permiten la transmisión, recepción y retransmisión de las señales que se dirigen o se reciben de los satélites en órbita.

Este sistema satelital es clave en la arquitectura de comunicaciones de la Armada, integrándose en el sistema SECOMSAT y ofreciendo comunicación segura en zonas estratégicas, lo que refuerza la operatividad y respuesta del Ministerio de Defensa.

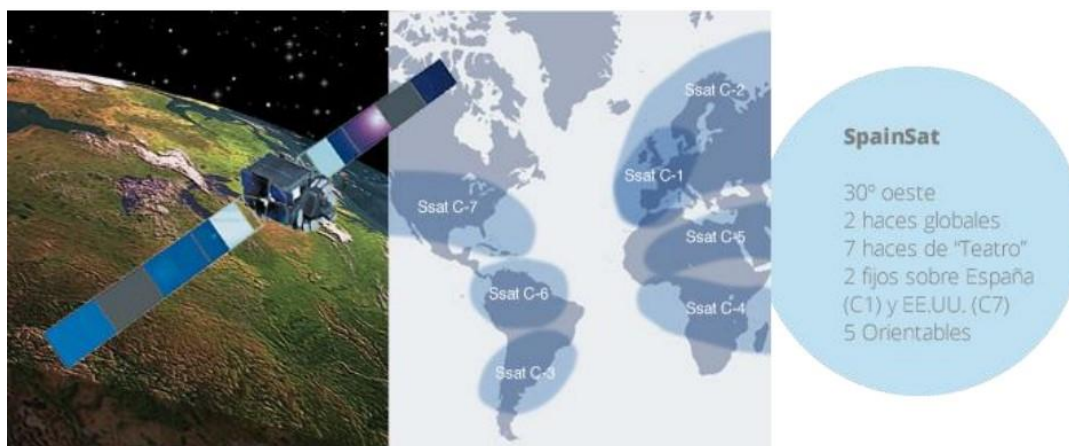


Figura 7.- Representación gráfica del satélite SPAINSAT con sus coberturas. Fuente.- Tema 2. - Sistemas SATCOM – Asignatura Máster: TEL 3. Autor: Jose María Núñez Ortuño [5]

El satélite **XTAR-EUR** (Figura 9), lanzado el 12 de febrero de 2005 y posicionado a 29° E, es otro de los componentes clave de las comunicaciones satelitales estratégicas para el Ministerio de Defensa y otras entidades gubernamentales. Opera conjuntamente con el satélite Spainsat para asegurar la cobertura y redundancia de las citadas comunicaciones militares y gubernamentales.

Fabricado con base en el modelo LS-1300 de Space Systems/Loral, XTAR-EUR está equipado con doce transpondedores de alta potencia en Banda X, destinados a comunicaciones de alta demanda en situaciones de defensa y seguridad [5].

Al igual que el SPAINSAT, el satélite XTAR-EUR contaba con una vida útil estimada de 15 años, que también se ha extendido hasta los 20 años, por lo que se prevé que el año que viene se salga de su órbita, siendo sustituido por los satélites SPAINSAT de Nueva Generación.

Entre sus capacidades de cobertura, proporciona un haz fijo (C1) que ilumina el hemisferio visible desde su posición, lo que le permite asegurar la conectividad continua en áreas operativas clave desde latitudes de hasta 70° Norte y Sur. Además, también cuenta con un haz orientable que le otorga flexibilidad adicional para ajustar la cobertura en zonas específicas según las necesidades de la misión. Este diseño permite que XTAR-EUR ofrezca servicios confiables y adaptables en diferentes condiciones y escenarios de despliegue, incrementando la operatividad de las Fuerzas Armadas en zonas alejadas de infraestructura de comunicación terrestre. Además, este satélite incorpora en su carga útil un conjunto de conmutadores y actuadores controlables remotamente que permiten replicar parte de la configuración de la carga útil del satélite SPAINSAT en caso de fallo de éste. [1]

La infraestructura de control de XTAR-EUR está distribuida en estaciones redundantes ubicadas en Ottawa - Canadá, y Hawley - EE.UU. Estas estaciones permiten monitorizar y gestionar el satélite, asegurando la continuidad del servicio y la estabilidad de los enlaces, además de permitir una rápida respuesta ante eventos técnicos. Al igual que el Spainsat, XTAR-EUR está integrado en el sistema **SECOMSAT**, un sistema satelital español que unifica las comunicaciones militares de alta seguridad. Gracias a su estructura y su tecnología de cobertura dual y orientable, XTAR-EUR ha sido

fundamental en las comunicaciones militares de España, ofreciendo una conexión segura y estable en operaciones internacionales, zonas de conflicto y áreas de interés estratégico. [5].

En la imagen que se muestra a continuación, se describen las estaciones de anclaje y Centros de Control que dan servicio a los satélites SPAINSAT y XTAR-EUR (Figura 8).

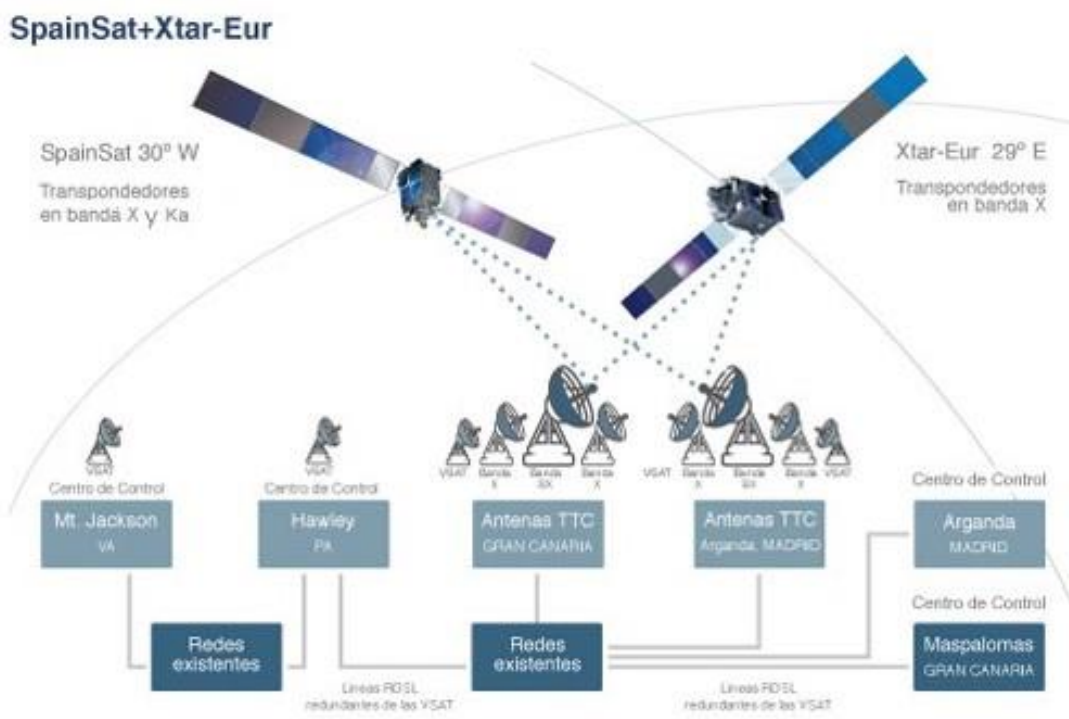


Figura 8.- Segmento Espacial y Segmento Terreno HISDESAT. Fuente.- https://www.hisdesat.es/satelites_comunic-spainsat/[6]. Autor: hisdeSAT

XTAR-EUR y SPAINSAT trabajan en conjunto para proporcionar redundancia en las comunicaciones y asegurar que las operaciones de defensa tengan siempre disponible una conexión segura y eficaz. Esto es fundamental para misiones críticas que dependen de comunicaciones confiables y protegidas contra interferencias, tanto en territorio nacional como en Zonas de Operaciones en cualquier lugar del Globo.



Figura 9.- Representación gráfica del satélite XTAR-EUR con sus coberturas. Fuente.- Tema 2. - Sistemas SATCOM – Asignatura Máster: TEL 3. Autor: Jose María Núñez Ortuño [5]

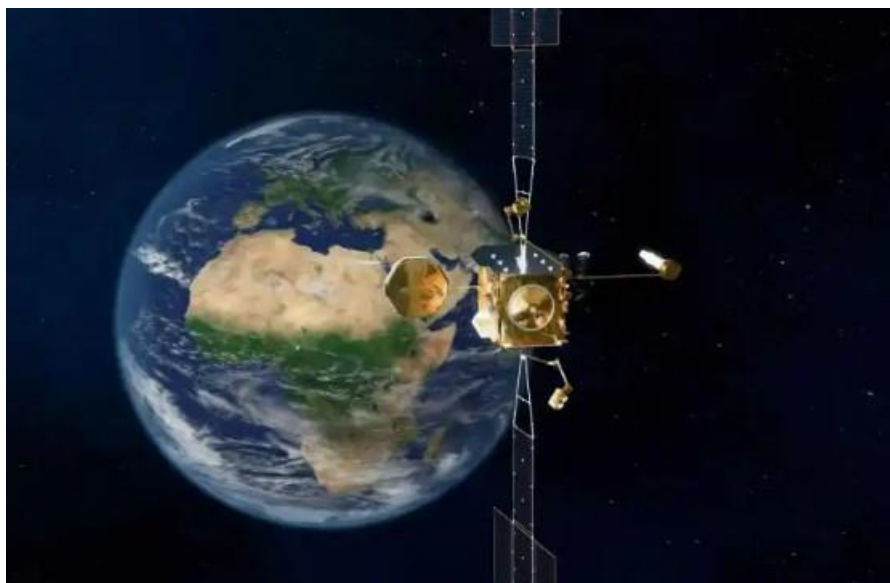


Figura 10.- Representación del satélite SPAINSAT NG. Fuente.- [https://www.hisdesat.es/satelites_comunic-spainsat/\[6\]](https://www.hisdesat.es/satelites_comunic-spainsat/[6]). Autor: hisdeSAT

El nuevo programa denominado SATCOM NG está creado para el desarrollo de los dos nuevos satélites SPAINSAT-NG, como se muestra gráficamente en la Figura 10. Se trata de un programa de satélites de comunicaciones de nueva generación, desarrollado principalmente para asegurar el mando y control efectivos en operaciones de las Fuerzas Armadas, más allá de la línea de visualización en las dos terceras partes de la Tierra; lo que les permitirá tener una cobertura redundante en zonas de interés estratégico. Ha sido gestionado por Hisdesat (Operador de satélites gubernamentales españoles).

El principal objetivo de este nuevo programa es la sustitución de los ya obsoletos satélites SPAINSAT y XTAR-EUR.

El SATCOM NG se compone de dos satélites geoestacionarios, SPAINSAT NG I 30° W y SPAINSAT NG II 29° E, cuya puesta en órbita está prevista para los años 2024 y 2025. Se prevé que tengan una vida útil de 15 años, por lo que se estima que permanezcan en servicio hasta el año 2037.

En cuanto a la fabricación de los citados satélites, más del 40% será desarrollado por la industria nacional, liderada por un consorcio de co-contratistas (las filiales francesa y española de las empresas europeas Airbus D&S y Thales Alenia Space).

En el desarrollo de nuevas aplicaciones y servicios prestados sobre los nuevos satélites se aplican las más novedosas tecnologías de Inteligencia Artificial, Big Data, Internet de las cosas, etc.

Esta nueva generación de satélites incorpora tecnologías avanzadas de protección contra intentos de interferencia (anti-jamming) y de suplantación (anti-spoofing), cruciales para mantener la integridad y la seguridad en las comunicaciones militares. Además, SPAINSAT NG incorpora sistemas de protección frente a fenómenos nucleares a gran altitud (HANE, por sus siglas en inglés; “High Altitude Nuclear Explosions”), asegurando su operatividad en condiciones extremas. [6].

Las bandas en las que van a operar estos satélites son la banda X, Ka militar y UHF, ofreciendo una solución avanzada y flexible.

La inclusión de la banda UHF es una capacidad nueva para los satélites militares españoles, aumentando la cobertura y adaptabilidad para diversos escenarios operacionales. La configuración de este sistema incluye antenas reconfigurables y tecnología de “beam-hopping” en la banda X, lo que

permite redirigir los haces de forma dinámica y optimizar la distribución de la capacidad de transmisión según las necesidades operativas en tiempo real, como así se muestra en la Figura 11.

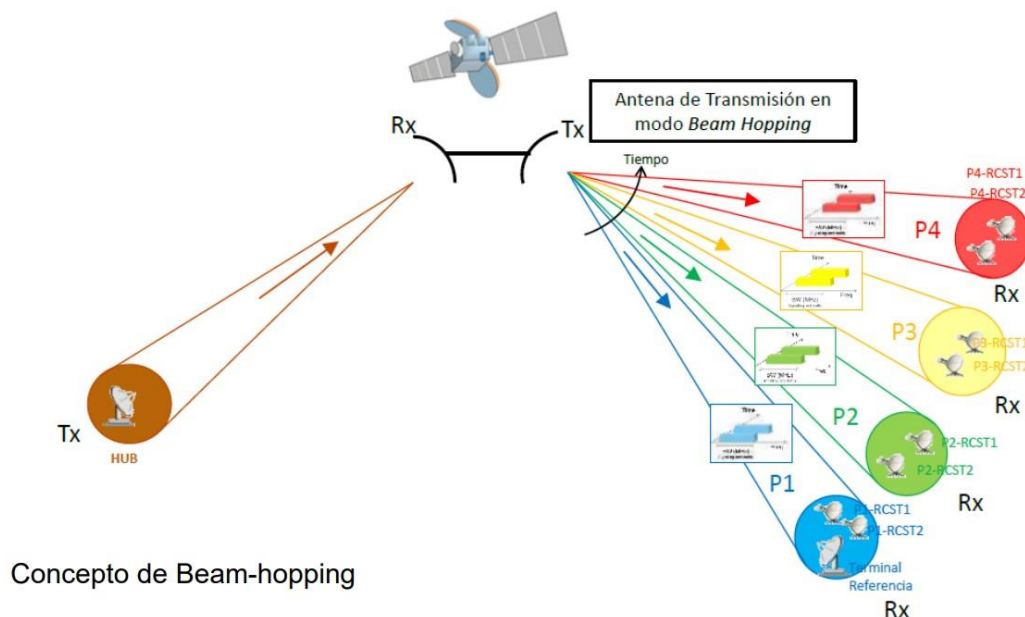


Figura 11.- Representación gráfica del concepto de “Beam-hopping”. Fuente.- Tema 2. - Sistemas SATCOM – Asignatura Máster: TEL 3. Autor: Jose María Núñez Ortuño [5]

Otra de las capacidades que incluyen estos satélites de nueva generación es la conectividad mediante “cross-banding”, permitiendo la interoperabilidad entre las bandas X y Ka militar. Esta tecnología facilita la conexión de enlaces ascendentes y descendentes en ambas bandas, adaptándose a las demandas de conectividad y redundancia en el campo. Asimismo, cuentan también con capacidades avanzadas de geolocalización de interferencias en la banda X, permitiendo la detección y mitigación de señales interferentes mediante el uso de zonas de sombra (nulling) en las bandas X y Ka militar.

2.4 FUTURO DE LAS COMUNICACIONES SATELITALES

El futuro de las comunicaciones satelitales en defensa está lleno de innovaciones tecnológicas que mejorarán la seguridad, capacidad y fiabilidad de las mismas.

Uno de los avances más esperados es el lanzamiento de los satélites geoestacionarios de próxima generación SPAINSAT NG I y II, que se prevé hayan reemplazado a los actuales SPAINSAT y X-TAR EUR en el curso del año 2025. El satélite SPAINSAT NG I, está prevista su puesta en órbita desde Cabo Cañaveral el próximo 28 de enero de 2025 y el SPAINSAT NG II, se prevé que durante los meses de septiembre/octubre de 2025 sea su puesta en órbita.

Esta nueva generación de satélites, multiplican por 16 su capacidad en las bandas X y Ka militar, en comparación con sus predecesores. También añaden una nueva carga útil en banda UHF, capacidad que no tienen otros sistemas en órbita. Esta combinación ofrecerá una mejora significativa en las comunicaciones militares, especialmente en misiones que requieren el envío de grandes volúmenes de datos, como imágenes de alta resolución o videos en tiempo real. Las principales características son:

- Proporcionar flexibilidad en la reconfiguración de coberturas y en las prestaciones, y capacidades de geolocalización y mitigación de interferencias.

- La carga útil de banda Ka militar proporciona haces orientables y semiglobales con flexibilidad en el uso de la potencia.
- La carga útil de banda UHF proporciona 9 portadoras de 25 KHz por satélite.
- La banda X y la banda Ka-mil están interconectadas por medio de un Procesador Digital Transparente.
- La carga de pago de SPAINSAT NG permite la optimización de recursos clave: potencia, espectro y coberturas.

Además, los satélites de nueva generación incorporarán tecnologías como los enlaces intersatélite, que permiten que los satélites se comuniquen entre sí directamente sin necesidad de pasar por estaciones terrestres. Esto no solo reduce la latencia de las comunicaciones, sino que también mejora la seguridad al limitar los puntos vulnerables a posibles ataques.

Otro avance clave será el uso de satélites regenerativos, que procesan las señales a bordo, mejorando la calidad de la transmisión y aumentando la eficiencia del sistema. Esta tecnología será crucial en un futuro donde se espera que los sistemas militares sean cada vez más autónomos y dependan de comunicaciones rápidas y seguras.

Además, se espera que el futuro de las comunicaciones por satélite en defensa dependa de una combinación de satélites en órbitas LEO (baja), MEO (media) y GEO (geoestacionaria), lo que permitirá una cobertura más completa y flexible. Los satélites en órbitas bajas y medias proporcionarán menor latencia y mayor ancho de banda, mientras que los satélites geoestacionarios continuarán ofreciendo cobertura global.

2.5 RELACIÓN CON LA INVESTIGACIÓN

La transición hacia satélites de órbita baja (LEO), como Starlink, responde a una necesidad creciente de redes con mayor velocidad y menor latencia. Starlink, con su constelación global de miles de satélites, ofrece una alternativa que supera los desafíos de los sistemas GEO tradicionales. Su capacidad para mantener conexiones rápidas y estables en zonas de difícil acceso lo convierte en una opción valiosa para la Armada, que enfrenta demandas crecientes de conectividad tanto operativa como de apoyo al personal en misiones internacionales.

En este sentido, este trabajo se centra en analizar cómo Starlink puede integrarse en los sistemas de comunicaciones existentes en los buques de la Armada, evaluando su impacto en términos de operatividad, resiliencia y costos. Al contrastar las capacidades de Starlink con los sistemas SECOMSAT e IGX, se busca establecer recomendaciones para una implementación más efectiva, que aproveche las fortalezas de cada tecnología.

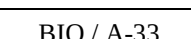
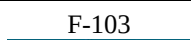
2.6 APORTES DEL ESTUDIO

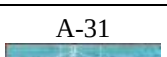
El principal aporte de este trabajo es proporcionar un análisis sistemático del rendimiento de Starlink en entornos marítimos, donde las condiciones operativas son particularmente exigentes. Este estudio incluye:

- Comparación técnica entre Starlink y sistemas previos en términos de latencia, ancho de banda y confiabilidad.
- Evaluación práctica del impacto en las dotaciones de los buques, especialmente en su acceso a redes de esparcimiento y operativas.
- Propuestas de integración para maximizar la interoperabilidad entre sistemas civiles y militares.

2.7 TERMINALES SECOMSAT INSTALADOS EN LOS BUQUES DE LA ARMADA

Prácticamente la totalidad de los buques de la Armada poseen terminal satélite SECOMSAT para proporcionarles cobertura global en las misiones que se les encomienden. En el cuadro que se muestra a continuación se especifican los buques que tienen terminal satélite SECOMSAT y el modelo de terminal que instalan:

NUMERAL DEL BUQUE	NOMBRE DEL BUQUE	TERMINAL SATÉLITE INSTALADO	TAMAÑO DE LA ANTENA
LHD / L-61 	“JUAN CARLOS I”	TNM-180D	1,78 mts.
LPD / L-51 	“GALICIA”	TNM-180D	1,78 mts.
LPD / L-52 	“CASTILLA”	TNM-180D	1,78 mts.
BAC / A-14 	“PATIÑO”	TNBB-178XKA	1,78 mts.
BAC / A-15 	“CANTABRIA”	TNBB-178XKA	1,78 mts.
BIO / A-33 	“HESPÉRIDES”	TNX-75	2,4 mts.
F-101 	“ÁLVARO DE BAZÁN”	TNM-180D	1,78 mts.
F-102 	“ALMIRANTE JUAN DE BORBÓN”	TNM-180D	1,78 mts.
F-103 	“BLAS DE LEZO”	TNM-180D	1,78 mts.
F-104 	“MÉNDEZ NÚÑEZ”	TNM-180D	1,78 mts.
F-105 	“CRISTÓBAL COLÓN”	TNBB-178XKA	1,78 mts.
F-81 	“SANTA MARÍA”	TNBB-178XKA	1,78 mts.

F-82 	“VICTORIA”	TNX-100	0,97 mts.
F-83 	“NUMANCIA”	TNBB-178XKA	1,78 mts.
F-84 	“REINA SOFÍA”	TNX-100	0,97 mts.
F-85 	“NAVARRA”	TNX-100	0,97 mts.
F-86 	“CANARIAS”	TNX-100	0,97 mts.
BAM / P-41 	“METEORO”	TNBB-178XKA	1,78 mts.
BAM / P-42 	“RAYO”	TNX-85	1,37 mts.
BAM / P-43 	“RELÁMPAGO”	TNBB-178XKA	1,78 mts.
BAM / P-44 	“TORNADO”	TNX-85	1,37 mts.
BAM / P-45 	“AUDAZ”	TNM-180D	1,78 mts.
BAM / P-46 	“FUROR”	TNM180D	1,78 mts.
P-71 	“SERVIOLA”	TNX-10	0,6 mts.
P-72 	“CENTINELA”	TNX-10	0,6 mts.
P-73 	“VIGIA”	TNX-10	0,6 mts.
P-74 	“ATALAYA”	TNX-10	0,6 mts.
A-111 	“ALERTA”	TNX-85	1,37 mts.
A-31 	“MALASPINA”	TNX-85	1,37 mts.

M-31 	“SEGURA”	TNX-10	0,6 mts.
M-32 	“SELLA”	TNX-10	0,6 mts.
M-33 	“TAMBRE”	TNX-10	0,6 mts.
M-34 	“TURIA”	TNX-10	0,6 mts.
M-35 	“DUERO”	TNX-10	0,6 mts.
M-36 	“TAJO”	TNX-10	0,6 mts.
A-20 	“NEPTUNO”	TNX-50C	1,47 mts.
S-81 	“ISAAC PERAL”	TSUB-40	0,38 mts.
S-71 	“GALERNA”	TSUB-20	0,195 mts.

Tabla 3.- Terminales navales satélite instalados en los buques de la Armada.

A continuación se presentan algunas características de los terminales más destacados actualmente en uso:

TNX-100: Este terminal naval es uno de los más usados por los buques de la Armada. Permite comunicaciones en la banda X. Con capacidad de hasta 2 Mbps, este terminal es ideal para transmisiones de voz y datos durante operaciones navales. Incluye antenas estabilizadas en tres ejes y múltiples portadoras, lo que garantiza la continuidad de las comunicaciones incluso en condiciones marítimas adversas.

TNM-180: Este terminal bibanda (X/Ka) es uno de los más modernos del sistema SECOMSAT. Con mayores prestaciones, tiene la capacidad de operar simultáneamente en las bandas X y Ka militar, lo que permite una flexibilidad significativa para las Fuerzas Armadas. Equipado con antenas de 1,8 metros y módems avanzados, como el iDirect y el PD-25, este terminal aporta comunicaciones de alta velocidad y gran capacidad.

TNX-10: Este terminal es una solución desarrollada por Indra, al igual que los anteriores, ultraligero de comunicaciones satélite en banda X, diseñado para su instalación en buques de pequeño porte.

Terminales ligeros y móviles: Los terminales como el **TNX-50** proporcionan movilidad y rapidez en el despliegue. Estos terminales son esenciales para operaciones terrestres y de despliegue rápido, ofreciendo capacidades de transmisión de hasta 2 Mbps en bandas X y Ku, pero no simultáneamente.

Terminales portátiles: En operaciones más tácticas, los terminales portátiles como el **TLX-50** ofrecen comunicaciones ligeras y rápidas con capacidades de hasta 512 Kbps, ideales para equipos desplegados en el terreno. Estos terminales se utilizan en contextos como la Infantería de Marina y otras unidades móviles. [4]

Aquellos buques que no están incluidos en la Tabla 3, y que están dados de alta en la Lista Oficial de Buques de la Armada, basan sus comunicaciones en las comunicaciones radio tradicionales (HF y UHF). De todos modos, se prevé que estos buques cuenten con terminales comerciales que les permitan establecer este tipo de comunicaciones.

2.8 COMUNICACIONES STAÉLITE COMERCIALES UTILIZADOS POR LAS FUERZAS ARMADAS

En las comunicaciones satelitales las unidades de la Armada, debido a su proyección estratégica que suele abarcar todo el planeta, necesitan tener un respaldo que garantice la continua comunicación con su Mando de Operaciones; para asegurar así el éxito de la misión encomendada. En este sentido se describirán a continuación los diferentes sistemas satélite comerciales que incorporan los buques de la Armada que les sirven como respaldo de las comunicaciones militares y para la calidad de vida de sus dotaciones.

2.8.1 Inmarsat Global Xpres (IGX)

Inmarsat Global Xpress (IGX) es una red de comunicaciones satelitales de banda ancha que opera en la banda Ka, ofreciendo cobertura global para aplicaciones móviles en tierra, mar y aire. Lanzada en 2015, IGX es la primera y única red de banda ancha móvil de alta velocidad que cubre todo el mundo de manera continua y confiable. [7]

La constelación de IGX está formada por tres satélites principales, posicionados de manera que cubren casi la totalidad del planeta, exceptuando las áreas polares. Cada satélite cuenta con 89 haces fijos y 6 haces orientables que maximizan la eficiencia en áreas de alta demanda, permitiendo asignar capacidad adicional cuando es necesario. Esto asegura que los buques de la Armada, cuando usan IGX como respaldo en sus comunicaciones, pueda mantener la conectividad incluso en operaciones de alta exigencia y en ubicaciones críticas.

IGX es capaz de alcanzar velocidades de **hasta 50 Mbps de descarga y 5 Mbps de subida**, facilitando aplicaciones que requieren gran ancho de banda, como videoconferencias y transmisión en tiempo real de datos. En el entorno marítimo, el servicio FleetBroadband de Inmarsat se integra con la infraestructura de IGX, ofreciendo una cobertura robusta que permite a las unidades navales mantener comunicaciones eficientes en todo momento.

En el contexto de la Armada, IGX se utiliza como sistema de respaldo del sistema militar SECOMSAT para las comunicaciones satelitales. Esta integración garantiza redundancia y resiliencia en las comunicaciones, asegurando que las operaciones navales mantengan conectividad en diversas condiciones y ubicaciones geográficas. La capacidad de IGX para proporcionar comunicaciones de alta velocidad y baja latencia es especialmente valiosa en operaciones que requieren transmisión de datos en tiempo real y coordinación efectiva entre unidades.

El uso de la banda Ka en IGX otorga ventajas significativas en términos de ancho de banda y calidad de transmisión. Sin embargo, su integración en las plataformas navales requiere de antenas específicas y un cuidadoso manejo de interferencias electromagnéticas para evitar afectaciones en otros sistemas

de comunicación a bordo. Además, la confiabilidad de IGX frente a condiciones adversas es un punto a considerar; aunque la banda Ka es más sensible a las condiciones atmosféricas que la banda L, la combinación de ambas en el sistema híbrido de Inmarsat ayuda a mitigar estos efectos.

Inmarsat Global Xpress representa una solución de alto rendimiento en el contexto de las comunicaciones marítimas y militares, complementando las capacidades de SECOMSAT y fortaleciendo la resiliencia operativa de la Armada en los escenarios más frecuentes. Su cobertura, capacidad de alta velocidad y flexibilidad para integrarse con otros sistemas refuerzan la capacidad de respuesta de la Armada en entornos que requieren transmisión rápida y segura de datos. [5].

2.8.2 IRIDIUM

El sistema Iridium es una constelación de comunicaciones satelitales de órbita baja (LEO), diseñada para ofrecer conectividad global en servicios de voz y datos. Consta de 66 satélites activos distribuidos en seis planos orbitales y situados a una altitud de aproximadamente 780 km. Este sistema se complementa con nueve satélites de respaldo en órbita y seis en tierra, garantizando redundancia y disponibilidad en caso de fallos.

A diferencia de los sistemas geoestacionarios, los satélites Iridium completan una órbita alrededor de la Tierra en unos 100 minutos, con pases sobre una misma ubicación cada 8 minutos aproximadamente. Cada satélite cuenta con 48 haces que cubren un área de aproximadamente 400 km de diámetro, lo que permite abarcar regiones amplias de la superficie terrestre y garantiza cobertura continua en cualquier lugar, incluyendo zonas polares. La estructura de Iridium es única, ya que emplea enlaces intersatelitales para transmitir señales entre satélites vecinos, permitiendo la conmutación de llamadas incluso cuando no se tiene línea de visión directa con una estación terrestre.

Iridium proporciona servicios de telefonía y transmisión de datos mediante terminales de comunicación en la banda L, alcanzando velocidades de hasta 176 Kbps en subida y 1.4 Mbps en bajada. Adicionalmente, la nueva plataforma Iridium Certus ofrece servicios de banda ancha global, con velocidades de hasta 704 Kbps, permitiendo aplicaciones más avanzadas en sectores marítimos, aéreos, terrestres y gubernamentales, así como en Internet de las Cosas (IoT). Este sistema es compatible con diferentes tipos de dispositivos, como el Iridium GO!, que transforma cualquier smartphone en un teléfono satelital, y terminales de datos de ráfagas cortas (Short Burst Data, SBD) para aplicaciones M2M e IoT.

Los terminales Iridium que poseen los buques de la Armada, representan una herramienta vital de comunicaciones de respaldo. Su cobertura global y capacidad para funcionar en condiciones extremas lo convierten en un sistema idóneo para situaciones de emergencia y operaciones en zonas remotas donde otros sistemas de comunicación podrían no ser accesibles. En particular, Iridium es fundamental en misiones de despliegue en áreas árticas y antárticas, y permite mantener comunicación continua en operaciones tácticas sin depender de infraestructuras locales. Iridium se emplea principalmente para comunicaciones de voz, datos ligeros y transmisión de información crítica. Pese a esta limitación, la confiabilidad y la baja latencia de Iridium, junto con su estructura de redundancia, lo convierten en un sistema esencial para operaciones militares [5].

2.8.3 EL SISTEMA STARLINK

Se trata de un sistema de comunicaciones satelitales creado por la empresa SpaceX. Su finalidad es crear una constelación de satélites de internet con el objetivo de brindar un servicio de internet de banda ancha, baja latencia y cobertura mundial a bajo costo.

En el año 2017 se completaron los requisitos legales necesarios para lanzar un total de 11.943 satélites para mediados de la década de 2020 (*En noviembre de 2018, la empresa recibió la autorización de la FCC-Comisión Federal de Comunicaciones, para desplegar 7.518 satélites de banda ancha, que se sumarían a los 4.425 aprobados en marzo del mismo año*). SpaceX también planea vender satélites para uso militar, científico y de exploración.

El lanzamiento de los primeros 60 satélites se llevó a cabo el 23 de mayo de 2019. La investigación y desarrollo del proyecto tiene lugar en las instalaciones de SpaceX ubicadas en Redmond, Washington.

Hasta la aparición de este proyecto, los servicios de internet satelital han estado disponibles a través de satélites Geoestacionarios cuya distancia a la superficie de la Tierra se sitúa en los 35.786 kilómetros, lo que provoca una latencia de entre 250 milisegundos. Además, los precios del servicio ofertado son muy elevados para los servicios que ofrecen. En cambio, los satélites Starlink son del tipo LEO, lo que significa que su órbita está situada entre los 150 y los 2.000 kilómetros sobre la superficie terrestre, y por lo tanto ofrecen una latencia de entre 7 y 30 milisegundos, comparables o inferiores a las redes de cable o fibra óptica existentes. En la Figura 12 se muestran las latencias de ambos tipos de satélite, mediante una representación que se puede ver en la web de Starlink. Por cada “roundtrip” (viaje de ida y vuelta) de la comunicación que realiza un satélite GEO, Starlink realiza 68 “roundtrips”.

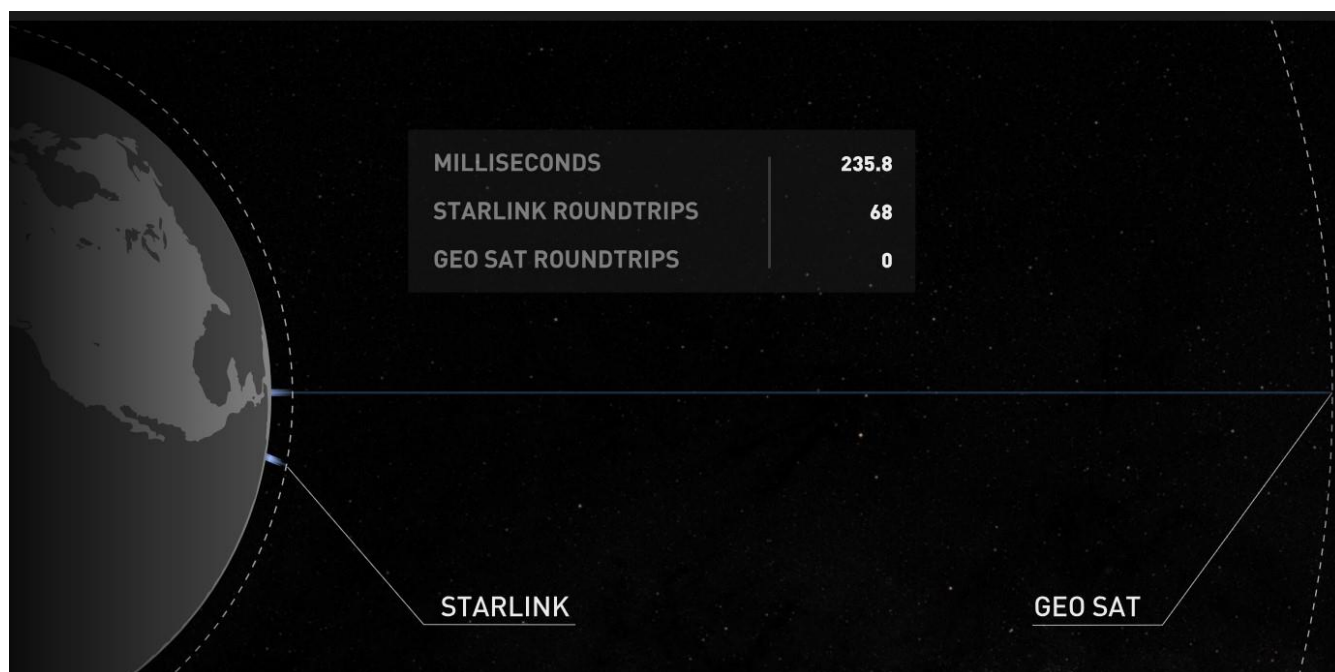


Figura 12.- Comparativa latencias satélites GEO y LEO (Starlink). Fuente: <https://www.starlink.com/es/technology>. Última visita: 12/11/2024

El CEO de la empresa y promotor del proyecto es Elon Reeve Musk (Pretoria, 28 de junio de 1971), conocido como Elon Musk. Se trata de un empresario, inversor y magnate sudafricano que también posee las nacionalidades canadiense y estadounidense. Es el fundador, consejero delegado e ingeniero jefe de SpaceX, director general y arquitecto de productos de Tesla, Inc., fundador de The Boring Company, cofundador de Neuralink y OpenAI, aunque ya no tiene más participación en esta última por desacuerdos en el rumbo de la empresa. También es el director de tecnología de X Corp. Con un patrimonio neto estimado en unos 207 mil millones de dólares en junio de 2023, Musk es la persona más rica del mundo según el índice de multimillonarios de Bloomberg y la lista de multimillonarios en tiempo real de Forbes.

El equipamiento de usuario del Starlink es muy simple, tanto en el equipamiento como en su instalación, y consta de los siguientes componentes:

Antena (Figura 13).- Esta antena es de tipo “*phase array*”, que permite rastrear múltiples satélites en movimiento sin necesidad de componentes mecánicos móviles. Tiene un bajo consumo de energía de entre 110 y 150 W y sus dimensiones son reducidas (57,5 cm de largo x 51,1 cm de ancho y 6,12 cm de alto), con un peso de 18,5 kilogramos.



Figura 13.- Antena Starlink instalada en buque de la Armada. Fuente: Oficial de Comunicaciones de la fragata F-102. Última visita: 12/11/2024

- **Enrutador (Figura 14).**- el router proporcionado en el kit del sistema Starlink es un router-wifi que está diseñado para proporcionar una conexión a internet de alta velocidad y baja latencia. Sus dimensiones son de 43.4 mm de alto 298.6 mm de largo y 120.4 mm de ancho y un peso de 0.57 kg. Implementa tecnología Wi-Fi 6 (802.11 a/b/g/n/ac/ax) con capacidad Tri-Band¹⁰ y soporte para MU-MIMO 4x4¹¹ lo que permite conexiones simultáneas más eficientes y rápidas. Cuenta con dos

¹⁰ Capacidad Tri-Band.- significa que pueden operar en **tres bandas de frecuencia inalámbrica** simultáneamente, lo que permite una mejor distribución del tráfico de red y optimización del rendimiento en entornos con múltiples dispositivos conectados (2,5 GHz, 5 GHz (Baja) y 5 GHz (Alta).

¹¹ MU-MIMO (Multi-User, Multiple Input, Multiple Output): "Múltiples Usuarios, Múltiples Entradas y Múltiples Salidas". Permite que un router Wi-Fi envíe datos a varios dispositivos a la vez, en lugar de hacerlo uno por uno, lo que reduce la latencia y mejora la velocidad de la red. Ideal para entornos con muchos dispositivos, como los buques de la Armada en Zona de Operaciones.

puertos LAN Ethernet con cubierta extraíble facilitando conexiones cableadas para dispositivos que lo requieran. Su cobertura alcanza hasta 297 m² ofreciendo una amplia área de servicio. La seguridad está garantizada mediante el protocolo WPA2 protegiendo las conexiones inalámbricas.



Figura 14.- Enrutador del kit Starlink. Fuente: <https://www.starlink.com/es/technology>. Última visita: 12/11/2024

- **Fuente de alimentación (Figura 15).**- La fuente de alimentación incluida en el kit de Starlink está diseñada para proporcionar energía confiable y eficiente al sistema asegurando un rendimiento óptimo. Sus dimensiones son 13.3 cm de alto 28.8 cm de largo y 4.6 cm de ancho con un diseño compacto que permite una integración sencilla en cualquier entorno. Esta fuente de alimentación está diseñada para integrarse perfectamente con el sistema Starlink proporcionando la energía necesaria para el funcionamiento eficiente de la antena y el enrutador.

4x4: Indica que el router Starlink tiene 4 antenas de transmisión (Tx) y 4 antenas de recepción (Rx). Esto permite manejar hasta 4 flujos de datos simultáneamente, aumentando la capacidad de la red y mejorando la cobertura.



Figura 15.- Fuente de alimentación del kit Starlink. Fuente: <https://www.starlink.com/es/technology>. Última visita: 12/11/2024

- **Cable de datos (Figura 16).**- El cable de datos incluido en el kit es un componente esencial que conecta la antena Starlink con el enrutador asegurando una transmisión eficiente de datos y energía. Tiene una longitud de 15 metros proporcionando flexibilidad en la instalación para ubicar la antena en la posición óptima con una vista despejada del cielo. Sin embargo, Starlink ofrece opciones de cables más largos para adaptarse a diferentes necesidades de instalación. Por ejemplo, para ciertos modelos, está disponible un cable de 45 metros. Está diseñado específicamente para combinar la transmisión de datos y la alimentación eléctrica facilitando la conexión entre la antena y el enrutador sin necesidad de cables adicionales. Está equipado con conectores propietarios en ambos extremos asegurando una conexión segura y resistente a las inclemencias del tiempo.



Figura 16.- Cable de datos del kit Starlink. Fuente: <https://www.starlink.com/es/technology>. Última visita: 12/11/2024

2.8.4 SEGMENTO ESPACIAL STARLINK

Los satélites Starlink presentan un aspecto menos voluminoso de lo habitual y son mucho más compactos que un satélite de comunicaciones común. Cada satélite presenta un diseño compacto de panel plano que minimiza el volumen, lo que permite una pila de lanzamiento densa (de hasta 21 satélites Starlink) para aprovechar al máximo las capacidades de lanzamiento del cohete Falcon 9 de SpaceX.

Estos satélites cuentan con un sistema de prevención autónoma de colisiones, maniobran de forma autónoma para evitar colisiones con desechos orbitales y otros objetos espaciales. Esta capacidad reduce los errores humanos y proporciona una mayor confiabilidad, superando considerablemente el estándar de su sector.

Poseen un sistema de rastreo de estrellas. Los sensores de navegación personalizados de Starlink examinan las estrellas para determinar la ubicación, la altitud y la orientación de cada satélite, lo que permite la ubicación precisa del satélite.

Starlink está probando en sus satélites el uso de láseres ópticos espaciales totalmente funcionales (enlaces ópticos intersatelitales o ISL), que permiten la comunicación directa entre los satélites para la transmisión de datos sin la necesidad de pasar por las estaciones terrestres. De este modo se reduce la necesidad de puntos de anclaje terrestre para poder ofrecer un servicio de Internet de banda ancha con una cobertura global (Figura 17).

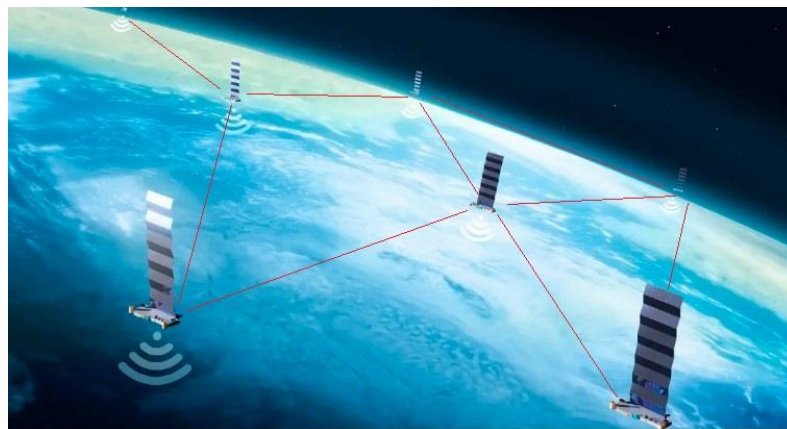


Figura 17.- Interconexión láser entre satélites Starlink. Fuente: Elaboración propia.

Cada satélite Starlink posee eficientes propulsores iónicos, propulsados por criptón, que les permiten elevar su altitud orbital, cambiar su trayectoria en el espacio y salir de su órbita al final de su vida útil. Los satélites Starlink son los primeros satélites de la historia propulsados por criptón.

Cada satélite Starlink usa 5 potentes antenas de matriz en fase (Figura 18) de bandass Ka (26.5 a 40 GHz), Ku (12 a 18 GHz) y V (40 a 75 GHz), utilizando las bandas Ku y V para conexiones con terminales de usuario, mientras que las bandas Ka y nuevamente la V se utilizará para conectarse a las gateways, y para los fines de control seguimiento y telemetría. Las antenas en fase tienen un funcionamiento bastante complejo. Básicamente, estas cinco antenas juntas funcionan como una sola antena cuyo ancho de haz y dirección se puede cambiar de forma eléctrica, sin tener que ir moviéndolas de una en una físicamente. También está provisto de 3 antenas de doble banda (banda Ka y banda E) para proporcionar una mayor capacidad [13].

Estos satélites cuentan con una matriz solar única, lo que simplifica significativamente el sistema. Las células solares están estandarizadas y son fáciles de integrar en el proceso de fabricación.

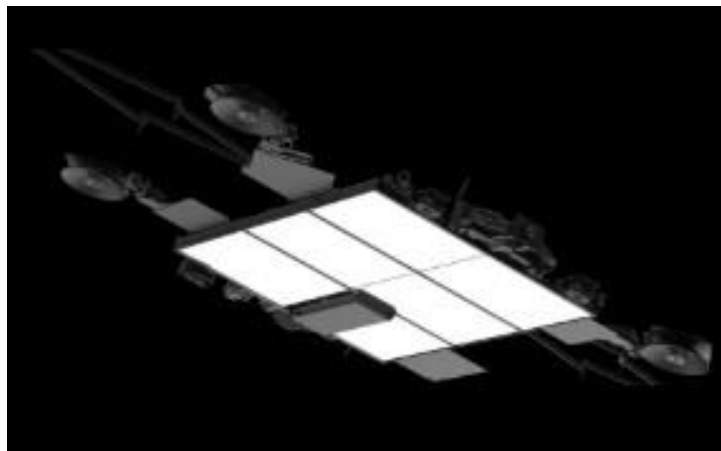


Figura 18.- Detalle antenas de un satélite Starlink. Fuente: <https://www.starlink.com/es/technology>. Última visita: 12/11/2024

Las frecuencias en las que trabaja Starlink en España vienen representadas en la siguiente Figura 19:

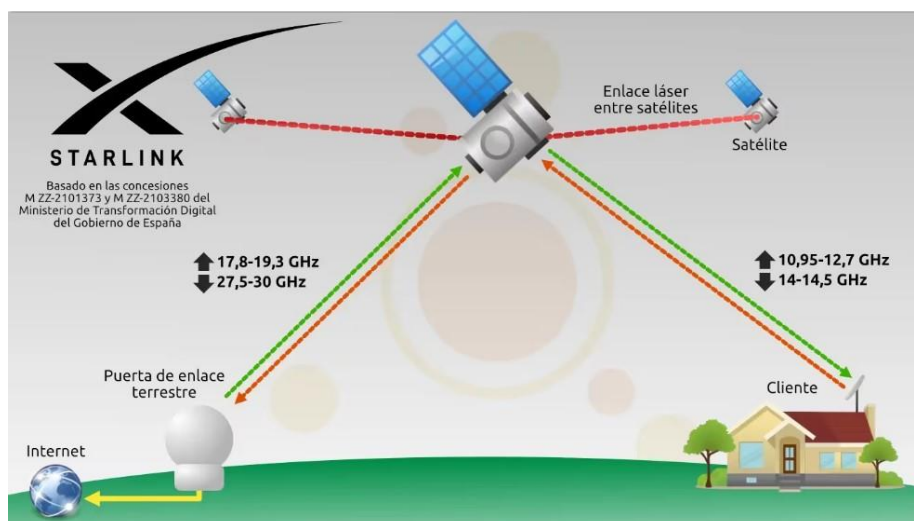


Figura 19.- Esquema simplificado del funcionamiento de la red Starlink y frecuencias empleadas en España. Fuente.- <https://bandaancha.eu/articulos/starlink-sera-mas-carro-espana-senala-10131> [8]- Última visita.- 04/11/2024

La constelación de satélites de Starlink recibió en junio de 2021 la primera autorización para utilizar frecuencias en España. Esta primera autorización habilitó las frecuencias destinadas a la comunicación entre los satélites y las estaciones base en tierra que los controlan y les dan salida a internet. Así, el permiso M ZZ-2101373 otorga el uso de un total de 4.000 MHz para la comunicación satélite-estación terrestre en ambos sentidos, en tres ubicaciones, Lepe en Huelva, Villarejo de Salvanes en Madrid e Ibi en Alicante.

Starlink aún necesitaba obtener permiso para otras 2 frecuencias, las destinadas a comunicar los satélites con los usuarios finales en ambos sentidos. Los planes iniciales eran empezar a dar servicio en España en la segunda mitad de 2021, pero la compañía decidió esperar hasta 2022 para obtener este segundo permiso, probablemente para evitar pagar la tasa de espectro de un año completo.

El día 4 de enero de 2022 Starlink recibió finalmente la autorización M ZZ-2103380 para utilizar las frecuencias destinadas a la comunicación con los usuarios, en este caso para todo el territorio nacional, con un total de 1.250 MHz sumandos ambos sentidos para los siguientes 5 años [8].

3. USO SE STARLINK EN LOS BUQUES DE LA ARMADA

3.1 CÓMO LLEGAMOS A STARLINK

Según lo descrito en el punto 2.3.4 de la presente memoria, los buques de la Armada basan sus comunicaciones satélite en el SECOMSAT y el IGX como respaldo. Dentro de estos recursos, aparte de las comunicaciones militares, se proporciona a las dotaciones la conexión a Internet para ocio y esparcimiento, denominado: Sistema de Apoyo al Personal en Zona de Operaciones (SAPZO).

El ancho de banda de los servicios SECOMSAT autorizados a un buque en Zona de Operaciones va en función del tipo de buque, de la misión encomendada y del rol que desempeñe el citado buque (si es buque de mando o simplemente forma parte de la Fuerza).

Normalmente los buques de mando (buques que embarcan un Estado Mayor a bordo) el ancho de banda es de unos 4 Mbps simétricos.

Esta tasa de datos se ve reducida en el caso de los buques que no tengan embarcado un Estado Mayor. En estos casos, que son la gran mayoría, la cadena de datos que se le autoriza es como máximo de 2 Mbps.

Como se puede deducir de estos datos, dichas capacidades son insuficientes para la cantidad de servicios que han de soportar:

- Sistemas de Mando y Control.- BICES, SIJE, NSWAN, SC2N, SACOMAR, ...
- Acceso a la I3D baja clasificación.- SIMENDEF, Intranet, Aplicaciones Web Corporativas,...
- Sistemas de voz.- Telefonía IP, circuitos de voz para comunicaciones tácticas,...
- Internet para el ocio y esparcimiento.

Debido a esta sobrecarga de tráfico, por regla general, los buques que disponen del IGX como sistema de respaldo lo utilizan paralelamente con el SECOMSAT para liberar ancho de banda y que las comunicaciones se vean menos comprometidas. Normalmente el sistema de respaldo (IGX) se utiliza para la cadena de datos de Internet libre, para la red de ocio y esparcimiento de la dotación (SAPZO).

A pesar de que mejora sustancialmente las posibilidades de acceder a contenidos de entretenimiento para el personal a bordo, siguen siendo insuficientes para plataformas de “streaming” que requieren de mayor ancho de banda que el ofrecido por el Inmarsat.

Con el aumento de las necesidades de ancho de banda y debido a la gran demanda de servicios que requiere un buque de la Armada en Zona de Operaciones, los servicios tradicionales de comunicaciones satélite utilizados son insuficientes. Esto provoca que, en la gran mayoría de las ocasiones, que las dotaciones de los buques de la Armada no puedan disfrutar de buenos recursos de Internet, en los limitados momentos de ocio y esparcimiento de que disponen cuando se encuentran en alta mar.

Como solución a estas carencias, el Centro de Sistemas y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (CESTIC) está dirigiendo la adquisición de terminales Starlink para su uso por las unidades de los Ejércitos, de la Armada y de la U.M.E.

El CESTIC fue creado en el año 2010 como una Subdirección General de la Dirección General de Infraestructura de la Secretaría de Estado de la Defensa; denominándose Subdirección General de Tecnologías de la Información y Comunicaciones. A tenor de lo dispuesto en el Real Decreto 63/2023, que modifica la estructura del Ministerio de Defensa, establece que el CESTIC pase al rango

de Dirección General, dependiente directamente de la Secretaría de Estado de Defensa. Entre sus funciones se encargará de la gestión y desarrollo de las políticas de sistemas y tecnologías de la información y comunicaciones (CIS/TIC). Esto incluye la transformación digital, la seguridad de la información, y la ciberseguridad, así como la supervisión de la Infraestructura Integral de Información para la Defensa (I3D). Otra de sus funciones es la integración de redes de información, tanto nacionales como internacionales. Además, impulsa la transformación digital y la innovación tecnológica, colaborando con la Dirección General de Armamento y Material para integrar nuevas tecnologías y promover la participación de la industria nacional en proyectos de defensa.

Como ya se ha dicho, el CESTIC es el encargado de la gestión de la adquisición y puesta en servicio de los terminales Satarlink. Esta adquisición se está llevando a cabo a través de dos contratos centralizados. En dichos contratos se adquieren tanto los terminales, como los servicios del proveedor. Las previsiones hasta el día de la fecha son de adquirir un total de 76 equipos.

Centrándonos en la Armada, además de los 12 (+3 adicionales para buques SEGEPESCA), se prevé la recepción de otros 6 terminales a lo largo del próximo año 2025. El propio CESTIC conserva un “pool” de 10 terminales, uno de los cuales se le han asignado al “Juan Sebastián del Elcano”, destinado a la red SAPZO. Además de este terminal proporcionado por el CESTIC, el buque irá provisto de otros dos terminales proporcionados por la Armada, que estarán dedicados, uno a Telemedicina y el otro para la I3D (Infraestructura Integral de Información para el Ministerio de Defensa).

Se están preparando, por parte del CESTIC, otros dos expedientes de contratación centrados en:

- El SAPZO para utilizar Starlinks como transporte en lugar de los IGX.
- Un Acuerdo Marco LEO.- será para la contratación de servicios de todo el parque de satélites LEO existente y sus servicios asociados. Este Acuerdo Marco servirá de refuerzo de los dos expedientes ya existentes, debido a que no pueden asumir la demandada actual.

3.2 PRUEBAS INICIALES

Después de la adquisición de los terminales por parte del CESTIC, dicho Centro realizó un resumen de los posibles casos de uso de interés para el Ministerio de Defensa, además de los previstos inicialmente para situaciones de crisis y emergencias. El 15 de septiembre de 2022, tuvo lugar una reunión entre la Secretaria de Defensa con el Vicepresidente de SpaceX, en la que se le presentó los citados casos de uso del sistema Starlink por parte del Ministerio.

En este sentido se prevé la utilidad de Starlink para:

- Servicios de Internet en operaciones en el exterior, tanto terrestres, como en buques de la Armada.
- Servicios de Internet en emplazamientos remotos en la Península donde no existe conectividad de banda ancha (ADSL, fibra, 4G...).
- Respaldo de servicios de comunicaciones vía satélite gubernamentales (SECOMSAT).
- Respaldo en comunicaciones tácticas.

Antes de las pruebas realizadas por la Armada, la UME realizó unas pruebas de rendimiento y prestaciones en sus despliegues en zonas remotas, con resultados excelentes; concluyendo que este sistema es muy adecuado para su uso en situaciones de crisis y emergencias, especialmente en áreas remotas donde no se dispone de otros servicios de comunicaciones de banda ancha.

Para estas pruebas CESTIC proporcionó un terminal destinado a uso residencial, pues no se disponía de otro modelo en el momento en que se desarrollaron las citadas pruebas.

Para las pruebas realizadas por la Armada se dedicará el siguiente punto.

4.RESULTADOS Y VALIDACIONES

Starlink dispone de una versión marítima, la cual está siendo utilizada para su instalación en los buques de la Armada.

En este apartado pretendo incluir la puesta en producción de los terminales Starlink distribuidos en algunas de las unidades a flote de nuestra Armada desplegadas en Operaciones o Misiones de distinta índole.

A día de hoy, la cobertura del sistema Starlink prácticamente es global, sobre todo en el mar, fuera de las aguas territoriales de aquellos países que no tienen servicio (Rusia, China, Irán, Siria, etc.), como se muestra en la Figura 20:

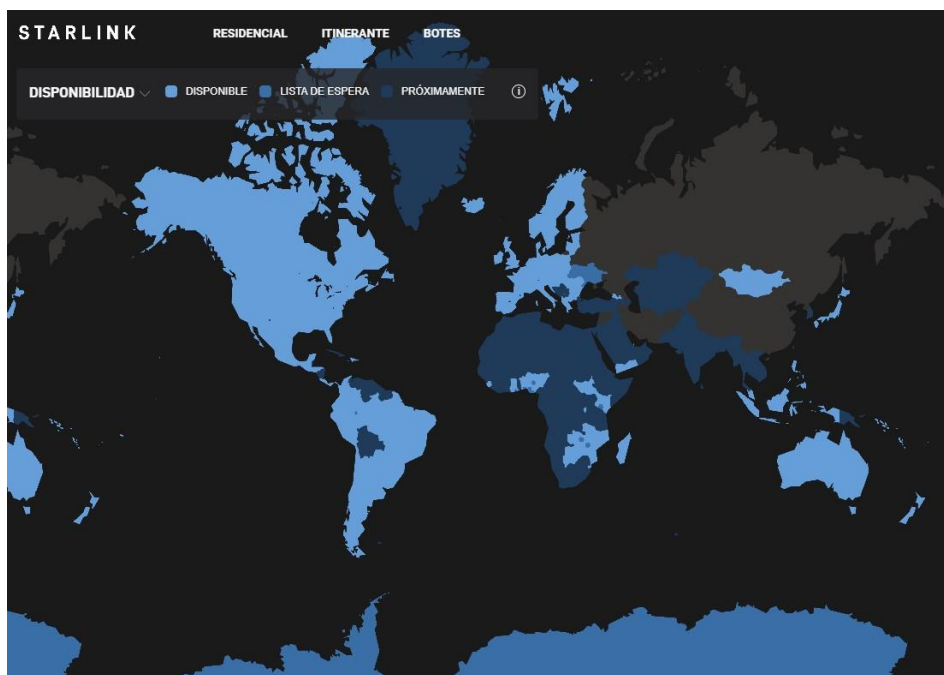


Figura 20.- Cobertura servicios Starlink. Fuente.- Fuente: <https://www.starlink.com/es/map> - Última visita.- 13/11/2024

Esta cobertura viene otorgada por la gran constelación de satélites que actualmente están en órbita (Figura 21). Nada más y nada menos que a día de hoy se encuentran en órbita un total de 7.296 satélites LEO.

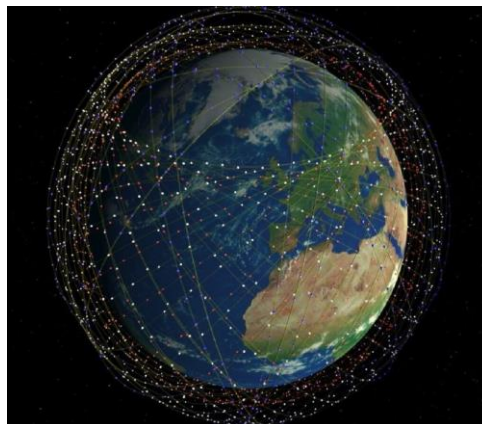


Figura 21.- Constelación satélites Starlink. Fuente.- Fuente: <https://www.xataka.com/basics/satelites-starlink-que-como-verlos> - Última visita.- 13/11/2024

4.1 PRUEBAS EN LA FRAGATA “NAVARRA”

La fragata “Navarra” fue desplegada en la Operación Atalanta desde el 9 de junio hasta el 21 de octubre de 2023. Dicha Misión se desarrolla en aguas del Océano Índico, donde la huella de SECOMSAT (XTAR-EUR) e IGX suelen ser bastante buenas. Concretamente el XTAR-EUR (Figura 22) tiene un haz específico orientado en la zona del Estrecho de “Bab el-Mandeb”, estrecho que separa el Mar Rojo con el Golfo de Adén, en el Océano Índico. Esta zona es la más transitada por los buques de guerra integrantes de la Operación Atalanta para preservar el tráfico marítimo seguro de los barcos mercantes.

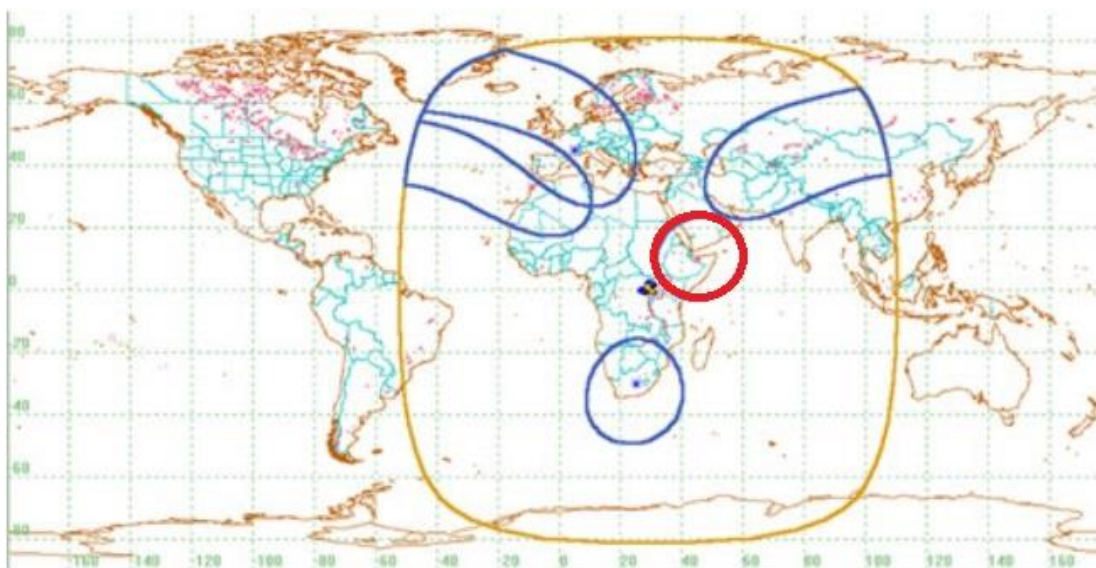


Figura 22.- Cobertura del satélite XTAR-EUR.- Fuente: <https://www.isdefe.es/files/Cuaderno%20Capacidades.pdf> - Última visita.- 14/11/2024

Además de los servicios satelitales ya mencionados, para dicha misión le fue asignado un terminal Starlink del cupo de la Armada, con el objeto de la realización de pruebas y puesta en producción para el estudio de los resultados obtenidos.

La red SAPZO a través del IGX está monitorizada y controlada por el MCCE (Mando Conjunto del Ciberespacio), lo que le otorga una seguridad en su uso que mitiga los riesgos de sufrir algún ciberataque.

El sistema Starlink da acceso directo a todos los recursos disponibles en Internet. Esto supone un riesgo inherente al hecho de que toda la dotación del buque puede hacer un uso de dichos recursos sin ningún tipo de control, además de los riesgos a los que se exponen las redes del barco de sufrir ciberataques.

Por este motivo, el propio buque tomó la iniciativa de adoptar medidas mitigadoras para el control de los usuarios y seguridad en la red que estaba asociada al servicio de Starlink.

El terminal asignado a la “Navarra” era un terminal Marítimo de altas prestaciones con las siguientes características de antena (Figura 23):

STARLINK	
Antenna	Electronic Phased Array
Orientation	Motorized Self Orienting
Environmental Rating	IP56
Snow Melt Capability	Up to 75mm / hour (3in / hour)
Operating Temperature	-30°C to 50°C (-22°F to 122°F)
Field of View	140°
Average Power Usage	110-150W

Figura 23.- Características de la Antena Starlink de Altas Prestaciones.- Fuente: Informe Núm. 03/2023, de 23 de noviembre de 2023, del CF., Comandante de la fragata “Navarra” [9]

La instalación inicial que se realizó se presenta en el siguiente esquema de red (Figura 24).

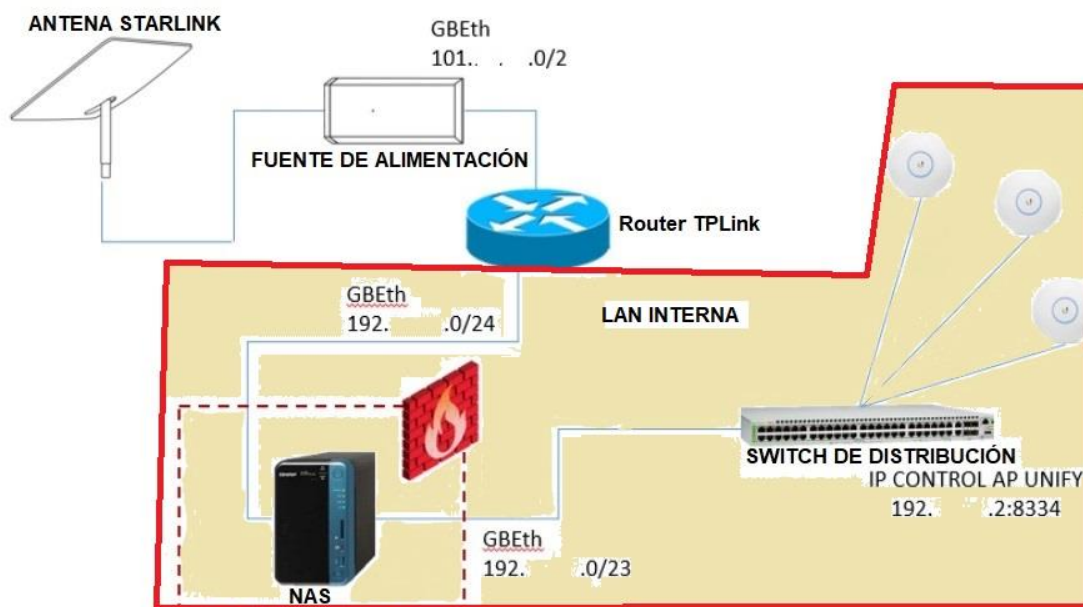


Figura 24.- Arquitectura de Red Starlink.- Fuente: Informe Núm. 03/2023, de 23 de nov. de 2023, del CF., Comte. de la fragata “Navarra” [9]

Tal y como se muestra en la imagen, por el direccionamiento IP mostrado, el Router TPLink tiene configurado NAT (Network Address Translation). En la parte de la LAN conectada al Router mediante una interfaz a Gigabit Ethernet (GbEth) tienen un NAS (Network Attached Storage)¹² de la marca QNAP (Quality Network Appliance Provider)¹³ para proporcionar al citado equipo de una dirección privada. En dicha NAS, se utilizan tanto el software de virtualización de puertos “Virtual Network”, como un software de máquinas virtuales en el cual se ha configurado un firewall,

¹² Un dispositivo NAS puede almacenar, gestionar y compartir tus datos con usuarios conectados a una red local o a internet. Gracias a su mayor flexibilidad y escalabilidad, puedes aumentar la capacidad de almacenamiento de los dispositivos NAS teniendo en cuenta tus necesidades.

¹³ QNAP (o proveedor de dispositivos de red de calidad).- la NAS de QNAP proporciona a todos los usuarios de la red conectada a ella, acceso remoto a los datos compartidos, sincronización de archivos, uso compartido de archivos y almacenamiento suficiente para crear copias de seguridad de los datos. En palabras sencillas, se puede decir que el NAS es como una computadora a la que pueden acceder fácilmente varios usuarios (conectados a una red) a la vez.

concretamente “PfSense”, que es el que realiza la gestión del tráfico de la red, para otorgar a la misma una capa de seguridad en el tráfico entrante y saliente desde Internet; además de proporcionar las direcciones IPs de forma dinámica a través del servicio DHCP a los diferentes equipos conectados. Además de la gestión de red, se le configuró de forma simultánea, un sistema de reproducción de videos en “streaming” para el uso y disfrute de la dotación en periodos de descanso y ocio.

Durante el primer mes de uso, las pruebas dieron como resultado que el NAS QNAP no soportaba la gestión de las conexiones simultáneas de los usuarios, no proporcionando el servicio de “streaming”, pese a disponer de una conexión de 1 Gbps en la interfaz que lo conectaba al switch de distribución. Esta limitación se dedujo que era producida por la reducida memoria RAM del NAS (4 GB), y la capacidad de proceso del microprocesador. Sometido a una prueba de estrés, se comprobó que no era capaz de soportar la reproducción de más de 30 vídeos de forma simultánea, convirtiendo este esquema de red en poco funcional para una dotación de 220 personas.

Como medida paliativa, el buque adquirió un servidor DELL R610 con las siguientes características técnicas:

MARCA & MODELO	
DELL	POWEREDGE R620 8SFF(8x2.5")
CARACTERÍSTICAS	
CPU	INTEL XEON 2xE5-2630Lv2 (12NUCLEOS/24HILOS) CON UNA FRECUENCIA TURBO DE 2.80Ghz Y 15MB DE MEMORIA CACHÉ. ESPECIAL PARA SERVIDORES Y PARA VIRTUALIZACIÓN.
RAM	64GB DDR3 REGISTRADA ESPECIAL PARA SERVIDORES.
ALMACENAMIENTO Y CADDY	
HDD	4 HDD SAS 600GB 10K RPM 2.5" ESPECIAL PARA SERVIDORES.
CADDY (Drive bays)	4 CADDIES.
ACCESO REMOTO	
ACCESO REMOTO	IDRAC7
RAID CONTROLLER	
H710	BATERÍA INCLUIDA 512MB CACHÉ RAID LEVELS: 0,1,5,6,10,50,60 SAS Y SATA HDD (SSD TAMBIÉN)
CONECTIVIDAD	
ETHERNET	4X RJ45 10/100/1000MB/S.
ALIMENTACIÓN	
POWER SUPPLIES	2 FUENTES DE ALIMENTACIÓN POR REDUNDANCIA.

Tabla 4.- Características técnicas del Servidor DELL R620 8SFF. [9]

Este servidor les proporcionó una mayor capacidad en la gestión de las conexiones simultáneas de los usuarios, garantizando así el correcto funcionamiento del sistema. Con la inclusión de dicho servidor, el esquema de red se modificó como se muestra en la Figura 25:

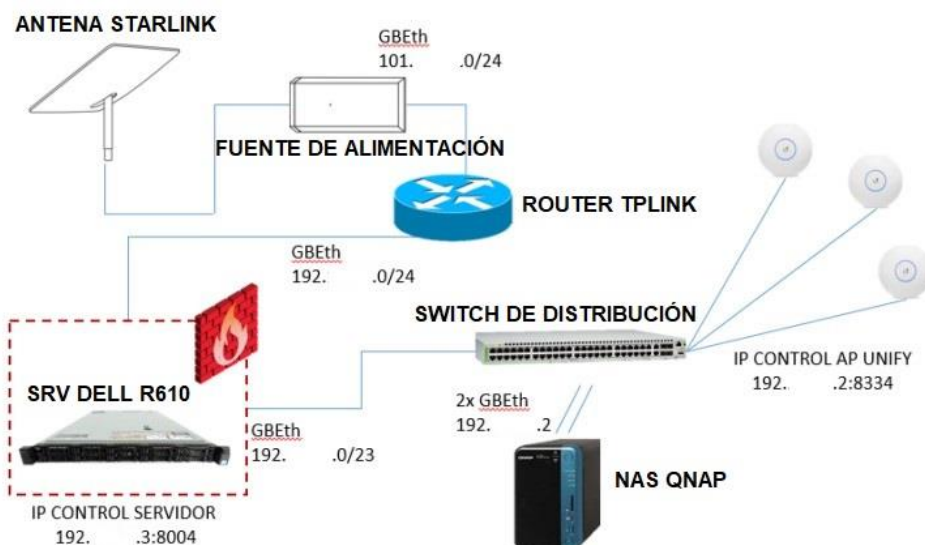


Figura 25.- Arquitectura de Red Starlink con Servidor Dell.- Fuente: Informe Núm. 03/2023, de 23 de nov. de 2023, del CF., Comte. de la fragata "Navarra" [9]

La configuración específica del servidor fue la siguiente:

- Se estableció un RAID 10¹⁴ en el servidor con una capacidad de 4 TB (4 discos de 1TB cada uno). De este modo, 2TB estaban dedicados a todos los servicios configurados en el Servidor y los 2TB restantes estaban replicados en los otros dos discos (mirroring o RAID 1). Por tanto, cada disco tenía un espejo exacto lo que aseguraba la redundancia. Si un disco fallase, su copia puede usarse para mantener la integridad de los datos.
En cuanto al modo de cómo se organizan los datos en los discos, se optó por la configuración RAID 0 (striping), en la que los datos se dividen en bloques y se distribuyen entre los pares de discos espejados.
Esto mejora el rendimiento, ya que las operaciones de lectura y escritura se realizan simultáneamente en varios discos.
- Se optó por la configuración en RAID 10 (Figura 26) porque es ideal en sistemas críticos que requieren alta disponibilidad, buen rendimiento y protección contra fallos, como bases de datos transaccionales, servidores de aplicaciones o entornos virtualizados.

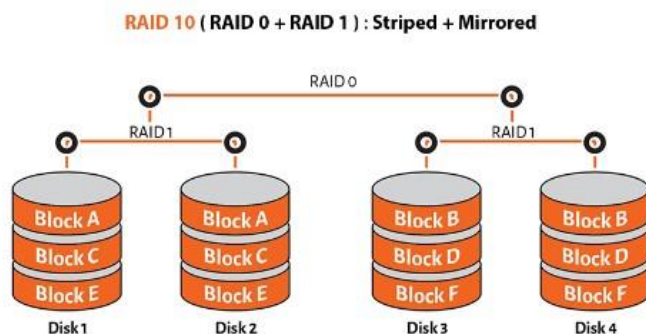


Figura 26.- Ejemplo de configuración RAID 10 del Servidor Dell.- Fuente: Wikipedia.

¹⁴ RAID 10.- También llamado RAID 1 + 0, es un sistema de almacenamiento que combina las ventajas de los niveles RAID 1 (mirroring) y RAID 0 (striping) para ofrecer redundancia y rendimiento. Se requiere un mínimo de 4 discos para poder establecerlo.

El software de gestión por el que se optó fue del tipo “Open Source”, concretamente “PROXMOX” basada en Linux. Este aplicativo es capaz de gestionar diferentes máquinas virtuales a diferentes niveles de gestión a través de roles de usuario. Debido que estaba en modo prueba, se asignó un único rol de administrador con usuario y contraseña para gestionar el acceso a las máquinas virtuales.

El entrono gráfico del aplicativo PROXMOX se muestra en la siguiente captura de pantalla (Figura 27):

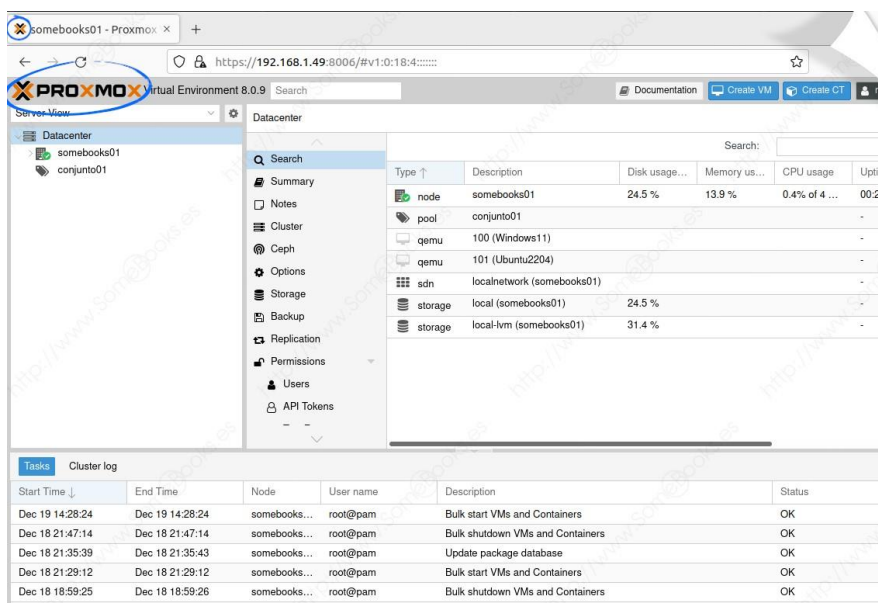


Figura 27.- Captura de pantalla del Aplicativo PROXMOX.- Fuente: <https://somebooks.es/cambiar-logos-en-proxmox-ve-8-usando-un-ordenador-con-ubuntu/>

A través de dicho Aplicativo se configuraron dos máquinas virtuales distintas:

- **TrueNAS:** esta máquina estaba encargada de virtualizar “dockers” o contenedores de diversas aplicaciones, entras que se empleó “Ubiquity Unify” para la gestión de los puntos de acceso a internet distribuidos por el barco.
- **PfSense:** esta máquina virtual da la posibilidad de gestionar la red, tanto en la distribución dinámico del direccionamiento (DHCP), como para el filtrado de contenido (navegación web/Whatsapp/Instagram/Telegram ...). Para ello se utiliza el IDS “Squid”, con el que se consigue el bloqueo de contenido web (tanto HTTP como HTTPS). Se trata de un servidor proxy para web con caché. Es necesario reseñar que para filtrar el contenido HTTPS es necesario proporcionar un certificado válido para las diferentes Autoridades Certificadoras (“Certification Authorities, CA”) externas, como Google. En caso de no poseer dicho certificado, el navegador devolverá un error HSTS por un certificado no válido “handshake”, a la hora de dirigir el tráfico hacia un servidor de contenidos externo “no seguro”.

Una vez definida la arquitectura de red más adecuada, y configurado el “software” que gestionaría la misma, se puso en producción el sistema Starlink durante lo que restaba de despliegue. Para el estudio de los resultados, se obtuvieron los datos del rendimiento del sistema (ancho de banda, latencias, ...). Este proceso es necesario hacerlo a través de la aplicación del proveedor, que puede estar instalada en un móvil corporativo del barco, descargándosela de la “Play Store” (Figura 28) o de “Apple Store”.



Figura 28.- Captura de pantalla de “Play Store” de un dispositivo Android.- Fuente: Propia

Como “anexo II” se adjuntan los resultados de los datos obtenidos en cuanto a la latencia y ancho de banda dispensado por el Sistema, especificando las situaciones del buque. Estas situaciones estuvieron condicionadas a las conexiones del terminal, que sólo se podía conectar fuera de las aguas territoriales de los países que no tenían un acuerdo marco con la empresa Space X (Figura 29).



Figura 29.- Cobertura Starlink en Zona Operaciones. Fuente: Informe Núm. 03/2023, de 23 de nov. de 2023, del CF., Comte. de la fragata “Navarra” [9]

Con los resultados obtenidos, se ha podido corroborar que con el modelo de enlace a través de satélites de órbita baja (LEO), se obtienen conexiones permanentes de muy baja latencia y un buen ancho de banda; algo que con el IGX estaba mucho más limitado.

Uno de los problemas, si así se le puede llamar, es la tarifa de datos autorizada al consumo. La concesión del cupo de datos asignado a las unidades que vayan a despliegues con un terminal Starlink, está directamente gestionado por el Centro de Comunicaciones de Madrid (CECOMMAD), integrado en el Centro de Explotación de los Sistemas de Información de Madrid (CECISMAD). Este reparto

normalmente se realiza en función de la misión que vaya a desempeñar la unidad, y también del tipo de buque.

Como norma general se atenderá a la siguiente prelación:

OPERACIÓN / TIPO DE BUQUE	TARIFA AUTORIZADA
“JUAN CARLOS I”	5 TB/mes
“GALICIA”	5 TB/mes
“CASTILLA”	5 TB/mes
OPERACIÓN ATALANTA Fragatas F-80	5 TB/mes
SNMG 1 y 2 CON ESTADO MAYOR A BORDO Fragatas F-100	5 TB/mes
SNMG 1 y 2 SIN STAFF	1 TB/mes
RESTO DE UNIDADES Y OPERACIONES	1 TB/mes

Tabla 5.- Tabla de concesión de cupo de datos según Operación/tipo de buque.

En el caso de la fragata “Navarra” le fueron asignados 5 TB/mes, lo que, debido a la gran demanda de datos por parte de la dotación, resultó insuficiente para la explotación de una conexión con esta velocidad. Por este motivo, se procedió a limitar el consumo de datos por usuario y un control a través de “ticketing” para garantizar un mínimo a cada usuario, y así preservar el consumo global de datos. Esta gestión se llevó a cabo a través de la red especificada en la figura 25.

Como ya se ha descrito en el punto 2.8.1, el IGX es el método que se venía utilizando como sistema de respaldo cuando la cadena SECOMSAT fallaba. Era lógico, por tanto, realizar pruebas con el sistema Starlink para respaldar al sistema militar de comunicaciones.

Durante el despliegue se realizaron varias pruebas de respaldo en las que, siguiendo el diagrama de la figura 30, se conectó una interfaz del terminal Starlink directamente a la interfaz del router CISCO ASA para sustituir así al IGX.

En dicha prueba se obtuvo un enlace a gran velocidad y con mucha estabilidad. No obstante, pese a tener unas latencias bajas y velocidades de enlace superiores a las obtenidas a través del SECOMSAT o el IGX por respaldo (80 ms de latencia con el Starlink respecto a 870 ms de los otros dos sistemas) se observó un elevado número de desconexiones, con duración de micro segundos, que provocaban la pérdida de paquetes de datos, afectando a los servicios y aplicaciones de algunos sistemas de mando y control. Por ejemplo, no se lograba mantener el chat SPARK más de un minuto forzando la reconexión constantemente.

No obstante, esta limitación no se considera grave, y su solución no se estima compleja.

Se ha observado que durante el empleo de Starlink como respaldo, no existe una gestión de la calidad de Servicio (QoS). No es posible gestionar el reparto específico de ancho de banda entre los servicios de ocio y de mando y control, ni el procesamiento de paquetes está priorizado, lo que en ocasiones provocó la pérdida de información en los sistemas de MyC, o un rendimiento menor al esperado.

Esta situación, que ocurre de forma similar al emplear respaldo a través de IGX, se solucionó de forma puntual configurando Starlink únicamente como respaldo del SECOMSAT e IGX para explotación para SAPZO (Figura 30). Si bien, a través de una priorización de paquetes de datos es posible emplear

el mismo sistema para ambos servicios sin pérdidas de latencia ni velocidad de conexión en ninguno [9].

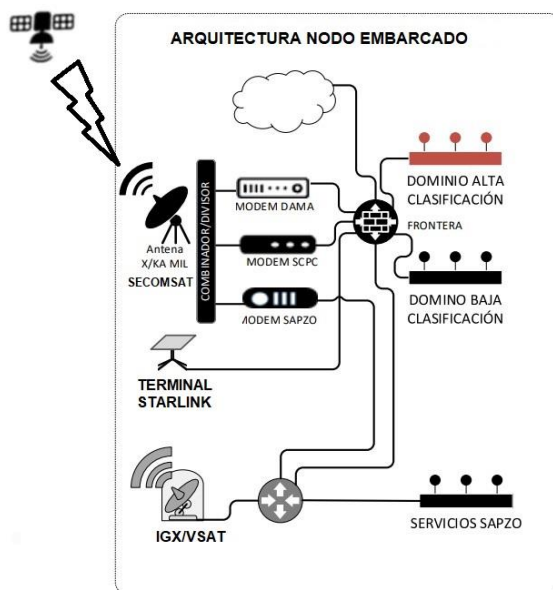


Figura 30.- Arquitectura de red Respaldo con Starlink. Fuente: PLN-01-24 del CESTIC.- Plan de Transición COMSATCOM - LEO [11]

4.2 PRUEBAS EN LA FRAGATA “CRISTÓBAL COLÓN

La fragata “Cristóbal Colón”, en el momento que estoy elaborando este trabajo, se encuentra desplegada en la “Standing NATO Maritime Group 2” (SNMG-2) desde el 15 de junio hasta el 12 de diciembre de 2024. Dicha Misión se desarrolla en aguas del Mar Mediterráneo, donde la huella de los satélites SECOMSAT (SPAINSAT y XTAR-EUR), y la del IGX son buenas.

Al igual que a la fragata “Navarra”, también le fue asignado un terminal Starlink Marítimo, para efectuar pruebas y puesta en producción, tanto para la red SAPZO como para realizar funciones de respaldo del SATCOM.

La instalación a bordo, como en el resto de unidades, es realizada por personal del destino de la Radio. En esta ocasión se situó la antena en la cubierta 02 (Figura 31), a la altura de la caja de banderas del buque.



Figura 31.- Instalación antena Starlink en la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque. [10]

Se eligió esta ubicación debido a que la cobertura era buena, tal y como se muestra en la imagen de la figura 32, obtenida de la aplicación de gestión instalada en un móvil.



Figura 32.- Cobertura antena Starlink en la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque. [10]

La fuente de alimentación del sistema Starlink se ubicó en el local de la Radio Principal, conectada a la red de 220v. El cable de datos que sale desde la antena se introdujo por un pasacables que tienen acceso directo al local de la Radio Principal y así poder conectarlo directamente a una de las tomas de red del barco (Figura 33). Gracias a la elección de esta ubicación, se reducen los riesgos de deterioro del material, paliando así la falta de rugerización de este sistema.



Figura 33.- Instalación en local Radio Principal del Sistema Starlink en la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque. [10]

Para la Operación que está desempeñando la fragata, se le asignaron 1 TB/mes. Con esta tasa de datos, el personal encargado de la configuración del sistema, decidió otorgar a cada miembro de la dotación 4 GB/mes. Para un total de 228 personas, quedaron 90 GB/mes sin asignar para posibles imprevistos.

Hasta el día de la fecha no están establecidas unas normas e instrucciones que regulen el uso del sistema Starlink para el acceso a internet. Tampoco está definida la arquitectura que ha de tener el sistema para poder monitorizar el tráfico o la gestión de los usuarios.

Por todo ello, el personal del servicio de comunicaciones del buque decide configurar la arquitectura que se muestra en la figura 34, con los siguientes componentes “hardware”: router Mikrotik CRS125-24G-1S-2HND-IN, Switch Netgear GS724T y un router inalámbrico Gigabit Ethernet doble Banda (2,4 GHz / 5 GHz).

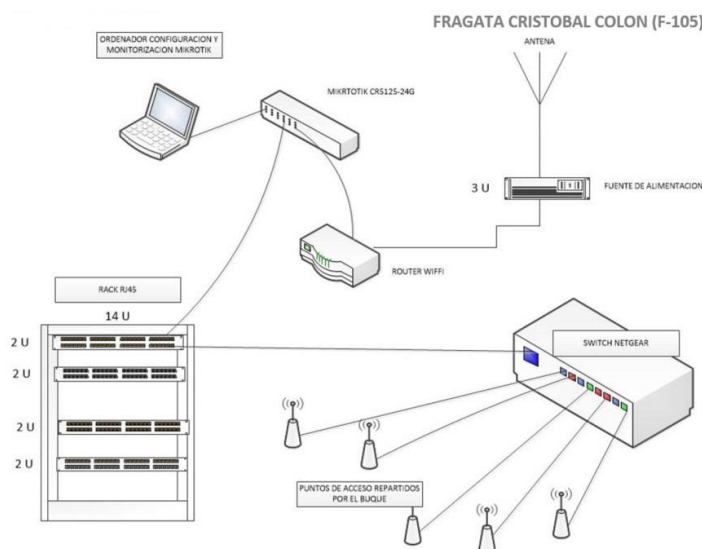


Figura 34.- Instalación en local Radio Principal del Sistema Starlink en la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque. [10]

Es necesario reseñar que esta arquitectura de red dará servicio solamente a la red SAPZO del buque. Constituida por diferentes routers TP-Link configurados como puntos de acceso, y sin contraseña para que pueda entrar cualquier usuario.

En el router Mikrotik se realizan las siguientes configuraciones:

- Crear un portal cautivo donde cada usuario que desee usar el sistema, tenga que introducir un usuario y contraseña.
- Se bloquea el tráfico P2P, UTorrent, sitios web de descarga de contenidos no autorizado por derechos de autor, ni acceso a sitios relacionados con la pornografía.
- Configuración del límite de datos para cada usuario, establecido en 4 GB/mes; bloqueando el usuario al llegar a dicho límite.

Para la monitorización del servicio a través del router Mikrotik se utiliza un PC portátil conectado a una de las interfaces del citado router. Con el PC se puede acceder al “software” de gestión del router, en este caso un entorno web denominado “Winbox”.

Una vez comprobada la configuración, se pone en producción distribuyendo la señal como se muestra en la figura 34.

Puede llamar la atención la no utilización del router proporcionado por el Kit Starlink, pero esto es debido a que dicho router no permitiría realizar la configuración descrita anteriormente.

En cambio, este router sí se conecta al sistema cuando se quiere monitorizar la velocidad, la conectividad con la antena, la latencia, la cobertura, etc. (Figura 35)



Figura 35.- Mediciones router Starlink en la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque. [10]

Una vez establecida la arquitectura de la red, así como la configuración de los dispositivos, se lleva a cabo un estudio de las prestaciones que ofrece el sistema Starlink. Para ello, se conectó el router proporcionado por el Kit para obtener los datos de velocidades y latencias; partiendo de la base de que la velocidad máxima ofertada por el proveedor es de 300 MB/seg.

Se realiza la comprobación desde tres puntos distintos de la red. (Figuras 36, 37 y 38)

- Desde la antena al router directamente.

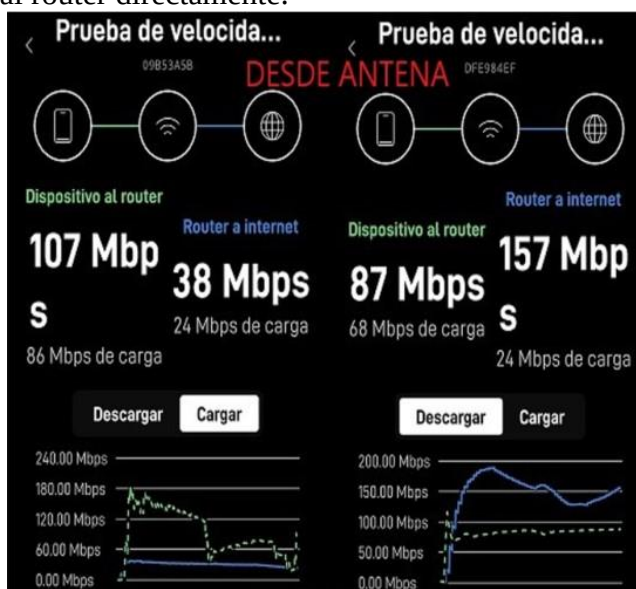


Figura 36.- Test velocidad desde router Starlink en la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque. [10]

- Desde el router a la toma de red de la Radio Principal.

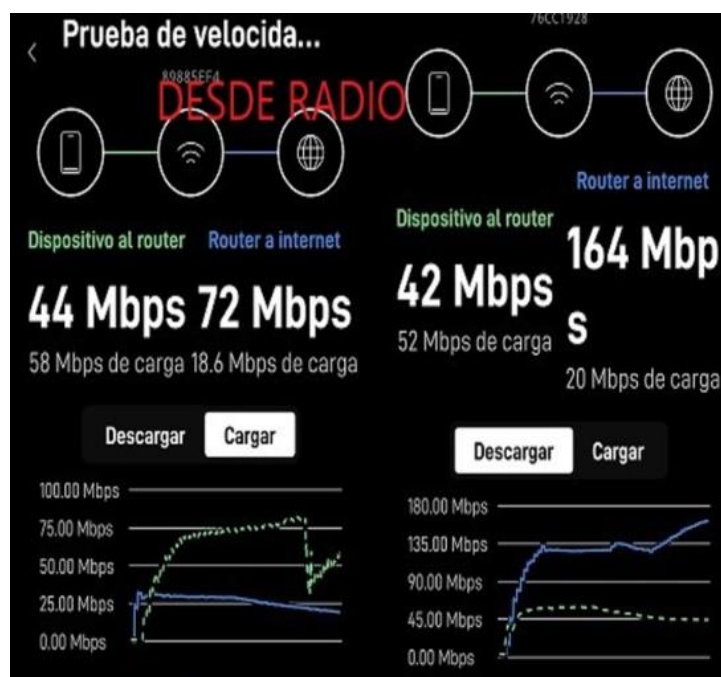


Figura 37.- Test velocidad desde router Starlink a toma red Radio Principal de la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque. [10]

- Desde la toma de la Radio Principal al Siwtch Netgear de distribución.



Figura 38.- Test velocidad desde toma de red Radio Principal a Switch Netgear de distribución de la fragata “Cristóbal Colón”. Fuente: Personal destino de la Radio del buque. [10]

La cobertura del sistema Starlink está siendo buena desde el puerto base, en Ferrol, hasta las zonas de tránsito y operaciones situadas en el mediterráneo central y oriental [10].

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

La experiencia de las pruebas y puesta en producción de los sistemas Starlink instalados en los buques en Zona de Operaciones, ha demostrado que es necesario normalizar el sistema que se ha de utilizar para el control del tráfico desde y hacia Internet. Hay que especificar una arquitectura de red que garantice los servicios que se van a prestar a la dotación, así como los parámetros de control y seguridad que se han de configurar en el Sistema.

5.1.1 Pruebas en la fragata “Navarra”

En líneas generales, se considera que Starlink es un sistema que, con una simplicidad máxima (prácticamente “plug and play”), ofrece una conexión a internet a velocidades implensables hasta la fecha en unidades operativas en alta mar.

Ofrece además la capacidad de potenciar el empleo de los sistemas de mando y control de las unidades, sin que se vea mermada la red SAPZO, para el ocio y esparcimiento de la dotación.

Actualmente Starlink ofrece una cobertura global en alta mar, algo que le otorga a este sistema muchas garantías para postularse como sistema de respaldo para toda la Armada alternativo al IGX. Algo que juega en contra de esta postulación, es la limitación en la conectividad que existe en los países que no están dentro del contrato de servicios de internet por satélite con la empresa Space X.

Este aspecto tiene fácil solución, si empleamos Starlink en alta mar y mantenemos el IGX para SAPZO, en los puertos que no tengan servicio Starlink.

También se considera conveniente valorar la posibilidad de ampliación del cupo de datos otorgado a la unidad, ampliándolo a 8 TB/mes, asignado un consumo medio de 220 Gbts/personas durante el despliegue.

El sistema permite, no solo la mejora del Servicio de Apoyo al Personal en Zona de Operaciones, sino también su empleo como sistema de respaldo, pues con mínimos ajustes en la conexión, es posible su uso como infraestructura de comunicación de los sistemas de mando y control, lo que permite una reducción de la latencia a mínimos nunca antes disponibles en pruebas de terminales navales de comunicaciones.

Con objeto de mejorar el sistema de respaldo, se propone el etiquetado de paquetes en la CAPA 3, para garantizar la priorización del tráfico, lo que proporcionará un flujo continuo de datos y permitirá que el sistema de respaldo sea más eficiente con tiempos de respuesta muy bajos.

5.1.2 Pruebas en la fragata “Cristóbal Colón”

A las conclusiones que, por el momento, ha llegado el personal de la fragata “Cristóbal Colón” son que el sistema Starlink supone un servicio estable y de alta velocidad en alta mar, siendo muy sencilla su instalación y puesta en marcha. Lo complejo es adaptar la cantidad de datos a cada usuario, debido a la limitación de datos otorgada por la Armada.

Al igual que la fragata “Navarra”, se considera conveniente valorar la posibilidad de ampliar el cupo de datos a 8 TB/mes.

El sistema se probó para dar respaldo a los sistemas militares sólo una vez, obteniendo buena calidad en el servicio de la WAN-PG y voz IP. Sin embargo, no fueron buenos los resultados obtenidos en los sistemas de Mando y Control. Se sospecha que este hecho es debido al balanceo de la IP pública

del propio sistema Starlink; al utilizar el proveedor el protocolo NATGEAR para asegurar su cupo de direcciones públicas de IPv4 semi-estáticas.

La segunda prueba realizada como respaldo de los sistemas militares se desarrolló en el puerto de Souda (Creta) durante los días 22 y 23 de noviembre de 2024.

Los resultados obtenidos en esta ocasión fueron satisfactorios. Diferenciando los servicios de baja clasificación con los de alta clasificación podemos resolver lo siguiente:

SERVICIOS BAJA CLASIFICACIÓN	
I3D	Se observa una latencia fluctuante. La web de Intranet tarda mucho en cargar completamente. El correo “Outlook” funciona correctamente en el correo entrada, pero en la salida de correos fuera del Dominio del barco se observa una latencia superior a lo normal. Las aplicaciones logísticas como el GALIA la respuesta es buena y sin latencias. Otras aplicaciones como el GLPI también obtiene buenos resultados de latencia. Manteniendo de forma estable una navegación fluida.
VoIP	Se mantienen conversaciones fluidas sin retardos, con varias llamadas simultaneas.
SERVICIOS DE ALTA CLASIFICACIÓN	
SACOMAR	La conexión es estable, recibiendo tráfico de mensajes sin demora. La salida de mensajes es más lenta que con los sistemas SECOMSAT.
NSWAN	Se obtienen buenos resultados de conectividad, tanto en el correo electrónico como en la navegación web y aplicaciones.
SC2N	Se obtienen buenos resultados tanto en el uso del correo electrónico, como en la navegación web y videollamadas. Se prueba una VTC-SKYPE con resultados satisfactorios.
SIJE	No se consigue levantar el servicio. Se prueba a reiniciar el router y el Epicom, sin que ello suponga cambio alguno.
BICES	No se consigue levantar el servicio. Se prueba a reiniciar el router y el Epicom, sin que ello suponga cambio alguno.

Tabla 6.- Resultados pruebas con Starlink como sistema de respaldo.

De los resultados obtenidos es fácil deducir que a medida que se van introduciendo dispositivos en la arquitectura de red, la calidad del servicio va disminuyendo. Para las conexiones se utilizó cable UTP Categoría 5, y los puntos de acceso wifi finales tienen capacidades superiores a los 300 MB; para minimizar las pérdidas de velocidad.

Las velocidades mínimas que se obtienen en los puntos de acceso finales (situados en las zonas de descanso de la dotación: camarotes, sollados, camareras,...) son de 30 MB, lo que garantiza tener un buen servicio de Whatsapp, llamadas IP y video llamadas; que son los servicios más demandados por la dotación.

5.1.3 Encuesta de satisfacción del servicio Starlink

Se confeccionó un cuestionario, que se acompaña como “anexo I”, en el que se le presentaba a la dotación de uno de los buques que provó el sistema. Como resultado de ese cuestionario, que fue respondido por un total de 185 personas de la dotación de la fragata “Cristóbal Colón”, el muestreo fue satisfactorio en el sentido de que participó el 90 % de la dotación, con un 10 % de absentismo. Se adjuntan en el citado anexo los histogramas resultantes por cada una de las preguntas realizadas a los miembros de la dotación.

5.2 Líneas futuras

La irrupción de los sistemas basados en constelaciones de órbita baja (LEO), ha significado un antes y un después para las comunicaciones satelitales comerciales. Se trata de sistemas que ofrecen unas ventajas muy destacables con respecto a los sistemas geoestacionarios, entre ellas podemos destacar:

- Una mayor capacidad de transmisión de datos.
- Baja latencia.
- Cobertura global (siempre que el número de satélites que formen la constelación sea suficiente para abarcar el globo terráqueo).
- Resiliencia (al estar formadas las constelaciones por tantos satélites, que se comunican entre ellos, les da esta característica).
- Más económicos (los programas de constelaciones GEO son tremendamente costosas y con unos plazos de puesta en producción muy elevados).

Entre los inconvenientes que podemos enunciar, destacan:

- La seguridad en las comunicaciones; es mucho más vulnerable que los sistemas GEO.
- Su marcada orientación comercial y no gubernamental.
- Ausencia de soberanía sobre el sistema. El propietario es el CEO de la empresa.
- Disponibilidad.

Por parte del CESTIC, en el año 2023 se realizó un estudio de viabilidad para valorar el uso de las constelaciones LEO como capa de transporte, realizándose a lo largo de ese año y el 2024, pruebas en diferentes Unidades de los tres Ejércitos, como se ha plasmado en los puntos 5.3.1 y 5.3.2 del presente documento.

Con los resultados obtenidos en las pruebas efectuadas, el CESTIC ha diseñado un plan de transición con un horizonte a medio plazo, para lo que ha configurado un plan de ruta que se muestra en la figura 39 [11].

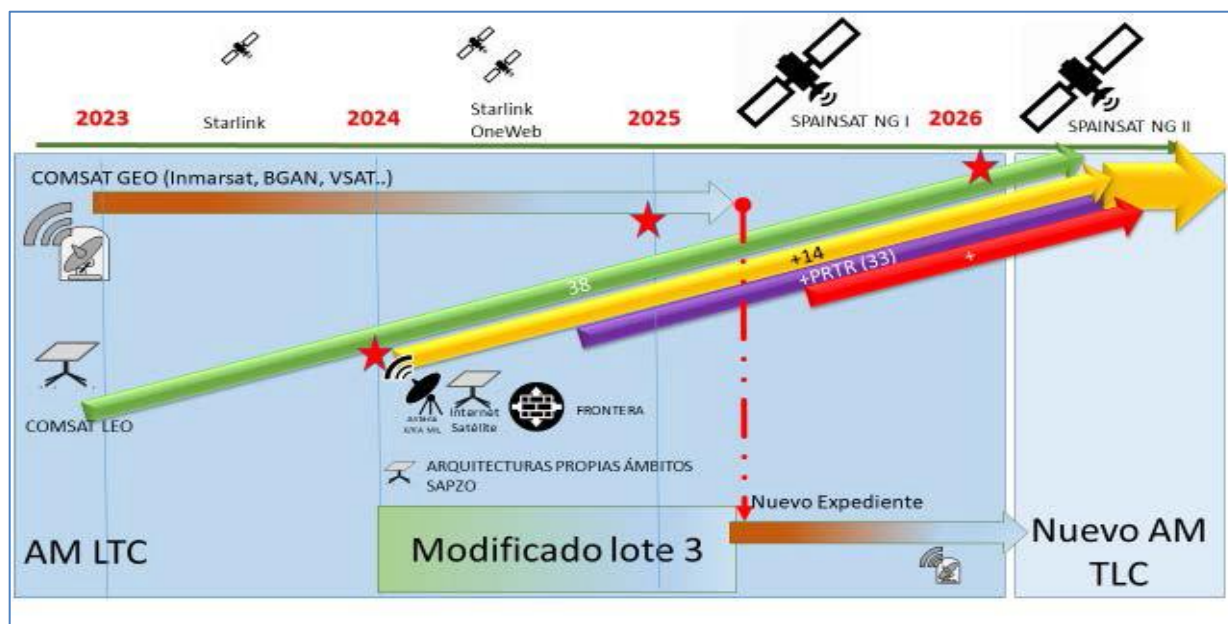


Figura 39.- Plan de transición de GEO a LEO en contexto con el Acuerdo Marco de Telecomunicaciones. Fuente: PLN-01-24 del CESTIC – Plan de Transición COMSATCOM-LEO. [11]

Paralelamente al Plan descrito anteriormente, el CESTIC ha presentado una propuesta para dotar al Ministerio de Defensa de España de una capacidad avanzada de comunicaciones seguras mediante una constelación de nanosatélites en órbita baja (LEO). Esta solución busca complementar las capacidades actuales proporcionadas por los satélites geoestacionarios SPAINSAT y XTAR-EUR, que están en proceso de sustitución por los nuevos SPAINSAT-NG. La constelación de nanosatélites ofrecería cobertura global, bajo coste y resiliencia, actuando como respaldo en caso de fallos de los sistemas principales y abriendo nuevas posibilidades operativas.

El crecimiento del sector espacial en la última década, impulsado por la democratización del espacio y el movimiento "New Space"¹⁵, ha reducido significativamente los costes y tiempos de fabricación y lanzamiento de satélites. Esto ha hecho viable el desarrollo de constelaciones basadas en nanosatélites, que pueden fabricarse y desplegarse en un año, en contraste con los programas tradicionales que requieren décadas y presupuestos elevados. Las constelaciones LEO destacan por su flexibilidad, escalabilidad y resiliencia, ya que su diseño descentralizado las hace menos vulnerables a ataques o fallos.

La propuesta contempla una constelación formada por nanosatélites de entre 1 y 10 kilogramos, equipados con tecnología SDR (Radio Definida por Software) para actualizar sus capacidades según las necesidades. Estas plataformas estarían optimizadas para operar en estándares 5G/6G, garantizando compatibilidad con dispositivos terrestres y proporcionando velocidades de hasta 2 Mbps. Unos 80-100 satélites permitirían ofrecer comunicaciones globales en tiempo real, aunque este número podría ajustarse según las áreas prioritarias de operación.

Entre los casos de uso principales se incluyen: soporte a redes IoT para inteligencia militar, seguimiento de tropas y activos, comunicaciones en zonas remotas, distribución segura de claves, y repetición de

¹⁵ "New Sapce".- se trata de una nueva manera de acometer la exploración y comercialización espacial, impulsada por el sector privado y caracterizada por la agilidad, la innovación y una visión nueva del espacio, que pasa a ser una extensión de nuestra economía y sociedad, en la que todo es posible.

señales de posicionamiento y navegación (PNT). La constelación actuaría como un recurso estratégico en ambientes degradados o como solución de respaldo.

Para poder llevar a cabo estos objetivos, el CESTIC ha previsto tres alternativas para implementar esta capacidad:

1. **Contratación de servicios bajo demanda** de empresas comerciales como SATELIOT o FOSSA, especializadas en IoT. Si bien estas ofrecen servicios asequibles, no cumplen con los requisitos específicos de defensa, aunque están dispuestas a colaborar en el diseño de cargas útiles personalizadas.
2. **Participación en la Fase II del proyecto IRIS2 de la Unión Europea**, prevista para 2027-2030, que contempla el desarrollo de una constelación de satélites LEO. Aunque esta opción reduciría costes compartiéndolos con otros países europeos, presenta incertidumbres sobre los plazos, la implementación y la capacidad de España para influir en el diseño.
3. **Desarrollo de una constelación nacional propia**, lo que permitiría al Ministerio de Defensa un control total sobre el diseño y las capacidades. Aunque más costosa, esta opción asegura la soberanía y la posibilidad de añadir capacidades según las necesidades futuras. Se estima un coste inicial de 25 millones de euros para una constelación básica de 40 nanosatélites y de 50 millones para alcanzar una capacidad global con 80 unidades.

La propuesta sugiere priorizar la opción 3 de una constelación nacional, combinada con la participación en IRIS2 como una solución complementaria a medio-largo plazo. Para ello, se recomienda que el propio CESTIC lidere el proyecto, colaborando con empresas españolas y aprovechando sus capacidades industriales.

Se plantea un enfoque escalonado:

1. Diseño y desarrollo de un demostrador con dos nanosatélites por un coste de 2 millones de euros.
2. Ampliación a una capacidad operativa inicial (IOC) con 40 nanosatélites.
3. Alcance de la capacidad operativa final (FOC) con hasta 80 nanosatélites para comunicaciones en tiempo real.

El coste total estimado de 50 millones de euros incluye el despliegue completo, pero excluye el mantenimiento a largo plazo, que consistiría en la reposición de satélites al final de su vida útil (esta vida útil oscila entre 2 y 4 años).

Esta constelación de nanosatélites LEO representa una oportunidad estratégica para reforzar las capacidades de comunicación del Ministerio de Defensa, alineándose con las tendencias globales de democratización del espacio y maximizando la autonomía operativa de España en un entorno cada vez más competitivo [12].

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] LOUREIRO VÁZQUEZ, JUAN CARLOS; INTRODUCCIÓN HISTÓRICA SATCOM, Escuela de Especialidades "Antonio de Escaño", 2018.
- [2] G. S. PAGE, «NATO 2A, 2B,» [En línea]. Available: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/nato-2.htm. [Último acceso: 15 10 2024].
- [3] M. MONTES PALACIO, «LA NUEVA GENERACIÓN DE SATÉLITES NATO,» *REVISTA AERONÁUTICA Y ASTRONÁUTICA*, nº Diciembre, p. 1162 a 1165, 1991.
- [4] DEPARTAMENTO TCI E.E. "ANTONIO DE ESCAÑO", COMUNICACIONES POR SATÉLITE - CURSO DE ESPECIALIZACIÓN TCI - PE-TCI.601-(B), Ferrol: Escuela de Especialidades "Antonio de Escaño", 2014.
- [5] JOSE MARÍA NÚÑEZ ORTUÑO, SISTEMAS DE COMUNICACIONES VÍA SATÉLITE, DE POSICIONAMIENTO, TELEDETECCIÓN Y RADIONAVEGACIÓN - MÁSTER DIRETIC - TEL 3, VIGO: CUD-MARÍN, 2022/2023.
- [6] HISDESAT, «PROGRAMA SPAINSAT-NG,» [En línea]. Available: <https://www.hisdesat.es/c-seguras/programa-spainsat-ng/>. [Último acceso: 05 noviembre 2024].
- [7] INMARSAT GOVERNMENT, «GLOBAL XPRESS,» [En línea]. Available: <https://www.inmarsatgov.com/capabilities/global-xpress/>. [Último acceso: 03 NOVIEMBRE 2024].
- [8] P. I. S. TELECOMUNICACIONES, «BANDAANCHA.EU,» [En línea]. Available: <https://bandaancha.eu/articulos/starlink-sera-mas-carro-espana-senala-10131>. [Último acceso: 04 noviembre 2024].
- [9] COMANDANTE FRAGATA "NAVARRA", «INFORME NÚM. 03/0233 - 27/11/2023 - USO TERMINAL STARLINK A BORDO DURANTE OPERACIÓN "ATALANTA" 2023,» FRAGATA "NAVARRA", 2023.
- [10] COMANDANTE FRAGATA "CRISTÓBAL COLÓN", «INFORME STARLINK,» FRAGATA "CRISTÓBAL COLÓN", 2024.
- [11] SECRETARÍA GENERAL DEL CESTIC, «PLAN DE TRANSICIÓN COMSATCOM-LEO. PLN-01-24,» CESTIC, 2024.
- [12] SECRETARÍA GENERAL DEL CESTIC, «SISTEMAS DE COMUNICACIONES SEGURAS POR SATÉLITES BASADAS EN UNA CONSTELACIÓN DE NANOSATÉLITES EN ÓRBITA LEO PARA APLICACIONES DEL MINISDEF,» CESTIC, 2024.
- [13] Á. FIGUERUELO HERNÁN, «STARLINK; LA NUEVA RED SATELITAL MUNDIAL DE COMUNICACIONES,» 2020.

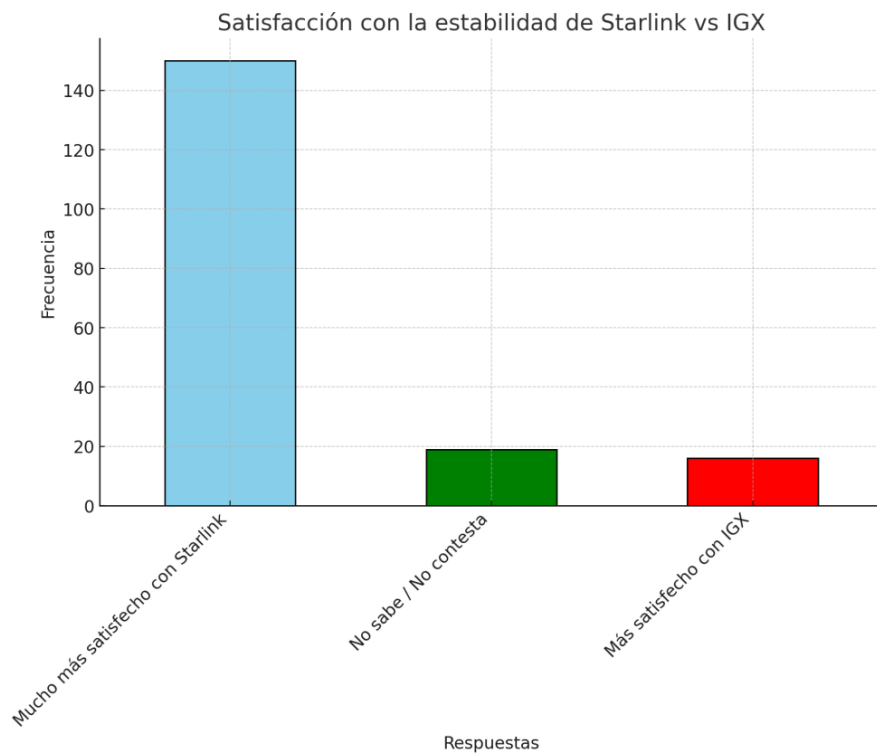
7. ANEXOS

ANEXO I: TEST SATISFACCIÓN DEL SERVICIO STARLINK**Test comparativo de la Calidad del Servicio de Starlink vs IGX:**

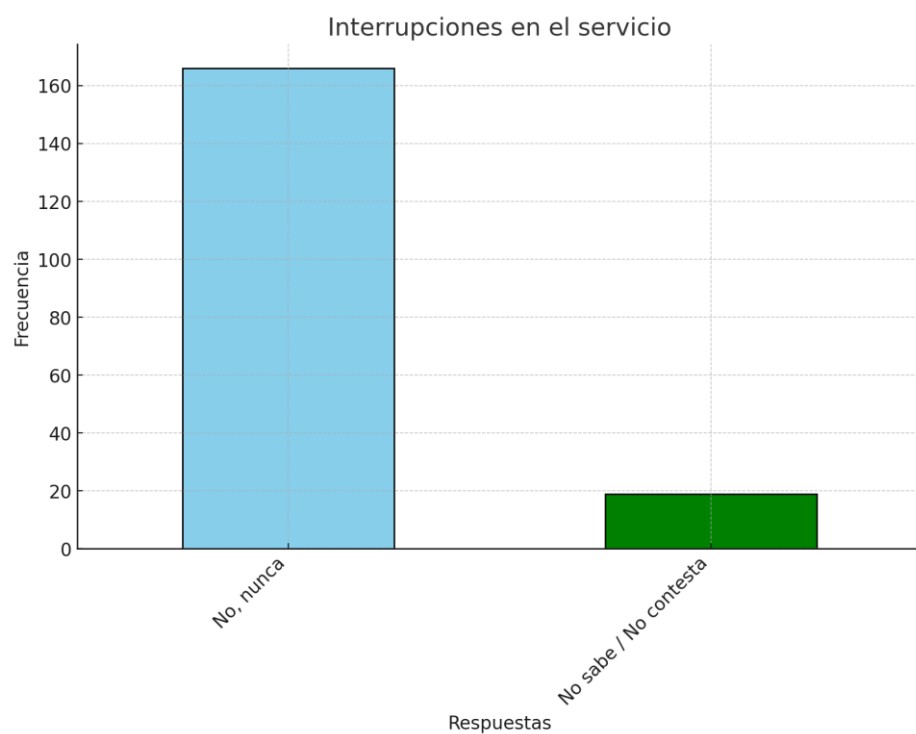
1. **En una escala del 1 al 10, ¿cómo calificaría la calidad general del servicio de Starlink?**
(1 = *Muy mala*, 10 = *Excelente*)
2. **¿Ha experimentado cortes o interrupciones en el servicio de Starlink durante su uso?**
 - Sí, con frecuencia
 - Sí, pero de manera ocasional
 - No, nunca
3. **¿Cómo considera la velocidad de transmisión de datos con Starlink?**
 - Muy rápida
 - Rápida
 - Adecuada
 - Lenta
 - Muy lenta
4. **Comparando Starlink con Inmarsat Global Express (IGX), ¿cuál de los dos servicios le ha brindado mejor cobertura en zonas remotas?**
 - Starlink
 - Inmarsat Global Express (IGX)
 - Ambos son similares
 - No he utilizado IGX
5. **¿Cuál es su nivel de satisfacción con la estabilidad de la conexión de Starlink en comparación con Inmarsat Global Express (IGX)?**
 - Mucho más satisfecho con Starlink
 - Más satisfecho con Starlink
 - Ambos ofrecen una estabilidad similar
 - Más satisfecho con IGX
 - Mucho más satisfecho con IGX

RESULTADOS DE LA ENCUESTA:

1ª PREGUNTA:



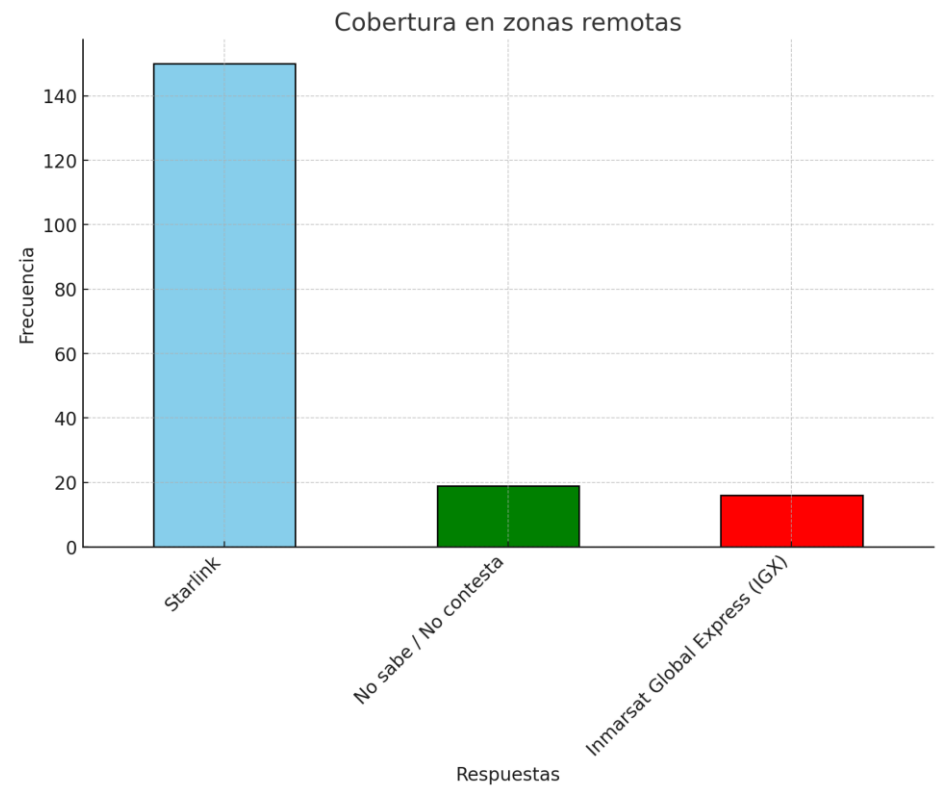
2ª PREGUNTA:



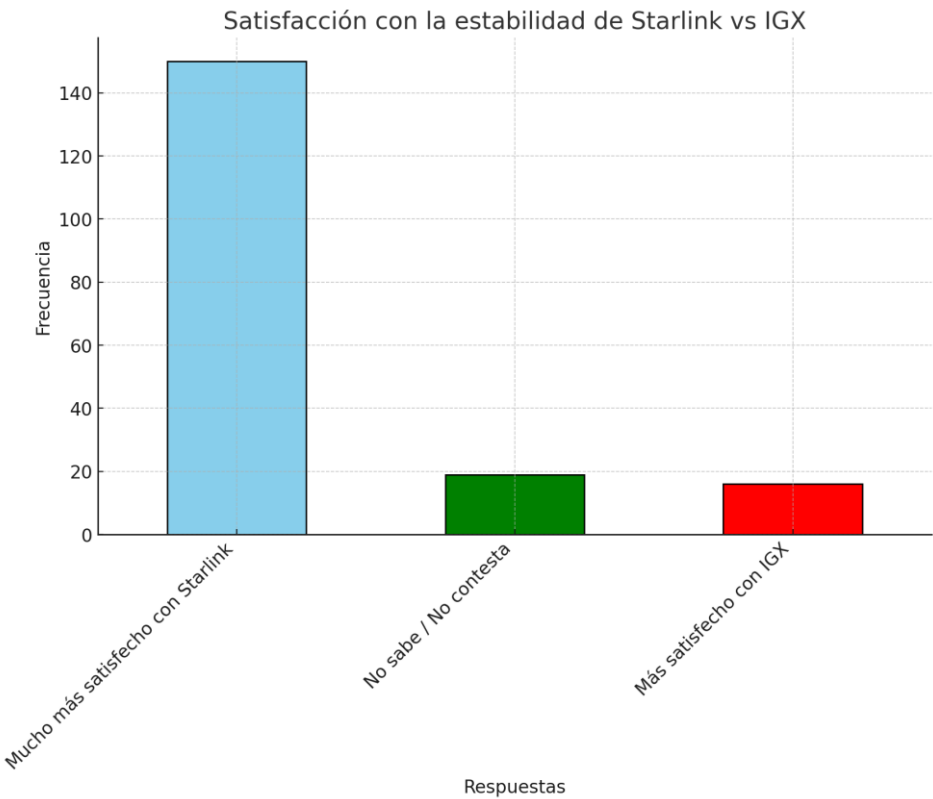
3ª PREGUNTA:



4ª PREGUNTA:



5ª PREGUNTA:



**ANEXO II: TABLA DE MUESTREO DE COBERTURA DURANTE DESPLIEGUE ATALANTA 2023 FRAGATA
“NAVARRA”**

MES	LATITUD	LONGITUD	LATENCIA (ms)	VELOCIDAD (Mb/s)
09/06/2023	36° 31,3´ N	006° 24,7´ W	97	193
10/06/2023	36° 38,5´ N	000° 12,5´ W	115	190
11/06/2023	37° 38´N	006° 42´ E	119	199
12/06/2023	37° 00,8´ N	013° 20,7´ E	90	193
13/06/2023	35° 59,1´N	019° 41,6´E	92	191
14/06/2023	SOUDA (CRETA)		N/A	
15/06/2023				
16/06/2023				
17/06/2023	35° 32,5´ N	025° 03,3´ E	118	200
18/06/2023	32° 47,3´ N	030° 29,3´ E	107	195
19/06/2023	30° 44,5´ N	032° 20,2´ E	92	193
20/06/2023	27° 24,6´ N	034° 40,5´ E	117	190
21/06/2023	AQABA (JORDANIA)		N/A	
22/06/2023				
23/06/2023				
24/06/2023	28° 54´ N	034° 44´ E	106	190
25/06/2023	24° 00,1´ N	036° 30,2´ E	91	190
26/06/2023	19° 35,9´ N	037° 36,7´ E	120	196
27/06/2023	16° 12´ N	041° 08´ E	93	191
28/06/2023	DJIBOUTI (DJIBOUTI)		N/A	
29/06/2023				
30/06/2023	11° 47,18´ N	043° 22,1´ E	115	192

MES	LATITUD	LONGITUD	LATENCIA (ms)	VELOCIDAD (Mb/s)
01/07/2023	11° 29,4 ´N	048° 05,3´ E	94	192
02/07/2023	12° 14 ´N	050° 46´ W	90	196
03/07/2023	13° 22´N	051° 11´ E	106	195
04/07/2023	SALALAH (OMÁN)		N/A	
05/07/2023				
06/07/2023				
07/07/2023	16° 05,2´ N	053° 45´ E	105	194
08/07/2023	11° 45,7´ N	049° 57,8´ E	95	193
09/07/2023	11° 02´ N	046° 11,3´ E	99	192
10/07/2023	11° 13,52´ N	045° 55,01´ E	110	196
11/07/2023	11° 47,1´ N	044° 38,7´ E	103	193
12/07/2023	11° 36´ N	044° 27,7´ E	80	198
13/07/2023	11° 30´ N	044° 03´ E	100	200
14/07/2023	DJIBOUTI (DJIBOUTI)		N/A	
15/07/2023				
16/07/2023				
17/07/2023				
18/07/2023				
19/07/2023	11° 47´ N	043° 17´ E	109	198
20/07/2023	12° 36,6´ N	045° 52,8´ E	113	192
21/07/2023	12° 30,5´ N	048° 03,2´ E	93	193
22/07/2023	11° 36,4´ N	044° 40´ E	110	197
23/07/2023	11° 01,1´ N	044° 38,5´ E	100	191
24/07/2023	11° 52,5´ N	045° 41,7´ E	100	197
25/07/2023	DJIBOUTI (DJIBOUTI)		N/A	
26/07/2023				
27/07/2023				
28/07/2023				
29/07/2023	11° 47,9´ N	043° 12,5´ E	110	195
30/07/2023	16° 34,7´ N	040° 43,18´ E	102	198
31/07/2023	19° 42´ N	037° 49´ E	91	196

MES	LATITUD	LONGITUD	LATENCIA (ms)	VELOCIDAD (Mb/s)
01/08/2023	23° 32´ N	036° 38,3´ E	95	191
02/08/2023	SAFAGA (EGIPTO)		N/A	
03/08/2023				
04/08/2023				
05/08/2023	26° 28,49´ N	034° 28,9´ E	110	193
06/08/2023	23° 07´ N	037° 15´ E	83	197
07/08/2023	19° 31,1´ N	038° 08,4´ E	84	198
08/08/2023	14° 34,7´ N	041° 57,8´ E	104	196
09/08/2023	DJIBOUTI (DJIBOUTI)		N/A	
10/08/2023				
11/08/2023	11° 46,2´ N	043° 25,4´ E	82	194
12/08/2023	11° 30´ N	049° 05´ E	119	195
13/08/2023	13° 31´ N	051° 10,2´ E	101	192
14/08/2023	16° 33,14´ N	056° 27,3´ E	120	198
15/08/2023	19° 39´ N	059° 03,1´ E	94	195
16/08/2023	23° 25,4´ N	060° 14,5´ E	85	197
17/08/2023	MUSCAT (OMÁN)		N/A	
18/08/2023				
19/08/2023				
20/08/2023	23° 24,4´ N	059° 03,1´ E	98	194
21/08/2023	18° 39,3´ N	058° 15,9´ E	107	197
22/08/2023	16° 12,4´ N	054° 05,1´ E	93	199
23/08/2023	SALALAH (OMÁN)		N/A	
24/08/2023				
25/08/2023	16° 41,5´ N	053° 54,19´ E	112	190
26/08/2023	13° 39,8´ N	051° 53,9´ E	112	192
27/08/2023	12° 08,8´ N	049° 32,7´ E	118	192
28/08/2023	11° 02,8´ N	046° 12,3´ E	83	200
29/08/2023	10° 51´ N	044° 57´ E	111	197
30/08/2023	DJIBOUTI (DJIBOUTI)		N/A	
31/08/2023				

MES	LATITUD	LONGITUD	LATENCIA (ms)	VELOCIDAD (Mb/s)
01/09/2023	11° 51,1' N	45° 26' E	94	190
02/09/2023	15° 56,2' N	41° 25,1' E	99	190
03/09/2023	16° 01,6' N	41° 05,2' E	98	199
04/09/2023	15° 58,29' N	41° 10,04' E	107	200
05/09/2023	DJIBOUTI (DJIBOUTI)		N/A	
06/09/2023				
07/09/2023	11° 42,6' N	43° 08,1' E	104	198
08/09/2023	13° 58,3' N	50° 39,76' E	86	195
09/09/2023	15° 34,7' N	52° 34,5' E	82	198
10/09/2023	SALALAH (OMÁN)		N/A	
11/09/2023				
12/09/2023	16° 32,9' N	053° 44,8' E	113	192
13/09/2023	11° 55,2' N	048° 44,4' E	101	192
14/09/2023	12° 06,15' N	051° 11,38' E	89	200
15/09/2023	07° 36,7' N	053° 29,8' E	101	190
16/09/2023	02° 25' N	054° 30,5' E	100	196
17/09/2023	01° 17,25' S	055° 09,13' E	93	194
18/09/2023	SEYCHELLES (REPÚBLICA DE LAS SEYCHELLES)		N/A	
19/09/2023				
20/09/2023				
21/09/2023				
22/09/2023	04° 13,76' S	055° 20,54' E	117	190
23/09/2023	04° 34,8' N	055° 28,8' E	114	191
24/09/2023	SEYCHELLES (REPÚBLICA DE LAS SEYCHELLES)		N/A	
25/09/2023	04° 12,2' S	055° 27,8' E	95	195
26/09/2023	00° 12,4' N	051° 32,41' E	92	200
27/09/2023	04° 33,5' N	048° 05,8' E	119	190
28/09/2023	06° 22,04' N	049° 27,56' E	94	195
29/09/2023	10° 32,5' N	052° 26,5' E	108	198
30/09/2023	11° 21,6' N	051° 29,7' E	95	196

MES	LATITUD	LONGITUD	LATENCIA (ms)	VELOCIDAD (Mb/s)
01/10/2023	011° 28,64´ N	048° 01,7´ E	113	191
02/10/2023	010° 42,1´ N	044° 56,7´ E	89	191
03/10/2023	DJIBOUTI (DJIBOUTI)		N/A	
04/10/2023				
05/10/2023	011° 48,3´ N	043° 27,3´ E	92	194
06/10/2023	013° 20´ N	048° 15,4´ E	89	191
07/10/2023	016° 01,34´ N	053° 55,17´ E	85	197
08/10/2023	019° 40,8´ N	058° 49,9´ E	105	192
09/10/2023	MUSCAT (OMÁN)		N/A	
10/10/2023				
11/10/2023	023° 38,7´ N	058° 57,4´ E	99	199
12/10/2023	017° 28,4´ N	056° 46,1´ E	99	194
13/10/2023	013° 48,3´ N	049° 51,8´ E	113	190
14/10/2023	DJIBOUTI (DJIBOUTI)		N/A	
15/10/2023	011° 44,56´ N	043° 08,31´ E	101	198
16/10/2023	017° 49,8´ N	040° 11,9´ E	99	191
17/10/2023	023° 18,59´ N	031° 06,38´ E	86	196
18/10/2023	028° 18,4´ N	033° 15,8´ E	93	197
19/10/2023	030° 41,5´ N	032° 21,2´ E	106	195
20/10/2023	034° 05,58´ N	028° 37,03´ E	86	195
21/10/2023	SOUDA (CRETA)		N/A	
22/10/2023				
23/10/2023	036° 03,33´ N	018° 13,87´ E		
24/10/2023	038° 01,07´ N	010° 50,77´ E		
25/10/2023	038° 16,6´ N	003° 33,6´ E		
26/10/2023	037° 24,19´ N	001° 24,5´ E		
27/10/2023	ROTA (PUERTO BASE)			
28/10/2023				
29/10/2023				
30/10/2023				
31/10/2023				