

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

**GRADO EN INGENIERIA EN SISTEMAS DE
TELECOMUNICACION**

Trabajo Fin de Grado

Viabilidad de un Portfolio de Productos de Servicios Móviles
por Satélite de Nueva Generación

Autor: Luis Gilaberte Rhodes

Director/es: Judith M. Redoli Granados

TRIBUNAL:

Presidente: David Anastasio de la Mata Moya

Vocal 1º: Manuel Rosa Zurera

Vocal 2º: Judith M. Redoli Granados

FECHA:

Indice

Resumen.....	1
Abstract	3
Glosario de términos.....	5
Resumen extendido	7
Introducción	13
Motivación.....	14
Estado del arte.....	14
1. Comparación de la banda Ka con las bandas Ku, S, L y C.....	15
1.1 Banda L.....	16
1.1.1 Datos técnicos.....	16
1.1.2 Servicios proporcionados en Banda L	17
1.1.3 condiciones de propagación y Limitaciones de la banda.....	26
1.1.4 Conclusiones de la banda L.....	28
1.2 Banda S.....	29
1.1.1 Datos técnicos.....	29
1.2.2 Servicios proporcionados en Banda S	30
1.2.3 condiciones de propagación y limitaciones de la banda.....	34
1.2.4 Conclusiones de la banda S	35
1.3 Banda C	36
1.3.1 Datos técnicos.....	36
1.3.2 Servicios proporcionados en Banda C.....	37
1.3.3 condiciones de propagación y limitaciones de la banda.....	38
1.3.4 Conclusiones de la banda C	39
1.4 Banda Ku	40
1.4.1 Datos técnicos.....	40

1.4.2 Servicios proporcionados en Banda Ku	41
1.4.3 condiciones de propagación y limitaciones de la banda.....	42
1.4.4 Conclusiones de la banda Ku	43
1.5 Banda Ka.....	45
1.5.1 Datos técnicos.....	45
1.5.2 condiciones de propagación y limitaciones de la banda.....	47
1.5.3 Conclusiones de la banda Ka	49
2. Servicios que se pueden distribuir en la banda Ka.	50
2.1 Marítimos	51
2.1.1 Inmarsat.....	51
2.1.2 Intelsat	53
2.1.3 Telenor Satellite Broadcasting	54
2.2 Aéreos:	54
2.2.1 Inmarsat.....	54
2.2.2 Telefónica.	54
2.2.3 ViaSat	55
2.2.4 Honeywell	57
2.3 Terrestres:	58
2.3.1 ViaSat	58
3. Tipos de satélites utilizados en la banda Ka.	61
Olimpus F1	64
Satelites Inmarsat-5.....	65
Amazonas-3.....	67
Eutelsat: KA-SAT	69
Intelsat: 29e y 33e	71
Avanti: Hylas 1, 2 y 3	74

4. Planificación del transpondedor satélite.....	77
4.1 distribución del transpondedor.....	77
4.2 cálculo del enlace en sentido Forward	83
4.2.1 Enlace ascendente	83
4.2.2 Enlace descendente	99
4.3 cálculo del enlace en sentido Return.....	107
4.3.1 Enlace ascendente	107
4.3.2 Enlace descendente	113
Conclusiones.....	125
Bibliografía:.....	127
Referencia de ilustraciones	135

Lista de figuras

Figura 1: esquema del enlace de una red VSAT [1]	13
Figura 2: reparto de frecuencias para los sistemas de posicionamiento global [2]	20
Figura 3: localización de los satélites meteorológicos [3].....	21
Figura 4: estación de telemetría portátil [4]	22
Figura 5: Datos técnicos del servicio marítimo de Inmarsat [5].....	24
Figura 6: Datos técnicos del servicio aéreo de Inmarsat [6].	25
Figura 7: ejemplo de estructura Solaris Mobile en banda-S [7].....	34
Figura 8: diferencia entre una huella convencional y una creada por spot-beams [8] ..	45
Figura 9: patrón de asignación de frecuencias a los spot-beams de un satélite Iridium [9]	46
Figura 10: comparación de los dos terminales de Intellian para los servicios marítimos en banda Ka [10]	53
Figura 11: Esquema de conexión entre estaciones terrenas y avión [11]	55
Figura 12: hoja de especificaciones del equipo Viasat 5320 [12]	56
Figura 13: hoja de especificaciones del terminal 5230 [13].....	57
Figura 14: terminal Surfbeam-2 Pro de ViaSat [14].....	59
Figura 15: terminal de 75 cm de ViaSat [15]	60
Figura 16: hoja de especificaciones del terminal con 1,2 metros de antena [16]	60
Figura 17: olimpus F1 [17].....	64
Figura 18: Inmarsat-5 [18].....	66
Figura 19: Amazonas-3 [19].....	68
Figura 20: KA-SAT [20].....	69
Figura 21: cobertura satélite KA-SAT [21]	70
Figura 22: cobertura satélite Intelsat 29e [22]	72
Figura 23: cobertura satélite Intelsat 33e [22]	73

Figura 24: cobertura de los spot beams del intelsat 29e y 33e [23]	73
Figura 25: cobertura compuesta de los satelites Hylas 1, 2 y 3 [24]	74
Figura 26: satélite Hylas 2 [25]	75
Figura 27: Planificación del enlace en banda Ka	78
Figura 28: Division del canal en banda Ka	80
Figura 29: esquema conceptual del reparto de frecuencias de portadoras UpLink	82
Figura 30: esquema conceptual del reparto de frecuencias de portadora DownLink ...	82

Lista de Tablas

Tabla 1: resumen de velocidades y BER en sentido Forward.....	10
Tabla 2: resumen de velocidades y BER en sentido return.....	10
Tabla 3: bandas del espectro utilizadas por el programa Landsat [31]	30
Tabla 4: datos tecnicos de los satelites Inmarsat-5.....	66
Tabla 5: datos tecnicos del satelite amazonas_3	68
Tabla 6: datos tecnicos satelite KA-SAT	70
Tabla 7: datos tecnicos Intelsat 29e [54]	71
Tabla 8: datos tecnicos Intelsat 33e [54]	72
Tabla 9: datos tecnicos Hylas 1 [97].....	75
Tabla 10: datos tecnicos Hylas 2 [98].....	76
Tabla 1: resumen de velocidades y BER en sentido Forward.....	123
Tabla 2: resumen de velocidades y BER en sentido return.....	123

Resumen

Los servicios móviles son de los servicios de telecomunicaciones que más rápido han evolucionado hasta el día de hoy, sin embargo no siempre existen redes terrestres disponibles para proporcionar este tipo de servicios ante la creciente demanda de usuarios en diferentes entornos (aéreo, marítimo y terrestre). En muchos casos, los satélites proporcionan la única solución viable hasta la fecha, sin embargo las bandas clásicas utilizadas para las comunicaciones por satélite (L, S, C y Ku) no permiten transmitir los servicios móviles por satélite actuales que presentan una velocidad promedio de 50 Mbps. Por ello se regulariza para su uso una nueva banda (Ka) con el suficiente ancho de banda para transmitir estos servicios. Después de un estudio de las bandas actuales (L, S, C y Ku) que permite ver la evolución de las comunicaciones móviles por satélite a lo largo del tiempo, se describen las nuevas tecnologías implementadas en la banda Ka, claves para proporcionar servicios de banda ancha en movilidad con calidad. Por último, se lleva a cabo la planificación tanto del enlace forward como del enlace return para los tres tipos de servicios móviles: terrestre, marítimo y aéreo en banda Ka.

Palabras clave: Banda-Ka, Spot-Beam, HTS, Servicio-Móvil, Link-Budget.

Abstract

Actually mobile services are facing the quickest evolution among all telecommunications services. However, terrestrial networks are not always available for this purpose due to the growing demand of users in different environments (air, sea and land). In many cases, satellites provide the only feasible solution until now, however the classic bands used for satellite communications (L, S , C and Ku) don't allow real high speed mobile satellite services (50 Mbps). To solve this problem, the ITU regularized the use of a new band (Ka) with enough bandwidth to provide them. This study allows seeing the evolution of mobile satellite communications over time. Moreover, the new technologies implemented in the Ka band, key to providing broadband services on the move with high quality are described. Finally, ka band forward link and return link planning for the three types of mobile services (land, sea and air) are performed.

Keywords: Ka-Band, Spot-Beam, HTS, Mobile-Service, Link-Budget.

Glosario de términos

BER: Bit Error Rate

C/N: Carrier to Noise

DVB-S: Digital Video Broadcasting - Satellite

DVB-S2: Digital Video Broadcasting - Satellite second Generation

DVB-SH: Digital Video Broadcasting - Satellite services to Handhelds

FDMA: Frequency Division Multiple Access

G/T: Gain to temperature

HPA: High Power Amplifier

HTS: High throughput satellite

HUB: Telepuerto

ITU: International Telecommunications Union

M-APSK: M- Amplitude Phase Shift Keying

M-PSK: M-Phase Shift Keying

PIRE: Potencia Isotrópica Radiada Equivalente

SFD: Satellite Flux Density

TDMA: Time Division Multiple Access

VSAT: Very Small Aperture Terminals

Resumen extendido

Los servicios móviles por satélite crecen año tras año. Actualmente en 2015 es uno de los sectores de las telecomunicaciones con más proyección de futuro. Por este motivo en este trabajo de fin de grado presentaremos los límites de las bandas clásicas de transmisión asignadas a la difusión de contenidos vía satélite y propondremos una solución a estos límites, que radica en la utilización de una banda de frecuencias más grande. Recopilaremos que clase de servicios móviles se pueden distribuir por satélite y en qué tipos de áreas pueden ser dados. Describiremos las principales características de los satélites necesarias para operar estos servicios y llevaremos a cabo los cálculos necesarios para la realización de un enlace por satélite para tres de los servicios recopilados anteriormente.

Empecemos describiendo las bandas clásicas de transmisión por satélite. La primera banda asociada directamente a los servicios móviles por satélite desde los años 90 es la banda L. Definida entre 1 y 2 Ghz, solo puede albergar servicios de banda estrecha tales como servicios de posicionamiento global, servicios meteorológicos, telemetría y comunicaciones móviles de velocidad igual o inferior a 432 Kbps (valor aproximado). Por lo que la convierte en una banda de frecuencias obsoleta para los servicios de banda ancha que se imparten en la actualidad (velocidades de 50 Mbps).

La siguiente banda en utilizarse es la banda S. situada entre 2 y 4 Ghz proporciona mayor ancho de banda que su predecesora, sin embargo históricamente esta banda está asociada a las comunicaciones y la investigación gubernamental, no dejando mucho espacio en el que insertar servicios de comunicaciones móviles civiles. Los servicios que se pueden distribuir en ella son teledetección, investigación y operaciones espaciales, radioastronomía y servicios móviles como los impartidos en banda L pero de mayor ancho de banda de transmisión, aunque insuficiente para los servicios actuales.

La siguiente banda conocida es la banda C. Situada entre 4 y 8 Ghz está reservada principalmente para los servicios fijos por satélite en zonas donde la densidad de precipitaciones es abundante todo el año (como las zonas tropicales). Esto se debe a que presenta una muy buena relación entre el ancho de banda para transmitir datos

de banda ancha y unas pérdidas relativamente bajas producidas por la lluvia. Sin embargo la transmisión de estos servicios fijos no deja espacio para la transmisión de los servicios móviles que nos interesan para nuestro trabajo.

Por último se encuentra la banda Ku. Situada entre 11 y 17 Ghz es la otra banda asociada a los servicios fijos por satélite. Los servicios fijos que no se pueden impartir en la banda C por ancho de banda, o por que no existen frecuencias de portadora disponibles se imparten en la banda Ku. Este hecho hace que actualmente la banda Ku esté completamente saturada de operadores que demandan cada vez mayor ancho de banda, y que apenas dejan espacio para los servicios móviles por satélite, relegando estos a una pequeña porción del ancho de banda disponible y por consiguiente reduciendo el número de servicios que se pueden dar en ella.

Ante esta situación, existe la imperiosa necesidad del uso de la última banda de transmisión por satélite regulada hasta la fecha, la banda Ka. Esta banda se encuentra entre 18 y 31 GHz con la gran ventaja de ser una banda emergente en la actualidad y por lo tanto sin prácticamente adjudicaciones frecuenciales en comparación con las bandas clásicas de transmisión. Esto permite que todos los sectores donde pueden darse los servicios móviles (aéreo, marítimo y terrestre) dispongan de una porción de ancho de banda sin problemas.

Sin embargo esta banda de frecuencias presenta los inconvenientes de la “tan alta frecuencia”. Las pérdidas producidas por lluvia, se disparan hasta límites no vistos hasta el momento en las comunicaciones por satélite. Esto provoca el encarecimiento de los equipos y el evidente incremento de la PIRE así como de la G/T que necesitan los equipos para poder disponer de una calidad de enlace buena.

Los servicios proporcionados en la banda Ka se pueden proporcionar tanto en aviones como en barcos o vehículos terrestres, pero esencialmente son los mismos (acceso a internet, intercambio de datos, acceso a plataformas de ocio, visionado de video o telefonía). Los distintos equipos embarcados proporcionan diferentes rangos de velocidad en función del área de trabajo de los servicios y de la dirección de la transmisión de los datos, ya que en los sistemas VSAT en los que se basan estos equipos son bidireccionales. Los sistemas VSAT disponen de un enlace de descarga de

gran capacidad (forward) y uno de subida para las peticiones de datos más lento (return). Esto permite que las velocidades típicas en sentido forward alcancen los 50 Mbps y las de sentido return lleguen a los 20 Mbps en la banda Ka.

Explicados los grandes inconvenientes de las bandas de trabajo existentes hasta la fecha y la aparición de la nueva banda Ka, pasemos a definir los satélites operativos para esta nueva banda.

En primer lugar los satélites hasta la fecha se podían diferenciar entre satélites geoestacionarios y satélites de órbita baja, en función de su periodo orbital o la distancia a la superficie terrestre. Sin embargo actualmente los satélites más usados en la banda Ka son prácticamente geoestacionarios, pues permiten una vida útil más larga (15 años) que los satélites de órbita baja (5-7 años), y se denominan satélites HTS (satélites de alto rendimiento). Estos satélites HTS disponen de PIRE's y G/T's mayores que en las otras bandas para hacer frente al aumento de las pérdidas que aparecen en los enlaces, y presenta una nueva tecnología de cobertura denominada spot beam. Los spot beams son huellas de cobertura más pequeñas que las que presentan las otras banda, de tal forma que con una agrupación de spot beams podemos cubrir el mismo área que con una huella tradicional, pero solo asignando potencia a la zona que se encuentra en uso (un spot beam concreto) y no a todos los spot beams que no esten siendo utilizados. De esta forma se aprovechan de mejor manera los recursos del satélite.

Las empresas Hispasat, Eutelsat, Inmarsat, Intelsat o Avanty ya disponen de más de un satélite de estas características en sus flotas, lo que les ha permitido ser los pioneros en la distribución de servicios móviles de banda ancha por satélite.

Por ultimo hemos calculado el balance de enlace para tres servicios, uno marítimo (servicio 1), otro aéreo (servicio 2) y otro terrestre (servicio 3). Todos ellos se encuentran asignados al mismo transpondedor satélite, el telepuerto que proporciona los datos de gran tamaño que desean descargar los tres terminales VSAT se encuentra en Madrid (España), el terminal marítimo se localiza en un barco situado en el Canal de la Mancha, el terminal Aero en un avión que sobrevuela Alemania y el terminal terrestre en una antena transportable en el norte de Argel.

Para la realización de estos enlaces hemos tenido en cuenta la potencia máxima que podía recibir nuestro satélite, y así transmitir una PIRE suficiente para alcanzar el satélite con una buena relación señal a ruido pero sin destruir su receptor. En nuestro enlace hemos tenido en cuenta todas las atenuaciones correspondientes a este rango de frecuencias, que mostraban una atenuación de la señal significativa (Lluvia, gases, apuntamiento, polarización y pérdidas por transmisión en espacio libre) y las hemos calculado acorde a la recomendación correspondiente de la UIT (unión internacional de las telecomunicaciones). Por último hemos impuesto el requisito de que la probabilidad de Bit erróneo (BER) debía ser menor o en torno a 10^{-6} para disponer de una buena calidad de enlace. Acorde a estos planteamientos estos son los resultados que hemos obtenido:

Sentido Forward

	Velocidad (Mbps)	BER del enlace ascendente	BER del enlace descendente
Servicio 1	20	$2,4 * 10^{-30}$	$3,4 * 10^{-15}$
Servicio 2	40	$3,4 * 10^{-16}$	$1,6 * 10^{-7}$
Servicio 3	50	$4,1 * 10^{-13}$	$2,7 * 10^{-15}$

Tabla 1: resumen de velocidades y BER en sentido Forward

Sentido Return

	Velocidad (Mbps)	BER del enlace ascendente	BER del enlace descendente
Servicio 1	4	$1,08 * 10^{-7}$	$2,36 * 10^{-15}$
Servicio 2	3	$1,7 * 10^{-6}$	$1,7 * 10^{-19}$
Servicio 3	4	$3 * 10^{-8}$	$7,4 * 10^{-14}$

Tabla 2: resumen de velocidades y BER en sentido return

Introducción

Actualmente los servicios por satélite destinados a VSAT crecen año tras año reportando importantes beneficios al sector. Los operadores tradicionales de comunicaciones móviles por satélite como INMARSAT están expandiendo el segmento satélite a los servicios móviles de datos.

Actualmente la banda ancha móvil es un servicio en alza. La necesidad de conseguir una conectividad en cualquier lugar induce que el medio más rápido de implementar estos servicios, como por ejemplo internet, es el enlace por satélite. Las bandas de trabajo tradicionales en comunicaciones móviles marítimas no permiten alta capacidad. Por ello es necesario plantear otra banda de trabajo.

Producto de esta motivación surge la banda Ka, una banda lo suficientemente ancha como para pasar de transmisiones de datos de banda estrecha a comunicaciones de banda ancha en las comunicaciones móviles por satélite basadas en los sistemas VSAT como muestra la siguiente figura.

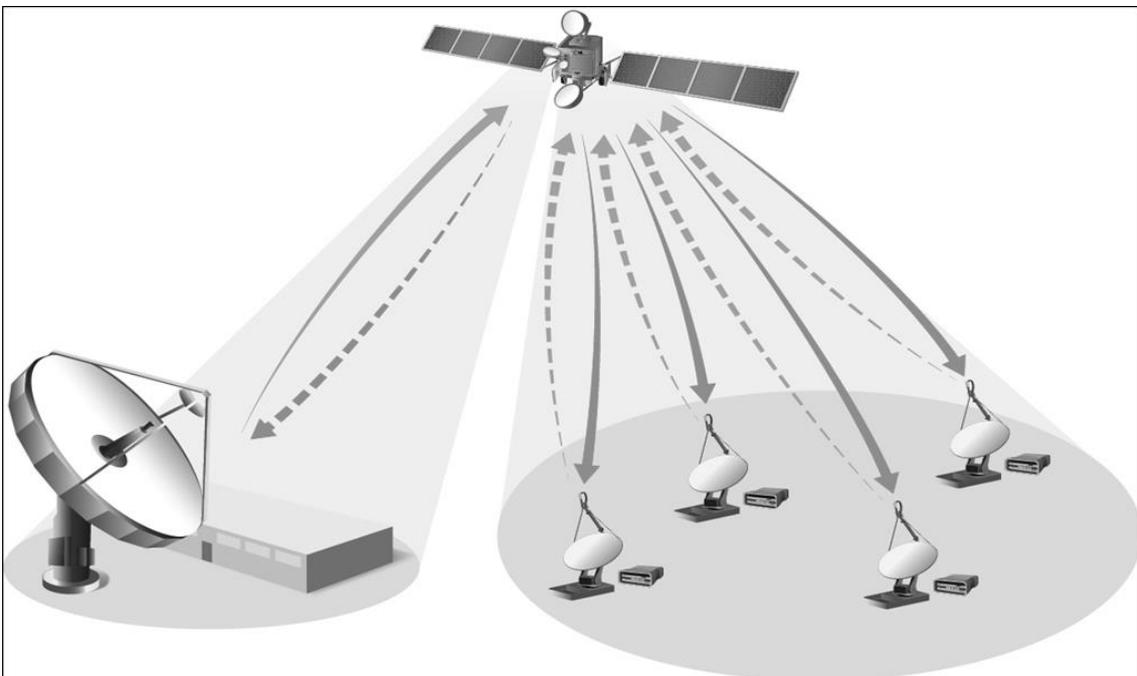


Figura 1: esquema del enlace de una red VSAT [1]

Motivación

Uno de los principales objetivos en la Unión Europea de 2020 (horizonte 2020) es la comunicación global de todos sus integrantes, para ello las zonas aisladas que no disponen de conexiones terrestres, ven en las comunicaciones por satélite una alternativa segura de mantenerse conectados al resto del mundo.

Para poder ofrecer conexiones de alta capacidad, como de las que disponen todos los integrantes que residen en áreas de fácil acceso, como las grandes ciudades, es necesario que los satélites de nueva generación dispongan de un ancho de banda mayor del que disponen hasta la fecha, comparable al de las redes terrestres. En este contexto surge la banda Ka (situada entre 18 y 31 Ghz).

Estado del arte.

Actualmente las bandas tradicionales (L, S, C y KU) son las más utilizadas en las comunicaciones por satélite. Sin embargo después de más de 20 años de uso, están al límite de sus prestaciones o capacidad de albergar nuevos servicios y satélites. Con la regulación de la banda Ka para su uso en estas comunicaciones, los diferentes operadores han puesto en órbita nuevos satélites que utilizan esta banda, y permiten un gran paso en la evolución de las comunicaciones, así como desarrollado equipos capaces de dar velocidades de transmisión susceptibles de competir con las comunicaciones terrestres (50 Mbps).

Explicada el contexto en el cual se enmarca este documento, pasaremos a describir el contenido del mismo.

1. Comparación de la banda Ka con las bandas Ku, S, L y C.

En el siguiente apartado se procederá a evaluar las diferentes bandas de frecuencia tales como la banda L, banda C, banda Ku y la emergente banda Ka. Se presentarán las principales ventajas y los principales inconvenientes de cada una de estas bandas, así como los servicios que se han venido impartiendo en las bandas L, C y Ku, y los motivos por los cuales estas bandas no son aptas para dar los nuevos servicios móviles requeridos en el presente y futuro de las telecomunicaciones por satélite. Además se explicará porqué una posible solución para la implementación de estos servicios es utilizar la actual banda Ka.

Actualmente la demanda de servicios de comunicación tales como el acceso a internet o visionado de videos en streaming e intercambio de archivos de gran tamaño en cualquier momento y lugar se ha visto incrementada, así como la posibilidad de acceder a estos servicios cuando y como se quiera. Esto plantea un problema para la banda más utilizada actualmente, la banda Ku, pues esta se encuentra saturada por los múltiples servicios que se ofrecen actualmente como radiodifusión de televisión por satélite (Direct Broadcasting Satellite, DBS) mediante redes VSAT. A este problema de la falta de frecuencias para transmitir, se añade otro en cuanto a posicionamiento del satélite en órbita se refiere. La gran mayoría de las posiciones orbitales para esta banda y para la segunda con mayor capacidad, la banda C, se encuentran ya asignadas para los actuales servicios fijos de banda ancha. Esto condiciona la entrada al mercado en estas bandas de nuevos satélites con mayor capacidad que los actuales. Como respuesta a este problema surge como solución la utilización de una banda mucho más amplia a la indicada anteriormente, la banda Ka. Su rango frecuencial situado entre los 18 y 31 GHz supera ampliamente a su predecesora, la banda Ku, como se verá posteriormente. Además, cuenta con la ventaja añadida de encontrarse todavía en fase de inicio de explotación, por lo que se encuentra muy poco utilizada y con mucho ancho de banda disponible para estos nuevos servicios móviles.

1.1 Banda L

1.1.1 Datos técnicos

La banda L se encuentra definida como la banda de frecuencias más baja del espectro radioeléctrico perteneciente al rango de las microondas, dentro del rango de la alta frecuencia utilizado para la comunicaciones. Está situada entre 1 y 2 GHz [1], por lo que dispone de 1 GHz total en toda la banda para albergar todos los servicios por satélite que se dan en ella. Este ancho de banda a su vez se divide en anchos de banda más pequeños, siendo estos asignados a las diferentes empresas que pretenden explotar esta banda. Los anchos de banda varían entre 158 MHz y 230 MHz [2] a repartir entre los diferentes satélites y servicios que deseen operar. Esos anchos de banda son repartidos por las empresas operadoras del satélite entre todos los transpondedores del mismo, asignándose a cada transpondedor 20 MHz [3] totales de ancho de banda aproximadamente.

Las empresas que desean transmitir sus servicios, alquilan porciones de ese ancho de banda en cada transpondedor, denominados Canales. Los canales en la banda L son de 25 KHz [4] (valor aproximado que depende de cada operador de satélite y las necesidades de la empresa que da los servicios), y son el ancho de banda final donde se transmitirán los datos del servicio. Cada empresa puede alquilar múltiples canales o un transpondedor entero, para transmitir diferentes servicios o un mismo servicio con mayor ancho de banda.

El enlace ascendente en banda L opera en 1,6 GHz, mientras que el enlace descendente lo hace en 1,5 GHz (frecuencias de portadora) [5].

Las técnicas de acceso al medio son TDMA y FDMA [6].

Los estándares de transmisión más utilizados son DVB-SH, DVB-S, DVB-S2 [7] [8] y estándares propios de Inmarsat como el E, M, P, mini M y AERO [6].

Las modulaciones más utilizadas son BPSK y QPSK [6].

Antes de continuar, definamos el estándar que manejaremos en todo el documento principalmente, el DVB-S (digital video Broadcasting - Satellite). Este estándar de

transmisión es el más utilizado en todo el mundo para comunicaciones por satélite, porque permite el envío conjunto en una misma trama: voz, video y audio. Se basa en el estándar MPEG-2 para la transmisión de datos y determina los parámetros físicos de transmisión en el enlace tales como la modulación, la corrección de errores o el roll off. Este estándar utiliza principalmente la modulación QPSK, con roll off de 35%, FEC: $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{5}{6}$ y reed Solomon (204,188). Este estándar presenta una variante para algunos servicios móviles por satélite, DVB-SH, que esencialmente es la misma que DVB-S pero enfocado para dispositivos de pequeño tamaño en movimiento como teléfonos móviles. Puesto que nuestros dispositivos son equipos móviles pero de mayor tamaño instalados sobre vehículos, nos centraremos en el uso del primero [\[9\]](#) [\[10\]](#).

1.1.2 Servicios proporcionados en Banda L

Es la banda más utilizada y extendida para los servicios móviles por satélite. Por ello empresas como Iridium, Globalstar o Inmarsat la siguen utilizando a día de hoy por si sola para transmitir sus servicios o en combinación con otra banda para aumentar el ancho de banda de estos servicios.

Los servicios que encontramos dentro de esta banda se pueden agrupar en cuatro grupos bien diferenciados [\[2\]](#):

- Servicios de posicionamiento global (GPS, Glonas, Galileo...)
- Servicios meteorológicos por satélite (adquisición de datos)
- Servicios de telemetría (adquisición de datos)
- Servicios de comunicaciones móviles vía satélite (telefonía, internet, intercambio de archivos...)

Los servicios de posicionamiento global como GPS de origen americano o Galileo de origen Europeo, GLONASS de origen Ruso y QZSS de origen Japonés proporcionan todos sus servicios de posicionamiento en esta banda.

Los sistemas GPS son sistemas de origen americano que permiten la navegación civil y militar. Utilizan 4 satélites de una constelación formada por hasta 24 satélites a 22000 km de altura para proveer datos de localización a los receptores de cada usuario, la información transmitida se codifica mediante la generación de un código con propiedades similares a las del ruido (el código es una señal pseudoaleatoria) y se utilizan técnicas de espectro ensanchado para evitar las interferencias.

En la actualidad, las señales a través de las cuales se transmite la información necesaria para realizar los cálculos de la localización se modulan con las siguientes portadoras:

La señal de uso civil codificada con un código de adquisición común que cumple las características anteriores de código ruidoso y que se modula con la portadora L1 centrada en 1575 MHz.

La señal de uso militar codificada por un código de precisión encriptado mucho más seguro que el de adquisición común se modula con las señales L1 y L2 centrada en 1227 MHz, lo que confiere robustez a la comunicación. El ancho de banda total de estas portadoras es de 1 MHz. [\[11\]](#)

El sistema GLONASS es muy parecido al sistema GPS, comprendido por una constelación de 21 satélites más 3 de repuesto para proveer una cobertura global, a una altura de 19000 Km, de manera que siempre se encuentran visibles 4 satélites para proporcionar los datos de posicionamiento. Sin embargo presentan una diferencia fundamental, el sistema GLONASS utiliza sus dos portadoras tanto para la señal de uso militar como para la de uso civil (a diferencia de GPS), las cuales se encriptan con un código de precisión y uno de adquisición común respectivamente, sin embargo esos códigos son la mitad de eficientes que en las señales GPS. Las dos señales que transmiten L1 y L2 se dividen en múltiples canales según esta fórmula:

$$\text{Frecuencia banda L1: } f_1(k) = 1598 \text{ MHz} + k * 9/16 \text{ MHz}$$

$$\text{Frecuencia banda L2: } f_2(k) = 1242 \text{ MHz} + k * 7/16 \text{ MHz}$$

Donde k es el canal asignado para mandar la información por lo que cada canal tiene un ancho de banda de 0,56 MHz. [\[12\]](#)

La unión Europea pretende implementar un sistema de posicionamiento global propio, aún en fase de implementación, para evitar la dependencia con los sistemas GPS y GLONASS. Este sistema se conoce como Galileo y estaba previsto para el año 2014. A día de hoy solo 8, de los 30 satélites que formaran el segmento espacial del sistema están desplegados. Estos satélites se encuentran desplegados en orbitas MEO y a diferencia de los otros sistemas solo tiene aplicaciones civiles.

En función de las prestaciones y del grado de capacidad de localización el sistema Galileo proporcionará hasta 6 servicios:

- servicio abierto
- servicio comercial
- servicio Safety of life
- servicio público regulado
- servicio proporcionado por elementos locales
- servicio de búsqueda y rescate

Las frecuencias utilizadas por el sistema Galileo para la banda L en el enlace ascendente se sitúan entre 1330 y 1350 MHz. En el caso del enlace descendente se localizan entre 1164 - 1215 MHz y entre 1260 – 1300 MHz.

El sistema Galileo también dispone de una porción en banda C entre 5000 – 5030 MHz para los servicios Safety of life que requieran más ancho de banda. [\[13\]](#)

A continuación se puede ver una representación de las diferentes frecuencias para los sistemas de posicionamiento.

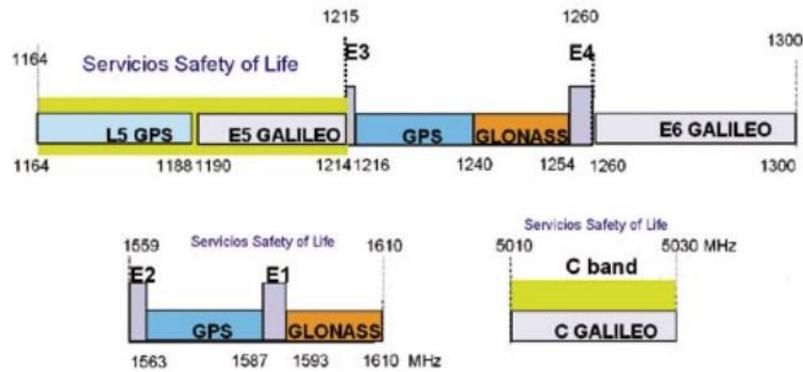


Figura 2: reparto de frecuencias para los sistemas de posicionamiento global [2]

Los servicios meteorológicos

La adquisición de datos meteorológicos está asignada por la UIT entre las frecuencias 1670 y 1710 MHz de la banda L. En estas frecuencias ofrecen sus servicios los satélites geoestacionarios y los de órbita baja. Cada uno de los satélites tiene asignado un ancho de banda aproximadamente entre 750 KHz y 5,4 Mhz dependiendo de la funcionalidad [14].

Los satélites geoestacionarios GOES, GMS, GOMS, INSAT y METEOSAT son un buen ejemplo de estos servicios, estos satélites se encuentran gestionados por la EUMETSAT (organización europea para la explotación de los servicios meteorológicos). Son satélites que disponen de capturadores ópticos de baja resolución espacial (entre 2,5 y 5 KM/pixel) que permiten capturar imágenes del espectro visible, infrarrojo térmico y vapor de agua, con los que se pueden observar la evolución del clima en la superficie terrestre [15].

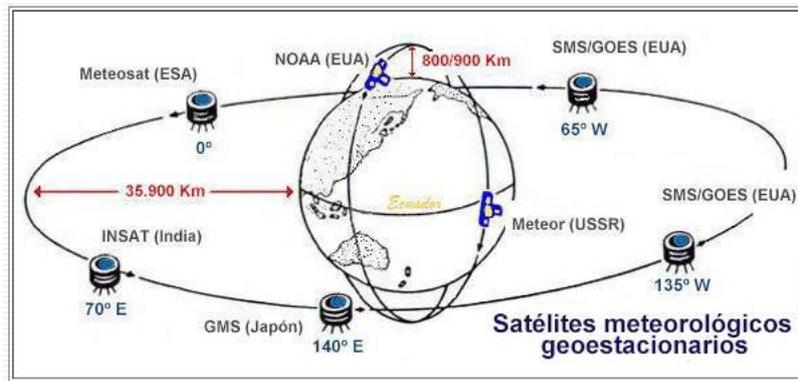


Figura 3: localización de los satélites meteorológicos [3]

Existen otro tipo de servicios meteorológicos más precisos proporcionados por satélites de órbita polar (satélites NOAA) que permiten resoluciones de 1 km/píxel, lo que permite incrementar el seguimiento y cartografiar la evolución de los recursos naturales. Estas fotografías se emiten en 1700 MHz [16].

Los servicios de telemetría se fundamentan a día de hoy en la necesidad de monitorizar diferentes datos de sistemas localizados en lugares remotos como pueden ser oleoductos, satélites, naves espaciales y demás sistemas que por su localización no disponen de redes terrestres para comunicar con el sistema de control y mando. La banda L es muy utilizada por los operadores comerciales para dar este tipo de servicios, sin embargo las agencias espaciales utilizan la banda S. Ello se debe a que requieren de un ancho de banda mayor por los datos que manejan.

Inmarsat dispone de servicios de telemetría basados en M2M (máquina a máquina) que permiten monitorizar de forma remota dos equipos distintos, así como acceder a diferentes aplicaciones. Uno de estos servicios proporciona seguridad mediante una pequeña estación base portátil con una cámara, utiliza la banda de frecuencias 1626,5-1675 MHz para el enlace descendente y 1518-1559 MHz para el enlace ascendente [17] [18].

Site Guard

BGAN M2M

Satellite Transmit Frequency	1626.5–1675 MHz
Satellite Receive Frequency	1518–1559 MHz
GPS Frequency	1574.42–1576.42 MHz
IDU Weight	< 1.5 Kg
IDU Dimensions	150 mm x 200 mm x 45 mm
ODU Weight	< 1.9 Kg (excludes mount and cable)
ODU Dimensions	385 mm x 385 mm x 33 mm
Operating Temperature	-40° C to +75° C
Storage Temperature	-55° C to +75° C
Humidity	95% RH at +40° C
ODU Wind Loading	Survival wind loading (with optional mount) up to 100 mph
IDU Water and Dust	IP-40 Compliant
ODU Water and Dust	IP-65 Compliant
Input Voltage	+12 Vdc/+24 Vdc nominal
Firmware Upgrades	Over the air or local



Figura 4: estación de telemetría portátil [4]

Los servicios de comunicaciones móviles vía satélite. La banda L es ampliamente utilizada para este tipo de servicios desde principios del siglo 21. Debido a la baja cantidad de datos que se transmitían simultáneamente (transmisiones de banda estrecha) como por ejemplo las llamadas de voz, permitía que los 100 MHz reservados para estos servicios en banda L fueran suficientes.

Empresas como IRIDIUM utilizaban esta banda entre 1616 y 1626.5 MHz [19] en sus satélites de órbita baja para proporcionar servicio móvil por satélite a regiones como África central. O empresas como Inmarsat que siguen utilizando esta banda entre 1525 y 1646.5 MHz en lugares que por orografía no se disponía de redes terrestres de acceso móvil como puede ser a bordo de cargueros o aviones comerciales [3] [20].

Inmarsat actualmente proporciona la gran mayoría de todos sus servicios en los tres sectores existentes: marítimo, aéreo y terrestre, en esta banda. A continuación los describiremos brevemente, ya que sirven como referencia de tipo de servicios de comunicaciones móviles vía satélite en cada uno de dichos sectores.

En el sector marítimo, la necesidad de comunicación más importante en cualquier travesía por alta mar es el acceso a los servicios de emergencia en caso de que sean necesarios. Para ello Inmarsat propone diversos servicios de comunicaciones que explicaremos detalladamente.

Desde que en 1992 los sistemas de socorro y seguridad marítima global se pusieron en funcionamiento (GMDSS), las comunicaciones por satélite han sido la principal forma de retransmitir su información [\[21\]](#).

Dentro de sus paquetes de servicios marítimos el conocido como fleetBroadband, es uno de los más representativos de esta empresa. Está destinado principalmente a buques de gran calado, aunque esto no impide que buques más pequeños puedan hacer uso de él.

El servicio proporciona voz y datos a lo largo de todos los mares y océanos del globo terráqueo exceptuando los polos terrestres, ya que sus satélites geoestacionarios no disponen de cobertura en estas zonas. La banda de este servicio permite dar funcionalidades no solo de seguridad como puede ser el conocimiento de las condiciones meteorológicas o el estado de la mar. También permite la recepción y el envío de mensajes de texto con la localización global adquirida mediante GPS, acceso a internet, videoconferencias y VoIP.

Para dar este servicio Inmarsat dispone de varias tarifas con distintas velocidades y líneas telefónicas que se ajustan a las necesidades de la naviera que contrata el servicio.

El servicio más básico consta de tres líneas telefónicas y una velocidad de 150 Kbps para la transmisión de datos en la utilización de aplicaciones como el correo electrónico o el acceso a internet, conexión directa sin coste con el centro de emergencias marítimas más cercano y comunicación para tres faxes. El más completo llega hasta las 9 líneas y 432 Kbps de velocidad para la transmisión y recepción de datos, permite adquisición de datos en streaming garantizando una velocidad mínima de 256 Kbps y la ya mencionada comunicación con los servicios de emergencia [\[22\]](#).

FleetBroadband 150	FleetBroadband 250	FleetBroadband 500
Find out more >	Find out more >	Find out more >
<ul style="list-style-type: none"> < 150kbps Always-on IP data Affordable global voice and data Up to 3 extra phone lines Group 3 fax For small to medium-size vessels 	<ul style="list-style-type: none"> < 284kbps Always-on IP data < 128kbps Guaranteed Steaming IP Up to 9 extra phone lines Group 3 and 4 fax GSM calls using pre-paid SIM 	<ul style="list-style-type: none"> < 432kbps Always-on IP data < 235kbps Guaranteed Steaming IP Up to 9 extra phone lines Group 3 and 4 fax GSM calls using pre-paid SIM
Antennas from: H 22.1cm x D 29.1cm, 2.5kg	Antennas from: H 27.56cm x D 32.92cm, 3.9kg	Antennas from: H 64.3cm x D 65.3cm, 18kg

Figura 5: Datos técnicos del servicio marítimo de Inmarsat [5].

En el sector aéreo, mediante el paquete de servicio SwiftBroadband de INMARSAT las aeronaves pueden acceder a voz y a datos al mismo tiempo. Mediante el intercambio de paquetes para la transmisión y recepción de datos basados en los servicio IP best-effort se consiguen velocidades de hasta 432 Kbps por canal.

SwiftBroadband presenta las siguientes características:

Telefonía por satélite. Permite tener acceso telefónico en pleno vuelo con calidades similares a la telefonía fija terrestre. Para conseguir esta calidad, cada canal dedicado a voz utiliza conmutación de circuitos. También se puede disponer de hasta cuatro líneas diferentes de voz por canal, reduciendo la calidad de las llamadas. O incluso ganar líneas de voz utilizando VoIP con una calidad inferior.

En el intercambio de datos se permite utilizar de forma simultánea diferentes aplicaciones hasta completar el ancho de banda permitido, este ancho de banda puede ser modificado mediante la adhesión de canales de datos para ajustarse al consumo real de los usuarios.

Para mantener la seguridad en las líneas de voz y datos permite conexiones con encriptación de datos y voz, es decir, sistemas y protocolos de encriptación de señal

para codificar la información sensible de ser robada o manipulada. Estos sistemas son los más utilizados actualmente en las redes de seguridad de comunicaciones: STU-IIIb, STE, Taclane, KIV-7 y Brent.

La cobertura para este paquete de servicios no está disponible en las zonas polares, al igual que en el caso anterior, debido a que los satélites Inmarsat I-4 son geoestacionarios. [23]

Se disponen de hasta tres paquetes comerciales para las compañías aéreas o propietarios de aeronaves:

SwiftBroadband (HGA)	SwiftBroadband (IGA)	SwiftBroadband 200
Find out more >	Find out more >	Find out more >
<p>Four channels < 432kbps each</p> <p>Dynamic IP streaming 8, 16, 32, 64 or 128kbps (combined 192kbps max)</p> <p>X-stream full-channel streaming > 250kbps</p> <p>Circuit-switched voice and multi-voice VoIP</p> <p>Standalone or simultaneous operation with Inmarsat Aero H+</p> <p>Compliant with Arinc 781</p>	<p>Four channels up to 332kbps each</p> <p>Dynamic IP streaming 8, 16, 32, 64 or 128kbps (combined to a maximum of 160kbps per channel)</p> <p>Circuit-switched voice</p> <p>Multi-voice VoIP</p> <p>Compliant with Arinc 781</p>	<p>Single channel < 200kbps</p> <p>Dynamic IP streaming 8 or 16 kbps</p> <p>Circuit-switched voice and up to 3 multi-voice VoIP</p> <p>Stand-alone system</p> <p>Small and compact avionics</p> <p>Low-gain blade antenna</p>
<p>Antenna weight: High gain < 9.5kg</p>	<p>Antenna weight: Intermediate gain < 3.5kg</p>	<p>Antenna weight: SwiftBroadband 200 < 0.7kg</p>

Figura 6: Datos técnicos del servicio aéreo de inmarsat [6].

En el sector terrestre, Inmarsat dispone de un servicio denominado BGAN, en el que mediante antenas de pequeño tamaño (25 cm), permite voz y datos para dar acceso a internet, intercambio de correo electrónico, teleconferencia o video en streaming con velocidades de Hasta 492 KBps. El comportamiento es similar a lo explicado en el sector marítimo [24].

1.1.3 condiciones de propagación y Limitaciones de la banda

Al ser la banda L la más baja del espectro radioeléctrico de alta frecuencia es muy robusta frente a las atenuaciones producidas por la lluvia, los gases atmosféricos, el centelleo y otros posibles factores troposféricos.

Como hemos indicado anteriormente la banda L se sitúa entre 1 y 2 GHz. Si tenemos en cuenta la recomendación de la UIT P.618-11, que describe las predicciones de propagación a tener en cuenta en las comunicaciones por satélite, los dos únicos tipos de atenuación que podrían afectar a la señal serían los efectos del centelleo ionosférico y la lluvia. Los primeros solo son importantes en frecuencias inferiores a 1 GHz, puesto que el índice de reflexión de la ionosfera a frecuencias superior a la indicada es despreciable y no refleja las ondas de vuelta a la superficie terrestre o no genera multitrayectos hacia el satélite. Las irregularidades del índice de refracción a lo largo de la ionosfera también son despreciables por lo que tampoco se tendrán en cuenta (explicado detalladamente en la recomendación UIT-R P531).

La lluvia, aunque empieza a atenuar en las frecuencias superiores a 1 GHz y va incrementando su efecto pernicioso cuanto mayor es la frecuencia, no es hasta los 10 GHz cuando la atenuación debida a este fenómeno empieza a considerarse. Ya que hasta frecuencias superiores a los 10 GHz las gotas de lluvia no empiezan a distorsionar la frecuencia de la onda ni de su polarización.

En la referencia P.618-11 podemos ver los métodos de cálculo para la atenuación debida a la lluvia en función de la frecuencia y la zona geográfica donde se emite la señal.

Un efecto similar ocurre con la atenuación debida a los gases atmosféricos. No es hasta frecuencias superiores a 10GHz cuando los gases de la atmosfera, como el vapor de agua, absorben parte de la energía de la onda transmitida, reduciendo la potencia de la misma (especificado en la recomendación P.618-11). [\[25\]](#)

Aunque los efectos troposféricos no afecten a esta banda de frecuencias, si lo hace la atenuación de la señal debida a las pérdidas de propagación en espacio libre.

Las pérdidas por espacio libre son características de cualquier medio de transmisión no guiado, y son directamente proporcionales a la frecuencia de transmisión de las señales, así pues las encontraremos como una limitación en todas las bandas que analizaremos y serán cada vez mayores con el aumento de la frecuencia.

Estas pérdidas se producen por la propia dispersión de la onda al propagarse entre el emisor y el receptor. El método de cálculo para estas pérdidas queda definido en la siguiente fórmula (todos sus componentes se introducen en unidades naturales):

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4\pi d f}{c} \right)$$

Dónde:

L_{bf}: Pérdidas en espacio libre

d: la distancia del radioenlace (Km)

c: la velocidad de la luz (Km/s)

f: frecuencia de la señal (MHz)

La recomendación de la UIT P.525-2 describe el procedimiento de cálculo de estas pérdidas.

Como se puede apreciar es la banda, dentro de la alta frecuencia, con menor atenuación de todas las que se estructuran en este documento. Sin embargo si presenta una gran limitación, y es su reducido ancho de banda como hemos podido apreciar en los apartados anteriores.

Este hecho hace que sea imposible transmitir datos de banda ancha por lo que no cubre las necesidades actuales de los usuarios móviles. Y la convierten en una banda poco útil para los servicios por satélite actuales.

1.1.4 Conclusiones de la banda L

Se puede concluir este apartado deduciendo que la banda L presenta grandes ventajas de transmisión en cuanto a la reducida potencia necesaria para transmitir la información, el reducido tamaño de los equipos emisores y receptores, así como las bajas pérdidas de propagación. Pero con un problema insalvable a día de hoy, su reducido ancho de banda. Hasta hace unos años, era suficiente para las comunicaciones móviles de voz que no ocupaban gran ancho de banda. Pero actualmente solo permite la transmisión de servicios de banda estrecha, suficiente para las operaciones a bordo de barcos y aeronaves pero que no se adaptan al consumo real de banda ancha que demandan sus pasajeros. Y por lo tanto esta banda está quedándose obsoleta en la implementación de nuevos servicios.

1.2 Banda S

1.1.1 Datos técnicos

La banda S se encuentra situada en el espectro radioeléctrico entre la banda L y la banda C. el tamaño de la banda S es de aproximadamente el doble que su predecesora, situándose entre los 2 y 4 GHz [1]. Contiene parte de la banda de UHF y SHF formando la frontera entre ambas. La banda completa está compuesta por 2 GHz pero al igual que ocurría en la banda L, solo una porción se dedica a la transmisión de servicios móviles por satélite. El ancho de banda reservado para las comunicaciones móviles está dividido en bandas de aproximadamente 150-215 MHz [2], que se asignan a los operadores de satélites. Esas bandas se dividen entre los diferentes transpondedores de aproximadamente 30 MHz(los 30 MHz de ancho de banda se consiguen combinando dos ancho de banda de 15 MHz con polarizaciones ortogonales entre sí) [1] [26] [27]. Este ancho de banda se divide en canales para su alquiler como ya ocurría en la banda L, o se oferta de forma completa dependiendo del uso que las empresas que ofertan los servicios quieran hacer.

El enlace ascendente opera entre 2,1 y 2,2 GHz, mientras que el enlace descendente lo hace entre 1,9 y 2 GHz (frecuencias de portadora) [2].

Las técnicas de acceso al medio son TDMA y FDMA [6].

Los estándares más de transmisión utilizados son DVB-S2, DVB-SH [7] [28] y estándares propios de Inmarsat como el E, M, P, mini M y AERO [6].

Las modulaciones más utilizadas son BPSK y QPSK [6] [29].

1.2.2 Servicios proporcionados en Banda S

Esta banda se puede considerar la más extendida en los servicios de investigación. Agencias como la NASA o la ESA la utilizan para comunicarse con los diferentes satélites de observación, así como para establecer las comunicaciones con los transbordadores espaciales. No obstante, también es utilizada por los operadores de comunicaciones móviles como Inmarsat [27] o Solaris Mobile [26].

Los diferentes servicios que se pueden encontrar en la banda S se pueden diferenciar en los siguientes grupos [2]:

- Servicios de teledetección (adquisición de datos)
- Operaciones espaciales
- Investigación espacial (sondas espaciales)
- Radioastronomía
- Servicios de comunicaciones móviles (intercambio de datos entre Europa y América)

Los servicios de teledetección actuales se utilizan principalmente para el estudio de la evolución de los materiales terrestres y las condiciones medioambientales del planeta, los proyectos Landsat, Spot, Envisat, IRS, Terra o Ikonos son los más conocidos [30].

Los satélites Landsat de órbita baja situados de 705 a 915 Km de altura con respecto a la superficie terrestre, se fundamentan en la utilización del espectro electromagnético para conformar las imágenes en alta resolución de la superficie terrestre, llegando a usar también el espectro del infrarrojo para aumentar el contraste entre tierra, agua, vegetación...

Bandas	longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
*Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Tabla 3: bandas del espectro utilizadas por el programa Landsat [31]

En 1972 se puso en servicio el primero de estos satélites, el Landsat-1, disponía de las bandas 1 a la 7 para formar imágenes con una resolución de 80 metros y una velocidad de transmisión de 15 Mbps. Posteriormente llegaron los Landsat 2 y 3 añadiendo una banda de visualización más para las imágenes, la térmica, con los satélites 4 y 5 y 6 se aumentó la velocidad del enlace hasta los 85 Mbps añadiendo transpondedores en banda L, X, y KU. Con la llegada en 1999 del Landsat 7 se consiguieron velocidades de 150 Mbps y añadir una nueva banda cromática a las imágenes aumentando su resolución hasta los 30 metros. En la actualidad el Landsat-8 es capaz de proporcionar imágenes con una resolución de hasta 15 metros de la superficie terrestre. El tamaño de cada una de las imágenes comprimidas en el Landsat 8 es de 1 GB y se almacenan en una memoria interna de aproximadamente 3,14 Terabits. Para la descarga de datos, la NASA, que es quien opera el satélite, dispone de un enlace de 384 Mbps en banda X (10,7 a 12,5 GHz) para la descarga de datos [\[31\]](#) [\[32\]](#).

Operaciones espaciales: Incluyen todas aquellas comunicaciones necesarias para llevar a cabo con éxito las diferentes misiones de las distintas agencias espaciales, por ejemplo: NASA, ESA o la Agencia Espacial Británica. En esta misma banda también se dan las comunicaciones con la estación espacial internacional, que permiten tanto el intercambio de datos de investigación que realizan los astronautas, como la medición y el seguimiento de las condiciones estructurales y de habitabilidad para la seguridad de estos. Definido anteriormente en la banda L como telemetría. También se producen las comunicaciones con los transbordadores espaciales de la NASA durante las misiones espaciales. Para ello se disponen de dos canales situados en 2106,4 MHz (ascendente) y 2287,5 MHz (descendente) para el canal principal y 2041,9 (ascendente) y 2217,5 MHz (descendente) para el secundario. Así se evitan las interferencias en caso de dos naves en misión espacial al mismo tiempo en posiciones orbitales próximas. Ambos canales se modulan con modulación PM y permiten velocidades de 72 Kbps para los enlaces ascendentes y 192 Kbps para los enlaces descendentes con visión directa entre las antenas del transbordador y las de las estaciones terrenas, y 96 Kbps en caso de no ser así para transmitir voz y telemetría [\[33\]](#).

Investigación espacial: En el caso concreto de la NASA la telemetría es un recurso vital de las misiones de exploración espaciales llevadas a cabo con sondas como Voyager 1 y 2 y las Pioneer 10 y 11. Estas sondas se utilizan para recopilar toda clase de datos del sistema solar, de los planetas que lo componen y el espacio interestelar más lejos de nuestro sistema solar. Para comunicarse con las estaciones de la NASA situadas en España, Australia y Goldstone (USA) las sondas Voyager disponen de 4 transmisores redundantes en banda S a 2,3 GHz y 2 receptores también en banda S para las ordenes procedentes de estas estaciones base. La velocidad máxima de transmisión decrece conforme la distancia a nuestro planeta aumenta, siendo de 115Kbps a la distancia de Júpiter y reduciéndose a 14,4 Kbps a la altura de Neptuno. Actualmente la distancia con ambas sondas es tan grande que las transmisiones desde estas, solo puede realizarse en banda X a 8,4 GHz. Esto se debe a que la gran distancia de separación entre la sonda y los receptores terrestres provoca una disminución muy grande de la potencia a lo largo del camino recorrido, emitida en ambas bandas por la sonda, con la diferencia de que en la banda S además de estas transmisiones actualmente se emiten otras transmisiones de servicios móviles terrestres como puede ser el WIFI (2,4 GHz) o móvil 3G (2,1 GHz). Estos servicios móviles enmascaran completamente la potencia de la señal transmitida por la sonda y hacen imposible su recepción. Como esto en banda X no ocurre no existen problemas de interferencia con otras señales y se decide actualmente solo recibir la información en banda X [\[34\]](#) [\[35\]](#) [\[36\]](#).

Radioastronomía: el estudio de la materia del universo mediante las ondas que esta emite también se encuentra localizado en esta banda. La UIT reserva el rango entre 2690 y 2700 MHz para tales estudios.

Los servicios de comunicaciones móviles. Empresas civiles como INMARSAT o Solaris Mobile poseen desde 2009 una porción de ancho de banda para dar servicios de datos entre Europa y América de mensajería corta (SMS) [\[1\]](#) entre las frecuencias 1,98 a 2,01 GHz y 2,17 a 2,2 GHz para el enlace descendente y ascendente respectivamente [\[2\]](#). Tanto Inmarsat como Solaris Mobile asignan un ancho de banda a cada transpondedor de los satélites igual a 15 MHz, como se dispone de polarización horizontal y vertical por cada transpondedor, ese ancho de banda pasa a ser 2 x 15 MHz [\[1\]](#).

INMARSAT junto con la empresa Thales Alenia Space, llevan a cabo un proyecto de desarrollo de un nuevo satélite conocido como Inmarsat S-Europasat/Hellas-sat 3. Este satélite proporciona servicios de comunicaciones móviles por satélite de cuarta generación y se pretende que junto a los servicios móviles de Inmarsat, proporcione servicios de internet vía satélite dentro de los aviones, donde se distribuirá mediante receptores WIFI. Además proporcionará servicios de seguridad como operaciones de socorro [\[37\]](#).

Este servicio está centrado en Europa con Eurpasat pero se puede utilizar en vuelos por todo el mundo mediante roaming a través del servicio GX (Global Xpress). El objetivo de esta planificación es conseguir una red global con la que dar servicios móviles por satélite de nueva generación, una vez el sistema GX éste funcionando a pleno rendimiento. Por este motivo los recursos disponibles en banda S de los que dispone Inmarsat pasarían también a trabajar de forma conjunta con la banda Ka. De forma que a los usuarios se les daría el servicio en la banda más adecuada según la zona geográfica donde se encuentren. Está preparado para ponerse en funcionamiento antes de 2016 [\[27\]](#) [\[38\]](#).

Solaris Mobile, conocido también como EchoStar Mobile es el principal operador de telefonía móvil por satélite en la banda-S. Dispone de una porción en la banda de 2 GHz reservada para las comunicaciones móviles, que le permiten en combinación con las redes de transmisión terrestres conectar diferentes dispositivos móviles. Utilizando el satélite Eutelsat 10A en banda S con frecuencias situadas para el enlace ascendente entre 2185 y 2200 MHz y para el descendente entre 1995 y 2010 MHz. Dispone de un ancho de banda alquilado de 15+15 MHz para transmitir en uno de sus transpondedores, como explicábamos antes se consigue el doble de ancho de banda intercalando polarizaciones. La conectividad de los diferentes dispositivos está basada en los estándares UMTS de las redes 3G [\[39\]](#).



Figura 7:ejemplo de estructura Solaris Mobile en banda-S [7]

En la anterior figura podemos apreciar como Solaris Mobile dispone de una red híbrida para comunicar los diferentes dispositivos móviles terrestres utilizando las infraestructuras terrestres y el satélite [40].

1.2.3 condiciones de propagación y limitaciones de la banda

Dentro de las posibles limitaciones que encontramos en la banda S, cabe destacar las condiciones ya enumeradas en la banda L, pues nos encontramos en unas situaciones muy similares. Aunque la frecuencia sea mayor y por consiguiente los efectos perniciosos de todas las atenuaciones de la señal sean mayores, aun se queda demasiado lejos de frontera de 10 GHz. Y por consiguiente la atenuación debida a la lluvia, gases atmosféricos y centelleo son despreciables. Sin embargo las pérdidas producidas por la propagación en espacio libre si deben tenerse en cuenta.

A estas pérdidas deben añadirse unas nuevas que empiezan a atenuar la señal, a partir de la banda de frecuencias de 2 GHz. Estas son las perdidas debidas a la despolarización de las señales emitidas. Se producen por la interacción de los hidrometeoros de agua y hielo con la señal, al ser estos capaces de cambiar la polarización inicial de las señales cuando son atravesados. Un ejemplo de dicho proceso sería la conversión de una señal transmitida con polarización vertical a otra de

igual frecuencia con polarización horizontal. Puesto que una de las formas más utilizadas en la banda S para ganar ancho de banda en un transpondedor es utilizar dos polarizaciones ortogonales entre sí (como en el ejemplo anterior vertical y horizontal), este tipo de interferencia haría que ambas informaciones se mezclasen provocando la pérdida de la información.

En la recomendación de la ITU-R P.618 se encuentra el procedimiento a seguir para predecir los posibles efectos adversos en la propagación.

1.2.4 Conclusiones de la banda S

Podemos destacar que sería una buena solución para los servicios móviles por satélite. Pues dispone de las mismas ventajas de propagación que la banda L pero con el visible incremento de ancho de banda que necesitan los nuevos servicios. Sin embargo esta banda está muy utilizada por los servicios de investigación gubernamentales y militares, por lo que el acceso a frecuencias nuevas está muy condicionado dependiendo de la zona donde se quiera emitir. Por lo tanto el uso de esta banda podría ser una solución complementaria para transmitir algunos de los nuevos servicios de nueva generación que se quieran ofrecer, pero no una solución por sí misma para estos servicios pues no hay suficiente espacio para albergarlos a todos.

1.3 Banda C

1.3.1 Datos técnicos

La banda se encuentra junto a las anteriores formando parte del espectro radioeléctrico de las microondas dentro de la alta frecuencia. Está situada entre la banda S y la banda Ku, tiene un ancho espectral situado entre 4 y 8 GHz [\[1\]](#), Esto deja 4 GHz para albergar todos los servicios de esta banda incluyendo el enlace ascendente y descendente. Los 4 GHz se asignan en bandas de 500 MHz, cada una de las cuales se divide entre los transpondedores del satélite, de forma que a cada transpondedor se le asignan entre 36 y 40 MHz [\[41\]](#). Este ancho de banda se divide en canales para su alquiler como ya ocurría en las bandas anteriores, o se oferta de forma completa dependiendo del uso que las empresas que ofertan los servicios quieran hacer.

El enlace ascendente opera entre 5,9 y 6,4 GHz, mientras que el enlace descendente lo hace entre 3,7 y 4,2 GHz (frecuencias de portadora) [\[42\]](#).

Las técnicas de acceso al medio más extendidas, son CDMA y espectro ensanchado para evitar las interferencias [\[43\]](#).

Los estándares de transmisión más utilizados son DVB-S y DVB-S2 [\[44\]](#).

Las modulaciones más utilizadas son BPSK, QPSK, 8PSK y se tiende cada vez más a 16APSK [\[9\]](#) [\[10\]](#).

A partir de la banda C surge el segundo estándar de transmisión importante a tratar en este documento, el DVB-S2. Este estándar es la evolución directa del DVB-S y se crea para adecuarse mejor a al aumento de la cantidad de datos transmitidos en las banda de frecuencia más alta. Está basado en el estándar MPEG-4 e igual que su predecesor define las reglas para el transporte físico en el enlace, añade a la ya existente modulación QPSK, la posibilidad de usar la modulación 8-PSK y 16-APSK (modulación de fase y amplitud) y añade un roll off de 20% y 25% al ya usado 35% [\[29\]](#).

1.3.2 Servicios proporcionados en Banda C

Es la banda más utilizada en localizaciones geográficas donde la atenuación por lluvia es demasiado grande para usar la banda Ku, como es el caso de América Latina. Los servicios de Tv, radio, redes VSAT y servicios de emergencias en caso de catástrofe o datos meteorológicos, marítimos y aéreos son un compendio de los servicios que alberga esta banda y hemos descrito en los apartados anteriores.

Surgió como principal alternativa al cable submarino para la transmisión de grandes cantidades de datos entre continentes.

Gracias a las grandes huellas de cobertura que presentan las antenas de esta banda, la hacen idónea para la difusión en un área muy extensa con gran número de clientes de forma simultánea. Esta es una de las principales causas por la cual se encuentra excesivamente saturada.

Los servicios que caracterizan esta banda son los siguientes [\[2\]](#):

- Servicios fijos por satélite (acceso a internet, IT, redes VSAT, TV,...)
- Servicios de emergencia (catástrofes naturales)

Servicios fijos: en América Latina, la banda C, es la región del espectro radioeléctrico más cotizado para la difusión de servicios fijos por satélite, ya que combina una banda suficientemente ancha y una resistencia a la atenuación debida a la lluvia aceptable.

La empresa Ciberlat ofrece servicios de acceso a internet por satélite usando los satélites de Eutelsat, a través de un router conectado a satélite que permite velocidades de 2 Mbps de bajada y 512 Kbps de subida [\[45\]](#).

Eutelsat por su parte proporciona acceso en Nigeria a la empresa Philips Projects Centre desde el año 2013. Esta empresa proporciona servicios IT (servicios de tecnologías de la información) a toda la región, centrándose especialmente en los yacimientos de gas y petróleo. Para ello se sirve de un ancho de banda de 20 MHz que proporciona uno de los transpondedores del Eutelsat 10A [\[46\]](#).

También proporciona diferentes servicios a empresas basados en redes VSAT en todo el continente africano. Estos servicios proporcionan transferencia de voz, video y

acceso a internet mediante enlaces IP entre los terminales VSAT y el HUB, permitiendo velocidades entre 512 Kbps y 4 Mbps [47].

En otra clase de servicios de acceso fijo la empresa SES Global provee servicios televisivos mediante el satélite AMC 12 en banda C a Europa, África y América. La capacidad del satélite son 72 transpondedores en banda C con una capacidad de 36 MHz por transpondedor. La empresa tiene asignadas las bandas de 5925 a 6425 MHz para el enlace ascendente y de 3700 a 4200 MHz para el descendente, donde las cadenas de televisión acceden al satélite sin pasar por un operador de servicios intermedio. Este es el caso de cadenas como CBS, ABC o fox news [48].

El satélite Intelsat 11 proporciona su carga útil para la distribución de las cadenas HBO, Discovery o FOX en todo el atlántico mediante sus transpondedores AE1C y AE2C con portadoras 3717 MHz y polarización horizontal, las portadoras 3718 MHz y 3745 con polarización vertical consiguiendo un ancho de banda de 22000 Msyn [49].

1.3.3 condiciones de propagación y limitaciones de la banda

En la banda C, podemos decir que es idéntica a la banda S en cuanto a limitaciones de propagación se refiere. Y aunque al aplicar las fórmulas de las diferentes atenuaciones den valores mayores de atenuación, estos siguen siendo igual de despreciables. Por lo que solo deberíamos tener en cuenta las pérdidas producidas por espacio libre y en cierto grado por la despolarización.

A las condiciones de propagación descritas, se deben añadir unas limitaciones de la propia banda producidas por los requisitos de la morfología de los equipos así como de la potencia necesaria para emitir, al ancho de banda para albergar a las diferentes compañías de servicios y otros factores. La banda C se caracteriza por presentar unas huellas de cobertura satelital que cubren grandes extensiones de la superficie terrestre, algo muy útil cuando se quiere difundir servicios punto a multipunto como puede ser la TV por satélite. Pero lo que es una ventaja para los servicios de difusión se convierte en un problema en la cohabitación de otros servicios en esta banda. Debido a las grandes huellas de cobertura que presentan los satélites de la banda y la

posibilidad de que diferentes satélites estén dando diferentes servicios sobre la misma zona y con la misma frecuencia hace que las interferencias entre ellos aumenten de forma significativa. Este motivo, hace que el número de satélites que pueden operar en esta banda que presenta tantas ventajas de propagación y ancho de banda suficiente como para empezar a hacer frente a las demandas actuales de comunicación, sea muy reducido y por consiguiente el número de empresas que puede emitir en esta banda sea muy pequeño así como la variedad de servicios.

Otro de los principales problemas es el gran tamaño de las antenas (entre 1 y 5,6 m) en esta banda tanto de emisión como de recepción, que vuelven a reflejar el problema de las interferencias, al emitir con un haz demasiado grande que puede cubrir varios satélites en su línea directa de visión [\[50\]](#).

1.3.4 Conclusiones de la banda C

En conclusión sobre la banda C, no es una solución para implementar nuevos servicios de ningún tipo, pues se encuentra ya de por sí reservada para los servicios fijos por satélite en zonas de altas precipitaciones. Además no presenta posiciones orbitales libres donde implementar nuevos satélites.

1.4 Banda Ku

1.4.1 Datos técnicos

La banda Ku es el siguiente paso en la evolución de las telecomunicaciones con respecto a la banda C. es la banda de frecuencias más utilizada actualmente, permite aumentar el nivel de potencia de transmisión con respecto a la anterior banda, proporcionar más ancho de banda y utilizar antenas 30 cm más pequeñas. El rango de frecuencias en el que se encuentra esta banda va desde los 11,7 a los 17,8 GHz [\[42\]](#).

El ancho de banda total en esta banda es de aproximadamente 8 GHz para albergar todos los servicios (enlace ascendente y descendente). Al igual que ocurre en la banda C, el ancho de banda se subdivide en bandas menores de 500 MHz, y cada uno de esas bandas se divide entre los diferentes transpondedor del satélite como ya ocurría en las bandas anteriores. El ancho de banda de cada transpondedor varía entre 36 y 54 MHz y existen asignaciones de hasta 72 MHz [\[41\]](#) [\[51\]](#). Estos anchos de banda se dividen en canales para su alquiler como ya ocurría en las bandas anteriores, o se oferta de forma completa dependiendo del uso que las empresas que ofertan los servicios quieran hacer. Se puede conseguir el doble de ancho de banda como explicábamos antes si se utilizan diferentes polarizaciones.

El enlace ascendente opera entre 14 y 14,8 GHz, mientras que el enlace descendente lo hace entre 10,7 y 11,7 GHz para Europa y entre 11,7 y 12,2 para América (frecuencias de portadora) [\[42\]](#).

El acceso al medio puede ser FDMA o TDMA [\[43\]](#).

Los estándares de transmisión más utilizados para la distribución de los servicios son DVB-S y DVB-S2 [\[52\]](#).

Las modulaciones más utilizadas son BPSK, QPSK, 8PSK y se tiende cada vez más a 16APSK [\[9\]](#) [\[10\]](#).

1.4.2 Servicios proporcionados en Banda Ku

Los diferentes tipos de servicios que podemos encontrar en la banda Ku presentan un denominador común. Y es que la banda Ku se encuentra extendida a lo largo de todo el planeta para ofrecer enlaces fijos entre diferentes terminales, es decir la banda KU se centra en el servicio fijo por satélite (FSS) y alberga todos aquellos servicios que por falta de espacio no se pueden emitir en la banda C. Entre todos los servicios que se encuentran disponibles en esta banda como son las redes educativas y empresariales, teleconferencias y redes VSAT, el más destacable es el servicio fijo de televisión digital por satélite.

Servicios implementados en la banda KU [2]:

- Servicio fijo por satélite (Redes VSAT, Televisión digital Satélite, broadcast,internet)
- Servicios móviles aéreo de acceso a internet (ViaSat)

Servicios fijos: El servicio de televisión digital por satélite directo al hogar (DTH) es el más ampliamente extendido en esta banda junto a las redes VSAT. Esto se debe a la gran cantidad disponible de ancho de banda para poder emitir datos de tamaño aproximadamente con 30 MHz de ancho de banda. Empresas como Telefónica, Digital Plus, o Multichoice y operadoras propietarias de satélite como Astra, Intelsat e Hispasat siguen utilizando esta banda para este tipo de servicio. A día de hoy es la banda más utilizada en el mundo para impartir este servicio (razón por la que se encuentra tan saturada).

Hispasat en 2004 puso en órbita el satélite amazonas. En un acuerdo con Intelsat ambas empresas se unían para ofrecer servicios DTH en América latina. El satélite actualmente en servicio con 16 transpondedores en banda Ku posee un ancho de banda de entre 36 y 54 MHz por transpondedor con los que dar servicios DTH en América del norte y Latinoamérica [51].

Telefónica junto con las operadoras Eutelsat desde 1985 e Hispasat desde 1991 lleva proporcionando servicios VSAT y DTH. Mediante el satélite Hispasat 1E Telefónica proporciona en la frecuencia de 12052 KHz con polarización vertical mediante el transpondedor 133 del satélite y un ancho de banda de 27500 Msym, aproximadamente 36 MHz (teniendo en cuenta un ROLL OFF del 35 %, RS de 188/204, FEC 3/4 y modulación QPSK) .Una serie de canales de radio (RTVE) y televisión (TVE, Antena 3, Canal 24H) para América [\[52\]](#).

Digital + también utiliza el satélite Hispasat 1E para distribuir sus canales en los transpondedores del satélite desde el 151 al 156 en las frecuencias de portadora 11731 , 11771, 11811, 11815, 11891 y 11931 MHz todas con polarización vertical y un ancho de banda de 27500 (36MHz) y 30000 (26 MHz) Msym por canal dentro de cada transpondedor [\[52\]](#).

Servicios móvil aéreo:

ViaSat dispone de un margen de frecuencias en la banda Ku para dar servicios móviles. Mediante el terminal instalado en los aviones 5320, como veremos en uno de los siguientes apartados, permite la comunicación tanto en banda Ku como en la nueva banda Ka para dar servicios de acceso a internet en vuelo. Este terminal en banda Ku es capaz de proporcionar entre 128 Kbps y 8 Mbps de subida, y entre 128Kbps y 4 Mbps para descarga. La hoja de especificaciones del equipo se puede encontrar en el siguiente enlace [\[53\]](#).

1.4.3 condiciones de propagación y limitaciones de la banda

Atendiendo a los criterios de propagación en espacio libre y como ya indicábamos en las anteriores bandas, esta banda supera la frontera a partir de la cual ciertas atenuaciones como las debidas a la lluvia y a los gases atmosféricos empiezan a ser relevantes. Atenuaciones como la lluvia, gases atmosféricos, despolarización o las persistentes perdidas por propagación en espacio libre, provocan una atenuación en las señales y se deben tomar medidas para prevenir el efecto pernicioso de estas atenuaciones.

De todas las atenuaciones indicadas anteriormente, la que es capaz de degradar más el nivel de señal es la lluvia, Pues además y como a indicamos en la banda L, influye directamente en la despolarización de la señal, Pudiendo incluso atenuar completamente la señal.

Como consecuencia de estas grandes atenuaciones, la potencia que se debe transmitir para prevenir esas posibles atenuaciones es mucho más grande que en las bandas anteriores (la diferencia de potencia entre la banda C y Ku puede ser de 9 dBw como se aprecia en los parámetros del satélite Intelsat 9E). Esto, puede provocar interferencias en otras señales o el enmascaramiento de las mismas, Además del aumento del consumo de recursos energéticos y el encarecimiento de los equipos [54].

Otro inconveniente de las grandes atenuaciones en banda Ku se produce en zonas en las que la lluvia es abundante todo el año, como son las zonas tropicales. Por este motivo en estas zonas se intenta evitar esta banda en favor de la banda C, quedando saturada en estas regiones hasta el punto de no poder albergar nuevos servicios y satélites [55].

En el resto de zonas el problema es que la banda KU era la banda más grande donde emitir servicios de banda ancha, por lo que se utilizó hasta que a día de hoy no hay más espacio para satélites y nuevos servicios [43].

1.4.4 Conclusiones de la banda Ku

Se encuentra en una situación similar a la banda C o con mayor índice de sobreexplotación. No se encuentran ni posiciones orbitales para nuevos satélites ni frecuencias nuevas donde emitir los servicios de creciente explotación. A su vez esta banda está prácticamente designada en su totalidad para los servicios fijos por satélite, reduciendo a unos pocos los servicios móviles que podemos encontrar en esta banda. Esta banda como ocurría con la banda S podría solventar parte de la demanda de servicios móviles en zonas donde los servicios fijos no estuvieran tan extendidos, como es el caso de los servicios móviles en aeronaves para vuelos transoceánicos. Pero no podría ser una solución por si sola por la evidente carga de servicios fijos.

Toda esta descripción de las diferentes bandas actuales nos lleva a la necesidad de usar una banda superior del espectro radioeléctrico, la banda Ka. Aunque no sea más robusta en atenuaciones, si provee de mayor ancho de banda en el que introducir nuevos servicios móviles.

1.5 Banda Ka

1.5.1 Datos técnicos

La banda Ka surge como principal solución y alternativa para la implementación de nuevos servicios que requieren gran ancho de banda o que no pueden ser dados en las saturadas bandas C y Ku.

La banda Ka se encuentra entre 18 y 31 GHz [42], con la visible ventaja de disponer de mucho más ancho de banda para implementar una gran cantidad de servicios que su predecesoras.

En la banda Ka se pone en marcha un uso más eficiente de las frecuencias, y aparecen por primera vez los spot-beam. A diferencia de lo que ocurre en las otras bandas (sobre todo en la banda C), en la banda Ka no se retransmiten todos los datos de forma secuencial sobre una gran área de cobertura. En lugar de esto, se generan múltiples áreas de cobertura más pequeña denominadas spot-beam mediante la recombinación del array de antenas situado en el satélite, y que apunta la dirección de máxima radiación hacia el o los spot-beams que se encuentran activos en ese momento. Por lo tanto la información solo se redirecciona hacia el spot-beam que reclama los datos y no hacia el resto.

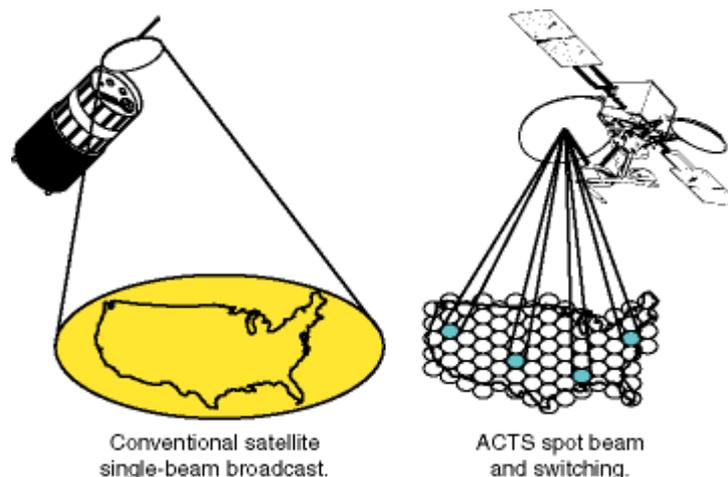


Figura 8: diferencia entre una huella convencional y una creada por spot-beams [8]

Como se puede apreciar en la figura anterior el satélite de la derecha presenta una huella de cobertura formada por múltiples spot beams, pero solo los que se

encuentran coloreados en azul se encuentran activos en ese instante de tiempo para recibir o enviar la información. Mientras el resto se encuentran a la espera de información que enviar o recibir.

Cada spot-beam presenta una frecuencia distinta de los demás spot-beam situados en su frontera, pero comparte la misma con otros spot-beams que se encuentran más alejados. De esta forma se pueden reutilizar las frecuencias del satélite aumentando su ancho de banda sin producir interferencias en los demás, utilizar la potencia solo en las áreas que sean necesarias, conformar huellas de cobertura más complejas y que se adapten a la zona que se desea cubrir y utilizar antenas más pequeñas tanto en el segmento terrestre como en el espacial.

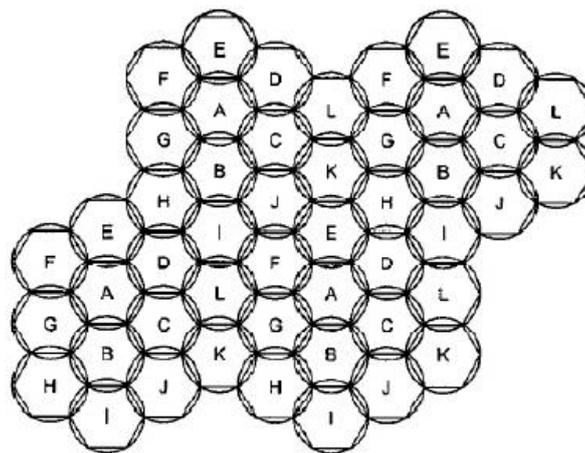


Figura 9: patrón de asignación de frecuencias a los spot-beams de un satélite Iridium [9]

En la figura anterior se aprecia que ningún spot-beam que se encuentre solapado presenta la misma frecuencia, designada con una letra de la A a la L. También se aprecia como las diferentes frecuencias son repetidas en los demás spot-beams.

Los transpondedores de la banda Ka presentan un aumento evidente del ancho de banda con las anteriores bandas descritas. El tamaño de estos transpondedores varía de 300 MHz a 600MHz [56], pasando por 400, 450 y 500 MHz [57].

Como ya ocurría en las otras bandas estos transpondedores pueden ser alquilados completamente o en porciones más pequeñas (canales). Estos canales dependerán del tipo de servicio que se pretenda ofertar. Y suelen ser de aproximadamente 125 o 250

MHz (si utilizamos polarizaciones ortogonales entre sí en un mismo canal para aumentar el ancho de banda) [\[9\]](#).

El enlace ascendente opera entre 27.5 y 31 GHz, mientras que el enlace descendente lo hace entre 17,7 y 21,2 GHz (frecuencias de portadora) [\[58\]](#).

Los estándares de transmisión siguen siendo DVB-S y DVB-S2 para mantener la retrocompatibilidad con las otras bandas y sus equipos del cliente. Pero se introducen mejoras en los estándares como es el caso de ACM (Adaptive Coding and Modulation) para mejorar el nivel de codificación y modulación en el caso de DVB-S2. ACM permite modificar de forma dinámica el grado de codificación y la modulación más adecuada para mantener un uso eficiente del enlace haciendo frente a las posibles atenuaciones de la señal [\[9\]](#) [\[59\]](#) [\[60\]](#).

Las técnicas de acceso al medio pueden ser como en las anteriores FDMA o TDMA, sin embargo es más aconsejable utilizar TDMA en lugar de FDMA, por la demanda de servicios puntuales que se realizan en lugar de servicios de transmisión constante [\[61\]](#) [\[62\]](#).

Las modulaciones son las ya usadas en las otras bandas como BPSK, QPSK y 8PSK [\[9\]](#) y otras modulaciones nuevas como 16APSK y 32APSK [\[56\]](#).

1.5.2 condiciones de propagación y limitaciones de la banda

En cuanto a las condiciones de propagación, la banda Ka es muy similar a la banda Ku. Igual que indicábamos con anterioridad, la atenuación debida a la lluvia, gases atmosféricos, despolarización de las señales, hielo, y demás efectos nocivos como las pérdidas en espacio libre atenúan la señal de forma significativa a frecuencias mayores de 10 GHz.

En el caso de la banda Ka estos efectos se agravan en mayor medida a la que ocurría en la banda Ku, pues nos encontramos entorno a los 20 GHz y estas atenuaciones crecen conforme lo hace la frecuencia de transmisión. Como también se indicó

anteriormente en la recomendación UIT-R P618-11 se encuentran todos los métodos de cálculo para estos efectos.

De todas las atenuaciones descritas anteriormente, la lluvia y los gases atmosféricos, son las más atenuantes en esta banda, llegando a producir el corte del enlace ascendente como se describirá en el último apartado de este trabajo.

En la recomendación UIT-R P618-11 también se encuentra el método de cálculo para un efecto a tener en cuenta en esta banda de frecuencias tan alta en el caso de tener ángulos de elevación menores de 5 grados. Este efecto es el centelleo troposférico, e igual que ya ocurría en baja frecuencia con el centelleo ionosférico (frecuencias menores a 1 GHz), se produce de forma similar pero en otra capa de la atmosfera, La troposfera. Los efectos del centelleo troposférico son similares al ionosférico, produciendo cambios del índice de refracción de la troposfera, que o bien reflejan las señales de vuelta a la tierra o presentan problemas de multicaminto en la recepción del satélite. Este efecto suele presentarse en días de cielo despejado. Y puede mitigarse con la disminución del haz de transmisión de la antena (perfecto para la implementación de spot-beams).

Otro efecto muy pernicioso que se da en esta banda de forma más crítica que en las anteriores es el conocido efecto doppler. En los sistemas móviles de comunicación, este efecto distorsiona mucho la frecuencia de la señal transmitida a frecuencias tan altas. Este efecto debe compensarse antes de la demodulación o sería imposible recuperar la información. Lo que conlleva el consiguiente encarecimiento de los equipos [\[63\]](#).

Como consecuencia de estas condiciones de propagación, se hace necesario el aumento de potencia en la transmisión de las señales desde las estaciones terrestres. De esta forma podrían mitigarse o solventarse completamente estos problemas. Pero conlleva el problema de mayor gasto de energía como ocurría en la banda Ku (de por sí ya elevado) y equipos más caros capaces de implementar de forma dinámica las técnicas ACM [\[64\]](#).

1.5.3 Conclusiones de la banda Ka

Hemos visto que presenta grandes inconvenientes en cuanto a atenuaciones en su propagación, y que necesita de caros equipamientos que proporcionen codificación contra errores y selección de modulación de forma dinámica. Sin embargo es la banda que mayor ancho de banda puede proporcionar actualmente a los servicios. Y siendo este el factor determinante en los servicios de banda ancha que se desean implementar (como se verá seguidamente en este documento), así como la baja población de satélites que se encuentran trabajando en ella. Es la única alternativa viable a día de hoy que puede permitir el ancho de banda demandado [\[65\]](#).

2. Servicios que se pueden distribuir en la banda Ka.

Como hemos comprobado anteriormente los servicios móviles han venido aplicándose en la banda L hasta el presente año, y siguen proporcionándose. Como se ha podido apreciar esta banda no dispone de ancho de banda suficiente para dar la creciente demanda de servicios de banda ancha. Y en las otras bandas como la S, C o Ku no pueden implementarse por los problemas ya indicados en cada una de ellas.

Por estos motivos, la banda Ka se ha convertido en la principal solución para este problema de difusión. La banda Ka permite implementar múltiples servicios móviles debido a sus prestaciones, independientemente de si estos servicios son para barcos, aeronaves o vehículos terrestres.

La clase de servicios que se pueden distribuir en esta banda son telefonía, internet, video en streaming, teleconferencias, SMS, email...en definitiva todos aquellos servicios que se han desplegado y se están desplegando en la banda L pero con mayor ancho de banda.

Actualmente las empresas más conocidas del sector de las comunicaciones móviles vía satélite como Inmarsat, Iridium, Telefónica, Nassat o Viasat disponen de la tecnología necesaria para realizar este gran cambio en las telecomunicaciones. Así pues disponen de servicios que están ya en funcionamiento o que están parcialmente disponibles a falta de situar en órbita todos los satélites que darán estos servicios de forma global. Y que describiremos a continuación.

Hemos considerado correcto agrupar los servicios adelantados anteriormente, en los tres grandes sectores que definen el actual mercado de las comunicaciones móviles por satélite:

- Servicio móvil vía satélite marítimo
- Servicio móvil vía satélite aéreo
- Servicio móvil via satélite terrestre

De los tres campos indicados anteriormente, donde más ha profundizado el uso de la banda Ka para los nuevos servicios de banda ancha es en las aeronaves por razones que destacaremos en su momento.

2.1 Marítimos

Los servicios móviles por satélite en alta mar ya no se reducen solo a facilitar la navegación o el control de sistemas de abordaje, cada vez más pasajeros quieren seguir teniendo la oportunidad de conectarse a internet, realizar video llamadas, utilizar correo electrónico, descargar y ver películas en streaming como si se encontraran en su lugar habitual de residencia, a velocidades comparables al ADSL y en algunos casos a fibra óptica.

Por estos motivos compañías como Inmarsat, Intelsat o Telenor son las primeras en dar servicios de banda ancha en el sector.

2.1.1 Inmarsat

Como se puede apreciar a lo largo del documento, es una de las empresas más extendidas en los servicios móviles por satélite en la actualidad. Ante la creciente demanda de sus servicios ha decidido incrementar el ancho de banda de los mismos actualizándose a la demanda de sus consumidores, proveyendo de los mismos servicios pero con mayor ancho de banda.

Así pues será de las primeras en dar un servicio completamente global de alta capacidad en banda Ka, conocido como Global Xpress (GX).

Se apoyará en los 4 satélites pertenecientes al proyecto inmarsat-5 para a finales de 2015 poder proporcionar este servicio que actualmente con la puesta en órbita de dos de los satélites (el F1 y el F2) solo está disponible en Europa, África, gran parte de Asia, América y océano atlántico.

El servicio (GX) en el sector marítimo se conoce como Fleet Xpress. El servicio cumplirá con las aplicaciones desarrolladas en la banda L hasta la fecha como es el paquete de

servicios fleetBroadband proporcionados actualmente a través de los satélites Inmarsat I-4. Tras la puesta en órbita del último satélite de la serie, utilizará los satélites I-5 en banda Ka para expandir los servicios y añadir otros nuevos, consiguiendo así una utilización óptima de la combinación de las dos bandas.

A los servicios actuales, se añadirán otros nuevos como la telemedida o video para vigilancia, y servicios de ocio como los paquetes de televisión por satélite, o de telecomunicaciones como las videollamadas y el acceso a las redes sociales [\[66\]](#).

Navarino, uno de los proveedores de servicios móviles en este sector, pone a disposición de sus clientes el servicio Fleet Xprees de Inmarsat mediante una serie de terminales de las empresas Cobham, JRC e Intellian [\[67\]](#).

Intellian, dispone de los terminales más integrados con la red inmarsat con el GX-60 y el GX-100. A falta de completar la red satelital con 2 satélites todavía, las pruebas realizadas con estos equipos bajo las áreas de cobertura de los satélites I-1 e I-2 de la serie inmarsat-5, han permitido constatar unas velocidades de 4 Mbps para la subida y 24 Mbps para la descarga [\[68\]](#).

Las hojas de especificaciones de los dos equipos descritos anteriormente se pueden visualizar y descargar en el siguiente enlace [\[69\]](#).

MODEL	GX60	GX100	v100GX
System	GX Terminal System	GX Terminal	GX Convertible Antenna System
Radome Dimension	90x103cm (35.5x25.6in)	138x151.4 cm (54.3x59.6 inch)	138x151.4 cm (54.3x59.6 inch)
Reflector Diameter	65cm (25.6in)	103 cm (41 inch)	103 cm (41 inch)
Antenna Weight	Approx. 60kg / 132lbs	128 kg (282 lbs)	127.4 kg (280.8 lbs)
Elevation Range	-20° to 115°	-20°~115°	-20°~115°
Cross-Level Range	Up to ±37°	Up to ±37°	Up to ±37°
Turn Rate	Up to 12°/sec² 5°/sec²	NA	Up to 12°/sec & 5°/sec²
TX Frequency	29.00~30GHz Ka-band	29.0~30.0 GHz	13.75~14.5 GHz Ku-band
RX Frequency	19.2~20.2GHz Ka-band	19.2~20.2 GHz	10.7~12.75 GHz Ku-band
TX Gain	43.75 dBi @ 29.5GHz w/ Radome	47.7dB	41.6 dBi @ Mid band
RX Gain	40 dBi @ 19.7GHz w/ Radome	43.7dB	39.4 dBi @ Mid band
LNB Pol Control	Circular, Tx:RHCP Rx:LHCP	Circular, Tx:RHCP Rx:LHCP	Cross-pol & Co-pol as standard
Cross-Pol Isolation	Minimum 35 dB	Tx: 29dBW Rx: 24 dBW	>35 dB @ beam center

Figura 10: comparacion de los dosterminales de Intellian para los servicios maritimos en banda Ka [10]

Las hojas de especificaciones de las otras compañías mencionadas se pueden encontrar aquí [\[70\]](#) [\[71\]](#).

2.1.2 Intelsat

Otra empresa destacable en el sector es Intelsat. A su nuevo servicio destinado a las nuevas comunicaciones en banda Ka lo denomina Intelsat EPIC.

Intelsat, no pretende hacer una red exclusiva en banda Ka para dar los nuevos servicios, sino más bien una multiplataforma en conjunto con las bandas C y Ku (en las que ya tenía servicios implementados) para adaptarse a la cobertura más adecuada en cada zona del planeta y apoyarse en otras bandas, de entre las tres, en caso de que una no esté disponible. La entrada en funcionamiento de la banda Ka a pleno rendimiento está prevista para 2016, por el momento la empresa ofrece sus servicios en la banda Ku mediante terminales VSAT con velocidades de 50 Mbps hasta que la red de nueva generación Intelsat EPIC esté preparada con los satélites 29e y 33e de Intelsat [\[72\]](#) [\[73\]](#) [\[74\]](#).

2.1.3 Telenor Satellite Broadcasting

Telenor se suma a los servicios marítimos en la banda Ka con el satélite THOR 7 [75]. El satélite lanzado en 2015 dará el nuevo servicio marítimo sobre la plataforma de banda Ka de que dispone la empresa proveedora de servicios iDirect [76]. Proporcionará velocidades de descarga situadas en las decenas de Mbps, lo que puede aproximarlos a las velocidades dadas por el servicio Gx de Inmarsat. La velocidad de subida ha sido estimada entre 2 y 6 Mbps [72] [77].

2.2 Aéreos:

En el sector aeronáutico la única forma de proveer de banda ancha a las aeronaves en pleno vuelo es vía satélite. Puesto que actualmente cada vez se demanda más ancho de banda en las aplicaciones de los smartphones, la banda Ka parece ser la solución más eficiente para dar servicios a estos dispositivos. Aunque anteriormente se explicó la gran desventaja de la banda Ka frente a las precipitaciones debido a la lluvia y a los gases, en las aeronaves este problema no existe debido a la altura de vuelo.

Las empresas que se describirán a continuación como Inmarsat, Telefónica, ViaSat o Honeywell ya disponen de servicios en pleno vuelo.

2.2.1 Inmarsat

Inmarsat emplea los satélites I-5 como se indicó anteriormente en los servicios marítimos, para ofrecer el servicio aéreo de GX, conocido como Gx Aviation [78]. Este servicio actualmente se oferta exclusivamente a través del proveedor de servicios Honeywell, que se describirá en este mismo apartado.

2.2.2 Telefónica.

En abril de 2015 Telefónica firmó un proyecto de integración con la compañía aérea Vueling por la cual la empresa española de telecomunicaciones ofrecerá internet por satélite proporcionando wifi en pleno vuelo.

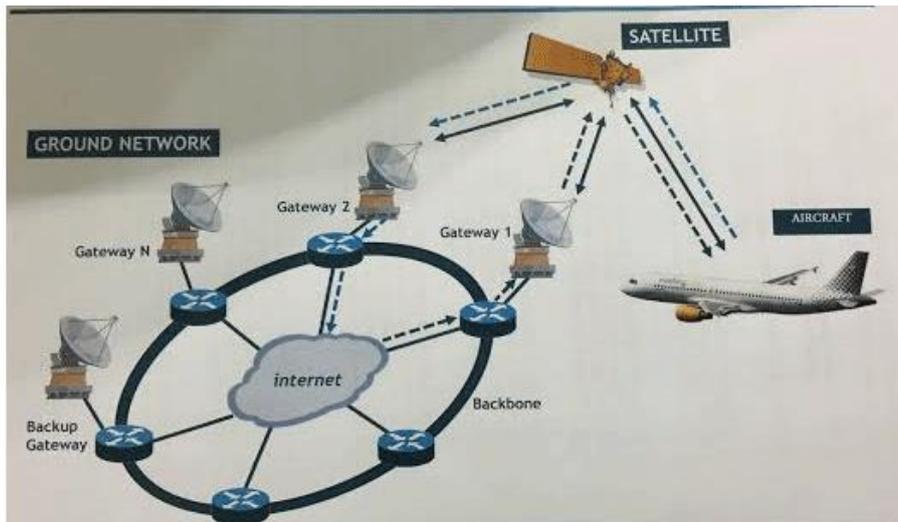


Figura 11: Esquema de conexión entre estaciones terrenas y avión [11]

El servicio se caracteriza por ser de los primeros en ofrecer un acceso a internet de banda ancha utilizando la banda Ka en pleno vuelo a partir de 3000 metros. Utiliza el satélite geoestacionario de la empresa Eutelsat de nueva generación conocido como KA-SAT. Para proveer una velocidad de bajada de 20 Mbps y una velocidad de subida de hasta 2 Mbps mediante una antena orientable [79].

2.2.3 ViaSat

Es actualmente una empresa proveedora de servicios móviles y fijos por satélite. En el sector aéreo, proporciona servicios de banda ancha móvil por satélite en aviones privados y comerciales mediante el satélite de ViaSat (ViaSat-1) [80].

El principal servicio que ofrecen a las aeronaves es el acceso a internet de banda ancha, mediante dos tipos de equipos situados en la aeronave que distribuyen vía WIFI el acceso a internet a los dispositivos. Estos dos dispositivos son el Global Aero Terminal 5320 [81] y el Aero Mobile Terminal 5230 [82].

El primero de los dos puede trabajar en conjunto la banda Ka y la banda Ku proporcionando más rangos de cobertura en caso de estar disponible una de las dos bandas en un área geográfica concreta. El equipo de abordaje 5320 permite una velocidad de entre 70 y 100 Mbps de descarga, que se reduce a 12 Mbps para cada

dispositivo conectado en vuelo. Y entre 2,5 y 20 Mbps para la subida de datos. En el siguiente enlace se puede ver la hoja de especificaciones del equipo [\[81\]](#).

ViaSat Global Aero Terminal 5320

SPECIFICATIONS

ANTENNA

Class	Tx/Rx medium profile dual Ku-/Ka-band airborne antenna
Array Configuration	Suitable for Airbus and Boeing class aircraft
Ka-band	
Aperture	Waveguide horn array; with electronically switched circular, RHCP/LHCP, cross or co-polarization
RF Electronics	Airborne Tx/Rx integrated assemblies (ATRIA) mounted to antenna aperture
Rx Frequency	17.7 to 21.2 GHz
Tx Frequency	27.5 to 31.0 GHz
G/T (dB/K)	13.9 at 19.95 GHz at 35,000 ft (includes radome loss)
EIRP (dBW)	47.25 at 31.00 GHz (includes radome loss)
Ku-band	
Aperture	Waveguide horn array; with linear, electronically switchable cross and co-polarization; polarization tracking
RF Electronics	Integrated Tx and Rx assemblies mounted to antenna aperture
Rx Frequency	10.95 to 12.75 GHz
Tx Frequency	14.0 to 14.5 GHz
G/T (dB/K)	11 at 11.85 GHz at 35,000 ft (includes radome loss)
EIRP (dBW)	47.0 at 14.25 GHz (includes radome loss)
Antenna Control	Built-in Antenna Control Unit (ACU) mounted to antenna positioner; includes rate sensors and ruggedized programmable servo-motors (for azimuth over elevation control)
Elevation coverage	0° to 80° under normal flight maneuvers, 0° to 90° with limited dynamics
Azimuth coverage	360° continuous
Swept Diameter	39.25 in.; 99.70 cm
Height	11.30 in.; 28.70 cm
Weight (Maximum)	<160 lb; <72.6 kg
Antenna Power Supply	
Input	115 VAC, 400 Hz single phase
Output	48 VDC/400 W nominal, 500 W maximum
Dimensions (LxWxH)	11 x 8 x 4 in.; 28 x 21 x 10 cm
Weight	<11 lb; <5 kg
Temperature Range	
Operating	-55° to +70° C
Storage	-55° to +85° C
Navigation Data	ARINC 429 bus

MODEM

Ka-band	
Return Link	2.5 to 20 Mbps (typical)
Forward Link	70 to 100 Mbps (typical)
Size	4 MCU ARINC 600 compliant, type 1 connector
Weight	10 lb; 4.5 kg
Power Source	+115 VAC input, variable frequency 400 Hz nominal, 100 W maximum, 80 W typical
MAC Layer Enhancements	WiMAX mobility protocols satellite beam hand-offs
Ku-band	
Return Link	128 kbps to 8 Mbps
Forward Link	128 kbps to 4 Mbps
Size	4 MCU (or 1/2ATR) with ARINC 600 compliant, type 1 connector
Weight	10 lb; 4.5 kg
Power Source	28 VDC input, 130 W maximum, 100 W nominal
Baseband Interfaces	
LAN Interface	
Data	1000 BASE-T Ethernet
Control	1000 BASE-T Ethernet
Aircraft data interface	ARINC 429

INTERFACE CABLES

Modem to Antenna	Two IFL cables; each <150 ft ECS 31150 or equivalent loss; DC-2500 MHz
-------------------------	------------------------------------------------------------------------

SUPPORTED NETWORKS

ViaSat global Ku-band and high-capacity Ka-band networks

IF CONTROLLER

Power Input	28 VDC
Operating Temperature (in-aircraft equipment)	-40° to +70°
Dimensions	7.9 x 5.1 x 12.6 in. (handle adds 1.5 in.); 20.0 x 12.9 x 32.0 cm
Mounting	Inside fuselage
Weight	6.5 lb maximum; 3 kg (8 lb with optional internal power supply)

RADOME

Dimensions (HxWxL)	13 x 42 x 93 in.; 32 x 107 x 235 cm
Weight	<90 lb; <41 kg

SUPPORTED AIRCRAFT

Airbus
Boeing

Figura 12: hoja de especificaciones del equipo Viasat 5320 [12]

El segundo equipo indicado como 5230 utiliza la banda Ka exclusivamente para las transmisiones, ofreciendo velocidades de recepción de 42 Mbps y 4,2 Mbps para transmisión. En el siguiente enlace se puede ver la hoja de especificaciones del equipo [\[82\]](#).

Aero Mobile Terminal 5230

SPECIFICATIONS

OPERATING FREQUENCY

Transmit	29.5 to 31.0 GHz
Receive	19.7 to 21.2 GHz

TRANSMISSION RATES

Forward/Return Link	Up to 42 Mbps Forward Link Up to 4.2 Mbps Return Link
---------------------	----------------------------------------------------------

RF/TRACKING PERFORMANCE

EIRP	46.5 dBW minimum
G/T	10.2 dB/K minimum
Polarization	Circular LH & RH
Coverage	Azimuth 360° Elevation 5° to 85°
Tracking Rates	Azimuth 30°/s Elevation 20°/s Circular Polarization
Tracking Acceleration	Azimuth 30°/s ² Elevation 30°/s ² Circular Polarization

ANTENNA CONTROL UNIT (ACU)

Power	<235 W @ 28 VDC
Operating Temperature	-55° to 70° C
Storage Temperature	-55° to 85° C
Dimensions	8 x 11 x 3.4 in.; 20.3 x 27.9 x 8.64 cm
Weight	5.5 lb; 2.5 kg

BASEBAND INTERFACES

Data	10/100BASE-T Ethernet
Console	RS-232 and Ethernet (via SSH)
Nav	ARINC 429

OPTIONAL FEATURES

Acceleration	TCP/IP performance enhancing proxy
Router	Commercially available

ENVIRONMENTAL & PHYSICAL CHARACTERISTICS

Antenna	
▶ Power	Supplied by ACU
▶ Operating Temperature	-55° to 70° C
▶ Storage Temperature	-55° to 85° C
▶ Weight	22 lb; 10 kg
▶ Swept Volume	12.98 in.; 32.97 cm
ViaSat Mobile Broadband Router (VMBR-2540)	
▶ Power	<100 W @ 28 VDC
▶ Operating Temperature	-20° to 60° C
▶ Storage Temperature	-40° to 85° C
▶ Dimensions	14.6 x 4.88 x 7.63 in.; 37.1 x 12.4 x 19.4 cm
▶ Weight	10 lb; 4.5 kg

Figura 13: hoja de especificaciones del terminal 5230 [13]

2.2.4 Honeywell

Como adelantábamos antes, Honeywell es la única empresa que explota hasta el momento de los satélites Inmarsat 5 puestos en órbita. La unión de esta empresa proveedora de equipos integrados en aeronaves y servicios con la empresa propietaria de los satélites Inmarsat, han permitido crear una de las primeras redes de acceso a internet, canales de televisión, videoconferencias y llamadas de voz en pleno vuelo [83].

Similar a la compañía ViaSat, Honeywell dispone de su propio terminal, MCS8000, con el que acceder a los satélites I-5. Este equipo permite dos tipos de configuraciones, la primera dedicada a aeronaves comerciales de gran tamaño en los que se permite una descarga máxima de 50 Mbps y una subida de 7Mbps. La segunda configuración va destinada a aviones privados y de menor tamaño donde la velocidad se reduce a 33

Mbps de descarga y 2,2 Mbps de subida. Esta diferencia es debida al tamaño de los equipos que se pueden montar en un avión u otro [\[84\]](#).

2.3 Terrestres:

Los servicios de comunicaciones móviles vía satélite en el sector terrestre son de gran utilidad en lugares donde no existen infraestructuras terrestres para las comunicaciones o en el caso de existir, quedan completamente cortadas por catástrofes naturales. El satélite se convierte en la única vía de comunicación para estas zonas.

Los servicios de comunicaciones móviles hasta hace unos pocos años y como ya se indicó anteriormente se distribuían en banda L. Actualmente el ancho banda demandado para los servicios terrestres no se puede hacer frente con esa banda, y se recurre a la nueva banda Ka, para dar acceso a redes militares durante conflictos entre países, a cadenas de noticias para cubrir diferentes tipos de eventos o a equipos de emergencia desplazados a zonas donde el satélite es la única alternativa de comunicación con el resto del mundo.

Actualmente la empresa ViaSat es la más desarrollada en este sector con los servicios indicados anteriormente y que son los más demandados. Otras empresas como Idirect, Harmonic (distribuidora de equipos), Avanti o Inmarsat (de la cual venimos hablando en todo el documento) también disponen de cobertura para estos servicios.

2.3.1 ViaSat

Como ocurría en los servicios aéreos ViaSat utiliza su satélite en banda Ka, ViaSat-1, para este sector. La empresa dispone de diferentes tipos de terminales para adaptarse a los diferentes tipos de condiciones que necesite el cliente [\[85\]](#).

El primero de ellos es un terminal portátil reducido al tamaño de una maleta tipo “fly-away”. Esto permite que tanto empresas de noticias con un reducido material puedan

transmitir información en cualquier lugar como que equipos de emergencias o militares puedan desplazarse más rápido a lugares más inaccesibles que con otros equipos y mantener las comunicaciones con el centro de control. Este primer terminal es el SurfBeam-2 pro y una de sus características es la adquisición de datos en tiempo real. Para su reducido tamaño, presenta unas prestaciones bastante elevadas, pues es capaz de transmitir a velocidades de 10 Mbps, y recibir a 40 Mbps (bastante más que en el sector marítimo actualmente).



Figura 14: terminal Surfbeam-2 Pro de ViaSat [14]

La hoja de especificaciones se puede encontrar en el siguiente enlace [\[86\]](#).

El segundo tipo de terminal es más grande y presenta dos tamaños uno de 75 cm y otro de 1,2 m. Ambos están diseñados para ser montados sobre vehículos y proporcionar más potencia para transmitir las señales que el anterior terminal portátil. Ambos equipos aumentan la velocidad de transmisión con respecto al anterior hasta los 20 Mbps y en recepción hasta los 50 Mbps. Entre sus principales aplicaciones destacan las mismas que en el anterior terminal: comunicaciones militares y/o de equipos de emergencias, transmisión de noticias en tiempo real y acceso a internet.



Figura 15: terminal de 75 cm de ViaSat [15]

Las hojas de características de ambos terminales se pueden encontrar en la siguiente dirección [87] [88].

ViaSat 1.2 Meter Vehicle Mounted Terminal

SPECIFICATIONS

FORWARD CHANNEL (SATELLITE TO TERMINAL)

Modulation/Coding	
» 16-APSK Rate	2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9
» 8PSK Rate	3/5, 2/3, 3/4, 5/6
» QPSK Rate	1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6
» Adaptive Coding & Modulation	
Symbol Rate	Up to 50 MSym/s

RETURN CHANNEL (TERMINAL TO SATELLITE)

Modulation/Coding	
» 8PSK Rate	7/12, 2/3, 3/4
» QPSK Rate	3/8, 1/2, 5/8, 3/4
» BPSK Rate	1/2
» Automatic power control and rate adaptation	
Symbol Rate	625, 1250, 2500, 5000, 10000 and 20000 kSym/s
RF Spectrum FCC	47CFR25, ETSI EN 301 459

USER SPEEDS

Forward Channel	Service provider configurable up to 50 Mbits/s
Return Channel	Service provider configurable up to 20 Mbits/s
Actual User Speed	Dependent on purchased service plan

ANTENNA

Input Frequency	18.3 to 20.2 GHz
Output Frequency	28.1 to 30.0 GHz
Polarization	Circular, with remote switching
Mounting	
» Antenna	Vehicle roof-top, motorized stowable for travel
» Modem	19 in rack mounted, 1RU
Nominal EIRP ²	53.6 dBW
Nominal G/T ³	22.3 dB/K

POWER

Vehicle AC	100 to 240 VAC, 50 to 60 Hz
Consumption	<900 W

MECHANICAL

Weight	
» Antenna	<125 lb
» Modem/Router	<25 lb
Stowed Antenna Height	<18.5 in

POINTING

- » Automatic, single-button initiated
- » Typical Acquisition <5 min; 90% of time, cold start, with calibrated compass
- » Vehicle Inclination
 - Full Performance <10°
 - Limited Elevation >10°

NETWORKING

- » Transparent TCP and HTTP acceleration
- » Packet classification and filtering

MANAGEMENT

Modem	Web GUI local management
Display	Pointing and status indication
LEDs	Quick terminal status

ORDERING INFORMATION

Antenna Manufacturer	AvL Technologies
----------------------	------------------

Figura 16: hoja de especificaciones del terminal con 1,2 metros de antena [16]

3. Tipos de satélites utilizados en la banda Ka.

Empezaremos diferenciando los dos grandes grupos de satélites que podemos encontrar. El primero de estos grandes grupos lo conocemos como satélites de órbita geoestacionaria, geosíncrona o GEO. Este tipo de satélites se encuentra a una distancia de 36000 km de la superficie terrestre (en vertical directa sobre el ecuador terrestre), y presentan la gran ventaja de proveer una cobertura global con solo 4 satélites en órbita. Aunque por el contrario presentan una muy mala cobertura en torno a los polos de la tierra.

El segundo gran grupo donde englobaremos el resto de satélites lo definimos como satélites de órbita no geoestacionaria. Estos satélites se encuentran en orbitas mucho más bajas con respecto a los anteriormente comentados. Orbitas como las LEO (órbitas de baja altura situadas por debajo de los 5035 Km) o las MEO (órbitas de media altura situadas entre los 10075 y 20150 Km) son las propias para este tipos de satélites. Estas orbitas presentan la gran desventaja de tener que usar muchos más satélites sincronizados entre sí (para evitar colisiones) para poder dar la misma cobertura global que en el caso de los satélites GEO. A esta se le añade otra, y es que la vida de estos satélites es de una media de 7 años frente a los otros que puede ser de 15 años, incrementando el coste de los servicios a largo plazo. Pero como gran ventaja podemos destacar que estos satélites presentan menos retardo en las telecomunicaciones que sus oponentes GEO. Aunque inicialmente los satélites no geoestacionarios también se pensaron para ofrecer servicios en la banda Ka como podía ser internet (es el caso de satélites como el Teledesic o el Skybridge) se dejaron de lado debido al gran coste de desarrollo y puesta en órbita.

Por todo ello, podemos afirmar a día de hoy que la mayoría de satélites para dar servicios en la banda Ka son geoestacionarios.

Independientemente de si la órbita que describirá el satélite es geoestacionaria o no los satélites de nueva generación que se describirán en este documento y que pueden ser utilizados para desplegar servicios en la banda Ka se conocen como satélites de alto rendimiento o High Throughput Satellites (HTS).

Los satélites HTS se dividen en dos grandes grupos en función del tipo de servicios que proporcionan:

- satélites de servicio fijo o FSS
- satélites de servicios móviles o Mobile-Satellite Service (MSS)

En primer lugar satélites de servicio fijo o por sus siglas en inglés Fixed-Satellite Service (FSS) se pueden definir como aquellos satélites que dan servicios entre estaciones terrestres fijas.

En segundo lugar se encuentran los satélites relevantes para nuestro estudio de servicios móviles. Estos son los conocidos como satélites de servicios móviles o Mobile-Satellite Service (MSS) [\[58\]](#). Esta clase de satélites podemos decir que han ido evolucionando a partir de los sistemas VSAT. Los sistemas VSAT se basan en la utilización de una estación principal de control denominada HUB, a través de la cual pasa toda la información de la red y se transmite a todos los usuarios a través del satélite (en los sistemas de televisión digital, el HUB, es quien transmite todo el contenido a los usuarios y quien recibe todas las peticiones de estos). En el otro extremo se encuentran los terminales VSAT, que son los terminales de reducido tamaño (tamaños de antena entre 0,6 y 1 metro) a través de los cuales el cliente recibe toda la información, y mediante el cual se comunica con el HUB para realizar las peticiones. En la banda Ka este sistema ha evolucionado a un sistema más dinámico en el cual se mantiene la figura del HUB y del terminal VSAT pero los enlaces se vuelven más simétricos, ya que los terminales VSAT no se utilizan exclusivamente para recibir información del HUB, sino también para transmitir importantes cantidades de información hacia él. Este tipo de sistemas siempre han sido utilizados para ofrecer comunicaciones móviles y fijas en áreas de difícil acceso, como podían ser sistemas de vigilancia o de intercambio de datos de señalización en zonas remotas como oleoductos. Actualmente estos sistemas se han adaptado para poder ser utilizados en barcos o aviones en los que poder dar servicios de última generación mediante la banda Ka [\[89\]](#) [\[90\]](#).

A continuación pasaremos a describir uno de los satélites que fue pionero en usar la banda Ka, así como los actuales satélites en banda Ka que podemos encontrar actualmente en servicio y los que se encuentran en proceso de despliegue:

- Olympus F1
- Inmarsat-5
- Amazonas-3
- KA-SAT
- Intelsat 29e
- Intelsat 33e
- Hylas-1
- Hylas-2

Olimpus F1

Fue de los primeros satélites en utilizar la banda Ka para dar servicios de teleconferencia punto a punto y punto a multipunto e intercambio de datos de baja velocidad.

Satélite desplegado en 1991, construido para la ESA (agencia espacial europea) por la agencia aeroespacial británica y concebido para tener una vida útil de 5 años. Capaz de proporcionar una potencia de 3,6 kw fue retirado en 1993 por fallo en sus sistemas.

Este satélite fue desplegado para dar cobertura sobre Europa en órbita geoestacionaria. Los equipos destinados a su carga operativa estaban formados por 2 transpondedores en la banda Ku BSS para dar servicios de difusión en 12 GHz, otros 4 transpondedores en la banda Ku para videoconferencias y distribución de datos entre 12 y 14 GHz y dos transpondedores en banda Ka para realizar pruebas de servicios en la banda entre 20 y 30 GHz [\[91\]](#).



Figura 17: olimpus F1 [17]

Satelites Inmarsat-5

Esta colección de 4 satélites desplegados para dar servicio global son los que darán el anteriormente indicado servicio Global Xpress. Cada uno de Los 5 satélites posee una combinación de 6 antenas con las que forman los spot beams, capaces de transmitir unos haces puntuales muy estrechos. Permiten transmitir 89 frecuencias distintas desde sus respectivos 89 transpondedores, lo que posibilita una fuerte reutilización de las frecuencias de la banda Ka, para así ofrecer grandes velocidades de datos mediante terminales más compactos.

Cada satélite es capaz de ofrecer una potencia para las transmisiones de 15 kw desde el comienzo de su vida útil de 15 años, que se reducirá como máximo hasta los 13,8 kw al final de la misma.

Los haces son orientables, permitiendo así redirigir la potencia y por tanto la velocidad demandada a una zona concreta. Es decir, podríamos modificar la cobertura del satélite allí donde se requiera y evitar tanto malgastar recursos dando cobertura en zonas despobladas o interferir con otros sistemas que habiten en esas zonas. Y lo que es más importante todo esto se puede hacer bajo demanda en tiempo real.

Los 5 satélites están diseñados para operar no solo en la banda Ka. También permitirán la retrocompatibilidad con la red de banda L desplegada anteriormente incrementando la velocidad y utilizando los mismos equipos actualmente operativos en aviones, barcos y vehículos terrestres, permitiendo comunicaciones seguras de alto rendimiento [\[92\]](#).



Figura 18: Inmarsat-5 [18]

Datos técnicos:

Numero de transpondedores	89 en la banda Ka
Ancho de banda	No disponible
Numero de antenas	6 antenas
Peso	3750 Kg
Potencia carga util	15 Kw
Potencia total	No disponible
PIRE	No disponible
G/T	No disponible

Tabla 4: datos tecnicos de los satelites Inmarsat-5

Actualmente, de los 4 satélites en órbita geostacionaria solo dos han sido desplegados. El primero de ellos desplegado en diciembre de 2013 situado a 62,6 grados este y el segundo de ellos el 1 de febrero de 2015 situado a 55 grados oeste. El despliegue del siguiente satélite está previsto a lo largo del 2015.

Amazonas-3

Este satélite pertenece al grupo empresarial HISPASAT. Se encuentra en la posición orbital 61 grados Oeste, situado verticalmente sobre Latinoamérica en una órbita geoestacionaria lo que permite dar servicios de acceso a internet principalmente, y de intercambio de datos, telefonía y televisión a toda la zona latinoamericana y parte del océano atlántico.

El amazonas-3 fue construido por la empresa californiana Space Systems Loral para reemplazar al satélite amazonas 1 tras finalizar su vida útil.

Este satélite consta de 63 transpondedores. Los de banda Ku difunden servicios de banda ancha en América y gran parte de Europa, los de la banda C retransmiten para el continente americano servicios de difusión de televisión por satélite y los restantes transpondedores de banda Ka proporcionan los servicios mencionados con anterioridad.

El ancho de banda proporcionado en cada transpondedor de la banda Ka es de entre 400 y 450 MHz. Como podemos apreciar es mucho más del que se dispone en un mismo transpondedor de este satélite destinado a la banda Ku, que es de solo 54 MHz.

El satélite dispone de 6 antenas configuradas para proporcionar 9 spot beams destinados a la banda Ka (actualmente solo 4 antenas están en funcionamiento).

La potencia proporcionada a través de los paneles solares es aproximadamente de 14 Kw pero la potencia útil para repartir entre los diferentes transpondedores del satélite se reduce hasta los 11,2 Kw ya que el resto se utiliza para mantener los sistemas de a bordo del satélite.

Como en el resto de satélites la duración de la misión es de 15 años [\[93\]](#).

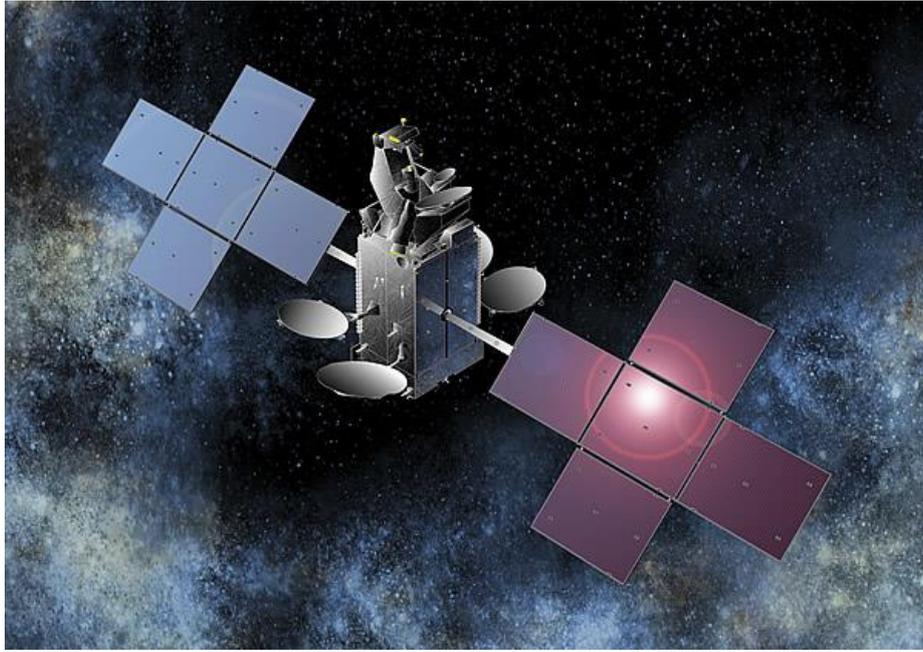


Figura 19: Amazonas-3 [19]

Datos técnicos:

Numero de transpondedores	13 en banda Ka 33 en banda Ku 19 en banda C
Ancho de banda	De 400 a 450 MHz en la banda Ka De 36 a 54 MHz en la banda Ku y C
Numero de antenas	6 antenas configurables
Peso	2819 Kg
Potencia carga util	11,2 Kw
Potencia total	14 Kw
PIRE	No disponible
G/T	No disponible

Tabla 5: datos tecnicos del satelite amazonas_3

Eutelsat: KA-SAT

Como ya indicábamos anteriormente Eutelsat dispone de un satélite de alta capacidad trabajando en banda Ka denominado KA-SAT. Además de proporcionar el servicio de internet en los aviones de Vueling, este satélite situado en 9 grados este, de tipo geoestacionario, proporciona servicios como acceso a internet fijo por toda Europa donde está centrada su área de cobertura, con capacidades que llegan a 20 Mbps de bajada y 6 Mbps de subida con el servicio tooway.



Figura 20: KA-SAT [20]

El satélite KA-SAT es de los primeros en prestar servicios de alta capacidad en Europa usando la banda Ka. Para ello dispone de 82 spot beams con 82 transpondedores que permiten la reutilización de cada frecuencia del satélite hasta 20 veces, consiguiendo un rendimiento de hasta 70 Gbps en la capacidad total del satélite. Cada transpondedor dispone de 50 Mbps de bajada y 20 Mbps de subida como máximo.

La vida operativa del satélite es de 16 años [\[94\]](#).

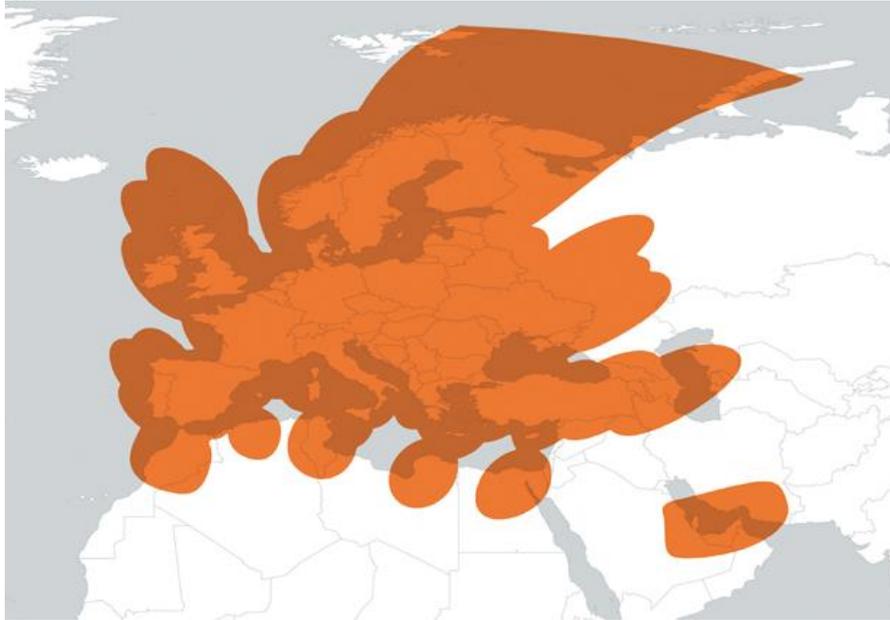


Figura 21: cobertura satelite KA-SAT [21]

En la figura anterior podemos apreciar la cobertura configurable de la que dispone el satélite KA-SAT con el uso de spot beams. Y como “ilumina” solo las zonas donde quiere enfocar la potencia de las transmisiones [95].

Datos técnicos:

Numero de transpondedores	82 en banda Ka
Ancho de banda	No disponible
Numero de antenas	4 antenas
Peso	6150 Kg
Potencia carga util	No disponible
Potencia total	15 Kw
PIRE	No disponible
G/T	No disponible

Tabla 6: datos tecnicos satelite KA-SAT

Intelsat: 29e y 33e

Estos dos satélites geoestacionarios de Intelsat con una vida útil de 15 años están destinados a la distribución de los servicios móviles de banda ancha en la banda Ka. Está previsto que se desplieguen en 2016 y ofrezcan los esperados servicios de Intelsat Epic. Ambos satélites disponen de transpondedores adicionales en banda C y Ku con los que completar la cobertura y el ancho de banda de la banda Ka [\[54\]](#).

Intelsat 29e:

Datos técnicos:

Numero de transpondedores	No disponible
Ancho de banda total	450 Mhz banda Ka 840 MHz en banda C 9395 MHz en banda Ku
Numero de antenas	No disponible
Peso	6000 Kg
Potencia carga util	3548 W
Potencia total	No disponible
PIRE	35,5 dBW (en banda Ka)
G/T	6,6 dB/k (en banda Ka)

Tabla 7: datos tecnicos Intelsat 29e [\[54\]](#)

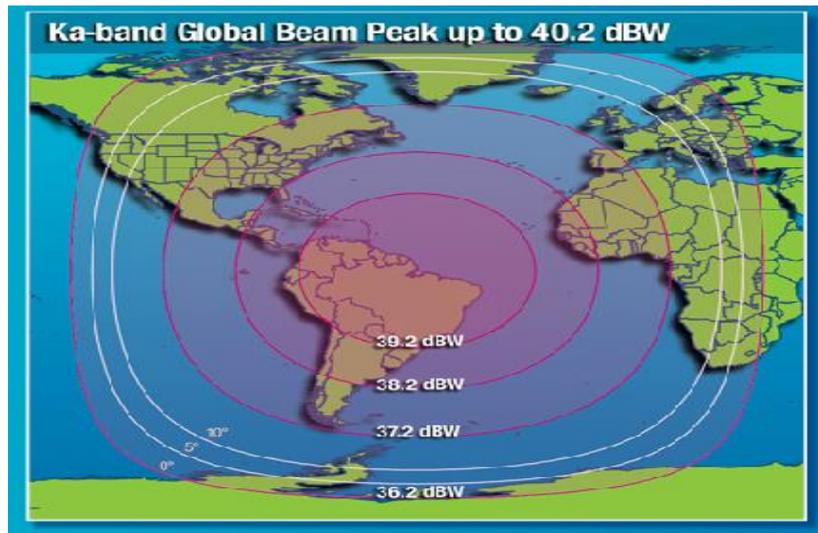


Figura 22: cobertura satellite Intelsat 29e [22]

Intelsat 33e:

Datos técnicos:

Numero de transpondedores	-
Ancho de banda total	441 Mhz banda Ka 2670 MHz en banda C 9194 MHz en banda Ku
Numero de antenas	-
Peso	6000 Kg
Potencia carga util	3388 W
Potencia total	-
PIRE	35,3 dBW (en banda Ka)
G/T	-7 dB/k (en banda Ka)

Tabla 8: datos tecnicos Intelsat 33e [54]

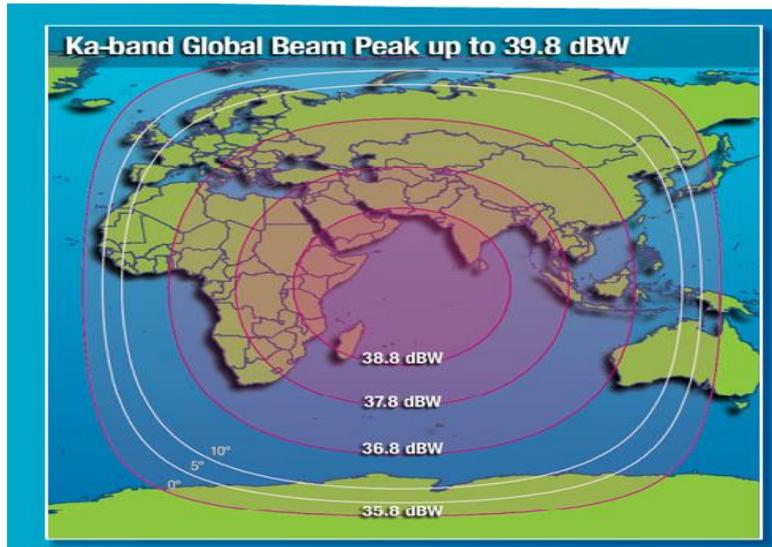


Figura 23: cobertura satelite Intelsat 33e [22]

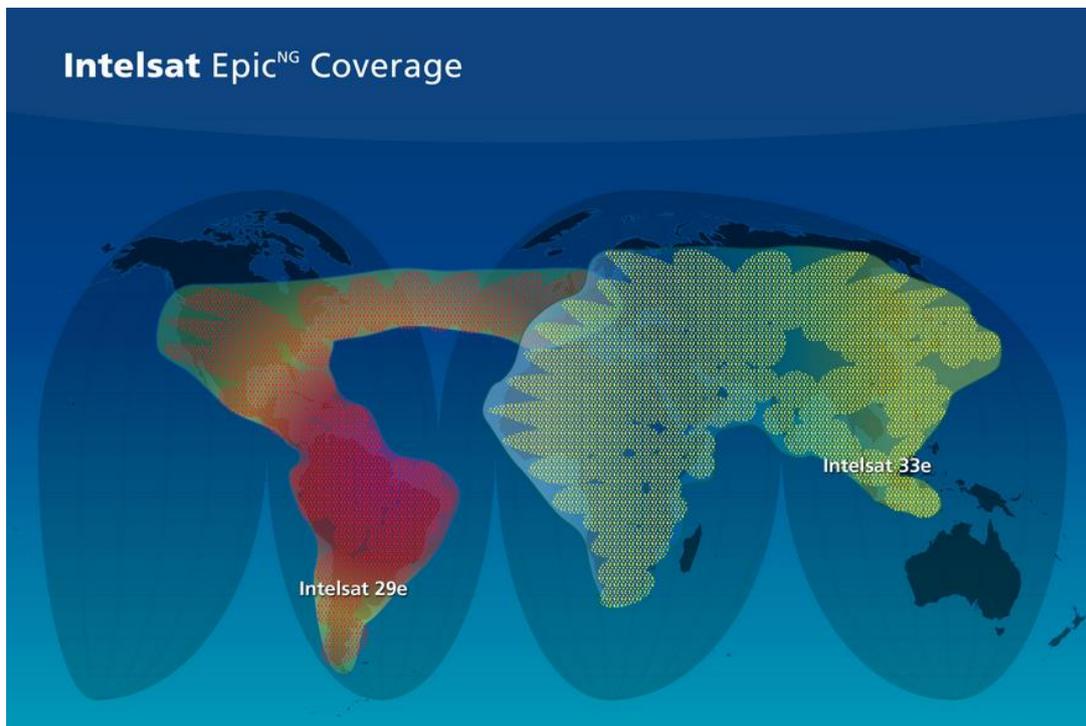


Figura 24: cobertura de los spot beams del intelsat 29e y 33e [23]

Avanti: Hylas 1, 2 y 3

La empresa Avanti fue una de las primeras en desplegar un satélite en la banda Ka para proporcionar servicios en banda Ka tanto móviles (servicios marítimos) como fijos (internet por satélite). En 2010 se desplegó el satélite Hylas 1 con cobertura a toda Europa y se convirtió en uno de los primeros satélites en ofrecer internet por satélite en Reino Unido mediante la empresa Hughes. En 2012 se puso en órbita el segundo para ampliar esa cobertura al continente africano. En 2016 está previsto el lanzamiento del Hylas 3 para aumentar la capacidad de las regiones de Europa, Oriente Medio y África. En 2017 se podría lanzar el Hylas 4 para aumentar la capacidad y la potencia en las coberturas de los Hylas 1 y 2. Todos ellos presentan una vida útil de 15 años [96].

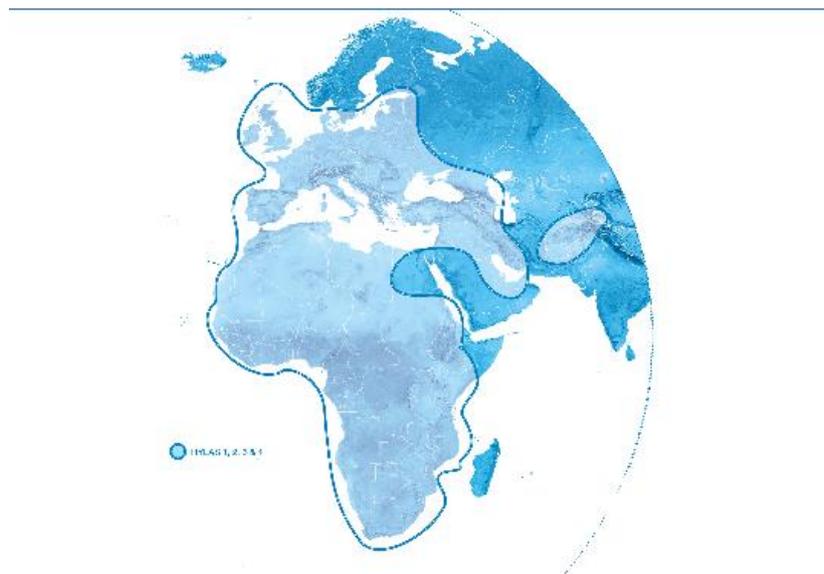


Figura 25: cobertura compuesta de los satélites Hylas 1, 2 y 3 [24]

Hylas 1:

Datos técnicos:

Numero de transpondedores	8 en banda Ka foward transmisión 2 en banda Ka return transmisión
Ancho de banda total	250 Mhz en banda Ka foward transmisión 120 Mhz en banda Ka return transmisión
Numero de antenas	No disponible
Peso	2300 Kg
Potencia carga util	Más de 2 Kw
Potencia total	No disponible
PIRE	62 dBW (en banda Ka)
G/T	No disponible

Tabla 9: datos tecnicos Hylas 1 [97]

Hylas 2:



Figura 26: satélite Hylas 2 [25]

Datos técnicos:

Numero de transpondedores	24 en banda Ka foward transmisión 6 en banda Ka return transmisión
Ancho de banda total	230 Mhz en banda Ka foward transmisión 220 Mhz en banda Ka return transmisión
Numero de antenas	No disponible
Peso	-2300 Kg
Potencia carga util	5 Kw
Potencia total	No disponible
PIRE	58 dBW (en banda Ka) sin lluvia 61,5 dBW (en banda Ka) con lluvia
G/T	11,5 dB/K (en banda Ka) sin lluvia 14 dB/K (en banda Ka) con lluvia

Tabla 10: datos tecnicos Hylas 2 [98]

4. Planificación del transpondedor satélite.

4.1 distribución del transpondedor

El objetivo de este último apartado, es la explicación del cálculo de un enlace satelital para tres servicios concretos en la banda Ka, basados en una comunicación del tipo VSAT.

El primero de estos servicios es un enlace por satélite entre un proveedor de servicios de internet y un barco situado en el Canal de la Mancha (50,039º Norte; 1,34º Oeste).

El segundo es un enlace por satélite entre el mismo proveedor de servicios anterior y un avión que sobrevuela Alemania (52,52 grados Norte; 13,6 grados Este).

El tercero es un enlace por satélite entre un proveedor de servicios de comunicaciones y una estación móvil situada en un vehículo en el norte de África (36,67 grados Norte; 3,24 grados Este). Los tres servicios anteriores utilizan el mismo HUB, localizado en Madrid, España (40º Norte; 3,59º Oeste).

Las conexiones entre el HUB y los tres terminales VSAT situados en el barco, el avión y el vehículo terrestre se realizarán a través del mismo satélite localizado en órbita GEO sobre el ecuador terrestre en 31 grados Este. Quedando la siguiente imagen conceptual del enlace:

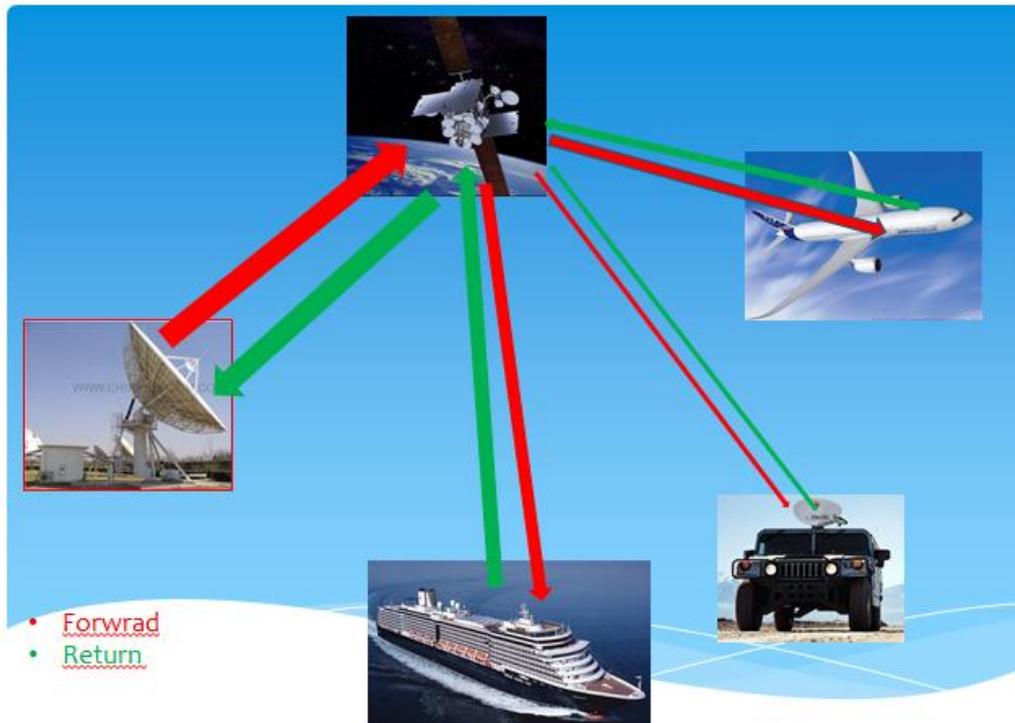


Figura 27: Planificación del enlace en banda Ka

Los tres servicios compartirán el mismo transpondedor de satélite, cuyo ancho total es de 450 MHz. A cada servicio se le ha asignado un canal de 125 Mhz donde se escalarán las dos direcciones del enlace:

- Forward cuando la transmisión se realiza en sentido HUB a terminal VSAT.
- Return cuando la transmisión se realiza en sentido terminal VSAT a HUB.

Ambas direcciones del enlace no son simétricas, ya que como ocurre en la gran mayoría de redes VSAT en el enlace forward se transmite más información, y por lo tanto se ha escalado teniendo en cuenta esta consideración.

El escalado de los tres canales se ha realizado de la misma forma para los tres servicios. En primer lugar se han tomado las velocidades típicas de transmisión en ambos sentidos de los servicios descritos en el apartado anterior y se han escogido unos valores acordes para calcular el ancho de banda que presentará cada dirección del canal de forma que al transmitir cada servicio con menor o igual velocidad no existan solapamientos.

- 50 Mbps para el sentido forward
- 20 Mbps para el sentido return

Para el sentido forward y el sentido return se utilizará el mismo estándar DVB-S2. En dicho estándar se contempla la modulación QPSK, que es la elegida en nuestro caso para transmitir la información con un FEQ $\frac{3}{4}$, un factor de roll off de 35% y un Reed Solomon de 188/204.

Teniendo en cuenta estas aclaraciones la asignación de ancho de banda dentro de cada canal se ha realizado teniendo en cuenta que en caso necesario el sistema utilizaría ACM para garantizar las comunicaciones en DVB-S2.

Para el sentido forward el ancho de banda se ha calculado de la siguiente manera:

$$B = V_{bin} * \frac{1}{FEQ} * REED\ SOLOMON * (1 + Roll\ off)$$

$$B = (50 * \frac{4}{3} * \frac{204}{188} * (1 + 0,35))/2 = 48,82\ Mhz$$

Este sería el ancho de banda mínimo que necesitaría el sentido Forward dentro del canal para poder transmitir una velocidad de 50 Mbps.

- Para el sentido return el ancho de banda se ha calculado de forma similar:

$$B = (20 * \frac{4}{3} * \frac{204}{188} * (1 + 0,35))/2 = 19,5\ Mhz$$

Con los anchos de banda mínimos en ambos casos y evitando sufrir solapamiento entre ambos sentidos, así queda la distribución dentro del canal para ambos sentidos de forma que cubrimos completamente el canal de 125 Mhz de forma proporcionada:

De los 125 Mhz disponibles, 85 Mhz son para el sentido forward y 30 Mhz para el sentido return, con 10 Mhz de banda de guarda entre ambos sentidos. De esta forma aseguramos que las diferentes señales no se solapen entre sí.

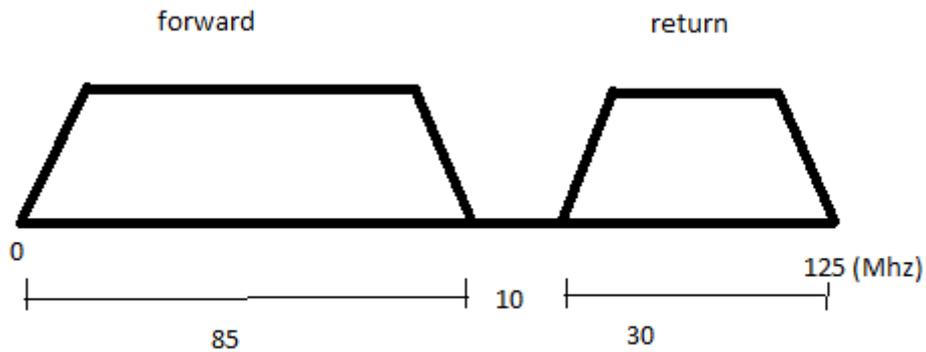


Figura 28: División del canal en banda Ka

Una vez calculada la división del canal, calculamos las portadoras para ambos sentidos en los tres canales asociados al transpondedor de 450 MHz, teniendo en cuenta que para el enlace ascendente las frecuencias se sitúan en torno a 28 GHz y para el enlace descendente en torno a 19 GHz.

Las portadoras en el caso del sentido forward para el enlace ascendente se han calculado de la siguiente forma:

- Consideramos 18,75 Mhz de banda de guarda entre los canales de 125 MHz para que todos dispongan de la misma separación teniendo en cuenta el margen inferior y superior del transpondedor (con el esquema final que presentaremos más adelante quedara más claro).

$$F_{1uf} = 28 + 0,01875 + \frac{0,085}{2} = 28,061 \text{ Ghz}$$

$$F_{2uf} = 28 + (0,01875 * 2) + 0,125 + \frac{0,085}{2} = 28,205 \text{ Ghz}$$

$$F_{3uf} = 28 + (0,01875 * 3) + (0,125 * 2) + \frac{0,085}{2} = 28,348 \text{ Ghz}$$

Siendo F_{1uf} la frecuencia de portadora ascendente asignada para el primer servicio, F_{2uf} la frecuencia de portadora ascendente asignada para el segundo servicio y F_{3uf} la frecuencia de portadora ascendente asignada para el tercer servicio.

Las portadoras en el caso del sentido forward para el enlace descendente se han calculado de forma idéntica al ascendente pero partiendo de la frecuencia de 19 Ghz:

$$F_{1df} = 19 + 0,01875 + \frac{0,085}{2} = 19,061 \text{ Ghz}$$

$$F_{2df} = 19 + (0,01875 * 2) + 0,125 + \frac{0,085}{2} = 19,205 \text{ Ghz}$$

$$F_{3df} = 19 + (0,01875 * 3) + (0,125 * 2) + \frac{0,085}{2} = 19,348 \text{ Ghz}$$

Siendo F_{1df} la frecuencia de portadora descendente asignada para el primer servicio, F_{2df} la frecuencia de portadora descendente asignada para el segundo servicio y F_{3df} la frecuencia de portadora descendente asignada para el tercer servicio.

Una vez visto el caso del enlace en sentido forward veamos cómo se han calculado las frecuencias de portadora en el sentido return.

Para el enlace ascendente las frecuencias de portadora se calculan de la siguiente forma:

- Tenemos en cuenta que la parte inferior de cada canal está ocupada por el sentido forward (85 Mhz) y la banda de guarda entre el sentido forward y el return como se indicó anteriormente con el esquema (10 Mhz), la suma hacen 95 MHz que debemos tener en cuenta para la colocación de las portadoras.

$$F_{1ur} = 28 + 0,01875 + 0,095 + \frac{0,030}{2} = 28,12875 \text{ Ghz}$$

$$F_{2ur} = 28 + (0,01875 * 2) + 0,125 + 0,095 + \frac{0,030}{2} = 28,2725 \text{ Ghz}$$

$$F_{3ur} = 28 + (0,01875 * 3) + (0,125 * 2) + 0,095 + \frac{0,030}{2} = 28,416 \text{ Ghz}$$

Siendo F_{1ur} la frecuencia de portadora ascendente asignada para el primer servicio, F_{2ur} la frecuencia de portadora ascendente asignada para el segundo servicio y F_{3ur} la frecuencia de portadora ascendente asignada para el tercer servicio.

Para el enlace descendente se calculan de forma similar pero en 19 GHz:

$$F_{1dr} = 19 + 0,01875 + 0,095 + \frac{0,030}{2} = 19,12875 \text{ Ghz}$$

$$F_{2dr} = 19 + (0,01875 * 2) + 0,125 + 0,095 + \frac{0,030}{2} = 19,2725 \text{ Ghz}$$

$$F_{3dr} = 19 + (0,01875 * 3) + (0,125 * 2) + 0,095 + \frac{0,030}{2} = 19,416 \text{ Ghz}$$

Siendo F_{1dr} la frecuencia de portadora descendente asignada para el primer servicio, F_{2dr} la frecuencia de portadora descendente asignada para el segundo servicio y F_{3dr} la frecuencia de portadora descendente asignada para el tercer servicio.

Así queda distribuido finalmente el transpondedor de satélite para ambos sentidos:

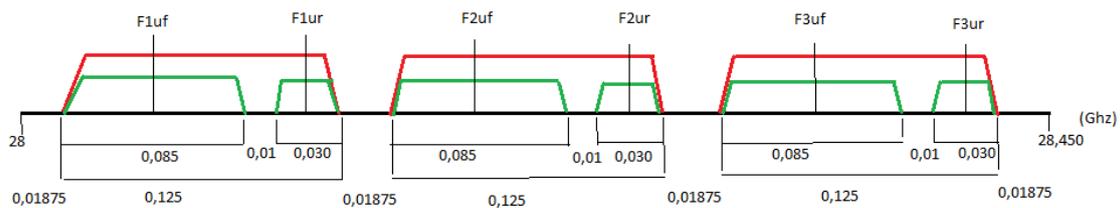


Figura 29: esquema conceptual del reparto de frecuencias de portadoras UpLink

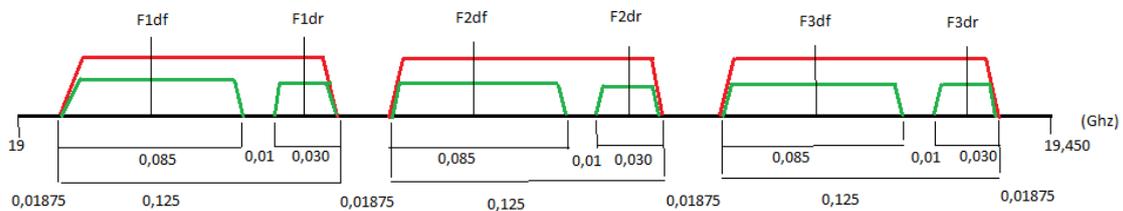


Figura 30: esquema conceptual del reparto de frecuencias de portadora DownLink

4.2 cálculo del enlace en sentido Forward

Una vez descrito como se divide el transpondedor para ambos sentidos para los tres servicios, pasaremos a calcular el balance de enlace para cada uno de los tres servicios en ambos sentido. Comencemos por el sentido forward. (Todos los datos utilizados para el cálculo del enlace están sacados de las diferentes hojas de especificaciones indicadas anteriormente)

Enlace forward.

Como ya hemos indicado, el enlace forward se realiza en sentido HUB -> terminal VSAT. Por lo que empezaremos dimensionando el balance del enlace ascendente entre HUB y el satélite para los tres servicios a la vez, pues al transmitirse todos desde la misma localización y con frecuencias tan similares, el cálculo de atenuaciones y demás datos serán prácticamente idénticos.

A diferencia de los otros enlaces por satélite vistos en las bandas anteriores (L, S, C, Ku) el enlace ascendente y el enlace descendente se tratarán como dos enlaces aislados entre sí en lo que a cálculo de C/N se refiere, pues los satélites en banda Ka no actúan como simples repetidores, sino que pasan la señal a banda base y la regeneran, para después retransmitirla por su correspondiente spot beam. Dicha esta aclaración comenzaremos con la primera parte del enlace, el enlace ascendente.

4.2.1 Enlace ascendente

El primer paso para poder calcular el enlace ascendente, es saber cuál es la PIRE necesaria que debe transmitir el HUB, de tal forma que no sature la recepción en el satélite y tenga la potencia mínima necesaria para superar la sensibilidad y poder diferenciar entre señal y ruido. Para este cálculo los proveedores de la infraestructura satélite proporcionan el SFD (densidad de flujo de saturación en el satélite) con el que poder calcular el valor máximo de la PIRE que debe transmitir el HUB.

Valores típicos de SFD se sitúan en torno a -84 dBw/m^2 [54]. Partiendo de este dato la pIRE máxima se calcula de la siguiente forma:

$$PIRE_{elibre} = SFD + 10\log(4 * \pi * d^2)$$

- Siendo “d” la distancia entre el satélite y el HUB calculada de la siguiente forma [99]:

$$d = r_s * \sqrt{1 + \left(\frac{r_t}{r_s}\right)^2 - 2 * \frac{r_t}{r_s} * \cos(\delta)}$$

- $r_s=42371 \text{ Km}$ (distancia típica de un satélite GEO)
- $r_t=6371 \text{ Km}$ (radio medio de la tierra)
- $\cos(\delta) = \cos(La_{et}) * \cos(La_s) * \cos(Lo_{et} - Lo_s) + \text{sen}(La_{et}) * \text{sen}(La_s)$
- $La_{et}= 40$ grados (latitud de la estación HUB)
- $La_s= 0$ grados (latitud del satélite GEO)
- $Lo_{et}= -3,59$ grados (longitud estación HUB)
- $Lo_s= 31$ grados (longitud del satélite)

Aplicando estos datos a la formula se obtiene:

$$d = 38744,84 \text{ Km}$$

Y por lo tanto la pIRE a transmitir en el HUB será:

$$PIRE_{elibre} = -84 + 10 \log(4 * \pi * (38744,84 * 10^3)^2) = 78,75 \text{ dBw}$$

Según este cálculo, esta sería la PIRE que debería emitir el HUB para que el satélite trabaje en saturación y así conseguir una muy buena relación señal/ ruido (C/N), si no existiera ninguna atenuación adicional. Sin embargo, como ya se indicó en otro apartado anteriormente existen dos atenuaciones que afectan en gran medida a la banda Ka, la lluvia y los gases, por eso se calcularán a continuación para ver la PIRE real que se debería transmitir para el peor de los casos.

Además, es necesario introducir ciertos márgenes adicionales que permitan absorber otras pérdidas que también es necesario tener en cuenta. Nos referimos a las pérdidas

por despolarización y por desapuntamiento de la antena y a las pérdidas en el alimentador de la antena.

Empezaremos calculando la atenuación debida a la lluvia según indica la recomendación de la ITU P618-11. para ello necesitamos los siguientes datos:

- $R_{0,01}=30$ (mm/h); intensidad de la lluvia para la estación HUB el 0,01% del año
- $h_s=0,654$ (Km); altura de la estación HUB con respecto al mar
- $EL = \cos^{-1} \left(\frac{r_s * \text{sen}(\delta)}{d} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{42371 * \text{sen}(51)}{38744} \right) = 31,8$ (grados); elevación de la estación HUB con respecto a la horizontal.
- $F_{uf}=28$ (Ghz); frecuencia de portadora de las señales transmitidas (para el cálculo de estas pérdidas redondearemos a 28 Ghz la frecuencia de portadora en los tres servicios, puesto que las frecuencias están muy próxima, el nivel de atenuación será prácticamente el mismo).

Partiendo de estos datos aplicaremos las formulas indicadas en la recomendación anterior para calcular en primer lugar la atenuación en la estación HUB superada el 0,01% del año.

En primer lugar calculamos la altura de lluvia de esta zona mediante la ITU-r P839-3:

$$h_r = 3 + 0,36 = 3,36$$

Calculamos la longitud del trayecto oblicuo L_s para ángulos >5 grados:

$$L_s = \frac{H_r - H_s}{\text{SEN}(EL)} = 5,13 \text{ (Km)}$$

Calculamos la proyección horizontal L_G :

$$L_G = L_s * \cos(EL) = 4,36 \text{ (Km)}$$

Calculamos la atenuación específica de la lluvia, γ_r .

$$\gamma_r = K * R_{0,01}^\alpha$$

Siendo K y α los coeficientes calculados según la recomendación ITU_r P838:

$$K = \frac{k_h + k_v + (k_h - k_v) * \cos^2(EL) * \cos(2\tau)}{2}$$

$$\alpha = \frac{(k_h * \alpha_h) + (k_v * \alpha_v) + ((k_h * \alpha_h) - (k_v * \alpha_v)) * \cos^2(EL) * \cos(2\tau)}{2K}$$

- $k_h = 0,2051$
- $k_v = 0,1964$
- $\alpha_h = 0,9679$
- $\alpha_v = 0,9277$
- τ es el ángulo de elevación de la polarización de la señal con respecto a la horizontal, en nuestro caso es 90 grados pues todas las señales las emitimos con polarización vertical.

De este modo la atenuación específica de la lluvia será:

$$\gamma_r = 4,72 \text{ (dB/Km)}$$

Seguidamente calculamos el factor de reducción horizontal $r_{0,01}$:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0,78 * \sqrt{\frac{L_G * \gamma_r}{F_{uf}} - 0,38(1 - e^{-2L_G})}} = 0,775$$

Calculamos el factor de ajuste vertical ξ :

$$\xi = \text{Tg}^{-1} \left(\frac{H_r - H_s}{L_G * r_{0,01}} \right) = 38,64 \text{ (grados)}$$

Comparamos ξ con la EL y como es más grande se usa la siguiente fórmula para calcular LR :

$$LR = \frac{L_G * r_{0,01}}{\cos(EL)} = 3,98 \text{ (Km)}$$

Como la LA_{et} donde se sitúa el HUB es mayor que 36 grados $v_{0,01}$ se calcula de la siguiente manera:

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\text{sen}(EL)} * (31(1 - e^{-EL}) * \frac{\sqrt{LR * \gamma_r}}{F_{uf}^2} - 0,45)} = 1,25$$

Calculamos la longitud del trayecto efectiva, LE:

$$LE = LR * v_{0,01} = 4,99 \text{ (Km)}$$

Y por último calculamos la atenuación al 0,01%, $A_{0,01}$:

$$A_{0,01} = \gamma_r * LE = 23,59 \text{ (dB)}$$

Ya tenemos calculada la atenuación debida a la lluvia que se superaría el 0,01% del año, sin embargo es una atenuación muy grande como cabía esperar, y podría llegar a cortar el enlace. En general, una disponibilidad del 99,9% o del 99,5% del tiempo suele ser suficiente. Por este motivo en lugar de realizar un enlace que esté disponible el 99,99% del año, estudiaremos uno que funcione el 99,9% o del 99,5% (si fuera necesario) del año. Vemos que en este caso la atenuación superada en el 0,1% del tiempo es mucho menor que la anterior como se demuestra a continuación:

$$A_{0,1} = A_{0,01} * \left(\frac{0,1}{0,01}\right)^{-(0,655+0,033*\text{Ln}(0,1)-0,045*\text{Ln}(A_{0,01}))} = 8,62 \text{ (dB)}$$

Como se puede apreciar la atenuación por la lluvia en este caso es menor y permite un enlace más fácil de llevar a la práctica.

En caso de necesitar disponibilidades mayores del 99,9%, la solución más adecuada sería disponer de un segundo HUB redundante al que conmutar el tráfico del primero en caso de que este quedase cortado por la lluvia. Para ello, este segundo HUB debe estar situado en una posición suficientemente alejada como para no verse afectado por la misma atenuación que el primero de forma simultánea.

La arquitectura de las redes VSAT, se conforma de manera que existan enlaces redundantes entre los usuarios y los contenidos que demandan. Así pues todas las redes VSAT disponen de al menos un HUB secundario e incluso un satélite de reserva

que entran en funcionamiento si el HUB principal o el satélite principal quedan fuera de servicio por un fallo en los equipos del mismo o por un corte en el enlace por la excesiva atenuación. De esta forma se dispone de un backup si los equipos no están disponibles y los usuarios disponen de varios gateways para acceder a la red y mantener el servicio que demandan, sin cortes [90] [100].

Una vez calculadas la atenuación por la lluvia pasaremos a las otras grandes pérdidas en la banda, la atenuación debida a los gases atmosféricos y el vapor de agua. Este cálculo se realiza de acorde a la recomendación de la ITU-R P676-10 mediante el segundo método indicado en la recomendación.

Para ello necesitamos los siguientes datos:

- P=923,5 (hPa); Presión atmosférica del aire seco para esta localización.
- T=10 (grados centígrados); Temperatura obtenida de la recomendación ITU-r P1510, es la recomendación de la ITU que permite conocer la temperatura media anual de la región donde se desea establecer el enlace en caso de no disponer de los datos medidos en el propio terreno.
- $F_{uf}=28$ (Ghz); frecuencia de portadora de las señales transmitidas (para el cálculo de estas pérdidas redondearemos a 28 Ghz la frecuencia de portadora en los tres servicios, puesto que las frecuencias están muy próxima, el nivel de atenuación será prácticamente el mismo).
- $p=7,5$ (g/m³); Densidad del vapor de agua, en este caso se ha estimado el mismo de la recomendación.
- EL=31,8 (gados); ángulo de elevación de la estación HUB.

Comenzaremos calculando la atenuación específica debida al aire seco, γ_o :

$$\gamma_o = \left(\frac{7,2 * r_t^{2,8}}{F_{uf}^2 + 0,34 * r_p^2 * r_t^{1,6}} + \frac{0,62 * \xi_3}{(54 - F_{uf})^{1,16\xi_1} + 0,83 * \xi_2} \right) * F_{uf}^2 * r_p^2 * 10^{-3}$$

Dónde:

- $\xi_1 = \varphi(r_p; r_t; 0,0717; -1,8132; 0,0156; -1,6515)$
- $\xi_2 = \varphi(r_p; r_t; 0,5146; -4,6368; -0,1921; -5,7416)$
- $\xi_3 = \varphi(r_p; r_t; 0,3414; -6,5851; 0,2130; -8,5854)$
- $\varphi(r_p; r_t; a; b; c; d) = r_p^a * r_t^b * e^{(c(1-r_p)+d(1-r_t))}$
- $r_p = \frac{P}{1013}$
- $r_t = \frac{288}{(273+t)}$

Con estos datos:

$$\xi_1 = 0,992; \xi_2 = 0,956; \xi_3 = 1,023$$

Y por lo tanto γ_o :

$$\gamma_o = 0,015$$

A continuación calculamos la atenuación específica del agua γ_w :

$$\begin{aligned} \gamma_w = & \left(\frac{3,98 * \eta_1 * e^{(2,23(1-r_t))}}{(F_{uf} - 22,235)^2 + 9,42 * \eta_1^2} * g(F_{uf}, 22) + \frac{11,96 * \eta_1 * e^{(0,7(1-r_t))}}{(F_{uf} - 183,31)^2 + 11,14 * \eta_1^2} \right. \\ & + \frac{0,081 * \eta_1 * e^{(6,44(1-r_t))}}{(F_{uf} - 321,226)^2 + 6,29 * \eta_1^2} + \frac{3,66 * \eta_1 * e^{(1,6(1-r_t))}}{(F_{uf} - 325,153)^2 + 9,22 * \eta_1^2} \\ & + \frac{25,37 * \eta_1 * e^{(1,09(1-r_t))}}{(F_{uf} - 380)^2} + \frac{17,4 * \eta_1 * e^{(1,46(1-r_t))}}{(F_{uf} - 448)^2} \\ & + \frac{844,6 * \eta_1 * e^{(0,17(1-r_t))}}{(F_{uf} - 557)^2} * g(F_{uf}, 557) + \frac{290 * \eta_1 * e^{(0,41(1-r_t))}}{(F_{uf} - 752)^2} \\ & \left. * g(F_{uf}, 752) + \frac{8,3328 * 10^4 * \eta_2 * e^{(0,99(1-r_t))}}{(F_{uf} - 1780)^2} * g(F_{uf}, 1780) \right) \\ & * F_{uf}^2 * r_t^{2,5} * P * 10^{-4} \end{aligned}$$

Dónde:

$$\eta_1 = 0,955 * r_p * r_t^{0,68} + 0,006 * p = 0,926$$

$$\eta_2 = 0,735 * r_p * r_t^{0,5} + 0,0353 * r_t^4 * p = 0,959$$

$$g(F_{uf}, f_i) = 1 + \left(\frac{F_{uf} - f_i}{F_{uf} + f_i} \right)$$

Y por lo tanto la atenuación específica del agua será:

$$\gamma_w = 0,088$$

Calculamos la altura equivalente del aire seco, ho:

$$h_o = \frac{6,1}{1 + 0,17 * r_p^{-1,1}} * (1 + t_1 + t_2 + t_3)$$

Dónde:

$$t_1 = \frac{4,64}{1 + 0,066 * r_p^{-2,3}} * e^{\left(-\left(\frac{F_{uf} - 59,7}{2,87 + 12,4 * e^{-7,9r_p}} \right)^2 \right)} = 9,74 * 10^{-53}$$

$$t_2 = \frac{0,14 * e^{(2,12r_p)}}{(F_{uf} - 118,75)^2 + 0,031 * e^{(2,2r_p)}} = 0,00011$$

$$t_3 = \frac{0,0114}{1 + 0,14 * r_p^{-2,6}} * F_{uf} *$$

$$* \frac{-0,0247 + 0,0001 * F_{uf} + 1,61 * 10^{-6} * F_{uf}^2}{1 - 0,0169 * F_{uf} + 4,1 * 10^{-5} * F_{uf}^2 + 3,2 * 10^{-7} * F_{uf}^3} = -0,0098$$

Y por lo tanto, ho, será:

$$h_o = 5,083$$

Por ultimo antes de poder calcular la atenuación debemos calcular la altura relativa del agua, h_w :

$$h_w = 1,66 * \left(1 + \frac{1,39 * \sigma_w}{(F_{uf} - 22,235)^2 + 2,56 * \sigma_w} + \frac{3,37 * \sigma_w}{(F_{uf} - 183,31)^2 + 4,69 * \sigma_w} + \frac{1,58 * \sigma_w}{(F_{uf} - 325,1)^2 + 2,89 * \sigma_w} \right)$$

Dónde:

$$\sigma_w = \frac{1,013}{1 + e^{(-8,6(r_p - 0,57))}} = 0,962$$

Y por tanto h_w será:

$$h_w = 1,72$$

Con estos datos ya tenemos todos los requisitos para poder calcular la atenuación producida por los gases de la siguiente manera:

$$A_g = \frac{h_0 * \gamma_0 + h_w * \gamma_w}{\text{sen}(EL)} = 0,43 \text{ (dB)}$$

Como se puede apreciar las perdidas debidas a los gases en banda Ka son altas con respecto a las otras bandas (en banda Ku con las mismas condiciones serian de entre 0,09 y 0,2 dB).

Calculadas las dos atenuaciones principales, podemos calcular finalmente la PIRE de saturación necesaria en el HUB para transmitir ($PIRE_{sat}$) y superar dichas atenuaciones:

$$PIRE_{sat} = PIRE_{libre} + A_{0,1} + A_g = 78,75 + 8,62 + 0,43 = 87,8 \text{ (dBw)}$$

Esta sería la PIRE máxima que podríamos transmitir para una portadora, sin embargo son tres las portadoras que transmitimos, por lo que deberemos repartir a partes iguales esta potencia. Además al transmitir tres portadoras y no una pueden aparecer productos de intermodulación de tercer orden.

Los productos de intermodulación surgen por la no linealidad de los amplificadores de las portadoras.

Para evitar estos productos de intermodulación lo más habitual es utilizar un amplificador de tubo de onda progresiva (HPA) superlinealizado, de forma que el amplificador trabaje siempre en su zona lineal y no en saturación para evitar la generación de los productos de intermodulación. Los fabricantes de estos amplificadores indican en sus hojas de especificaciones un parámetro, que indica que si en vez de trabajar con la máxima potencia de saturación, introducimos un IBO de 3 dB, los productos de intermodulación se mantendrán con un nivel muy bajo, de entre -24 y -27 dB por debajo de la potencia de la portadora de emisión y no interferirán en la señal. Esto hace que se cumpla el mínimo nivel que debe presentar de relación C/I, este valor debe ser de al menos 20 dB, y es la relación entre la portadora y la suma de todas las interferencias que caen en su ancho de banda, en este caso, los productos de intermodulación. Más adelante se demostrará que se cumple este requisito con datos reales [\[101\]](#) [\[102\]](#) [\[103\]](#).

Sabiendo cómo evitar los productos de intermodulación, calculemos la PIRE máxima en saturación que puede mandar cada portadora:

$$PIRE_{psat} = PIRE_{sat} - 3 - 10 \log(N) = 87,8 - 3 - 10 \log(3) = 80,028 \text{ (dBw)}$$

Sabiendo ya la potencia que puede transmitir cada portadora desde el HUB como máximo, calculemos el balance de potencia para saber cuánto será la C/No en el satélite:

$$\frac{C}{No} = PIRE_p - Lbf - Lpol - Lpoint - A_{0,1} - A_g + \frac{G}{T} + 228,6$$

Siendo:

- $PIRE_p = 86,84$; puede ser la PIRE máxima por portadora o inferior.
- Lbf ; pérdidas en espacio libre calculadas de la siguiente manera:

$$Lbf = 20 \log\left(\frac{4 * \pi * d * F_{uf}}{c}\right) = 20 \log\left(\frac{4 * \pi * 38744 * 28 * 10^9}{3 * 10^8}\right) = 213,16 \text{ (dB)}$$

- $A_{0,1} = 8,62 \text{ (dB)}$
- $A_g = 0,43 \text{ (dB)}$

- $\frac{G}{T} = 14$ (dB); es la relación entre ganancia de antena de recepción y la temperatura de ruido, seleccionamos una propia de los satélites en banda Ka como es la del Hylas 2.
- $L_{pol} = 0,8$ (dB); son las pérdidas producidas por una mala adaptación de la polarización entre la antena emisora y la receptora, un valor típico es 0,8 dB's [104].
- L_{point} ; son las pérdidas por desajuste de la antena que se calculan de la siguiente manera para una antena de 1,25 metros [104]:

$$L_{point} = 12 * \left(\frac{\theta_{error}}{\theta_{3dB}} \right)^2$$

Siendo

- $\theta_{error} = 0,1$ el error en la medida del haz a 3 dB,
- $\theta_{3dB} = 70 * \frac{c}{F_{uf} * D} = 70 * \frac{3 * 10^8}{28 * 10^9 * 1,25} = 0,6$

$$L_{point} = 12 * \left(\frac{0,1}{0,6} \right)^2 = 0,33$$
 (dB)

$$\frac{C}{N_0} = 80,028 - 213,16 - 8,62 - 0,8 - 0,33 - 0,43 + 14 + 228,6 = 99,28$$
 (dBHz)

Sabiendo la relación potencia ruido por hercio podemos calcular la C/N de todo el ancho de banda:

$$\frac{C}{N} = \frac{C}{N_0} - 10 \log(B * 10^6)$$

Siendo:

- B=19,5 Mhz; es el ancho de banda que ocupa la señal teniendo en cuenta que la hemos mandado a 20 Mbps con una codificación QPSK, y aunque el ancho de banda que calculamos anteriormente para el sentido forward era de 48,82 Mhz para transmitir hasta con una velocidad de 50 Mbps, si no reducimos hasta 20 Mbps la relación C/N no será suficiente para tener una BER aceptable en los enlaces descendentes como veremos más adelante.

$$\frac{C}{N} = 99,28 - 10 \log(19,5 * 10^6) = 26,37$$
 (dB)

Como se puede apreciar es una relación señal a ruido más que aceptable para el enlace.

A continuación calcularemos la relación energía ruido E_b/N_0 :

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} - 10 \log \left(\frac{R_b}{B} \right)$$

Dónde:

- $R_b=20$ Mbps; es la velocidad binaria de transmisión de la señal.
- $B=19,5$ Mhz es el ancho de banda ocupado por la señal a esa velocidad Binaria para la modulación QPSK con la que transmitimos.

$$\frac{E_b}{N_0} = 26,37 - 10 \log \left(\frac{20}{19,5} \right) = 26,16 \text{ (dB)}$$

Por ultimo calculamos la BER para la modulación QPSK:

$$BER = 2Q \left(\sqrt{2 \log_2(4) * \frac{E_b}{N_0} * \text{sen} \left(\frac{\pi}{4} \right)} \right)$$

Siendo $Q(x)$ la función de error complementaria que se puede obtener fácilmente en Matlab con el comando $Qfunc(x)$.

$$BER = 2Q \left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{26,26}{10}} * \text{sen} \left(\frac{\pi}{4} \right)} \right) = 5,6 * 10^{-186}$$

La BER obtenida es prácticamente perfecta y por lo tanto no se producirían errores, pero buscar una BER tan ideal es un desaprovechamiento de los recursos y no merece la pena, pues supone transmitir con una PIRE muy alta.

En lugar de ello, nuestro enlace funcionara con una tasa de errores de entorno a 10^{-6} o más pequeña de tal forma que podamos transmitir con menor potencia y conseguir una calidad de enlace aceptable.

Para conseguir en estas condiciones una BER de estas características necesitamos una $E_b/N_0=10,54$ dB, por lo que para el resto de cálculos nuestro objetivo será transmitir con una PIRE que proporcione esa E_b/N_0 o más elevada.

Repitamos el cálculo ahora para una PIRE más realista, PIRE por portadora de 72 dBw, fácil de conseguir con:

- Un HPA emitiendo a 100 W como es el modelo comercial MCL MT3600, 100 W son 20 dBw teniendo en cuenta los 3dB menos para evitar los productos de intermodulación y la emisión de 3 portadoras los que además le baja la potencia $10\log(3)$, obtendríamos una potencia de salida por portadora de [\[103\]](#):

$$P_p = P_{sat} - 3 - 10 \log(N) = 20 - 3 - 10 \log(3) = 12,22 \text{ dBw}$$

Como antes indicamos, cumpliendo estos requisitos conseguiríamos que la relación C/I sería igual o mayor que 20dB, Comprobémoslo:

El primer paso es calcular los productos de intermodulación según la recomendación UIT-R SM 1446 y ver cuántos de ellos caen dentro del ancho de banda de cada portadora:

Siendo las frecuencias de las portadoras que se transmiten en este HPA:

$$f_1 = 28,061 \text{ Ghz}$$

$$f_2 = 28,205 \text{ Ghz}$$

$$f_3 = 28,348 \text{ Ghz}$$

Y los productos de intermodulación que podrían afectarnos, los dados por estas ecuaciones(los productos de intermodulación de tercer orden):

$$Im_1 = 2f_2 - f_1 = 28,349 \text{ Ghz}$$

$$Im_2 = 2f_3 - f_1 = 28,635 \text{ Ghz}$$

$$Im_3 = 2f_1 - f_2 = 27,917 \text{ Ghz}$$

$$Im_4 = 2f_3 - f_2 = 28,491 \text{ Ghz}$$

$$Im_5 = 2f_1 - f_3 = 27,774 \text{ Ghz}$$

$$Im_6 = 2f_2 - f_3 = 28,062 \text{ Ghz}$$

Estas son todas las combinaciones de productos de intermodulación que podrían caer en nuestro rango espectral del transpondedor. Cada una de nuestras portadoras presenta 85 Mhz de ancho de banda, veamos cuantos productos de intermodulación “caen” dentro de ellos:

El primer ancho de banda de la primera portadora se encuentra entre:

$$\text{Límite superior: } f_1 + \frac{0,085}{2} = 28,1035 \text{ Ghz}$$

$$\text{Límite inferior: } f_1 - \frac{0,085}{2} = 28,0185 \text{ Ghz}$$

Como se puede apreciar el único producto de intermodulación que cae en esta portadora es el Im_6 , por lo que si nuestro nivel de portadora es 12,22 dBW al entrar solo un producto de intermodulación el nivel de la suma de los productos de intermodulación estará directamente en el valor que da el fabricante, 27 dB por debajo de 12,22 dBW:

$$12,22 - 27 = -14,78 \text{ dBw.}$$

Y por lo tanto la diferencia entre el nivel de portadora y el nivel del producto de intermodulación es $\frac{C}{I} = 27 \text{ dB}$. Como vemos cumplimos sobradamente el requisito indicado de C/I mínima.

Repitamos el mismo procedimiento para la portadora 2:

$$\text{Límite superior: } f_2 + \frac{0,085}{2} = 28,2575 \text{ Ghz}$$

$$\text{Límite inferior: } f_2 - \frac{0,085}{2} = 28,1625 \text{ Ghz}$$

En este caso no hay ningún producto de intermodulación en este ancho de banda como se puede ver arriba, por lo que no es necesario calcular la relación C/I, es empíricamente superior a 20 dB.

Por ultimo repitamos el procedimiento para la última portadora:

$$\text{Límite superior: } f_3 + \frac{0,085}{2} = 28,3905 \text{ Ghz}$$

$$\text{Límite inferior: } f_3 - \frac{0,085}{2} = 28,3055 \text{ Ghz}$$

En este caso es el Im_1 el que se encuentra dentro de nuestra última portadora, asique repitiendo el procedimiento anterior de la portadora 1 se puede ver que la relación C/I es de 27 dB.

Como hemos comprobado los productos de intermodulación con este HPA se encuentra a niveles tan bajos que no interferirán con la correcta recepción de las portadoras. Dicho esto prosigamos los cálculos de la transmisión.

Calculemos la ganancia necesaria en la antena:

- Añadiendo una antena que nos proporcione 60 dB de ganancia, esto se consigue con una antena de 1,25 metros de diámetro.

$$G = 10 \log \left(\eta * \left(\frac{4 * \pi * D * F}{C} \right)^2 \right)$$

- $\eta = 55\%$; eficiencia de la antena.
- $D = 1,25 \text{ m}$; diámetro de la antena.
- $F = 28 \text{ (Ghz)}$; frecuencia de cada portadora.
- $C = 3 * 10^8$; velocidad de la luz en el vacio.

$$G = 10 \log \left(0,55 * \left(\frac{4 * \pi * 1,25 * 28 * 10^9}{3 * 10^8} \right)^2 \right) = 60,72 \text{ (dB)}$$

Teniendo en cuenta unas pérdidas de la guía onda entre el HPA y la antena de 1 dB

Con estos dos requisitos conseguiríamos 72 dBw por portadora, con lo que repitiendo los cálculos la BER sería de:

$$\frac{C}{N_0} = 72 - 213,16 - 8,62 - 0,8 - 0,33 - 0,43 + 14 + 228,6 = 91,19 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 91,19 - 10 \log(19,5 * 10^6) = 18,28 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 18,28 - 10 \log\left(\frac{20}{19,5}\right) = 18,17 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q \left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{18,17}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)} \right) = 2,4 * 10^{-30}$$

En este caso real conseguimos una BER muy buena con la que este enlace ascendente sería posible.

Como ya se indicó anteriormente una vez han llegado las tres portadoras al satélite están pasan a banda base y se regeneran, eliminando todo el ruido que presenten, se suben en frecuencia otra vez, en este caso al rango de los 19 Ghz y se encaminan cada una hacia su Spot Beam correspondiente.

A estas portadoras preparadas para salir del satélite y asumiendo el peor de los escenarios en el que se emiten todas en el mismo instante de tiempo, se les aplica una PIRE en saturación del satélite que se divide como antes a partes iguales para las tres portadoras, a la que ya no restamos 3 dB como antes para evitar la generación de productos de intermodulación, pues asumimos que se disponen de los suficientes amplificadores como para que cada portadora sea amplificada por separado antes de emitirse por su correspondiente Spot Beam (cada Spot en uso con un amplificador HPA asignado).

4.2.2 Enlace descendente

Calculamos la PIRE de cada portadora:

Tomamos una PIRE de saturación de 61,5 dBw, como la que presentaría el satélite Hylas 2 en el caso de haber lluvia en el enlace descendente.

$$PIRE_p = PIRE_{sat} - 10 \log(N) = 61,5 - 10 \log(3) = 56,72 \text{ dBw}$$

Una vez calculada la PIRE por portadora, calculamos los datos del enlace descendente para cada servicio por separado:

Servicio 1

Como indicamos antes este servicio es el de un barco situado en el canal de la Mancha, empezaremos calculando la distancia a satélite y su ángulo de elevación como se realizó anteriormente:

- $r_s=42371$ Km (distancia típica de un satélite GEO)
- $r_t=6371$ Km (radio medio de la tierra)
- $La_{et}= 50,039$ grados (latitud de la estación HUB)
- $La_s= 0$ grados (latitud del satélite GEO)
- $Lo_{et}= -1,34$ grados (longitud estación HUB)
- $Lo_s= 31$ grados (longitud del satélite)

Aplicando estos datos a la formula se obtiene:

$$d = 39298 \text{ Km}$$

$$EL = 25,27 \text{ (grados)}$$

Con estos datos calculamos la atenuación debida a la lluvia y a los gases igual que se hizo antes:

Atenuación por lluvia:

- $R_{0,01}=35$ (mm/h).
- $h_s=0,07$ (Km).
- $EL = 25,27$ (grados).
- $F_{df} = 19,061$ (GHz).

$$A_{0,01} = 17,31 \text{ dB}$$

En este caso aseguraremos el enlace para el 99,9% del tiempo del año medio.

$$A_{0,1} = 6,13 \text{ dB}$$

Atenuación por gases:

- $P=1014$ (hPa).
- $T=10$ (grados centígrados); Temperatura sacada de la recomendación ITU-r P1510.
- $F_{df}=19,061$ (Ghz);
- $\rho=7,5$ (g/m³);
- $EL=25,27$ (gados);

$$A_g = 0,45 \text{ (dB)}$$

Calculamos las perdidas en espacio libre:

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4 * \pi * 39298 * 19061 * 10^6}{3 * 10^5} \right) = 209,87 \text{ (dB)}$$

Calculamos las perdidas por apuntamiento, suponiendo que la antena del satélite es de 1,2 metros:

- $\theta_{error} = 0,1$ el error en la medida del haz a 3 dB,
- $\theta_{3dB} = 70 * \frac{c}{F_{df} * D} = 70 * \frac{3 * 10^8}{19 * 10^9 * 1,2} = 0,92$

$$L_{point} = 12 * \left(\frac{0,1}{0,92} \right)^2 = 0,14 \text{ (dB)}$$

Con todos estos datos ya podemos calcular el balance de potencias como hicimos antes:

- $\frac{G}{T} = 20$ (dB/k); es la típica para un sistema embarcado de estas características [69].

$$\frac{C}{N_0} = 56,72 - 209,87 - 6,13 - 0,8 - 0,14 - 0,45 + 20 + 228,6 = 87,93 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 87,93 - 10 \log(19,5 * 10^6) = 15,02 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 15,02 - 10 \log\left(\frac{20}{19,5}\right) = 14,91 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q\left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{14,91}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)}\right) = 3,4 * 10^{-15}$$

Como podemos ver tendríamos una BER aceptable en el receptor de nuestro barco con lo que nuestro enlace forward para el primer servicio quedaría establecido y funcionando correctamente.

Servicio 2

Este servicio iba destinado a un avión que se encuentra sobrevolando Alemania, repetiremos los cálculos como en el caso del servicio 1.

Empezaremos calculando la distancia a satélite y su Angulo de elevación como se realizó anteriormente:

- $r_s=42371$ Km (distancia típica de un satélite GEO)
- $r_t=6371$ Km (radio medio de la tierra)
- $La_{et}= 52,52$ grados (latitud de la estación HUB)
- $La_s= 0$ grados (latitud del satélite GEO)
- $Lo_{et}= 13,6$ grados (longitud estación HUB)
- $Lo_s= 31$ grados (longitud del satélite)

Aplicando estos datos a la formula se obtiene:

$$d = 39022 \text{ Km}$$

$$EL = 28,54 \text{ (grados)}$$

En este caso la atenuación debida a la lluvia y a los gases no existe ya que el avión se encuentra sobrevolando a altura de vuelo comercial, que fácilmente pueden ser 9000 metros de altura, por lo que estas atenuaciones no se tendrán en cuenta para este servicio.

Calculamos las perdidas en espacio libre:

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4 * \pi * 39022 * 19201 * 10^6}{3 * 10^5} \right) = 209,99 \text{ (dB)}$$

Con todos estos datos ya podemos calcular el balance de potencias como hicimos antes:

- $\frac{G}{T} = 13 \text{ (dB/k)}$; es la típica para un sistema embarcado de estas características [\[82\]](#).

$$\frac{C}{N_0} = 56,72 - 209,99 - 0,8 - 0,14 + 13 + 228,6 = 87,39 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 87,39 - 10 \log(19,5 * 10^6) = 14,42 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 14,42 - 10 \log\left(\frac{20}{19,5}\right) = 14,37 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q \left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{14,37}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)} \right) = 1,46 * 10^{-13}$$

Como podemos apreciar la BER calculada sale muy buena debido a la falta de las atenuaciones debidas a gases y a lluvia, por lo que podríamos aumentar la velocidad de transmisión de 20 Mbps impuesta en un principio a 40 Mbps (la velocidad para la que se han dimensionado los servicios comerciales aéreos reales), lo que equivale a 39,06 Mhz de ancho de banda con una modulación QPSK.

Recalculamos los valores para confirmar que se puede transmitir a 40 Mbps en este caso.

Calculo de la BER en el enlace ascendente partiendo de los datos que ya se calcularon:

$$\frac{C}{N_0} = 72 - 213,16 - 8,62 - 0,8 - 0,33 - 0,43 + 14 + 228,6 = 91,19 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 91,19 - 10 \log(39,06 * 10^6) = 15,27 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 15,27 - 10 \log\left(\frac{40}{39,06}\right) = 15,16 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q\left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{15,16}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)}\right) = 3,4 * 10^{-16}$$

Calculo de la BER en el enlace descendente partiendo de los datos ya calculados:

$$\frac{C}{N_0} = 56,72 - 209,99 - 0,8 - 0,14 + 13 + 228,6 = 87,39 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 87,39 - 10 \log(39,06 * 10^6) = 11,47 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 11,47 - 10 \log\left(\frac{40}{39,06}\right) = 11,36 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q\left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{11,36}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)}\right) = 1,6 * 10^{-7}$$

Como se puede apreciar la velocidad se podría aumentar hasta los 40 Mbps en el servicio 2 manteniendo una buena calidad de enlace.

Servicio 3:

Por último calcularemos el servicio 3 que habíamos definido para una transportable situada en un vehículo en el norte de África. Repetimos el mismo procedimiento ya utilizado en los servicios 1 y 2 (Calcularemos el enlace descendente para la velocidad inicialmente propuesta de 20 Mbps).

- $r_s=42371$ Km (distancia típica de un satélite GEO)
- $r_t=6371$ Km (radio medio de la tierra)
- $La_{et}= 36,67$ grados (latitud de la estación HUB)
- $La_s= 0$ grados (latitud del satélite GEO)
- $Lo_{et}= 3,24$ grados (longitud estación HUB)
- $Lo_s= 31$ grados (longitud del satélite)

Aplicando estos datos a la formula se obtiene:

$$d = 38183 \text{ Km}$$

$$EL = 38 \text{ (grados)}$$

Con estos datos calculamos la atenuación debida a la lluvia y a los gases igual que se hizo antes:

Atenuación por lluvia:

- $R_{0,01}=30$ (mm/h).
- $h_s=0,192$ (Km).
- $EL = 38$ (grados).
- $F_{af} = 19,348$ (GHz).

$$A_{0,01} = 12,83 \text{ dB}$$

Como antes aseguraremos el enlace para el 99,9% del tiempo del año medio.

$$A_{0,1} = 4,4 \text{ dB}$$

Atenuación por gases:

- $P=1015$ (hPa).
- $T=10$ (grados centígrados); Temperatura sacada de la recomendación ITU-r P1510.
- $F_{df}=19,348$ (Ghz).
- $p=7,5$ (g/m³).
- $EL=38$ (gados).

$$A_g = 0,34 \text{ (dB)}$$

Calculamos las perdidas en espacio libre:

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4 * \pi * 38183 * 19348 * 10^6}{3 * 10^5} \right) = 210 \text{ (dB)}$$

Con todos estos datos ya podemos calcular el balance de potencias como hicimos antes:

- $\frac{G}{T} = 22,3 \text{ (dB/k)}$; es la típica para un sistema embarcado de estas características [\[88\]](#).

$$\frac{C}{N_0} = 56,72 - 210 - 4,4 - 0,8 - 0,14 - 0,34 + 22,3 + 228,6 = 91,94 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 91,94 - 10 \log (19,5 * 10^6) = 19,03 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 19,03 - 10 \log \left(\frac{20}{19,5} \right) = 18,92 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q \left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{-\frac{18,92}{10}}} * \text{sen} \left(\frac{\pi}{4} \right) \right) = 0,95 * 10^{-35}$$

Puesto que a 20 Mbps llegamos sin problema, repitémoslo para la velocidad comercial máxima que se oferta, 50 Mbps, y así comprobar si es cierta:

Calculo de la BER en el enlace ascendente partiendo de los datos que ya se calcularon:

$$\frac{C}{N_0} = 72 - 213,16 - 8,62 - 0,8 - 0,33 - 0,43 + 14 + 228,6 = 91,19 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 91,19 - 10 \log(48,82 * 10^6) = 14,3 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 14,3 - 10 \log\left(\frac{50}{48,82}\right) = 14,2 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q\left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{14,2}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)}\right) = 4,1 * 10^{-13}$$

Calculo de la BER en el enlace descendente partiendo de los datos ya calculados:

$$\frac{C}{N_0} = 56,72 - 210 - 4,4 - 0,8 - 0,14 - 0,34 + 22,3 + 228,6 = 91,94 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 91,94 - 10 \log(48,82 * 10^6) = 15,05 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 15,05 - 10 \log\left(\frac{50}{48,82}\right) = 14,95 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q\left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{14,95}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)}\right) = 2,7 * 10^{-15}$$

Como queda demostrado la velocidad de 50 Mbps puede llevarse a la práctica con una calidad de enlace bastante aceptable y por lo tanto la velocidad comercial queda demostrada.

Finalmente Los tres servicios que se han calculado, se están ofertando en el mercado con velocidades en sentido forward de 20, 40 y 50 Mbps respectivamente. Y como ha quedado demostrado todas ellas se pueden conseguir con los requisitos impuestos a nuestro sistema.

Calculado el sentido forward, pasamos al cálculo del sentido return.

4.3 cálculo del enlace en sentido Return

Como indicamos anteriormente es el enlace de vuelta entre las estaciones VSAT y el HUB. Para este apartado comenzaremos implementando una velocidad de 4 Mbps para asegurar una buena calidad de enlace, y en caso que podamos la aumentaremos para aprovechar mejor los recursos del enlace igual que hicimos en el enlace Forward.

4.3.1 Enlace ascendente

Comencemos realizando el balance de enlace para el primer servicio, el caso del barco situado en el canal de la mancha para el enlace ascendente.

Servicio1

En este caso ya calculamos la distancia y el ángulo de elevación en el enlace sentido Forward:

$$d = 39298 \text{ Km}$$

$$EL = 25,27 \text{ (grados)}$$

A continuación calculamos las pérdidas tal cual se hace hasta el momento.

Atenuación debida a la lluvia:

- $R_{0,01}=35$ (mm/h).
- $h_s=0,07$ (Km).
- $EL = 25,27$ (grados).
- $F_{df} = 28,12875$ (GHz).

$$A_{0,01} = 32,58 \text{ dB}$$

Como antes aseguraremos el enlace para el 99,9% del tiempo del año medio.

$$A_{0,1} = 12,32 \text{ dB}$$

Calculamos la atenuación por gases:

- $P=1014$ (hPa).
- $T=10$ (grados centígrados); Temperatura sacada de la recomendación ITU-r P1510.
- $F_{df}=28,12875$ (Ghz);
- $p=7,5$ (g/m³);
- $EL=25,27$ (gados);

$$A_g = 0,6 \text{ (dB)}$$

Calculamos las perdidas en espacio libre:

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4 * \pi * 39298 * 28128,75 * 10^6}{3 * 10^5} \right) = 213,31 \text{ (dB)}$$

Calculamos las perdidas por apuntamiento, suponiendo que la antena del satélite es de 1,03 metros:

- $\theta_{error} = 0,1$ el error en la medida del haz a 3 dB,
- $\theta_{3dB} = 70 * \frac{c}{F_{df} * D} = 70 * \frac{3 * 10^8}{28 * 10^9 * 1,03} = 0,72$

$$L_{point} = 12 * \left(\frac{0,1}{0,72} \right)^2 = 0,23 \text{ (dB)}$$

Con todos estos datos ya podemos calcular el balance de potencias como hicimos antes:

Consideramos una PIRE de 62,75 dBW, obtenida mediante una ganancia típica para las antenas situadas en los buques de 43,75 dB [69], la potencia que podría dar una HPA modelo MCL MT 3600 como el de antes trabajando a la misma potencia que en el HUB, pues solo transmitimos con una portadora y no se generarían productos de intermodulación (20 dBw) y considerando 1 dB de pérdidas en la guía onda como ya ocurría antes.

El ancho de banda que ocupa la portadora a un velocidad de 4 Mbps y una modulación QPSK es de 3,9 Mhz ($B = 4 * \frac{4}{3} * \frac{204}{188} * (1 + 0,35)/2$).

$$\frac{C}{N_0} = 62,75 - 213,87 - 12,32 - 0,8 - 0,23 - 0,6 + 14 + 228,6 = 77,53 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 77,53 - 10 \log(3,9 * 10^6) = 11,61 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 11,61 - 10 \log\left(\frac{4}{3,9}\right) = 11,5 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q\left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{11,5}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)}\right) = 1,08 * 10^{-7}$$

La BER obtenida es suficientemente buena como para tener un enlace que cumple con nuestros requisitos iniciales.

Repetimos el proceso para el servicio 2, el avión sobrevolando Alemania.

Servicio2

Repetimos los cálculos como en el servicio 1 para dar una velocidad de 4 Mbps, y comprobar si es posible mantener esta velocidad, que es la que actualmente se quiere conseguir en los vuelos comerciales.

Como antes ya calculamos en el apartado anterior la distancia y la elevación:

$$d = 39022 \text{ Km}$$

$$EL = 28,54 \text{ (grados)}$$

Calculamos las pérdidas en espacio libre

$$L_{bf} = 20 \log\left(\frac{4 * \pi * 39022 * 28272,5 * 10^6}{3 * 10^5}\right) = 213,29 \text{ (dB)}$$

Calculamos las pérdidas por apuntamiento, suponiendo que la antena del satélite es de 0,32 metros:

- $\theta_{error} = 0,1$ el error en la medida del haz a 3 dB,
- $\theta_{3dB} = 70 * \frac{c}{F_{df} * D} = 70 * \frac{3 * 10^8}{28 * 10^9 * 0,32} = 2,34$

$$L_{point} = 12 * \left(\frac{0,1}{2,34}\right)^2 = 0,02 \text{ (dB)}$$

Son unas pérdidas despreciables así que no se tendrán en cuenta

Como en el caso anterior, el avión vuela muy por encima de donde podrían aparecer las atenuaciones debidas a la lluvia y a los gases, así que no las tendremos en consideración. Pasamos por tanto al cálculo de balance de potencias del enlace:

- $PIRE = 46,5 \text{ (dBW)}$; es la típica para un sistema embarcado de estas características. Como se puede observar, alrededor de 20dB menos a la de los equipos marítimos, lo que va a limitar la velocidad del enlace, a pesar incluso de la reducción en las pérdidas para este caso concreto [\[82\]](#).

$$\frac{C}{N_0} = 46,5 - 213,29 - 0,8 + 14 + 228,6 = 75,3 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 75,3 - 10 \log(3,9 * 10^6) = 10 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 10 - 10 \log\left(\frac{4}{3,9}\right) = 9,77 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q\left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{9,77}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)}\right) = 1,2 * 10^{-5}$$

En este caso debido la velocidad de 4 Mbps (típica en este tipo de enlace) dispone de una BER muy justa en los requisitos del enlace q habíamos planeado. Reduciendo la velocidad a 3 Mbps (2,92 Mhz) en el caso de lluvia mantendríamos la calidad de enlace que impusimos en un principio. Repitiendo los cálculos la BER será de $1,7 * 10^{-6}$.

Pasemos al cálculo del último servicio, el vehículo situado en el norte de África.

Servicio 3

En este caso, y como las condiciones son similares a las del primer servicio pero con menor PIRE de transmisión calcularemos directamente para un enlace disponible el 99,5% del año medio, manteniendo la velocidad de 4 Mbps.

Como en los casos anteriores disponemos de la distancia y la elevación.

$$d = 38183 \text{ Km}$$

$$EL = 38 \text{ (grados)}$$

- $R_{0,01}=30$ (mm/h).
- $h_s=0,192$ (Km).
- $EL = 38$ (grados).
- $F_{df} = 28,41625$ (GHz).

$$A_{0,01} = 24,91 \text{ dB}$$

En este caso aseguraremos el enlace para el 99,5% del tiempo del año medio para poder cumplir con los requisitos de nuestro enlace ($BER=10^{-6}$).

$$A_{0,5} = 3,7 \text{ dB}$$

Atenuación por gases:

- $P=1015$ (hPa).
- $T=10$ (grados centígrados); Temperatura sacada de la recomendación ITU-r P1510.
- $F_{df}=28,41$ (Ghz).
- $p=7,5$ (g/m3).
- $EL=38$ (gados).

$$A_g = 0,41 \text{ (dB)}$$

Calculamos las perdidas en espacio libre:

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4 * \pi * 38183 * 28416,25 * 10^6}{3 * 10^5} \right) = 213,15 \text{ (dB)}$$

Calculamos las pérdidas por apuntamiento, suponiendo que la antena del satélite es de 1,2 metros:

- $\theta_{error} = 0,1$ el error en la medida del haz a 3 dB,
- $\theta_{3dB} = 70 * \frac{c}{F_{df} * D} = 70 * \frac{3 * 10^8}{28 * 10^9 * 1,2} = 0,625$

$$L_{point} = 12 * \left(\frac{0,1}{0,625} \right)^2 = 0,25 \text{ (dB)}$$

Con todos estos datos ya podemos calcular el balance de potencias como hicimos antes:

- $PIRE = 53,6 \text{ (dBW)}$; es la típica para un sistema embarcado de estas características. Como se puede observar, alrededor de 14 dB inferior a la de los equipos marítimos, lo que va a limitar la velocidad del enlace, que se da en circunstancias de propagación similares [\[88\]](#).

$$\frac{C}{N_0} = 53,6 - 213,15 - 3,7 - 0,8 - 0,25 - 0,41 + 14 + 228,6 = 77,89 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 77,89 - 10 \log(3,9 * 10^6) = 11,97 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 11,97 - 10 \log\left(\frac{4}{3,9}\right) = 11,86 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q \left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{11,86}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)} \right) = 3 * 10^{-8}$$

En este caso la BER también cumple con nuestras especificaciones iniciales.

Calculado el enlace ascendente, las señales llegan al satélite y realizan el mismo proceso que se daba en sentido forward, las señales bajan a banda base, se regeneran, se suben en frecuencia de nuevo y se disponen para salir por el mismo spot y por

consiguiente el mismo HPA. Para nuestro caso asumiremos nuevamente el peor de los escenarios, todas las señales se transmiten en el mismo instante de tiempo.

4.3.2 Enlace descendente

Como transmitimos con el mismo HPA realizaremos el mismo proceso que en el enlace forward para evitar la aparición de los productos de intermodulación.

Sabiendo que la PIRE máxima en saturación para el satélite es 61,5 dBw la potencia destinada a cada portadora será:

$$PIRE_{pmax} = PIRE_{sat} - 3 - 10 \log(N) = 61,5 - 3 - 10 \log(3) = 53,72 \text{ (dBw)}$$

Como hemos visto la PIRE por portadora es de 53,72 dBw. Esto se podría conseguir con la antena de 1,2 metros que estamos utilizando con una eficiencia en este caso del 10%, lo que equivale a 49 dB de ganancia para el rango de frecuencias en el que estamos (19 Ghz) y una potencia por portadora en el HPA de 5 dBw, puesto que contamos con que perdemos 1 dB por efecto de la guía onda entre el HPA y la antena. En este caso al transmitir con tan poca potencia, nos alejamos de la zona de saturación del amplificador, y trabajamos en una zona tan lineal que es prácticamente imposible que se generen productos de intermodulación con un valor de potencia significativo. No obstante calcularemos los posibles productos igual que se hizo para el amplificador del HUB.

Realicemos el mismo cálculo que se demostró en el transmisor del HUB para ver si este HPA puede con las diferentes portadoras que se usan:

Las frecuencias de transmisión de las portadoras son:

$$f_1 = 19,1287 \text{ Ghz}$$

$$f_2 = 19,2725 \text{ Ghz}$$

$$f_3 = 19,4162 \text{ Ghz}$$

Y los productos de intermodulación que podrían afectarnos, los dados por estas ecuaciones (los productos de intermodulación de tercer orden):

$$Im_1 = 2f_2 - f_1 = 19,4163 \text{ Ghz}$$

$$Im_2 = 2f_3 - f_1 = 19,7031 \text{ Ghz}$$

$$Im_3 = 2f_1 - f_2 = 18,9849 \text{ Ghz}$$

$$Im_4 = 2f_3 - f_2 = 19,5599 \text{ Ghz}$$

$$Im_5 = 2f_1 - f_3 = 18,8412 \text{ Ghz}$$

$$Im_6 = 2f_2 - f_3 = 19,1288 \text{ Ghz}$$

Estas son todas las combinaciones de productos de intermodulación que podrían caer en nuestro rango espectral del transpondedor. Cada una de nuestras portadoras presenta 30 Mhz de ancho de banda, veamos cuantos productos de intermodulación “caen” dentro de ellos:

El primer ancho de banda de la primera portadora se encuentra entre:

$$\text{Límite superior: } f_1 + \frac{0,030}{2} = 19,1437 \text{ Ghz}$$

$$\text{Límite inferior: } f_1 - \frac{0,030}{2} = 18,1137 \text{ Ghz}$$

Como se puede apreciar el único producto de intermodulación que cae en esta portadora es el Im_6 , por lo que si nuestro nivel de portadora es 5 dBW al entrar solo un producto de intermodulación el nivel de la suma de los productos de intermodulación estará directamente en el valor que da el fabricante, 27 dB por debajo de 5 dBW:

$$5 - 27 = -22 \text{ dBw.}$$

Y por lo tanto la diferencia entre el nivel de portadora y el nivel del producto de intermodulación es $\frac{C}{I} = 27 \text{ dB}$. Como vemos cumplimos sobradamente el requisito indicado de C/I mínima.

Repitamos el mismo procedimiento para la portadora 2:

$$\text{Límite superior: } f_2 + \frac{0,030}{2} = 19,2875 \text{ Ghz}$$

$$\text{Límite inferior: } f_2 - \frac{0,030}{2} = 19,2575 \text{ Ghz}$$

En este caso no hay ningún producto de intermodulación en este ancho de banda como se puede ver arriba, por lo que no es necesario calcular la relación C/I, es empíricamente superior a 20 dB.

Por ultimo repitamos el procedimiento para la última portadora:

$$\text{Límite superior: } f_3 + \frac{0,030}{2} = 19,4312 \text{ Ghz}$$

$$\text{Límite inferior: } f_3 - \frac{0,030}{2} = 19,4012 \text{ Ghz}$$

En este caso es el Im_1 el que se encuentra dentro de nuestra última portadora, asique repitiendo el procedimiento anterior de la portadora 1 se puede ver que la relación C/I es de 27 dB.

Como hemos comprobado los productos de intermodulación con este HPA se encuentra a niveles tan bajos que no interferirán con la correcta recepción de las portadoras. Dicho esto prosigamos los cálculos de la transmisión.

Sabiendo la PIRE máxima que puede transmitir cada portadora, calculemos el enlace descendente para cada servicio.

En primer lugar las tres portadoras deben recorrer la misma distancia y el HUB debe presentar el mismo ángulo de elevación:

$$d = 38744 \text{ Km}$$

$$EL = 31,8 \text{ (grados)}$$

Partiendo de estos datos calcularemos cada enlace descendente por separado.

Servicio1:

Atenuación debida a la lluvia:

- $R_{0,01}=30$ (mm/h).
- $h_s=0,654$ (Km).
- $EL = 31,8$ (grados).
- $F_{df} = 19,12875$ (GHz).

$$A_{0,01} = 12,45 \text{ dB}$$

En este caso aseguramos el enlace para el 99,99% del tiempo del año medio.

Calculamos la atenuación por gases:

- $P=923,5$ (hPa).
- $T=10$ (grados centígrados); Temperatura sacada de la recomendación ITU-r P1510.
- $F_{df}=19,12875$ (Ghz);
- $p=7,5$ (g/m3);
- $EL=31,8$ (gados);

$$A_g = 0,34 \text{ (dB)}$$

Calculamos las perdidas en espacio libre:

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4 * \pi * 38744 * 19128,75 * 10^6}{3 * 10^5} \right) = 209,83 \text{ (dB)}$$

Calculamos las pérdidas por apuntamiento, suponiendo que la antena del satélite es de 1,2 metros:

- $\theta_{error} = 0,1$ el error en la medida del haz a 3 dB,
- $\theta_{3dB} = 70 * \frac{c}{F_{df} * D} = 70 * \frac{3 * 10^8}{19 * 10^9 * 1,2} = 0,92$

$$L_{point} = 12 * \left(\frac{0,1}{0,92} \right)^2 = 0,14 \text{ (dB)}$$

Con todos estos datos ya podemos calcular el balance de potencias como hicimos antes:

- $\frac{G}{T} = 22,3 \text{ (dB/k)}$; es la típica para un sistema embarcado de estas características, hemos considerado que el HUB como mínimo tendrá la misma G/T que el vehículo terrestre considerado en el servicio 3.

$$\frac{C}{N_0} = 53,72 - 209,83 - 12,45 - 0,8 - 0,14 - 0,34 + 22,3 + 228,6 = 81 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 81 - 10 \log(3,9 * 10^6) = 15,08 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 15,08 - 10 \log\left(\frac{4}{3,9}\right) = 14,97 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q\left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{14,97}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)}\right) = 2,36 * 10^{-15}$$

Como podemos comprobar la BER es suficientemente baja como para disponer de un enlace funcional. Con estos cálculos tenemos el primer enlace completado, el del servicio 1.

Servicio 2

Atenuación debida a la lluvia:

- $R_{0,01}=30$ (mm/h).
- $h_s=0,654$ (Km).
- $EL = 31,8$ (grados).
- $F_{df} = 19,2725$ (GHz).

$$A_{0,01} = 12,52 \text{ dB}$$

Como antes aseguraremos el enlace para el 99,99% del tiempo del año medio.

Calculamos la atenuación por gases:

- $P=923,5$ (hPa).
- $T=10$ (grados centígrados); Temperatura sacada de la recomendación ITU-r P1510.
- $F_{df}=19,2725$ (Ghz);
- $p=7,5$ (g/m3);
- $EL=31,8$ (gados);

$$A_g = 0,36 \text{ (dB)}$$

Calculamos las perdidas en espacio libre:

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4 * \pi * 38744 * 19272,5 * 10^6}{3 * 10^5} \right) = 209,9 \text{ (dB)}$$

Con todos estos datos ya podemos calcular el balance de potencias como hicimos antes:

- $\frac{G}{T} = 22,3$ (dB/k); es la típica para un sistema embarcado de estas características, hemos considerado que el HUB como mínimo tendrá la misma G/T que el vehículo terrestre considerado en el servicio 3.

$$\frac{C}{N_0} = 53,72 - 209,9 - 12,52 - 0,8 - 0,14 - 0,36 + 22,3 + 228,6 = 80,9(dBHz)$$

$$\frac{C}{N} = 80,9 - 10 \log(2,92 * 10^6) = 16,23 (dB)$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 16,23 - 10 \log\left(\frac{3}{2,92}\right) = 16,11 (dB)$$

$$BER = 2Q\left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{16,11}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)}\right) = 1,7 * 10^{-19}$$

Como podemos comprobar la BER es suficientemente baja como para disponer de un enlace funcional con una gran calidad de enlace. Con estos cálculos tenemos el segundo enlace completado, el del servicio 2.

Servicio 3

Atenuación debida a la lluvia:

- $R_{0,01}=30$ (mm/h).
- $h_s=0,654$ (Km).
- $EL = 31,8$ (grados).
- $F_{df} = 19,4162$ (GHz).

$$A_{0,01} = 12,58 dB$$

En este caso aseguramos el enlace para el 99,99% del tiempo del año medio.

Calculamos la atenuación por gases:

- $P=923,5$ (hPa).
- $T=10$ (grados centígrados); Temperatura sacada de la recomendación ITU-r P1510.
- $F_{df}=19,4162$ (Ghz);
- $p=7,5$ (g/m3);
- $EL=31,8$ (gados);

$$A_g = 0,38 \text{ (dB)}$$

Calculamos las pérdidas en espacio libre:

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4 * \pi * 38744 * 19416,2 * 10^6}{3 * 10^5} \right) = 209,96 \text{ (dB)}$$

Con todos estos datos ya podemos calcular el balance de potencias como hicimos antes:

- $\frac{G}{T} = 22,3 \text{ (dB/k)}$; es la típica para un sistema embarcado de estas características, hemos considerado que el HUB como mínimo tendrá la misma G/T que el vehículo terrestre considerado en el servicio 3.

$$\frac{C}{N_0} = 53,72 - 209,96 - 12,58 - 0,8 - 0,14 - 0,38 + 22,3 + 228,6 = 80,5 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 80,5 - 10 \log(3,9 * 10^6) = 14,58 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 14,58 - 10 \log\left(\frac{4}{3,9}\right) = 14,47 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q \left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{14,47}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)} \right) = 7,4 * 10^{-14}$$

Con este último cálculo vemos una tasa de error de bit muy buena para que el último servicio se pueda llevar a cabo, de esta forma el cálculo de los enlaces quedaría completamente definido.

Las velocidades comerciales que se ofertan en el mercado para el sentido Return de los servicios dimensionados anteriormente están en torno a 4, 4 y 20 Mbps respectivamente para cada uno de los tres servicios, en el primer caso hemos conseguido esa velocidad con nuestros requisitos, en el segundo nos quedamos a poco de alcanzar la BER objetivo, sin embargo en el tercero la mayor velocidad que conseguimos fue de 4 Mbps. Calculemos a continuación cuáles serían los requisitos para los dos últimos servicios.

En ambos servicios la clave reside en que la G/T del satélite debe ser comparable a la que hemos deducido en el HUB o la que presentan las especificaciones de nuestra transportable móvil del servicio 3 (22,3 dB).

Así pues en el servicio 2 para una velocidad de 4 Mbps se conseguiría una BER:

- Considerando los mismos requisitos que se calcularon en el enlace ascendente Return del servicio 2.

Enlace ascendente:

$$\frac{C}{N_0} = 46,5 - 213,29 - 0,8 + 22,3 + 228,6 = 83,31 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 83,31 - 10 \log(3,9 * 10^6) = 17,39 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 17,39 - 10 \log\left(\frac{4}{3,9}\right) = 17,28 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q\left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{17,28}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)}\right) = 3,6 * 10^{-24}$$

Enlace descendente:

$$\frac{C}{N_0} = 53,72 - 209,9 - 12,52 - 0,8 - 0,14 - 0,36 + 22,3 + 228,6 = 80,9 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 80,9 - 10 \log(3,9 * 10^6) = 14,98 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 14,98 - 10 \log\left(\frac{4}{3,9}\right) = 14,87 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q\left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{14,87}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)}\right) = 4,8 * 10^{-15}$$

Y para el servicio 3 con una velocidad de 20Mbps sin lluvia si con una G/T de 24,3 la BER obtenida seria de:

- Considerando los mismos requisitos que se calcularon en el enlace ascendente Return del servicio 3.

Enlace ascendente:

$$\frac{C}{N_0} = 53,6 - 213,15 - 3,7 - 0,8 - 0,25 - 0,41 + 24,3 + 228,6 = 88,19 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 88,19 - 10 \log(19,5 * 10^6) = 15,28 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 15,28 - 10 \log\left(\frac{20}{19,5}\right) = 15,17 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q\left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{15,17}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)}\right) = 3,4 * 10^{-16}$$

Enlace descendente:

En este caso debe asegurarse solo al 99,9% para poder llegar a una velocidad de 20Mbps.

$$A_{0,1} = 4,31 \text{ dB}$$

$$\frac{C}{N_0} = 53,72 - 209,96 - 4,31 - 0,8 - 0,14 - 0,38 + 22,3 + 228,6 = 89,03 \text{ (dBHz)}$$

$$\frac{C}{N} = 89,03 - 10 \log(19,5 * 10^6) = 16,12 \text{ (dB)}$$

$$\frac{E_b}{N_0} = 16,12 - 10 \log\left(\frac{20}{19,5}\right) = 16,01 \text{ (dB)}$$

$$BER = 2Q\left(\sqrt{2 \log_2(4) * 10^{\frac{16,01}{10}} * \text{sen}\left(\frac{\pi}{4}\right)}\right) = 4,2 * 10^{-19}$$

Como podemos apreciar con un satélite que dispusiera de estas G/T se podrían obtener esas velocidades con una gran calidad de enlace.

A continuación presentamos una tabla a modo de resumen en la que ver las velocidades finales con las que se pueden transmitir los servicios y sus tasas de error de bits según nuestros requisitos impuestos:

Sentido Forward

	Velocidad (Mbps)	BER del enlace ascendente	BER del enlace descendente
Servicio 1	20	$2,4 * 10^{-30}$	$3,4 * 10^{-15}$
Servicio 2	40	$3,4 * 10^{-16}$	$1,6 * 10^{-7}$
Servicio 3	50	$4,1 * 10^{-13}$	$2,7 * 10^{-15}$

Tabla 1: resumen de velocidades y BER en sentido Forward

Sentido Return

	Velocidad (Mbps)	BER del enlace ascendente	BER del enlace descendente
Servicio 1	4	$1,08 * 10^{-7}$	$2,36 * 10^{-15}$
Servicio 2	3	$1,7 * 10^{-6}$	$1,7 * 10^{-19}$
Servicio 3	4	$3 * 10^{-8}$	$7,4 * 10^{-14}$

Tabla 2: resumen de velocidades y BER en sentido return

Conclusiones

Durante todo el documento hemos podido apreciar la clara evolución de las comunicaciones por satélite. Comenzando por las primeras bandas L y S, que solo pueden ser utilizadas para comunicaciones de banda estrecha que no permiten cubrir las necesidades actuales de los servicios de banda ancha. Continuando con Las bandas C y Ku, las cuales aunque si permiten la difusión de servicios que requieren de ancho de banda mayor, están completamente utilizadas por los servicios fijos, y apenas existen servicios móviles que se puedan distribuir en ellas. Y finalmente la aparición de la banda Ka, aún en fase de explotación y en la que se permite la cohabitación de los servicios móviles y fijos de banda ancha proporcionando una clara alternativa a los servicios terrestres.

También se ha podido demostrar la viabilidad de los servicios móviles proporcionados en banda Ka con el dimensionamiento de un transpondedor y su correspondiente cálculo de enlace. Y finalmente, confirmar las velocidades de las que presumen los diferentes operadores de servicios, así como los requisitos necesarios para conseguirlas.

Por ultimo hemos comprobado que para cumplir con las velocidades que se ofertan en el mercado actualmente, necesitamos unos requisitos más estrictos en las características de los equipos. En nuestro trabajo se ha demostrado que aumentando la G/T del satélite podemos llegar a cumplir estos objetivos, sin embargo, existen otras opciones para cumplimentarlos. Un ejemplo de ello puede ser aumentar la PIRE de los equipos de tierra en el caso que fuera necesario, pero esto provoca una mayor pérdida de energía que en el caso que proponemos.

Bibliografía:

[1]; [http://www.esa.int/Our Activities/Telecommunications Integrated Applications/Satellite frequency bands](http://www.esa.int/Our_Activities/Telecommunications_Integrated_Applications/Satellite_frequency_bands)

[2]; <http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/CNAF/cuadroAtribuciones2013.pdf>

[3]; Power Point adjunto designado como “Plan frecuencial satélite en banda L inmarsat 4.PPT” (en internet se encuentra como R0A0E0000260001PPTE.ppt)

[4]; <https://www.inmarsatgov.com/uploadedFiles/Resources/Downloads/l-tac-whitepaper.pdf>

[5]; <https://books.google.es/books?id=WWD-4oF9hjEC&pg=PA111&lpg=PA111&dq=frecuencias+enlace+ascendente+banda+S&source=bl&ots=XyfeVct8Ad&sig=3WcNVq1Ef0PILvMAVO68wPk7X4w&hl=es&sa=X&ved=0CEoQ6AEwB2oVChMI8enOqYWjxwIVAsUUCH0M6gNm#v=onepage&q=frecuencias%20enlace%20ascendente%20banda%20S&f=false>

[6]; http://www.upv.es/satelite/trabajos/Grupo2_98.99/standnofr.html

[7]; <https://sectoraudiovisual.wordpress.com/2008/05/12/acuerdo-para-ampliar-el-alcance-de-la-tv-movil-dvb-sh-a-menor-costos/>

[8]; <http://www.dektec.com/products/PCIe/DTA-2107/>

[9]; <http://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/material/CSA08-8-DVB-S-S2-RCS.pdf>

[10]; <https://www.dvb.org/standards>

[11]; PDF adjunto designado como “pag_(II-1999)-998_28-42_(II-1999)-998 informacion GPS.pdf”

[12]; <http://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-4-GLONASS-Reuter.PDF>

[13]; http://www.coit.es/foro/pub/ficheros/galileo_c4513fbc.pdf

- [14]; <http://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/view/302>
- [15]; http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad3/sat_mete.htm
- [16]; <http://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum12/vdm031.htm#3102a>
- [17]; [http://www.inmarsat.com/wp-content/uploads/2013/10/Inmarsat Site Guard.pdf](http://www.inmarsat.com/wp-content/uploads/2013/10/Inmarsat_Site_Guard.pdf)
- [18]; [http://www.inmarsat.com/wp-content/uploads/2013/10/Inmarsat Site Guard Technical Specifications.pdf](http://www.inmarsat.com/wp-content/uploads/2013/10/Inmarsat_Site_Guard_Technical_Specifications.pdf)
- [19]; http://www.upv.es/satelite/trabajos/pracGrupo18/t_bandas.htm
- [20]; http://www.upv.es/satelite/trabajos/pract_14/inmar333.htm
- [21]; <http://www.inmarsat.com/services/safety/gmdss/>
- [22]; <http://www.inmarsat.com/service-collection/fleetbroadband/>
- [23]; <http://www.inmarsat.com/service-collection/swiftbroadband/>
- [24]; <http://www.inmarsat.com/service/bgan/>
- [25]; http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/campos_v_da/capitulo1.pdf
- [26]; <http://www.fiercewireless.com/europe/story/echostar-buys-struggling-mss-operator-solaris-mobile/2014-01-08>
- [27]; [http://www.inmarsat.com/wp-content/uploads/2014/09/Inmarsat Investor Day Development And Engineering September 2014 EN.pdf](http://www.inmarsat.com/wp-content/uploads/2014/09/Inmarsat_Investor_Day_Development_And_Engineering_September_2014_EN.pdf)
- [28]; <http://www.inmarsat.com/wp-content/uploads/2014/06/Inmarsat-S-band-services-June-2014.pdf>
- [29]; <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2>
- [30]; http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad3/sat_td.htm

- [31]; <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
- [32]; http://landsat.usgs.gov/about_landsat1.php
- [33]; http://www.upv.es/satelite/trabajos/pract_3/sts/bspm.htm
- [34]; http://www.upv.es/satelite/trabajos/Grupo2_99.00/misiones/voyager/voyager.html
- [35]; <http://danielmarin.naukas.com/2012/09/16/la-historia-de-las-voyager-los-mensajeros-interstelares-de-la-humanidad/>
- [36]; <https://jocilesferrer.wordpress.com/tag/espacio/>
- [37]; <http://www.infoespacial.com/mundo/2014/06/05/noticia-thales-alenia-space-construira-el-inmarsat-s-europasathellas-sat-3.html>
- [38]; <http://www.inmarsat.com/about-us/our-satellites/europasat/>
- [39]; <http://echostarmobile.com/services/technology>
- [40]; <http://www.slashgear.com/solaris-mobile-pocket-gateway-device-adds-dvbs-tv-via-wifi-1273823/>
- [41]; <http://www.upv.es/satelite/trabajos/pracGrupo2/intro/comsubs.html>
- [42]; <http://www.upv.es/satelite/trabajos/pracGrupo17/frecuencias.html>
- [43]; http://www.upv.es/satelite/trabajos/pract_4/eltos/space/frec.htm
- [44]; <http://www.lyngsat.com/Intelsat-11.html>
- [45]; <http://ipviasatelite.com/profiles/blogs/internet-satelital-para-america-con-banda-c>
- [46]; <http://www.eutelsat.com/home/news/press-releases/Archives/2013/press-list-container/ppc-of-nigeria-selects-eutelsat.html>
- [47]; <http://www.eutelsat.com/files/contributed/support/pdf/comprehensive-coverage-africa.pdf>
- [48]; <https://es.ses-astra.com/18580462/satelite-amc12.pdf>

- [49]; <http://www.lyngsat.com/Intelsat-11.html>
- [50]; <http://www.eutelsatamericas.com/files/contributed/PDF/support/Estandar-Tecnico-2014.pdf>
- [51]; PDF adjunto designado como “AMZ-1 @ 55.5 Frequency plan and coverage.pdf”
- [52]; <http://www.lyngsat.com/Hispasat-1E.html>
- [53]; PDF adjunto designado como “global_aero_terminal_5320_datasheet.pdf” o en la página de internet <https://www.viasat.com/products/mobile-broadband>
- [54]; <http://exnetapps.intelsat.com/flash/coverage-maps/index.html>
- [55]; <http://noticias.enabierto.es/2012/04/por-que-se-usa-la-banda-c-en-los-paises.html>
- [56]; http://www.gilat.com/dynimages/t_brochures/files/Ka-band%20versus%20Ku-band%202011-08.pdf
- [57]; <http://www.hispasat.com/es/flota-de-satelites/hispasat-1e>
- [58]; PDF adjunto designado como “R12-ITURKA.BAND-C-0001!!MSW-E.pdf” o descargado de internet mediante: https://www.google.es/search?q=R12-ITURKA.BAND-C-0001!!MSW-E&rlz=1C1AVNA_enES604ES604&oq=R12-ITURKA.BAND-C-0001!!MSW-E&aqs=chrome..69i57.957j0j7&sourceid=chrome&es_sm=122&ie=UTF-8
- [59]; <http://www.advantechwireless.com/wp-content/uploads/DVB-S2-theory.pdf>
- [60]; <http://www.lyngsat.com/Eutelsat-Ka-Sat-9A.html>
- [61]; <http://adsabs.harvard.edu/abs/1984coss.conf..395S>
- [62]; [http://www.iaria.org/conferences2014/filesAICT14/Keynote_presentation A ICT 2014 B.Jovic.pdf](http://www.iaria.org/conferences2014/filesAICT14/Keynote_presentation_AICT_2014_B.Jovic.pdf)

- [63]; http://www.researchgate.net/publication/4238379_Ka_band_Propagation_Experiments_on_the_Australian_Low-Earth_Orbit_Microsatellite_FedSat
- [64]; <http://www.todoprogramas.com/manuales/ficheros/2008/8.7785.3300.pdf>
- [65]; PDF adjunto designado como “Ka-band white paper.pdf” o en internet como <http://www.newsat.com/whitepapers/572-ka-band-white-paper/file>
- [66]; <http://www.inmarsat.com/service/fleet-xpress/>
- [67]; http://www.navarino.gr/section/80/Fleet_Xpress_.html
- [68]; <http://www.intelliantech.com/News/pressrelease/view/148>
- [69]; PDF`s adjuntos designados como “GX60_Datasheet” y “GX100_Datasheet” o en internet como <http://www.intelliantech.com/Satcom/gx/gx60>
- [70]; <http://www.cobham.com/about-cobham/communications-and-connectivity/about-us/satcom/satellite-communication-at-sea/products-and-services/inmarsat-global-xpress.aspx>
- [71]; <http://pdf.nauticexpo.com/pdf/jrc-europe/jue-60gx/24144-82538.html>
- [72]; <http://www.maritimevsat.com/index.php/latest-hot-topics>
- [73]; <http://www.intelsat.com/infrastructure/intelsat-epicng/>
- [74]; <http://www.intelsat.com/wp-content/uploads/2013/01/MarineElec-OctNov2011.pdf>
- [75]; <http://www.telenorsat.com/thor7/>
- [76]; PDF adjunto designado como “THOR-7-Mobility-and-Data-services-Ka-band-brochure” o en internet como <http://www.telenorsat.com/thor7/wp-content/uploads/2015/03/THOR-7-Mobility-and-Data-services-Ka-band-brochure.pdf>
- [77]; PDF adjunto designado como “DSHamburg_Manuel_Valero” o en internet como http://www.thedigitalship.com/conferences/presentations/2014hamburg/day1/DSHamburg_Manuel_Valero.pdf

[78]; <http://www.inmarsat.com/service/gx-aviation/>

[79]; <https://www.globalsolutions.telefonica.com/en/news/2015/03/16/vueling-unveils-first-plane-with-high-speed-wi-fi-installed-thanks-to-alliance-with-telefonica/>

[80]; <https://www.viasat.com/systems-products/satellite-systems>

[81]; PDF adjunto designado como “global_aero_terminal_5320_datasheet.pdf” o en internet como <https://www.viasat.com/products/mobile-broadband>

[82]; PDF adjunto designado como “aero_mobile_terminal_5230_datasheet.pdf” o en internet como <https://www.viasat.com/products/mobile-broadband>

[83]; PDF adjunto designado como “Honeywell Content Brief - Part I.pdf” o en internet como <https://aerospace.honeywell.com/~media/Connectivity%20Downloads/Content%20Brief%20-%20Part%20I.ashx>

[84]; PDF adjunto designado como “N61-1248-000-002_JetWave Satcom Terminal_LR.pdf” o en internet como http://www.satcom1.com/marketing/documents/tech/N61-1248-000-002_JetWave%20Satcom%20Terminal_LR.PDF

[85]; <https://www.viasat.com/industries-applications/emergency-response>

[86]; PDF adjunto designado como “surfbeam2 ProPortable Datasheet 019 .pdf” o en internet como https://www.viasat.com/sites/default/files/legacy/surfbeam2_ProPortable_Datasheet_019_web.pdf

[87]; PDF adjunto designado como “75cm vehicle mounted terminal datasheet.pdf” o en internet como https://www.viasat.com/sites/default/files/legacy/75cm_vehicle_mounted_terminal_datasheet_003_web.pdf

[88]; PDF adjunto designado como " 1.2m vehicle mounted terminal datasheet.pdf" o en internet como

https://www.viasat.com/sites/default/files/legacy/1.2m_vehicle_mounted_terminal_datasheet_006_web.pdf

[89]; <http://mecg.es/archivos/redesVSAT.pdf>

[90]; La recomendación utilizada por la UIT es UIT-R S.2278 de 2013, se puede encontrar en el siguiente enlace http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-S.2278-2013-PDF-E.pdf

[91]; http://space.skyrocket.de/doc_sdat/olympus-f1.htm

[92]; http://space.skyrocket.de/doc_sdat/inmarsat-5.htm

[93]; <http://www.hispasat.com/es/flota-de-satelites/amazonas-3>

[94]; <http://www.agenciasinc.es/Noticias/El-satelite-KA-SAT-listo-para-recortar-la-brecha-digital-europea>

[95]; http://www.eutelsat.com/files/contributed/news/media_library/brochures/ka-sat-professional-services.pdf

[96]; <http://www.avantiplc.com/fleet-coverage/coverage>

[97]; <http://www.avantiplc.com/fleet-coverage/hylas-1>

[98]; http://www.avantiplc.com/hylas2/hylas2_productsheet.pdf

[99]; <http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/radiocomunicacion/contenidos/presentaciones/satelites-07.pdf>

[100]; http://www.onastra.es/17862041/NOTA_DE_PRENSA_ASTRA_L1_OPERATIVO

[101]; http://www.satcomnow.com/satcom/pdf/MCL_MT2300.pdf

[102]; <http://www.xicomtech.com/products/documents/XTD-500Ka-KaL%20Rev%202010.pdf>

[103]; http://www.satcomnow.com/satcom/pdf/MCL_MT3600.pdf

[104]; PDF adjunto designado como “Configuration-and-the-Calculation-of-Link-Budget-for-a-Connection-via-a-...” o en internet como <http://waset.org/publications/9602/configuration-and-the-calculation-of-link-budget-for-a-connection-via-a-geostationary-satellite-for-multimedia-application-in-the-ka-band>

Referencia de ilustraciones

- [1]; https://www.viasat.com/sites/default/files/media/documents/mitigating_the_effect_of_weather_on_ka-band_high_capacity_satellites.pdf
- [2]; http://www.coit.es/foro/pub/ficheros/galileo_c4513fbc.pdf
- [3]; <http://ea3atl.ure.es/satsmet/satsmete.htm>
- [4]; http://www.inmarsat.com/wp-content/uploads/2013/10/Inmarsat_Site_Guard_Technical_Specifications.pdf
- [5]; <http://www.inmarsat.com/service-collection/fleetbroadband/>
- [6]; <http://www.inmarsat.com/service-collection/swiftbroadband/>
- [7]; <http://www.slashgear.com/solaris-mobile-pocket-gateway-device-adds-dvb-hs-tv-via-wifi-1273823/>
- [8]; <http://www.nasa.gov/missions/earth/fs13grc.html>
- [9]; <http://es.slideshare.net/fralbe007/capacidad-de-m-f-t-d-m-a>
- [10]; <http://www.intelliantech.com/Satcom/gx/gx60>
- [11]; http://cincodias.com/cincodias/2015/03/16/lifestyle/1426504573_505324.html
- [12]; PDF adjunto designado como “global_aero_terminal_5320_datasheet.pdf” o en internet como <https://www.viasat.com/products/mobile-broadband>
- [13]; PDF adjunto designado como “aero_mobile_terminal_5230_datasheet.pdf” o en internet como <https://www.viasat.com/products/mobile-broadband>
- [14]; PDF adjunto designado como “surfbeam2 ProPortable Datasheet 019 .pdf” o en internet como https://www.viasat.com/sites/default/files/legacy/surfbeam2_ProPortable_Datasheet_019_web.pdf

[15]; PDF adjunto designado como " 75cm vehicle mounted terminal datasheet.pdf" o en internet como

https://www.viasat.com/sites/default/files/legacy/75cm_vehicle_mounted_terminal_datasheet_003_web.pdf

[16]; PDF adjunto designado como " 1.2m vehicle mounted terminal datasheet.pdf" o en internet como

https://www.viasat.com/sites/default/files/legacy/1.2m_vehicle_mounted_terminal_datasheet_006_web.pdf

[17]; http://space.skyrocket.de/doc_sdat/olympus-f1.htm

[18]; http://space.skyrocket.de/doc_sdat/inmarsat-5.htm

[19]; <http://www.hispasat.com/es/flota-de-satelites/amazonas-3>

[20]; <http://spacenews.com/39737el-al-israel-airlines-to-offer-viasat-in-air-broadband-service/>

[21]; <http://www.eutelsat.com/en/satellites/the-fleet/EUTELSAT-KA-SAT-coverage.html>

[22]; <http://exnetapps.intelsat.com/flash/coverage-maps/index.html>

[23]; http://www.intelsat.com/wp-content/uploads/2014/06/EpicNG_Coverage_Map_Large.jpg

[24]; <http://www.avantiplc.com/fleet-coverage/coverage>

[25]; http://www.avantiplc.com/hylas2/hylas2_productsheet.pdf