



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Ingeniería Eléctrica

EVALUACIÓN DE CONSTELACIONES SATELITALES EN ÓRBITA LEO PARA LA COMUNICACIÓN DEL EHT EN EL POLO SUR

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de
Concepción para optar al grado académico profesional de:
Magister en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería
Eléctrica

**POR: PABLO ANDRÉS CARTES FICA
CONCEPCIÓN-CHILE**

Profesor Guía: Rodrigo Reeves Díaz
Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

Agosto 2024
Concepción, Chile

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Rodrigo A, Reeves Díaz

Evaluación de Constelaciones Satelitales en Órbita LEO para la Comunicación del EHT en el Polo Sur

Pablo Andrés Cartes Fica

Informe de Tesis
para optar al Grado de

Magister en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Eléctrica

Agosto 2024

© 2024 Pablo Andrés Cartes Fica

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amigos quienes siempre me incitaron a retomar este grado académico.

A Rodrigo Reeves, quien siempre confió en este desafío a pesar de los contratiempos surgidos en el desarrollo del programa, y a toda la comisión por sus consejos, permitiendo perfeccionar la información entregada en este proyecto.

RESUMEN

El Telescopio Horizonte de Eventos (EHT - Event Horizon Telescope), que en 2019 generó la primera imagen de un agujero negro supermasivo en el centro de la galaxia M87 y que en mayo del 2022 generó la imagen de Sagitario A*, agujero negro situado en el centro de la Vía Láctea, está compuesto por múltiples telescopios distribuidos globalmente. Actualmente, son 11 telescopios que operan bajo mediante el método de interferometría de larga base (VLBI – Very Long Baseline Interferometry), siendo el más aislado el ubicado en el Polo Sur, el Telescopio del Polo Sur (SPT - South Pole Telescope).

La obtención de los datos asociados al Telescopio del Polo Sur (SPT) presenta una dificultad técnico-operativa. Actualmente, los datos se almacenan en discos duros y, debido al invierno polar, la recuperación de la información del SPT se complica. Esto provoca demoras en la correlación de los datos con los de los demás telescopios, lo que a su vez retrasa posibles descubrimientos.

En el marco del proyecto Núcleo Milenio en Tecnología e Investigación Transversal para explorar Agujeros Negros Supermasivos (TITANS), se busca explotar el uso de constelaciones satelitales comerciales y/o destinadas para investigación, con el fin de generar soluciones entorno a la transferencia de información y así poder rescatar los datos desde el Polo Sur y enviarlos hacia territorio continental chileno, para que estos datos se integren con los de otros telescopios en periodos menores a 6 meses, que corresponde al tiempo actual con el que se realiza la adquisición de datos.

Se propone el uso de redes satelitales que operen en órbita LEO (Low Earth Orbit), ya que, debido a sus características físicas permitirán cubrir las regiones polares y al encontrarse a una altura menor que otras órbitas como MEO (Medium Earth Orbit) o GEO (Geostationary Earth Orbit), se reduce la latencia en la transmisión de datos.

Del mismo modo, el objetivo es lograr altas tasas de transmisión de datos, puesto que en la campaña de 2017 desde el SPT se obtuvieron 200 TB de datos en un período de seis meses, cantidad de datos se espera sea cuadruplicado a corto o mediano plazo con el aumento de las observaciones, la instalación de nuevos telescopios en la Antártida y la duplicación o triplicación de las bandas de frecuencias de observación, lo que implicaría un aumento proporcional en los datos.

El fin de utilizar comunicaciones satelitales radica en la posibilidad de aprovechar las grandes constelaciones que se están desarrollando e implementando actualmente. Estas constelaciones están en constante evolución, con cambios, licencias y permisos solicitados a la FCC (Federal Communications Commission) para la transmisión de altas tasas de transferencia de datos.

Así, en la presente tesis se propone un análisis y comparación de distintas constelaciones satelitales, mediante un estudio conceptual que permita profundizar y comparar distintas arquitecturas de constelaciones. Se considerarán factores como las condiciones atmosféricas, carga útil de satélites, tamaños y configuraciones orbitales tales como la cantidad de satélites, su distribución, distancia entre ellos y su frecuencia de operación. Además, se realizarán simulaciones para integrar estos atributos y métricas, con el objetivo de obtener estimaciones precisas de las tasas de datos que estas constelaciones pueden transmitir y manejar.

De esta forma, el propósito es identificar qué constelación y configuración permiten una transmisión de datos a altas tasas desde el Polo Sur, evaluando si el uso de un sistema satelital satisface los requisitos del South Pole Telescope (SPT) y los futuros observatorios proyectados en esa región.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	11
1.2. TRABAJOS PREVIOS	12
1.2.1 Trabajo Generales	12
1.2.2 Trabajos Específicos.....	13
1.2.3 Discusión	15
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	16
1.4. OBJETIVOS	16
1.4.1 Objetivo General	16
1.4.2 Objetivos Específicos.....	17
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	17
1.6. TEMARIO.....	18
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	19
2.1. PLANOS ORBITALES	19
2.2. CONFIGURACIÓN DE CONSTELACIONES SATELITALES	20
2.2.1 Proyecto Kuiper (Amazon)	20
2.2.2 Kepler Communications	24
2.2.3 STARLINK (SpaceX).....	30
2.2.4 Telesat Lightspeed (TELESAT).....	33
2.2.5 ONEWEB.....	37
2.2.6 IRIDIUM NEXT.....	43
2.3. DISCUSIÓN	46
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	50
3.1. MODELO DE PRESUPUESTO DE ENLACE	50
3.2. MODELO ATMOSFÉRICO	51
3.3. DEMANDA REQUERIDA.....	57
3.4. SOFTWARE SYSTEM TOOL KIT (STK).....	60
3.5. ESTACIÓN TERRENA.....	62
3.6. PONDERACIÓN DE COSTOS.....	65
3.6.1 Tipo de Antena.....	66
3.6.2 Cobertura.....	66
3.6.3 Banda Espectral de Operación.....	66
3.6.4 Tipo de Modulación.....	67
3.6.5 Comunicación Intersatelital	67
3.6.6 Altura de la constelación	67
3.6.7 Métricas.....	68
3.6.8 Matriz de Ponderaciones.....	68
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	70
4.1. CAPACIDAD MÁXIMA DE LOS SISTEMAS SATELITALES	70
4.2. COBERTURA DE CONSTELACIONES SATELITALES	77
4.3. ESTIMACIÓN COSTO PONDERADO DE IMPLEMENTACIÓN	81
4.4. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA.....	87
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	90
5.1. RESUMEN.....	90
5.2. CONCLUSIONES.....	91
5.3. TRABAJO FUTURO.....	93

BIBLIOGRAFÍA.....94

Lista de Tablas

TABLA 2-1: Diseño de Constelación Kuiper.	21
TABLA 2-2 Uso espectral de Constelación Kuiper.	21
TABLA 2-3 Diseño de Constelación Kepler.....	24
TABLA 2-4 Constelación Satelital Inicial SpaceX (LEO).	30
TABLA 2-5 Constelación Satelital Actual SpaceX (LEO).	31
TABLA 2-6 Configuración Original Constelación Telesat Lightspeed.	33
TABLA 2-7 Configuración Constelación Telesat Lightspeed.	34
TABLA 2-8 Rango de frecuencias usada por la constelación Telesat.	35
TABLA 2-9 Parámetros OISL de Constelación Telesat.	36
TABLA 2-10 Rango Espectral usado en Banda-V	39
Tabla 2-11 Configuración Arquitectura Sistema OneWeb LEO.	40
Tabla 2-12: Comparación de las Constelaciones.....	46
Tabla 2-13 Comparación de Configuración de las Constelaciones en órbita polar.	47
Tabla 2-14: Anchos de Banda de las Constelaciones Satelitales.	48
Tabla 3-1: Rango bandas espectrales microondas.....	54
Tabla 3-2: Resultados condiciones atmosféricas.	57
Tabla 3-3: Modulaciones utilizadas por las constelaciones satelitales.	60
Tabla 3-4: Parámetros antena receptora en satélites.	63
Tabla 3-5: Ángulos mínimos de Elevación para las Estaciones Terrenas.....	65
Tabla 3-6: Parámetros considerados por las constelaciones satelitales.....	69
Tabla 4-1: Razón señal a ruido de esquemas de modulación.....	71
Tabla 4-2: Temperatura de ruido en el sistema receptor.....	72
Tabla 4-3: Potencias usadas en enlace de comunicación.	72
Tabla 4-4: Resultados de la transmisión de datos.	74
Tabla 4-5: Disponibilidad de accesos para las constelaciones satelitales.	81
Tabla 4-6: Ponderación de implementación de constelaciones satelitales.....	82
Tabla 4-7: Sub-bandas de frecuencia usadas en enlace ascendente.	83
Tabla 4-8: Costo ponderado de estaciones terrenas para soporte de datos de transferencia.	84
Tabla 4-9: Sistema de comunicaciones satelitales optimizado.	88

Lista de Figuras

Figura 2-1 Cobertura de los haces de satélite Kuiper a 590 km de altura.	22
Figura 2-2 Representación cobertura global Constelación Kepler.....	25
Figura 2-3 Cono de cobertura de satélites Kepler.	25
Figura 2-4 Separación de canales en enlace descendente para la Constelación Kepler.....	26
Figura 2-5 Separación de canales en enlace ascendente para la Constelación Kepler.....	26
Figura 2-6 Arquitectura del sistema Kepler.	27
Figura 2-7 Mínimo ángulo de elevación para enlaces de servicio.	28
Figura 2-8 Configuración de transferencia de comunicación en gateway.	28
Figura 2-9 Mínimo ángulo de elevación para enlaces de alimentación.	29
Figura 2-10 Mínimo ángulo de elevación para enlaces de alimentación (Starlink).	32
Figura 2-11 Constelación Telesat Lightspeed.	35
Figura 2-12 Constelación OneWeb.	38
Figura 2-13 Estructura de frame TDMA para la constelación Iridium Next.	44
Figura 3-1 Comparación de atenuaciones producto de gases atmosféricos.	55
Figura 3-2 Atenuaciones causadas por la lluvia.	55
Figura 3-3 Atenuaciones causadas por la transmisión en espacio libre.	56
Figura 3-4 Atenuaciones causadas por nubes y niebla.	56
Figura 3-5 BER vs SNR para diferentes modulaciones.	61
Figura 3-6: Comparación de razón portadora a ruido para diferentes antenas.....	64
Figura 3-7 Estructura de implementación de metodología.	68
Figura 4-1 Constelación Kepler- 360 satélites (Software STK).	78
Figura 4-2 Constelación Telesat Lightspeed – 351 satélites (Software STK).	78
Figura 4-3 Constelación Starlink – 1240 satélites (Software STK).	78
Figura 4-4 Constelación Oneweb – 1764 satélites (Software STK).	79
Figura 4-5 Constelación Iridium – 66 satélites (Software STK).....	79
Figura 4-6 Constelación Kuiper – 1302 satélites (Software STK).....	79
Figura 4-7 Representación – South Pole Telescope.....	80
Figura 4-8 Evaluación de esquemas de modulación.	88

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción General

El pasar de los años y el surgimiento de nuevas tecnologías en diferentes ámbitos de la vida han llevado al requerimiento de transmitir mayores cantidades de datos. Para abordar esta necesidad se ha trabajado de forma paulatina en la masificación de la instalación de fibra óptica en el contexto de transmisiones guiadas, y la tecnología móvil 5G para transmisiones no guiadas. Sin embargo, estas nuevas tecnologías requieren de una infraestructura para proporcionar servicio a usuarios, edificios, instituciones, áreas metropolitanas, entre otras, lo que genera grandes desafíos para dar acceso a internet de alta velocidad a la población.

Es así como una tecnología que ha despertado gran interés en la última década corresponde a las comunicaciones satelitales, la cual, a pesar de no ser una tecnología emergente, en los últimos años se ha explorado el uso de órbitas más bajas que la geoestacionaria (órbitas LEO) y bandas de frecuencias cada vez mayores. En comparación con las órbitas MEO y GEO, las órbitas LEO permiten reducir los tiempos de latencia de la información entre el satélite y la estación terrestre debido a su proximidad a la Tierra. Esta cercanía a la superficie terrestre reduce las pérdidas por propagación, lo que deriva además en una disminución en los requerimientos de potencia de transmisión.

De esta forma, el presente trabajo busca conocer los requerimientos para un enlace satelital en órbita LEO, con el fin de verificar si pueden ser aplicables para altas tasas de transmisión de datos como las generadas por el South Pole Telescope (SPT).

Todo esto debido a que el SPT enfrenta una dificultad técnico-operativa a raíz de que en la actualidad genera datos de observaciones astronómicas y los almacena en discos duros, y producto de situaciones climáticas generadas por el invierno polar se dificulta la labor de recuperación de esta información, lo que trae a su vez demoras en la correlación de los datos junto a los demás telescopios y, por consiguiente, retrasos de posibles descubrimientos.

Problemática que debe ser resuelta para lograr la construcción y operación de futuros telescopios proyectados en el Polo Sur, en beneficio del EHT.

El trabajo presentado se enmarca en el Núcleo Milenio Tecnología e Investigación Transversal para explorar Agujeros Negros Supermasivos (TITANS), el cual busca, entre otras áreas, explorar el uso de constelaciones satelitales con el fin de optimizar la transferencia de información que permitan rescatar los datos desde el SPT y enviarlos hacia territorio continental chileno, en periodos menores a 6 meses, que corresponde al tiempo actual con el que se realiza la adquisición de datos.

1.2. Trabajos Previos

1.2.1 Trabajo Generales

En relación con el rendimiento de redes satelitales, Arifn y Khamsah proponen en [1] un sistema de transmisión satelital a bordo para la constelación de TELESAT diferente al desarrollado por la compañía, con el objetivo comparar la cantidad de usuarios y calidad del servicio que pueden entregar, frente al servicio real de la compañía. Este resultado arrojó que el sistema de transmisión propuesto puede soportar entre el 11% al 12% de la cantidad total de usuarios de la red satelital TELESAT LEO original, debido principalmente diferencias en la distancia, frecuencia, factor de mérito ganancia sobre temperatura de ruido (G/T) y modulación utilizada en ambos satélites.

De este proyecto se destacan los parámetros del sistema de comunicación y orbitales utilizados por Arifn y Khamsah para lograr una transferencia de información más eficiente, tales como la frecuencia, ganancia de las antenas, pérdidas atmosféricas, entre otras. Además de que la cantidad de usuarios soportados fue lograda sólo con una constelación de 9 satélites en órbita baja, por lo que la optimización del diseño puede seguir profundizándose.

El trabajo desarrollado por Ravishankar et al. en [2] se centra en la propuesta de métodos que permiten generar altas tasas de transferencia, tales como con la adición de más espectro y más potencia, optimizaciones adicionales de la capa física y de enlace de datos con un control más fino sobre la potencia transmitida, uso de bandas de frecuencia más altas y uso de terminales de usuario con una figura de mérito G/T predefinida. Así, la propuesta de estos métodos está basada en una asignación dinámica de recursos que considera diversas variables del sistema de transmisión, a diferencia de los mecanismos tradicionales que se basan sólo en aspectos individuales.

La relevancia del trabajo de Ravishankar et al. es la metodología en la cual trabaja diversos aspectos para lograr una eficiencia en la transmisión de los datos, objetivo también buscado en este proyecto.

En los trabajos desarrollados por Del Portillo y Pachler en [3] y [4], respectivamente, se presentan comparaciones de constelaciones satelitales en órbita LEO. El objetivo de estos estudios es dar a conocer las arquitecturas y la forma en que cada constelación operará, en base a información técnica extraída de la documentación presentada a la FCC (Federal Communications Commission), por las distintas empresas involucradas.

Un aspecto destacable de estos estudios es la fuente de información desde la cual extraen los datos, ya que en reiteradas ocasiones se hace referencia a información que no ha sido confirmada por

las mismas entidades o por el personal que pertenece a ellas, como es el caso de los enlaces inter-satelitales para la red de Starlink y la provisión de una flota con órbita polar de la misma empresa. El estudio indica que en general todas las arquitecturas se benefician del uso de enlaces inter-satelitales (Inter-Satellite Links – ISL), logrando mejoras entre el 13% y el 42% al utilizar conexiones de 20 Gbps. Específicamente Telesat y Amazon alcanzarían 7,52 y 11,3 Tbps si utilizan ISL de 20 Gbps, permitiendo duplicar la tasa de datos por satélite en comparación con las otras constelaciones.

Los antecedentes proporcionados en estos trabajos y extraídos de los documentos de la FCC permiten evaluar el desarrollo de las constelaciones satelitales. Esto facilita proyectar su escalabilidad y estimar un crecimiento futuro, permitiendo considerar las mega constelaciones satelitales como una red de comunicación adecuada para la transferencia de datos a altas tasas.

El trabajo presentado por Silva en [5] a través de su tesis de magíster, destaca las ventajas y limitaciones de las megaconstelaciones LEO y cómo estas complementan a las tecnologías de comunicaciones actuales. El análisis comparativo de las mega constelaciones se realizó mediante el estudio de los enlaces de comunicación, evaluando los niveles de interferencia que estos sistemas pudiesen generar a constelaciones similares o a sistemas de comunicaciones terrestres. Por lo tanto, el estudio ofrece un análisis de la coexistencia de las constelaciones satelitales propuestas por las grandes compañías de comunicación y destacando las características que posee cada uno de los sistemas.

Así, se destaca de este estudio la metodología utilizada para obtener los distintos parámetros orbitales y técnicos de las mega constelaciones satelitales. Las simulaciones realizadas por C. Silva tuvieron como referencia los antecedentes entregados por FCC, aunque también se asumieron varias consideraciones para establecer los enlaces de comunicación.

1.2.2 Trabajos Específicos

A continuación, se hace énfasis en las principales publicaciones que se relacionan al trabajo de tesis de tesis desarrollado.

- ♣ del Portillo, Inigo; Cameron, Bruce G.; Crawley, Edward F. (2019). A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband. *Acta Astronautica*, 159(), 123–135. doi:10.1016/j.actaastro.2019.03.040. [3]

Este trabajo presenta una comparación de tres mega constelaciones satelitales en órbita LEO, proyectadas por distintas compañías para proporcionar acceso a internet. Específicamente, se describe el sistema satelital de SpaceX, compuesto por 4,425 satélites que operan en las bandas Ku y Ka; el

sistema de OneWeb, con 720 satélites en las bandas Ku y Ka; y la constelación de Telesat, con 117 satélites que operan solo en la banda Ka.

El objetivo de este estudio es presentar las constelaciones satelitales, de acuerdo con las características extraídas desde los documentos presentados por cada una de las compañías en la FCC a septiembre de 2018, destacando las similitudes y diferencias entre los tres sistemas.

Los antecedentes técnicos de las constelaciones satelitales, junto con una estimación de la demanda de datos requerida por la población, permiten al autor calcular el rendimiento total del sistema. Dicha estimación considera la variabilidad e incidencia generada por las condiciones atmosféricas.

Por lo tanto, este estudio aporta una metodología de trabajo en base a estimaciones generales de demanda y criterios de diseño utilizados para realizar simulaciones mediante el software STK. Por lo tanto, se considera una referencia válida para el desarrollo del presente trabajo.

- ♣ Nils Pachler; Inigo del Portillo; Edward F. Crawley; Bruce G. Cameron; (2021). An Updated Comparison of Four Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband. 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), (), -. doi:10.1109/iccworkshops50388.2021.9473799. [4]

Este artículo ofrece una versión actualizada en relación con el trabajo presentado en [3], en la cual se comparan cuatro mega constelaciones satelitales NGSO en órbita LEO que corresponden a SpaceX, Telesat, OneWeb y Kuiper (Amazon), en términos de estimación de rendimiento para dar servicio a los usuarios.

Para el presente estudio se utilizaron los datos presentados por cada una de las compañías satelitales a través de sus solicitudes a la FCC, hasta enero del 2021.

La metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo es la misma utilizada en el estudio predecesor del análisis de tres constelaciones satelitales, evaluando la estimación global del rendimiento y la capacidad de los satélites.

Del trabajo se concluyó que Telesat y SpaceX poseen un rendimiento similar, mientras que OneWeb tiene el segundo lugar en tasas de rendimiento, a pesar de utilizar una menor cantidad de satélites. Amazon, por su parte, logra el mayor rendimiento, con aproximadamente 53,4 Tbps.

- ♣ Flink, E. (2020). A simple fragmentation protocol for satellite telemetry: Transmission of large telemetry from the MIST satellite (Dissertation). Retrieved from <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-279417>. [6]

Este trabajo se enmarca en torno al proyecto MIniature STudent satellite (MIST), del KTH

Royal Institute of Technology de Estocolmo, que construyó un satélite con el objetivo de orbitar alrededor de la Tierra. Una de las limitaciones del MIST es la necesidad de enviar unidades de datos mayores de las soportadas por la radio a bordo. Por lo tanto, es requerido fragmentar los datos antes de enviarlos y desfragmentarlos cuando sean recibidos, que corresponde a la solución propuesta en el presente estudio.

El diseño del protocolo de comunicación propuesto se basa en protocolos existentes, y no se limita su implementación únicamente al MIST, por lo que puede ser utilizado en otros satélites o aplicaciones de sistemas integrados, considerando las adecuaciones pertinentes.

El satélite MIST es controlado por un ordenador a bordo (OBC – OnBoard Computer), el cual recopila datos a través del satélite y los envía a una estación terrestre situada en el Campus KTH de Estocolmo. Es precisamente en el OBC dónde se implementa la etapa de fragmentación de datos, así como en el software de la estación terrena.

El presente trabajo sólo realizó una implementación básica en el software del satélite y su estación terrena, permitiendo una implementación general de la solución, pero sin abordar la implementación y validación real de la fragmentación de los datos.

La relevancia de este estudio para el desarrollo de la presente tesis radica en conocer la factibilidad de los procesos de fragmentación de datos al momento de establecer enlaces de comunicación en mega constelaciones satelitales.

1.2.3 Discusión

En los antecedentes revisados se muestra gran cantidad de investigaciones que exponen las comunicaciones satelitales en órbita baja como una tecnología prominente que solucionará las limitaciones existentes de las redes de comunicaciones basadas en medios guiados y no guiados. Además, se presentan los beneficios de estas arquitecturas frente a las constelaciones satelitales existentes en órbitas mayores, tal como se señala en [7] donde se listan las ventajas y desventajas de las redes LEO desde el punto de vista del despliegue de la compañía Telesat y cómo estas han permitido generar modelos de negocios para distintos mercados que requieren altas tasas de datos y bajas latencias en sus desarrollos.

Entre las desventajas principales o aspectos que afectan a las redes de comunicación en órbita baja, se encuentra factores como el terreno, las tormentas solares, la lluvia, las nubes y la temperatura, al igual que el consumo de energía de los equipos en órbita y las estaciones terrestres. Esto se destaca en [8], donde se presentan los resultados de mediciones y observaciones sobre las características de

la red de extremo a extremo para la constelación Starlink. En dicho estudio, se observan grandes brechas en la dinámica del rendimiento y la latencia comparadas con las redes terrestres, e incluso interrupciones frecuentes debido a los continuos saltos que deben realizar las estaciones terrestres para enlazarse a diferentes satélites mientras estos se encuentran en órbita.

El análisis de trabajos previos refleja que, hasta la fecha, existen estudios limitados sobre la cobertura y las tasas de transmisión en los enlaces de comunicación entre la Antártida y el extremo sur de Chile a través de constelaciones LEO con órbita polar. Esto puede estar relacionado con la falta de necesidad percibida para considerar estos estudios.

De manera similar, considerando que las compañías satelitales, al igual que otras compañías de telecomunicaciones, se centran en entregar un servicio eficiente a los usuarios, su enfoque principal es la tasa de transferencia en sentido descendente. Por esta razón, una gran cantidad de publicaciones están relacionadas con dicha área, siendo pocas las dedicadas al desarrollo de tecnologías y métodos para optimizar la tasa de transferencia de datos en sentido ascendente, como es lo propuesto en el trabajo de esta tesis.

Es así como el presente estudio intenta cubrir esta brecha, con el objetivo de verificar si los satélites de una red LEO en órbita polar logran satisfacer las necesidades de ancho de banda y tasas de transferencia requeridas por los radiotelescopios proyectados en estos sitios remotos.

1.3. Hipótesis de Trabajo

Las comunicaciones satelitales en órbita baja propuestas por las mega constelaciones satelitales representan un sistema adecuado para la transferencia de datos captados por observatorios astronómicos ubicados en zonas polares, en términos de costo ponderado de implementación. Estas comunicaciones son capaces de manejar las altas tasas de transmisión requeridas por el South Pole Telescope y futuros telescopios proyectados en la Antártica, beneficiando al EHT.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo el análisis y comparación del rendimiento en términos de tasas de transferencia de información, ancho de banda disponible y costo de implementación ponderado de las estaciones terrenas de las mega constelaciones satelitales, para su aplicación y utilización en zonas polares.

Se propone una metodología que permita estimar la capacidad de transferencia de datos de una estación terrena, en base a la disponibilidad del servicio satelital, la demanda de las tasas de datos a transmitir, los parámetros de comunicación establecidos y la variabilidad producto de las pérdidas atmosféricas que pudiesen generarse.

1.4.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos asociados al desarrollo de la presente tesis de magister se describen a continuación:

- Evaluar el presupuesto de enlace de forma detallada, que considere el caso más desfavorable para la estabilización de un enlace de comunicación satelital en órbita baja para las bandas de frecuencia en que operen las mega constelaciones satelitales.
- Simular las constelaciones satelitales en base los datos inscritos en la FCC por parte de estas compañías.
- Implementación de metodología para estimar la capacidad de transferencia de datos de una estación terrena, en base a la disponibilidad del servicio satelital, la demanda de las tasas de datos a transmitir, los parámetros de comunicación establecidos y la variabilidad producto de las pérdidas atmosféricas.
- Optimización del sistema de comunicaciones para minimizar la cantidad total de estaciones requeridas para soportar el rendimiento del sistema estimado por el EHT.
- Análisis teórico que permita validar la segmentación de datos a través de enlaces de comunicación satelitales.
- Estimación del costo de implementación de las constelaciones satelitales para la validación de su implementación en el Polo sur.

1.5. Alcances y Limitaciones

El trabajo desarrollado en la presente tesis de magister se limitará al análisis y comparación de 6 constelaciones satelitales, de órbita baja y polar, en distintas bandas espectrales, las cuales corresponden a:

- Space Exploration Holding LLC (SpaceX)
- Telesat Canada (Telesat LightSpeed)
- WouldVu Satellite Limited (OneWeb)

- Amazon (Kuiper Project)
- Iridium (Iridium NEXT)
- Kepler Communications (Kepler)

La distancia entre constelaciones satelitales, los parámetros orbitales, los parámetros de comunicación, entre otros, se definirán de acuerdo con lo establecido en FCC (Federal Communications Commission).

Como exclusión se tiene que este trabajo no considerará análisis de colisiones entre satélites pertenecientes a distinta constelación satelital, sino que se enfocará sólo en la simulación de cada una de estas de forma independiente, con la proyección de una estación terrena en el Polo Sur.

1.6. Temario

El presente informe se estructura de la siguiente forma: en el capítulo 2 se presenta el marco teórico, abordando temas como la arquitectura de las constelaciones satelitales y el concepto de planos orbitales, aspectos fundamentales para comprender cómo se encuentran conformadas las constelaciones satelitales analizadas en este estudio.

En el capítulo 3 se detalla la metodología implementada para la elaboración de la estructura de trabajo, definiendo los modelos utilizados en este proyecto, tales como el modelo atmosférico, el presupuesto de enlace, la demanda de datos requerida a ser transmitida y la ponderación de costo de implementación de las estaciones terrenas.

El capítulo 4 presenta los resultados de la simulación de las constelaciones satelitales, incluyendo el análisis de las tasas de transferencia y tiempos de disponibilidad del servicio para lograr la cobertura requerida. Estos resultados serán discutidos para comparar las ventajas y desventajas de una constelación frente a sus pares, identificando así la más adecuada en términos de cobertura para la aplicación deseada.

Finalmente, el capítulo 5 presenta las conclusiones y el trabajo futuro, destacando las oportunidades de proyectos en los cuales se podría participar.

Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentan algunas definiciones o descripción de conceptos requeridos para la comprensión del presente informe de tesis.

2.1. Planos Orbitales

Corresponde a un plano geométrico en el cual se encuentra inserto la órbita de un satélite o conjunto de estos. Los planos orbitales pueden clasificarse según su inclinación como se describe a continuación:

- Órbita Geosíncrona (GSO): Órbita que tiene el mismo periodo orbital que el periodo de rotación de la Tierra.
- Órbita inclinada: Órbita cuya inclinación con respecto al plano ecuatorial es mayor a 0° y menor a 90° .
- Órbita polar: Órbita que pasa por encima de los dos polos, o muy cercana a estos. Por lo tanto, tiene una inclinación de $\pm 90^\circ$.
- Órbita Polar Sincronizada con el Sol (SSO): Órbita casi polar que pasa por el ecuador a la misma hora solar local en cada pasada.

Sin embargo, a pesar de que su nombre lo indica, en la práctica la trayectoria de los satélites en órbitas polares no tiene por qué cruzar exactamente los polos para que dicha órbita se denomine polar. Es más, una órbita que pasa a menos de 20° o 30° de los polos, puede ser calificada como órbita polar. De esta forma, durante el presente trabajo se considerarán dentro de la simulación y análisis los satélites que orbiten entre $\pm 90^\circ$ y $\pm 70^\circ$.

Los satélites casi en órbita polar comúnmente eligen una órbita sincrónica al sol, lo que significa que cada paso orbital sucesivo ocurre a la misma hora del día.

Así, para mantener una órbita sincronizada con el Sol a medida que la Tierra gira su alrededor, la órbita debe girar alrededor de la Tierra a la misma velocidad, lo que no es posible si el satélite pasa directamente sobre el polo, debido a la forma no esférica de la Tierra.

Los parámetros orbitales de las constelaciones satelitales tales como el período de revolución del satélite, la excentricidad, la inclinación de la órbita, entre otros, determinan la calidad de la información transmitida y la tasa de transferencia de los mismos datos.

2.2. Configuración de Constelaciones Satelitales

A continuación, se describen las mega constelaciones satelitales que se encuentran bajo estudio por el presente informe de tesis, destacando su arquitectura, evolución en el tiempo, tipo de órbita, banda espectral de operación y el servicio para el cual fueron diseñados. Estas características y atributos permitirán comparar cada una de las compañías satelitales y sus parámetros de comunicación para proporcionar conectividad a los usuarios.

2.2.1 Proyecto Kuiper (Amazon)

El proyecto Kuiper (Kuiper Systems LLC) es un proyecto de la compañía Amazon.com Services, Inc. [9], que consiste en el diseño, construcción y puesta en servicio de una constelación de satélites que operan en las bandas Ku y V, a través de satélites no geoestacionarios (NGSO). El objetivo es proporcionar un sistema de servicio fijo por satélite (FSS) que ofrezca internet de banda ancha de alta velocidad y baja latencia a clientes en todo el mundo.

El Sistema Kuiper está diseñado para soportar una alta eficiencia del espectro, reutilización de frecuencias y uso compartido del espectro con otros operadores de satélites, a través de la utilización de pequeños haces puntuales y capacidades avanzadas para evitar interferencias.

La TABLA 2-1 presenta la distribución de las órbitas que conforman la red satelital del Proyecto Kuiper, la cual se encuentra segregada para distintas alturas, número de planos orbitales, satélites por plano orbital y banda espectral de operación. En general, el Proyecto Kuiper consta de 7.774 satélites en cinco combinaciones de altitud e inclinación entre 590 y 650 km, incluidas dos capas de órbita polar sincronizada con el Sol. Específicamente, el sistema Kuiper constará de 7.774 satélites que operarán en tres capas orbitales a 590 km, 610 km y 630 km; y (2) dos capas polares de satélites que operan en combinaciones de altitud e inclinación de 640 km y 72°, y 650 km y 80°.

TABLA 2-1: Diseño de Constelación Kuiper.

Altura [km]	Inclinación	Planos	Número de satélites por plano	Número de satélites	Banda de Frecuencia de Operación
650	80°	325	2	650	Banda V Banda Ku
640	72°	652	1	652	Banda V Banda Ku
630	51,9°	34	34	1156	Banda V
610	42°	36	36	1296	Banda V
590	33°	28	28	784	Banda V
630	51,9°	34	34	1156	Banda V Banda Ku
610	42°	36	36	1296	Banda V Banda Ku
590	33°	28	28	784	Banda V Banda Ku

Todos los enlaces del sistema Kuiper utilizarán polarización dual a través de métodos de polarización circular a la izquierda y derecha (LHCP y RHCP). Además, la TABLA 2-2 presenta la utilización de cada una de las bandas espectrales solicitadas por Kuiper para el funcionamiento de su constelación.

TABLA 2-2 Uso espectral de Constelación Kuiper.

Rango de Frecuencia [GHz]	Banda de Frecuencia	Aplicación
37,5 – 42,0	Banda V	Satélite a Gateway
42,0 – 42,5		
47,2 – 50,2	Banda V	Gateway a Satélite
50,4 – 51,4		
10,7 – 12,7	Banda Ku Banda V	Satélite a Terminal de usuario
37,5 – 42,0		
42,0 – 42,5		
12,75 – 13,25	Banda Ku Banda V	Terminal de usuario a Satélite
14,0 – 14,5		
47,2 – 50,2		
50,4 – 51,4		
40,0 – 40,1	Banda V	Enlace de bajada TT&C
47,2 – 47,3	Banda V	Enlace de subida TT&C

Los satélites Kuiper utilizan antenas avanzadas en fase con múltiples haces de usuario. La tecnología de antena y la funcionalidad de control definida por software permiten una asignación flexible de frecuencia y capacidad según las necesidades de los clientes dentro de una región determinada.

Las antenas en fase de cada satélite Kuiper son capaces de servir hasta $48,2^\circ$ desde el nadir, tal como se ilustra en la Figura 2-1. Este rango angular corresponde a un área de cobertura de 1.560.000 km² debajo de cada satélite en el caparazón de 630 km.

El ángulo de visualización desde el nadir variará a medida que nos acerquemos o alejemos de la superficie de la tierra. Así, el ángulo de elevación mínimos por parte del usuario o estación terrena debe ser de aproximadamente 35° , $35,2^\circ$, $35,4^\circ$, $35,5^\circ$ y $35,6^\circ$ para comunicaciones con satélites Kuiper en las capas de 590 km, 610 km, 630 km, 640 km y 650 km, respectivamente.

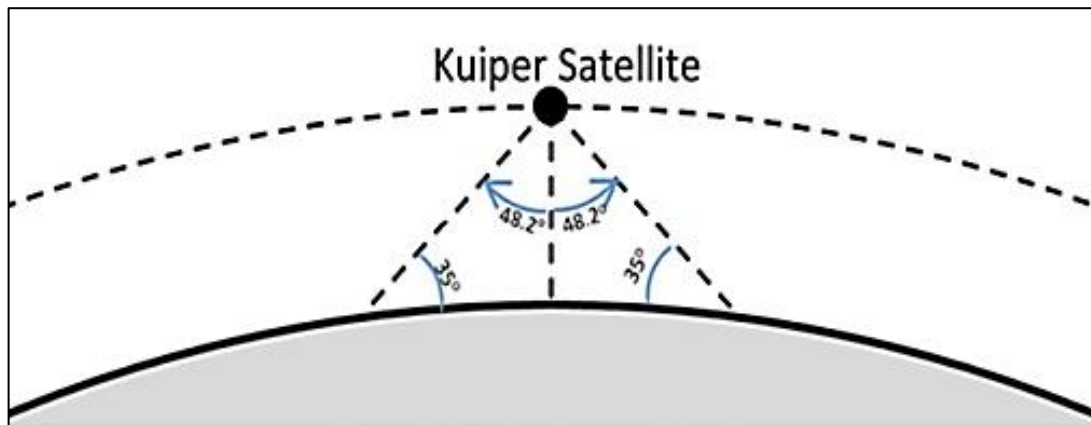


Figura 2-1 Cobertura de los haces de satélite Kuiper a 590 km de altura.

Los enlaces descendentes utilizan arreglos de antenas en fase en el satélite, con haces orientables hacia los terminales de los clientes que soportan antenas parabólicas o de igual forma, antenas de arreglos en fase.

Del mismo modo, se tiene que el espectro de enlace descendente del usuario se divide en canales de 100 MHz, los cuales se pueden agrupar para formar canales más amplios y así llegar a anchos de banda de 200 a 500 MHz. La arquitectura de carga útil admite la subdivisión de segmentos de banda dentro de un haz en unidades de frecuencia más pequeñas (FDMA) independientes entre ellas.

Para el caso de enlaces ascendentes, la banda se divide en canales de 50 MHz que, de manera similar a los canales de enlace descendente, se pueden agregar en segmentos de banda más anchos, llegando hasta 200 MHz.

El acceso a los canales ascendentes por parte de un usuario se comparte entre múltiples

terminales de enlace ascendente utilizando una combinación de FDMA (asignación de frecuencia), TDMA (porciones de tiempo asignadas por el satélite por usuario) y potencialmente CDMA (asignación por código) o TDMA para solicitudes de canales de acceso aleatorio.

Los enlaces se conforman a través de un conjunto de antenas de estación terrestre y antenas de parche (Patch Array Antennas) colocadas en diferentes superficies del satélite para permitir la conectividad incluso cuando el satélite no está alineado con el nadir.

Como complemento se añade que la constelación de Kuiper cumple con la coordinación de las operaciones para limitar el riesgo de colisión, minimizar los impactos operativos y ayudar a garantizar seguridad espacial. El sistema Kuiper funcionará con tolerancias de control a largo plazo para apogeo y perigeo de 9 km y 0,1 grados tanto para la inclinación como para la ascensión recta del nodo ascendente (RAAN).

2.2.2 Kepler Communications

Kepler Communications Inc. (Kepler) [10][11][12], corresponde a una compañía fundada en 2015 que opera una constelación satelital en órbita LEO para proporcionar un sistema de servicio fijo por satélite (FSS) en órbita no geoestacionaria (NGSO) destinado a prestar servicios de banda ancha de baja latencia por encima de los 55° de latitud norte.

La constelación completa se proyecta que esté conformada por 360 satélites en 12 planos orbitales a una altitud de 600 ± 50 km, que entreguen cobertura en las frecuencias de las bandas Ku y Ka.

Kepler busca proporcionar a través de una infraestructura de bajo coste, conformada por un sistema de radio definida por software (SDR) y de antenas orientables electrónicamente, una constelación de satélite de cobertura global. Mediante el uso de enlaces inter-satelitales, permitirán a otros operadores de redes NGSO comunicarse entre sí y con tierra en tiempo real.

Esta implementación permitirá que las diferentes constelaciones satelitales puedan solicitar, liberar ancho de banda de forma dinámica y reutilizar frecuencias al hacer uso de la constelación satelital de Kepler, abriendo nuevas oportunidades de negocio.

La siguiente tabla resume las características principales de la constelación Kepler.

TABLA 2-3 Diseño de Constelación Kepler.

Altura	Inclinación	Número de Planos	Separación LTAN	Satélites por plano	Separación en el plano	Número de Satélites
600 ± 50 km	89,5°	12	15°	30	12°	360

La Figura 2-2 representa la cobertura de la constelación Kepler. Sin embargo, estas áreas de cobertura sólo corresponden a la anchura total de la cobertura orientable, no así al área real de cobertura definida por cada beam sobre la Tierra.

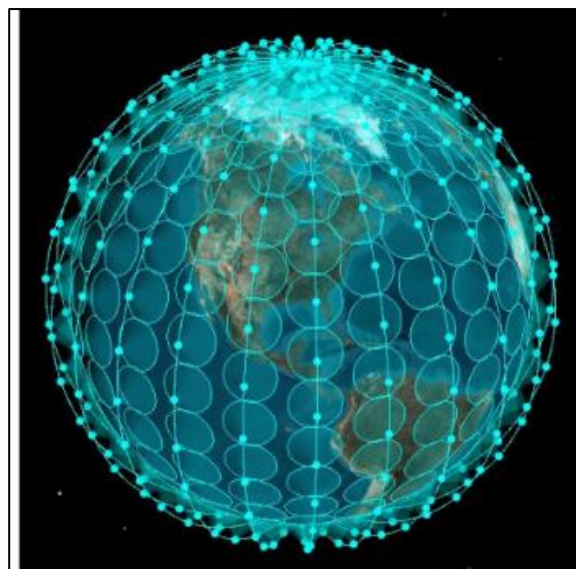


Figura 2-2 Representación cobertura global Constelación Kepler.

El sistema Kepler utiliza la banda Ku para los enlaces de radiofrecuencia entre los satélites y los terminales de usuario terrestres, así como entre los satélites y los gateways.

Los enlaces de radiofrecuencia en banda Ka se utilizan para las comunicaciones entre satélites dentro de la red y con los terminales de usuarios espaciales a bordo de otras NGSO.

Como se puede observar en la Figura 2-3 cada satélite Kepler tendrá un cono de cobertura total no superior a 64° , lo que implica un ángulo de elevación mínimo para los terminales de usuario de $10,4^\circ$.

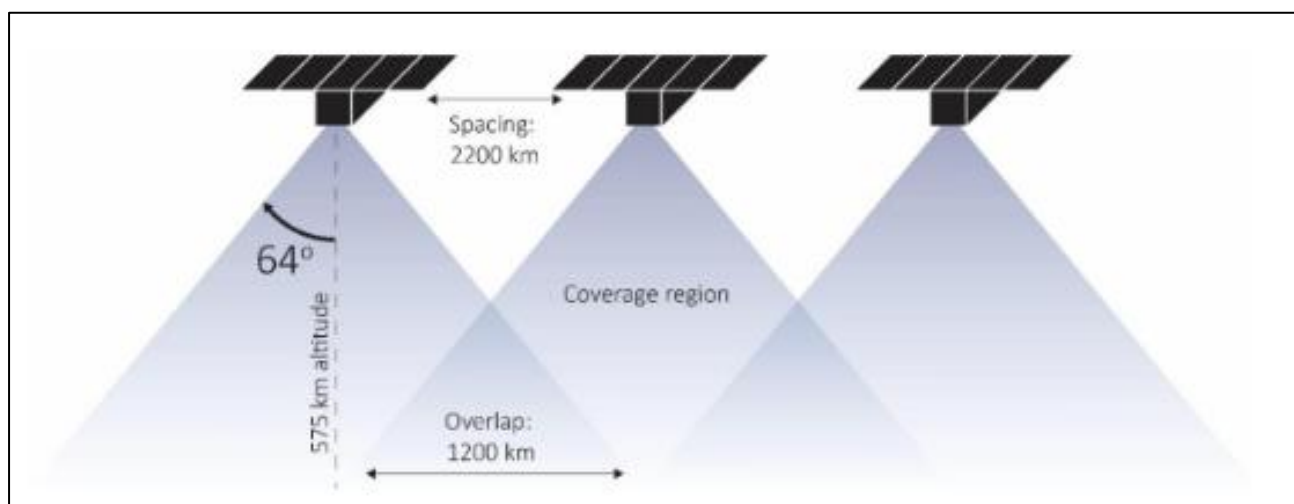


Figura 2-3 Cono de cobertura de satélites Kepler.

En la dirección descendente entre los satélites y los terminales de usuario, un único canal ocupará un máximo de 15 MHz. Mediante el uso del SDR, se puede asignar un único canal de 15 MHz, o N canales cada uno con un ancho de banda de $15/N$ MHz, como se ilustra en la Figura 2-4. En la práctica, el ancho de banda mínimo del canal es de 1 kHz, lo que implica hasta 15.000 canales.

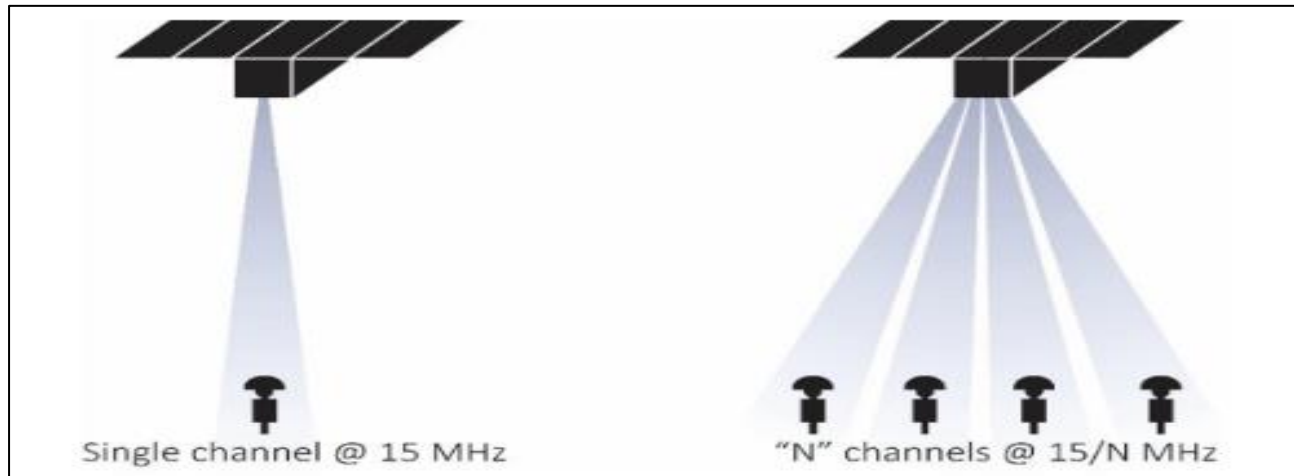


Figura 2-4 Separación de canales en enlace descendente para la Constelación Kepler.

En sentido ascendente entre los terminales de usuario y los satélites, un solo canal ocupará hasta 50 MHz de ancho de banda. El SDR está diseñado trabajar con un ancho de banda de hasta 200 MHz, lo que implica trabajar con 4 canales de 50 MHz o 200.000 canales de 1 kHz. Esta situación se presenta en la Figura 2-5.

El mayor ancho de banda disponible contrasta con lo expresado en el sentido descendente, puesto que se está limitado por la potencia disponible y/o la ganancia de la antena en el satélite, que son parámetros difíciles de modificar.

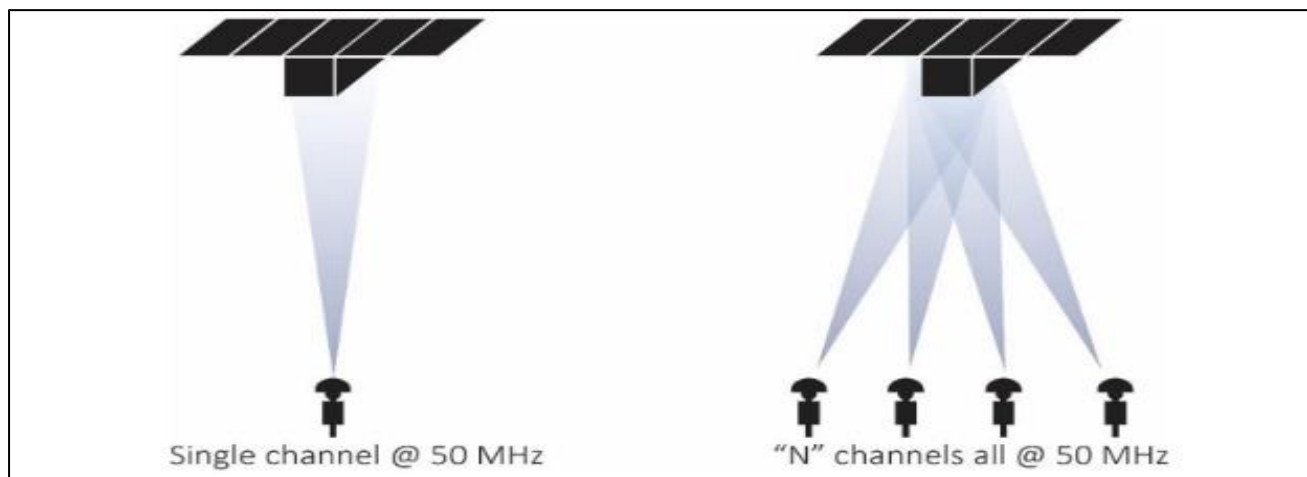


Figura 2-5 Separación de canales en enlace ascendente para la Constelación Kepler.

Aunque los anchos de banda indicados anteriormente son representativos de los casos típicos de usuario previstos en el mercado, el sistema Kepler es capaz de escalar el ancho de banda dinámicamente gracias a su SDR. A modo de ejemplo, si un cliente concreto necesitara más de 200 MHz en la dirección espacio-tierra, podría conseguirlo de varias maneras: la más sencilla sería una antena más grande en el terminal de usuario. Por lo tanto, debe quedar claro que el sistema Kepler es capaz de utilizar todo el espectro de 10,7 a 12,7 GHz y de 14,0 a 14,5 GHz. y no se limita a los ejemplos anteriores. El sistema Kepler es capaz de la reutilización completa de frecuencias mediante el uso de polarización ortogonal y haces espacialmente independientes.

La Figura 2-6 muestra una representación general de cómo se encuentra conformada la infraestructura de comunicaciones del sistema Kepler y su metodología para proveer del servicio de internet a los usuarios.

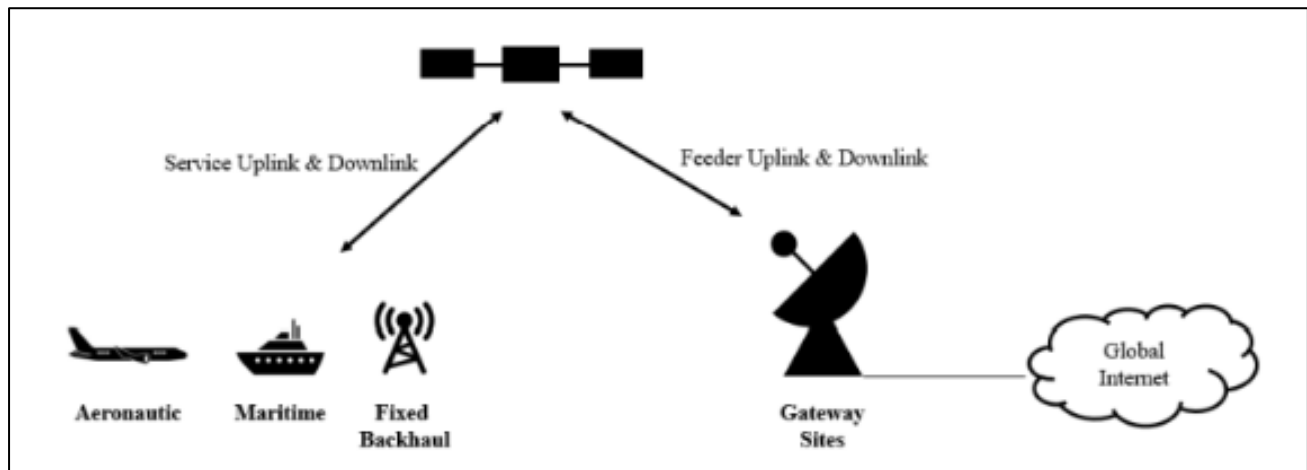


Figura 2-6 Arquitectura del sistema Kepler.

Los satélites están equipados con un sistema de antenas phased array en banda Ka en las direcciones de ascendente y descendente. La frecuencia central del haz, el ancho de banda del canal y la polarización son seleccionables, lo que proporciona una flexibilidad sustancial tanto a las operaciones técnicas como a la mitigación de interferencias. Los haces de servicio pueden orientarse en todo el footprint del satélite para dar cobertura a usuarios situados en distintos lugares. El ángulo máximo de orientación de los haces de enlace de servicio es de 45° para minimizar las emisiones de lóbulos laterales y mantener las pérdidas de barrido en un grado aceptable.

Con esto, la Figura 2-7 ilustra que para un ángulo de giro máximo de 45° fuera del campo visual, el área de cobertura por satélite es de 1.300 km de diámetro (aproximadamente 1.330.000 km²) cuando se encuentra a la altitud operativa máxima de 650 km.

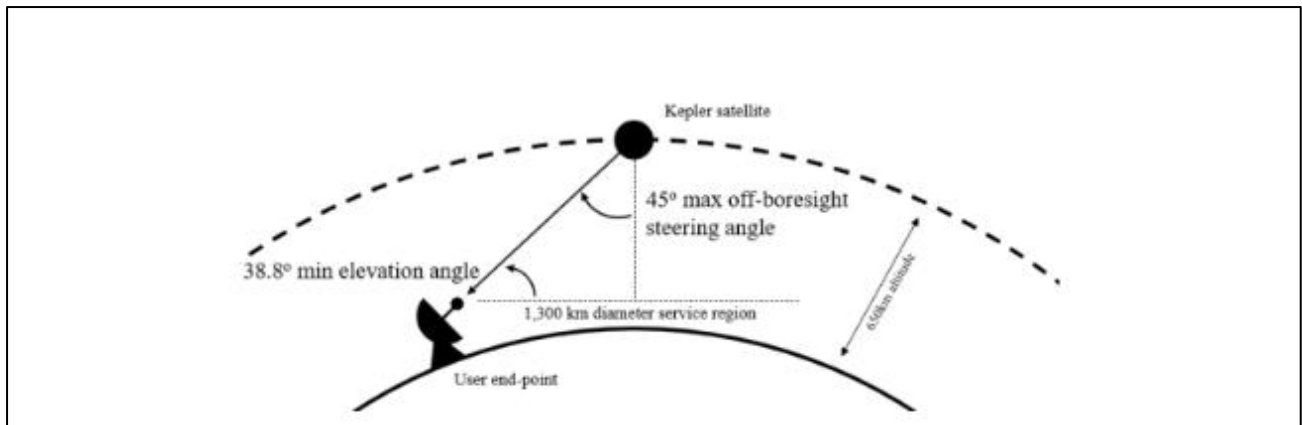


Figura 2-7 Mínimo ángulo de elevación para enlaces de servicio.

Los satélites pueden soportar hasta 2 haces de alimentación en banda Ku espacialmente independientes en las direcciones de enlace ascendente y descendente. Los haces de alimentación funcionan de forma similar a sus homólogos de enlace de servicio, con dos distinciones principales. La primera es que el ángulo de giro máximo (y, por tanto, el campo de visión del haz) se amplía a $63,4^\circ$ para lograr una mayor cobertura terrestre. La segunda es que, cuando se encuentre dentro de la región de servicio, al menos un haz alimentador estará siempre conectado a una estación terrestre conectada a Internet, Figura 2-8. El haz alimentador restante intentará establecer una conexión con la siguiente estación terrestre óptima antes de que el satélite pierda de vista la primera estación terrestre (conexión "make-before-break"). Se realizará un traspaso sin interrupciones cuando se establezcan ambas conexiones de pasarela.

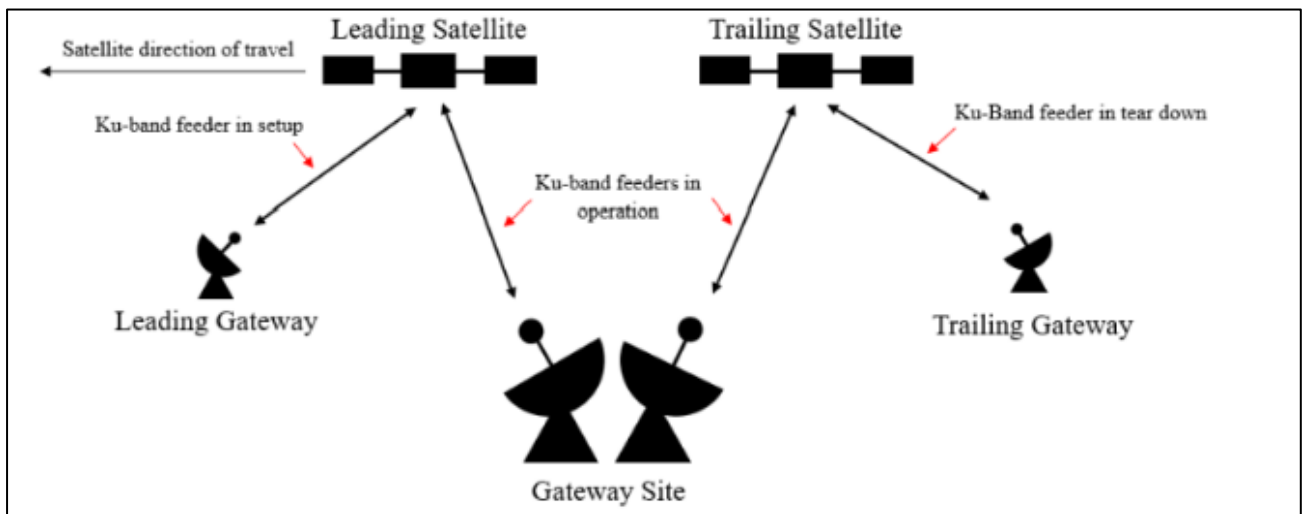


Figura 2-8 Configuración de transferencia de comunicación en gateway.

Utilizando un ángulo de giro máximo de $63,4^\circ$ fuera del campo visual, el área de cobertura por satélite para los enlaces de alimentación es de 2.590 km de diámetro (aproximadamente 5.270.000 km²), y el ángulo de elevación por parte de los usuarios y estaciones terrenas es de 10° . Una representación de esta disposición se observa en la Figura 2-9.

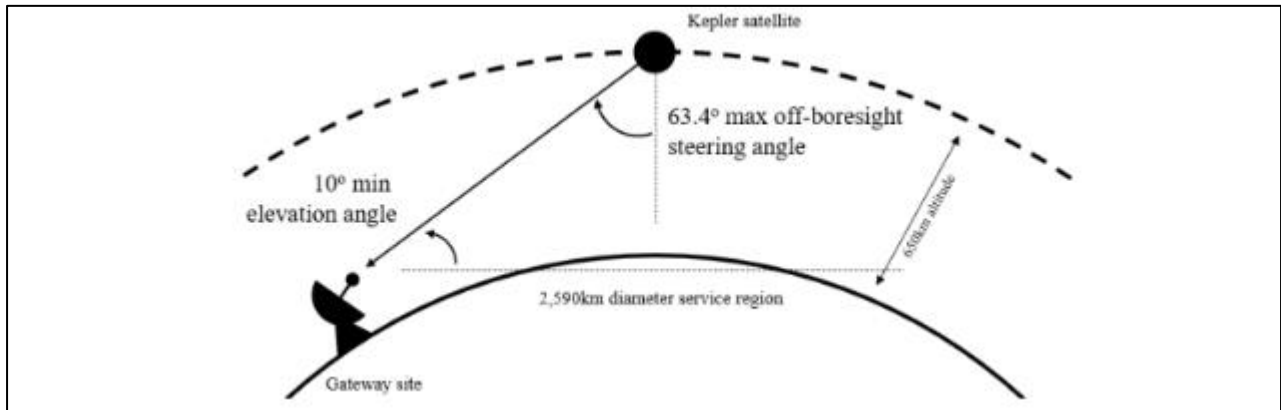


Figura 2-9 Mínimo ángulo de elevación para enlaces de alimentación.

Las pasarelas proporcionarán conectividad entre el satélite y la Internet global. Normalmente, en cada pasarela se ubicarán dos o más estaciones terrenas, una antena principal y otra secundaria, para mantener una conectividad continua con la constelación.

2.2.3 STARLINK (SpaceX)

Space Exploration Holdings, LLC (SpaceX) [13][14][15] corresponde a una compañía cuyo objetivo es construir, desplegar y operar un sistema de satélites en órbita no geoestacionaria (NGSO).

En 2017 se propuso la constelación Starlink, la cual se proyectó inicialmente de 4.425 satélites (más repuestos en órbita) en 83 planos orbitales para la prestación del servicio fijo por satélite (FSS) en el espectro de las bandas Ku y Ka, los cuales se distribuirían en alturas entre los 1.110 a 1.325 kilómetros. Sin embargo, en 2018 se solicitó modificar esta constelación a través de la reducción de 16 satélites, es decir, pasar de 4.425 a 4.409 equipos, además de mover 1.584 satélites a una altura de 550 [km].

Por lo tanto, esta temprana modificación implicaría específicamente mover los satélites localizados en 1.150 [km] y por lo tanto pasar de 32 planos orbitales con 50 satélites cada uno a una configuración de 72 planos orbitales con 22 satélites cada una, pasando de 1.600 satélites a 1.584 satélites. La TABLA 2-4 muestra la configuración inicial de la constelación Starlink en su órbita LEO.

TABLA 2-4 Constelación Satelital Inicial SpaceX (LEO).

Parámetros	Definición de constelación según altura				
Altura [km]	1.110	1.130	1.150	1.275	1.325
Planos Orbitales	32	8	72	5	6
Satélites por plano orbital	50	50	22	75	75
Inclinación	53,8°	74°	53°	81°	70°

Con esta reubicación, SpaceX puede lograr un mejor rendimiento en sus comunicaciones, además de implementar nuevos métodos para la mitigación de desechos orbitales sin aumentar la interferencia a ningún sistema. Además, reespaciar esos satélites permite una cobertura y capacidad más uniforme.

En 2020, SpaceX propuso reubicar la totalidad de sus satélites hasta altitudes que oscilan entre 540 km y 570 km, lo que resultaría en una constelación de 4.408 satélites, tal como se observa en la TABLA 2-5

TABLA 2-5 Constelación Satelital Actual SpaceX (LEO).

Parámetros	Definición de constelación según altura				
Altura [km]	540	570	550	560	560
Planos Orbitales	72	36	72	6	4
Satélites por plano orbital	22	20	22	58	43
Inclinación	53,2°	70°	53°	97,6°	97,6°

En 2020, SpaceX presentó una solicitud de autorización para desplegar y operar su sistema de Segunda Generación, el cual consiste en una ampliación del servicio fijo por satélite (FSS) existente, con la diferencia que ahora se proyecta utilice las frecuencias en banda Ku, banda Ka y banda E, con el fin de complementar la constelación de primera generación que SpaceX ya operativa.

Esta modificación fue proyectada para estar conformada por 7.518 satélites, cada uno de los cuales ocupará planos orbitales en una órbita terrestre muy baja (VLEO- Very Low Earth Orbit), cercana a los 300 km de altura.

Con esto se espera que SpaceX tenga mayor capacidad de reutilización el espectro, lo que permitiría a la constelación VLEO ofrecer más ancho de banda a los clientes, más opciones de diversidad de satélites o una combinación de ambos. Sin embargo, el factor de reutilización de frecuencia para esta segunda generación del sistema satelital aún no se encuentra definido.

El análisis de los satélites VLEO se excluyen del presente estudio debido a la falta de información técnica asociada, además de que la compañía SpaceX no ha decidido implementar ninguna de estas con certeza.

En relación con el ángulo de cobertura proporcionado por cada satélite de la constelación LEO, se señala que este parámetro variará en relación con la altura en que se encuentre el satélite respectivo que entregue cobertura a dicha área, tal como se puede observar en la Figura 2-10.

Los haces puntuales de enlace descendente de cada satélite SpaceX se pueden dirigir de forma independiente sobre todo el campo de visión de la Tierra. Sin embargo, las estaciones terrenas se comunican sólo con satélites por encima de un ángulo de elevación mínimo. En las primeras etapas del despliegue de la constelación, este ángulo puede ser tan bajo como 25°, pero se irá ajustando a 40° a medida que más satélites vayan poblando la constelación.

De esta forma, como se observa en Figura 2-10, cada satélite que opere a una altitud de 550 km proporcionará servicio sólo hasta $56,55^\circ$ de distancia desde el nadir, cuando la red de comunicaciones Starlink se ponga en marcha, para posteriormente ajustarse a una cobertura de $44,85^\circ$ cuando la constelación satelital se encuentre completamente conformada.

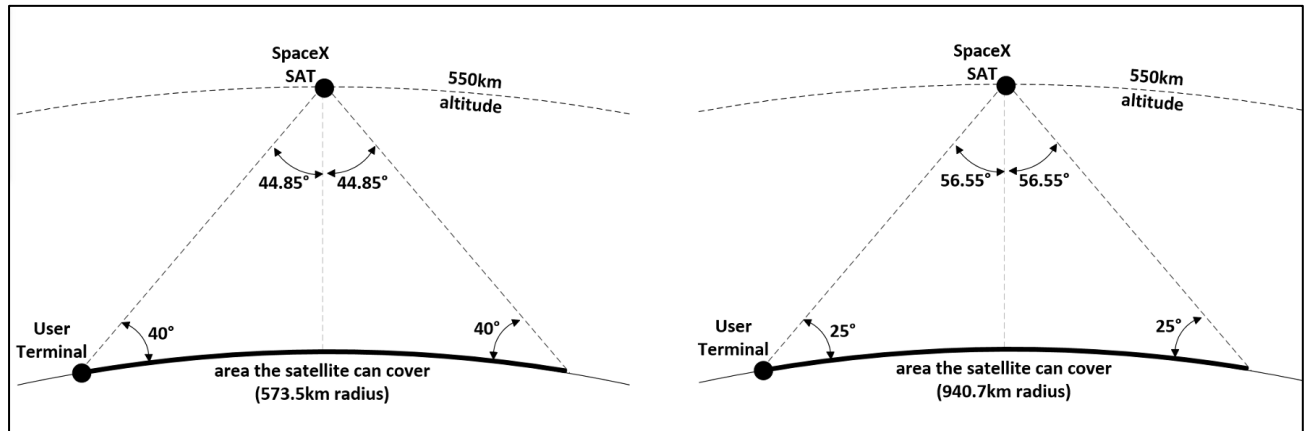


Figura 2-10 Mínimo ángulo de elevación para enlaces de alimentación (Starlink).

En relación con el ancho de banda de cada canal, Starlink no cuenta con documentación oficial donde se establezca dicha cantidad debido a que se encuentra en constantes optimizaciones de su sistema de comunicación para entregar un mejor rendimiento a los usuarios. Sin embargo, de acuerdo con lo indicado en los trabajos de Del Portillo y Pachler, [3] y [4] respectivamente, la constelación Starlink contará con ocho canales de subida de 250 MHz y 4 canales en el enlace descendente de 125 MHz, cada uno.

2.2.4 Telesat Lightspeed (TELESAT)

Telesat, corresponde a una compañía canadiense destinada a las comunicaciones satelitales, que desde el 2016 ha enfocado sus esfuerzos en la conformación de una mega constelación satelital denominada Telesat Lightspeed [16][17][18].

El propósito de esta constelación corresponde a proveer conectividad de internet a nivel global, partiendo en Canadá, luego en Estados Unidos, para con el tiempo expandirse a distintos países del globo, de acuerdo con la demanda y estabilidad de la red.

La compañía propone ofrecer internet de alta velocidad, con la capacidad de transportar varios Terabits por segundo (Tbps), mediante una arquitectura resiliente y que asegure la transmisión de los datos.

Inicialmente, dicha constelación consistiría en un conjunto de 117 satélites NGSO interconectados entre ellos, los cuales proveerían comunicación a través del desplazamiento de los satélites en orbitas polares y orbitas inclinadas.

La operación de los satélites fue planificada originalmente en las bandas de espectrales de frecuencia Ka/Ku y en orbitas orbitales bajas (LEO), específicamente orbitando a alturas de 1000 km y 1248 km de altura para las orbitas polares e inclinadas, respectivamente. A continuación, se presenta una tabla que resume las principales características de la primera versión de la constelación satelital Telesat Lightspeed.

TABLA 2-6 Configuración Original Constelación Telesat Lightspeed.

Atributo	Órbita Inclinada	Órbita Polar
Tipo de orbita	LEO	LEO
Cobertura	Parcial	Global
Cantidad de planos orbitales	5	6
Satélites por plano	9	12
Cantidad de satélites	45	72
Altura orbital	1248 km	1000 km
Inclinación de los planos	37,4°	99,5°

Por otro lado, debido a que el foco de esta constelación satelital es proporcionar conectividad a internet, uno de los requisitos clave es la instantaneidad de las comunicaciones. En este sentido, la compañía Telesat se destaca por ser una de las precursoras en la implementación de ISL como método para conectar satélites y hacer más rápida la comunicación entre dos estaciones terrenas.

Los enlaces ópticos destinados para la comunicación intersatelital se proyectaron en longitudes de onda de 1060, 1065, 1070, 1075 y 1550 nm, emitidos por un láser como dispositivo emisor. Este láser cuenta con un lente principal de aproximadamente 10 cm de diámetro y potencias radiadas de 4.0, 4.0, 4.0, 4.0 y 8.0 W, respectivamente.

Los satélites que forman parte de Telesat Lightspeed están provistos de antenas de matriz activa, las cuales son capaces de proporcionar hasta 24 haces direccionables a usuarios, 4 haces a gateways terrestres y 4 haces para la comunicación entre satélites, los cuales pueden variar en número, tamaño, potencia y espectro utilizado, permitiendo una mejor utilización y optimización de los recursos espectrales.

El año 2017, la compañía Telesat solicitó ampliar su red satelital, a través de la adición de satélites en órbita LEO tanto para órbita polar como la órbita inclinada, lo cual trae mejoras directas en el rendimiento del sistema, sin embargo, implica realizar modificaciones en los parámetros orbitales definidos con anterioridad a la FCC.

Esta nueva solicitud consta de 2 fases o etapas, siendo la primera la adición de 181 satélites, lo que resulta en tener 298 satélites en órbita, mientras que la segunda fase corresponde a la suma de 1373 satélites, dando como resultado una cantidad de 1671 satélites finales que conformarán la constelación de Telesat Lightspeed.

A continuación, la TABLA 2-7 presenta una comparación de la evolución de la constelación satelital Telesat Lightspeed a medida que se fueron adicionando satélites.

TABLA 2-7 Configuración Constelación Telesat Lightspeed.

Parámetro		Constelación inicial	Fase 1	Fase 2
Sub-constelación polar	Órbitas polares	6	6	27
	Satélites por órbita	12	13	13
	Inclinación	99,5°	98,98°	98,98°
	Altura	1000 km	1015 km	1015 km
	Satélites totales	72	79	351
Sub-constelación Inclinada	Órbitas polares	5	20	40
	Satélites por órbita	9	11	33
	Inclinación	37,4°	55,88°	50,88°
	Altura	1248	1325	1325
	Satélites totales	45	220	1320
Satélites totales		117	298	1671

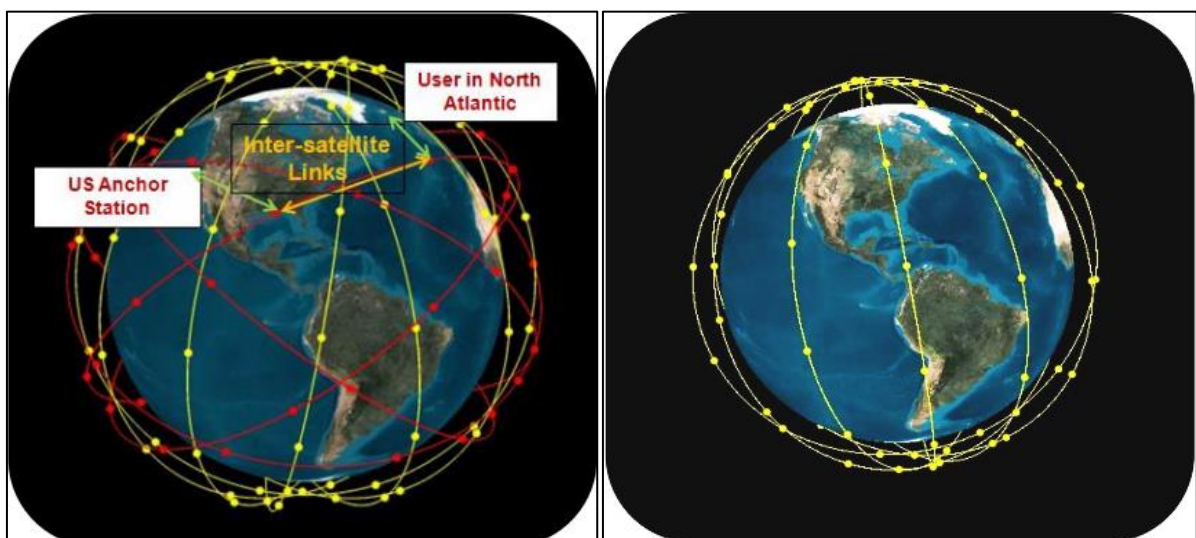
Por otro lado, la TABLA 2-8 presenta los rangos espectrales utilizados por la constelación satelital para los dos sentidos de la comunicación.

TABLA 2-8 Rango de frecuencias usada por la constelación Telesat.

Dirección	Límite de Frecuencia más bajo [GHz]	Límite de Frecuencia más alto [GHz]
Descendente	17,8	18,3
	18,3	18,6
	18,8	19,3
	19,7	20,2
	50,4	51,4
Ascendente	27,5	28,35
	28,35	28,6
	28,6	29,1
	29,5	30,0

El 2021, la compañía solicitó la petición de poder operar satélites NGSO en las bandas de 37,5-40,0 GHz, 40,0-42,0 GHz, 47,2-50,2 GHz y 50,4-51,4 GHz, las cuales se encuentran dentro de la banda espectral denominada banda V. En consecuencia, el 18 de julio del 2023 la compañía Telesat logró poner en órbita 3 satélites con carga útil para operar en banda Ka y V, pero no se especifica si se encuentran operando en órbita polar u órbita inclinada.

La Figura 2-11 muestra en (a) una representación gráfica de la convivencia que tendrán los satélites que forman parte de la constelación Telesat Lightspeed, mientras que en (b) se destaca la misma representación de los satélites que forman parte de la constelación en órbita polar.



(a) Constelación Telesat completa; (b) Constelación Telesat con órbitas polares.

Figura 2-11 Constelación Telesat Lightspeed.

Finalmente, la **TABLA 2-9** entrega la información técnica asociada a los enlaces ópticos entre satélites (OISL), la cual posee también el atributo de conectarse con Internet mediante gateways, los que tendrán acceso a todos los satélites de la Constelación en todo momento, ya sea directamente o a través de otros satélites a través de OISL.

TABLA 2-9 Parámetros OISL de Constelación Telesat.

PARÁMETRO	CANAL	
	COMUNICACIÓN	BALIZA DE SEÑALIZACIÓN
Longitud de onda	1526,61 nm / 1553,33 nm	976 nm $\pm$ 5 nm
Potencia promedio del láser	1,6 W	0,3 W nominal
Ciclo de trabajo	100%	100%
Diámetro del haz en el emisor	13 cm	1 cm
Divergencia del haz	11 μ rad	87 μ rad
Margen de potencia en el receptor a una distancia máxima de funcionamiento de 5500 km para un modo nominal	2,5 dB	1,6 dB
margen de potencia en el receptor a una distancia máxima de funcionamiento de 7800 km para un largo alcance	3 dB	1,6 dB

2.2.5 ONEWEB

WorldVu Satellites Limited (OneWeb), corresponde a una compañía enfocada a diseñar, construir y poner en funcionamiento una constelación satelital, conformada inicialmente de 720 elementos (incluidos los repuestos) en órbitas circulares casi polares a 1.200 km de altitud, de acuerdo con lo informado en 2016 a la FCC [19][20][21][22].

El objetivo de la conformación de esta constelación satelital consiste en proveer una ampliación a las redes de telefonía móvil y los ISP para dar servicio a nuevas zonas de cobertura, proporcionando acceso de voz y datos a clientes y empresas ubicadas en lugares de la comunidad que no pueden ser servidos técnica o económicamente a través de medios terrestres.

El sistema OneWeb utiliza la banda Ku para los enlaces entre los satélites y los terminales de usuario y la banda Ka para los enlaces entre los satélites y las estaciones terrenas, operando estas últimas de pasarela, ya que proporcionan la interconexión con Internet.

Por lo tanto, considerando la banda espectral en la cual opera esta constelación satelital, además de las aplicaciones en las cuales puede ser implementada, se tiene que las antenas utilizadas por las estaciones terrenas y terminales de usuarios pueden estar conformadas mediante reflectores parabólicos dirigidos mecánicamente y/o arreglos de antenas en fase (PAA - Phased Array Antenna) de bajo coste, u otra tecnología de direccionamiento del haz.

Por su parte, cada satélite OneWeb contará con 16 haces puntuales altamente elíptico no orientable nominalmente idénticos, que operarán en banda Ku. También contará con dos antenas en banda Ka, capaces de crear un haz puntual circular orientable independiente.

La Figura 2-12 muestra una representación de la constelación OneWeb con el footprint o área de cobertura capaz de proporcionar cada uno de los satélites.

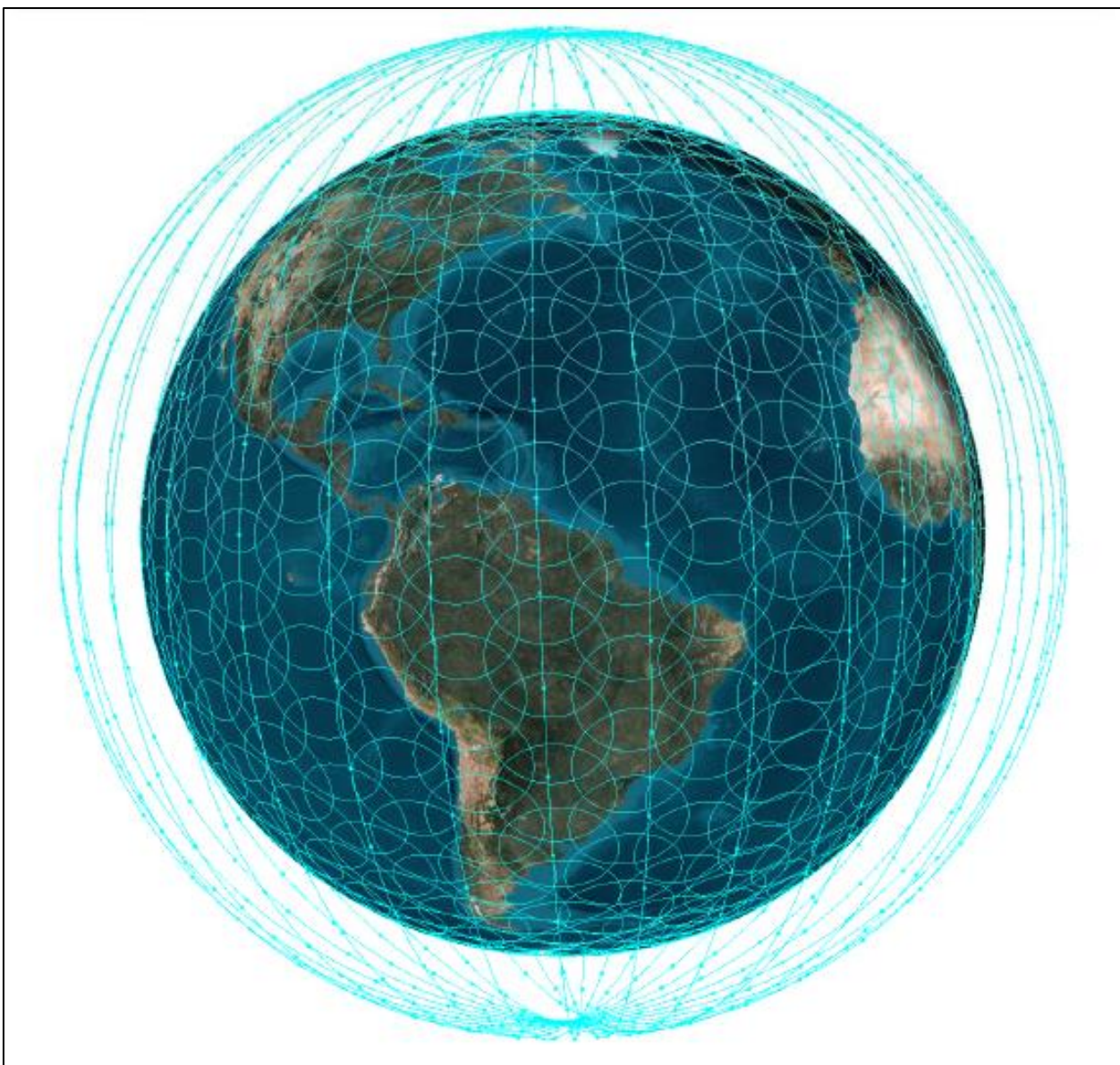


Figura 2-12 Constelación OneWeb.

En 2017 OneWeb solicitó una modificación en su constelación satelital, la cual considera proyectar en esta ocasión 2.000 satélites de órbita no geoestacionaria (NGSO), haciendo uso de la banda V, específicamente en los rangos de 37,5-42 GHz, 47,2-50,2 GHz y 50,4-51,4 GHz. Un mejor detalle de esta distribución espectral se puede observar en **TABLA 2-10**.

TABLA 2-10 Rango Espectral usado en Banda-V

Tipo de Enlace y dirección de la transmisión	Rango de Frecuencia
Gateway → Satélite	42,5 – 43,5
	47,2 – 50,2
	50,4 – 51,4
Satélite → Gateway	37,5 – 42,5
Terminal de Usuario → Satélite	48,2 – 50,2
Satélite → Terminal de Usuario	40,0 – 42,0

Este nuevo rango espectral solicitado se propuso como una carga útil extra para la constelación de 720 satélites en banda Ku/Ka, además de proponer 1.280 satélites adicionales en banda V que operen a una altitud nominal de 8.500 km (Orbita MEO).

Evaluando el segmento terrestre de la constelación OneWeb en órbita LEO y que opera en banda-V se puede indicar la presencia de dos subcategorías, estaciones terrenas pasarela y terminales de usuario. Con esta actualización y uso de la banda-V, la compañía se planteó colocar hasta diez antenas de estaciones terrenas en un emplazamiento para acceder simultáneamente a varios satélites visibles del sistema OneWeb de banda V.

En 2018, OneWeb solicitó aumentar el número de satélites activos en su constelación LEO de 720 a 1.980 en las bandas Ku y Ka. Para llevar a cabo esta acción se propuso aumentar la cantidad de planos orbitales a 36 (en lugar de 18), espaciados uniformemente, y la proyección de 55 satélites por plano orbital (en lugar de 40).

Durante el mismo 2018 y dejando sin consideración la propuesta antes mencionada, OneWeb propuso una modificación completa de su constelación LEO, la cual separó en dos fases. En la Fase 1, se propone una reducción del número máximo de satélites de 720 a 716, además de realizar ciertos ajustes en los parámetros orbitales de su constelación. Estas modificaciones implicarán un total de 588 satélites operando en los planos inclinados de 87,9° (12 planos de 49 satélites por plano) y 128 satélites operando en los planos inclinados de 55° (8 planos de 16 satélites por plano).

Por su parte, en la Fase 2, se propone un aumento en la cantidad de satélites autorizados pasando de 716 a 47.844 satélites, junto con los cambios respectivos en su arquitectura orbital.

Sin embargo, en marzo de 2020 OneWeb solicitó voluntariamente alivio bajo el Capítulo 11 del Código de Quiebras como resultado de las importantes perturbaciones en los mercados de capital producto del COVID-19.

Esto produjo a su vez que OneWeb propusiera una enmienda para actualizar su solicitud pendiente y así modificar su órbita terrestre baja (LEO) mediante la disminución del número máximo de satélites autorizados que lanzar durante el despliegue de la Fase 2, pasando de 47.844 satélites a 6.372 satélites, del mismo modo que no planea cambios en el despliegue de 716 satélites propuesto en la Fase 1.

Específicamente en la Fase 2 de la Solicitud de Modificación, OneWeb solicitó que se desplegaran 72 satélites en 32 planos con inclinaciones orbitales de 40° y 55°, así como un total de 1.764 satélites con una inclinación orbital de 87,9°. En consecuencia, el número total de satélites para los cuales OneWeb busca autorización en su despliegue de Fase 2 es de 6.372.

Un resumen de esta nueva configuración de satélites de la constelación OneWeb se presenta en la **TABLA 2-11**.

Tabla 2-11 Configuración Arquitectura Sistema OneWeb LEO.

Arquitectura Sistema OneWeb	Situación Inicial	Situación Propuesta Fase 1		Situación Propuesta Fase 2		
Altura Orbital [km]	1.200	Sin Modificación		Sin Modificación		
Frecuencia [GHz]	10.7 – 12.7	Sin Modificación		Sin Modificación		
	14.0 – 14.5					
	17.8 – 18.6					
	18.8 – 19.3					
	27.5 – 29.1					
	29.5 – 30.0					
Número de Satélites	720	716		6.372		
Número de Satélites por inclinación orbital	720	588	128	1.764	2.304	2.304
Número de Planos	18	12	8	36	32	32
Número de Satélites por Plano	40	49	16	49	72	72
Inclinación Orbital	87.9°	87.9°	55°	87.9°	40°	55°

Finalizada la Fase 2 de la constelación satelital OneWeb, se espera que cada satélite sea capaz de formar hasta 32 haces de usuario, además de hacer uso de enlaces ópticos inter-satelitales con el objetivo de enrutar los paquetes de tráfico de los usuarios a través de toda la constelación para así aumentar la disponibilidad de comunicación.

Los enlaces descendentes permiten la codificación y modulación adaptativa (ACM – Adaptive Coding and Modulation) para garantizar el rendimiento de datos óptimo en función del margen del enlace disponible en un instante determinado, el cual puede variar en función de aspectos como el desvanecimiento por lluvia, la geometría del enlace debido al movimiento del satélite.

En la dirección directa (Gateway a usuario) está en funcionamiento un esquema de transmisión TDM mediante el cual el haz de usuario soporta una única portadora de banda ancha de 250 MHz. Cada terminal de usuario del haz recibe y demodula esta portadora y extrae únicamente los datos que están destinados a ella, lo que está determinado por los encabezados de datos. En la dirección de retorno (usuario a Gateway) existe un esquema de transmisión TDMA/FDMA de portadora única (SC-TDMA/FDMA) en el que cada terminal de usuario transmite ráfagas temporales de datos en una portadora de banda relativamente estrecha (normalmente de 1,25 MHz a 50 MHz), pero que pueden extenderse a 125 MHz para terminales que son más robustos.

A raíz de estas mismas modificaciones en la cantidad de equipos que conforman la constelación satelital OneWeb, es que la compañía también optó por modificar su arquitectura en la Banda-V a través de la eliminación total de su componente en órbita MEO, y la implementación de carga útil en este rango espectral para el subcomponente de la Fase 1 en banda Ku/Ka.

Otras modificaciones corresponden a que OneWeb ya no solicita el uso de la banda espectral descendente de 42,0-42,5 GHz, y que, del mismo modo, tampoco se solicita el uso de la banda ascendente de 42,5-43,5 GHz en la Fase 1, sin embargo, se mantiene su solicitud para la Fase 2.

Si bien, no forma parte de su solicitud de modificación de la Fase 1, OneWeb también solicita rangos de frecuencia de banda E en su implementación asociada de la Fase 2.

Como complemento se añade que además de la solicitud en banda V, OneWeb añade rangos de frecuencia adicionales en la banda E, para ser implementados durante el desarrollo de la Fase 2 de su constelación, específicamente en el rango de 71-76 GHz y 81-86 GHz.

Los terminales de usuario de la Fase 2 constan de antenas pequeñas (normalmente de 20 cm a 75 cm) e incluirán terminales terrestres fijos y transportables, así como terminales móviles a bordo de aviones, embarcaciones marítimas y vehículos terrestres.

Las estaciones terrenas de entrada de banda V y E normalmente utilizarán antenas de 1,2 m a 3,4 m, dependiendo de su ubicación, las características de propagación asociadas y los requisitos del servicio. Se proyectan entre 10 a 20 antenas en cada estación terrena OW-V en un sitio de entrada para acceder a varios satélites simultáneamente desde esa ubicación.

Los satélites OW-V de Fase 2 tienen tres antenas de entrada de banda V idénticas, lo que permite que funcionen enlaces de entrada simultáneos con dos estaciones terrenas de entrada visibles. En banda E habrá dos antenas de puerta de enlace de satélite idénticas para dar servicio a un único sitio de puerta de enlace de banda E a la vez.

La tercera antena de entrada de banda V y la segunda antena de entrada de banda E se utilizan

con fines de traspaso a medida que los satélites se mueven en su órbita y hacen la transición a diferentes estaciones terrenas de entrada visibles.

Dado que los satélites compartirán las cargas útiles de las bandas Ku/Ka, V y E, las funciones TT&C se realizarán como parte del sistema inicial de OneWeb, es decir utilizando frecuencias de banda Ka.

2.2.6 IRIDIUM NEXT

Los satélites de Iridium Constellation LLC ("Iridium") desarrollados inicialmente por Thales Alenia Space, consisten en una constelación que opera en órbita baja (LEO), específicamente en las bandas de frecuencia de 1621.35 - 1626.5 MHz, para proporcionar comunicaciones satelitales móviles. Además de contar con las bandas de 29,1-29,3 GHz y 19,4-19,6 GHz para los enlaces de alimentación y en el rango de frecuencias de 22,18-22,38 GHz para las comunicaciones intersatélites [23][24][25].

La constelación presenta polarización dual en el rango 1616-1626,5 MHz, además de polarización para estos transpondedores de enlace de conexión es RHC en el enlace ascendente (29,1-29,3 GHz) y LHC en el enlace descendente (19,4- 19,6 GHz).

Algunas características adicionales de la constelación satelital incluyen un periodo orbital de 6028 segundos, inclinación de 86,398°, excentricidad de 0,001260, espaciado entre Nodos Ascendentes y Planos: 31.6°; argumento del perigeo de 90° y separación (entre los planos 1 y 6 nodos ascendentes/descendentes) de 22°.

El alcance de la empresa Thales Alenia Space consiste específicamente en la ingeniería, integración y validación en órbita de los 81 satélites Iridium NEXT, los cuales consisten en 66 satélites operativos y 15 satélites de reserva (9 satélites en órbita y 6 satélites en tierra), para ser implementado a una altitud circular nominal de 780 km.

Cada satélite está conectado a los 4 satélites más cercanos en el sistema, al frente, detrás, a la derecha y a la izquierda, lo que hace que el servicio sea totalmente independiente de cualquier red terrestre. [26]

Cada nave espacial emplea una antena phased array de banda L para generar el patrón celular de 48 haces y 4.700 km de diámetro sobre la superficie terrestre para la comunicación con los usuarios. También se proporcionan enlaces en banda Ka para las comunicaciones con las pasarelas terrestres y para los enlaces cruzados con naves espaciales adyacentes en órbita. [27]

La constelación proporcionará velocidades de datos en banda L de hasta 1,5 Mbit/s y servicio de alta velocidad en banda Ka de hasta 8 Mbit/s.

Cada satélite Iridium-NEXT puede soportar una carga útil de 50 kg, la cual dispone de una potencia media de 50 W. La entrega de datos y el acceso a la carga útil alojada se realiza a través de la infraestructura de Iridium o de pasarelas privadas.

La implementación de esta arquitectura en base a sistemas SMS y el incentivo de fomentar su aplicación se debe a que corresponde a una red con alta fiabilidad, la cual ha demostrado a través de

su fase anterior un papel clave en los esfuerzos de recuperación y respuesta de los sistemas de comunicación en varias de las grandes catástrofes naturales, como el huracán Katrina, el vertido de petróleo de 2010 en el Golfo de México, la super tormenta Sandy, los terremotos de Haití, Chile y Japón y el tifón de Filipinas.

A raíz de esto se establecieron algunos sitios específicos para la proyección de estaciones terrenas de pasarelas situadas en:

- Tempe, Arizona (EEUU).
- Fairbanks, Alaska (EEUU).
- Svalbard, Noruega (Europa).
- Izhevsk (Rusia).
- Punta Arenas, Chile (Sudamérica).

Los satélites Iridium NEXT están equipados con cuatro enlaces inter satelitales, permitiendo la comunicación con otros satélites Iridium NEXT ubicados tanto adelante como atrás en la misma órbita, así como con aquellos en órbitas adyacentes. Además de tener la exclusión de que cada satélite sólo puede asignar 32 de los 48 haces en una misma franja horaria.

Iridium NEXT proporciona a los usuarios finales tasas de datos de 1,5 Mbps en el enlace descendente y 512 Kbps en el enlace ascendente. Para esto, estructura la información en tramos que permiten el acceso múltiple al canal a través de divisiones en el tiempo (TDMA - Time-Division Multiple Access). Una trama es de 90 milisegundos, con intervalos de tiempo asignados a los canales simplex y a las portadoras dúplex de enlace ascendente y descendente. Ejemplo de este acceso al canal se puede observar en la Figura 2-13.

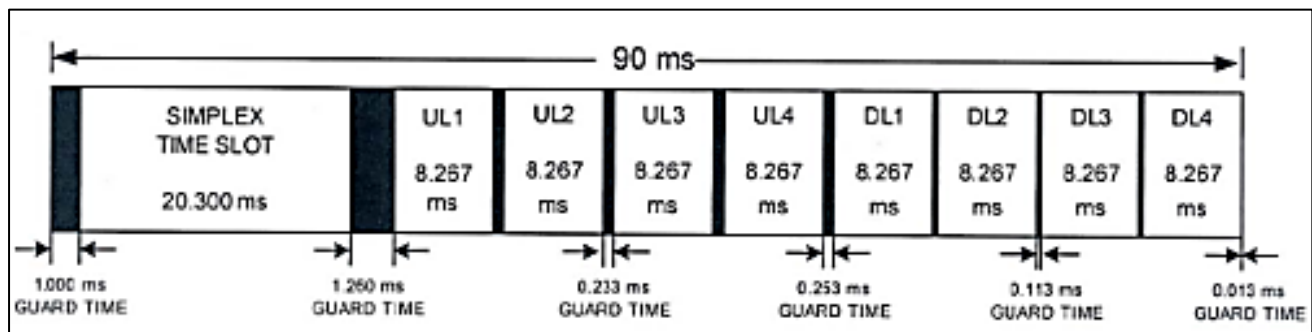


Figura 2-13 Estructura de frame TDMA para la constelación Iridium Next.

El intervalo de tiempo simplex es de 20,300 ms y cada uno de los cuatro intervalos de tiempo de enlace ascendente y descendente es de 8,267 ms.

La velocidad orbital de los satélites es de aproximadamente 27.000 km/h (17.000 mph). Los satélites se comunican con los satélites vecinos mediante enlaces inter-satelitales en banda Ka. Cada satélite puede tener cuatro enlaces inter satelitales: uno con cada uno de los satélites vecinos situados delante y detrás en el mismo plano orbital, y uno con cada uno de los satélites situados en planos vecinos a ambos lados. [28]

La comunicación entre los satélites y los terminales se realiza mediante un sistema basado en TDMA y FDMA que utiliza el espectro de banda L entre 1.616 y 1.626,5 MHz.

Las antenas externas de tipo "disco de hockey" utilizadas con los teléfonos de mano, módems de datos y terminales SBD de Iridium suelen definirse como de 3 dB de ganancia, 50 ohmios de impedancia con RHCP (polarización circular derecha) y VSWR de 1,5:1.

El tipo de modulación utilizado es normalmente DE-QPSK, aunque DE-BPSK se utiliza en el enlace ascendente (móvil a satélite) para adquisición y sincronización.

Dentro de cada canal FDMA hay cuatro ranuras de tiempo TDMA en cada dirección. La trama TDMA comienza con un periodo de 20,32 milisegundos que se utiliza para la mensajería simplex a dispositivos como buscapersonas y para avisar a los teléfonos Iridium de una llamada entrante, seguido de las cuatro ranuras de subida y las cuatro de bajada. La comunicación entre las unidades móviles y los satélites se realiza a 25 kilobaudios.

Los canales están espaciados a 41,666 kHz y cada canal ocupa un ancho de banda de 31,5 kHz; esto deja espacio para los desplazamientos Doppler.

2.3. Discusión

En esta sección se comparan o destacan las características principales de las constelaciones bajo análisis, ampliando las descripciones anteriores y especificando los atributos de los satélites en órbita LEO que serán simulados.

Como se muestra en la **Tabla 2-12**, los sistemas tienen gran variedad de órbitas, pudiendo cubrir rangos entre 540 - 1.350 km. Con esto se ha buscado dar cobertura mundial, proyectando satélites en órbitas polares y órbitas inclinadas, específicamente en áreas de difícil acceso y zonas más densamente pobladas del planeta.

Tabla 2-12: Comparación de las Constelaciones.

Sistema	Altura [km]	Inclinación	N° Planos Orbitales	N° Satélites por plano	N° de Satélites por capa	N° Total Satélites
OneWeb	1.200	87,9°	36	49	1.764	4.372
		40°	32	72	2.304	
		55°	32	72	2.304	
Starlink (SpaceX)	540	53,2°	72	22	1.584	4.408
	550	70°	36	20	720	
	560	53°	72	22	1.584	
	560	97,6°	6	58	348	
	570	97,6°	4	43	172	
Telesat Lightspeed	1.015	98,98°	27	13	351	1.671
	1.325	55,88°	40	33	1.320	
Iridium NEXT	780	86,398°	6	11	66	66
Kepler	600±50	89,5°	12	30	360	360
Kuiper (Amazon)	650	80°	325	2	650	7.774
	640	72°	652	1	652	
	630	51,9°	34	34	1.156	
	610	42°	36	36	1.296	
	590	33°	28	28	784	
	630	51,9°	34	34	1.156	
	610	42°	36	36	1.296	
	590	33°	28	28	784	

Por su parte, considerando que nuestro proyecto es buscar cobertura satelital en el Polo Sur, la **Tabla 2-13** resume las constelaciones de interés que deben ser modeladas a través del software STK. Para el filtrado de las constelaciones satelitales a ser consideradas para el modelamiento a través del software STK nos basamos en las características declaradas en la sección 2.1. Así, puesto que ninguna

compañía cuenta con una órbita perfectamente polar se considerarán para el presente estudio las órbitas polares sincronizada con el Sol (SSO), las cuales corresponden a órbitas que posean una inclinación mayor de 70°.

Tabla 2-13 Comparación de Configuración de las Constelaciones en órbita polar.

Sistema	Altura [km]	Inclinación	N° Planos Orbitales	N° Satélites por plano	N° de Satélites por capa	N° Total Satélites
OneWeb	1.200	87,9°	36	49	1.764	1.764
Starlink (SpaceX)	550	70°	36	20	720	1.240
	560	97,6°	6	58	348	
	570	97,6°	4	43	172	
Telesat Lightspeed	1.015	98,98°	27	13	351	351
Iridium NEXT	780	86,398°	6	11	66	66
Kepler	600±50	89,5°	12	30	360	360
Kuiper	640	72°	652	1	652	1.302
	650	80°	325	2	650	
Total						5.083

Las diferencias en las alturas orbitales, la inclinación, el espaciamiento y el campo de observación (FoR – Field of Regard) o footprint de cada satélite, permiten definir el número de satélites que posee cada compañía satelital para dar cobertura a una región, en nuestro caso al Polo Sur.

De la Tabla 2-13 se puede extraer que las órbitas con una mayor cantidad de satélites en órbita casi polar son OneWeb, Starlink y Kuiper. Esto puede justificarse parcialmente para las dos últimas compañías, ya que sus satélites están proyectados a una menor distancia orbital y, por ende, su área de cobertura es menor. Las constelaciones satelitales restantes, como Telesat, Iridium Next y Kepler, tienen un subconjunto polar con menos satélites y están proyectadas a alturas orbitales entre 600 y 1,015 km, lo que indica que su objetivo principal no es una cobertura continua en los polos.

A continuación, se presenta una contextualización teórica de los anchos de banda habilitados para ser utilizados con los terminales de usuario, para cada una de las constelaciones satelitales bajo estudio.

Se debe tener en consideración, tal como se mencionó previamente, que los anchos de banda totales o por canal de cada una de las constelaciones son teóricos, es decir, el espectro real disponible para cada enlace puede diferir con lo considerado en la simulación, sin embargo, corresponde a una

aproximación aceptable y en concordancia a lo propuesto por cada una de las compañías.

La Tabla 2-14 resume las características de ancho de banda de cada una de las constelaciones satelitales. Estos parámetros serán considerados valores de entrada para el software STK, con el objetivo de soportar las simulaciones de cada uno de los sistemas y calcular la tasa de transferencia más cercana a la real, en concordancia con los demás parámetros orbitales y técnicos de los enlaces de comunicación.

En el caso del sistema Telesat, el espectro de frecuencia disponible se comparte para la formación de enlaces con usuarios y gateways, ya sea en dirección ascendente como descendente, por lo tanto, no cuenta con un ancho de banda específico para cada caso. Además, la cantidad de haces y el ancho de banda de cada haz es reconfigurable. Considerando que la constelación Telesat opera en las bandas espectrales Ku y Ka, se estima que los anchos de banda pueden variar entre 500 MHz y varios gigahercios para la comunicación con usuarios y gateways, respectivamente. Por lo tanto, para la definición del ancho de banda disponible por la compañía Telesat se considera toda la banda espectral disponible, parámetro igualmente usado en los trabajos [3] y [4], desarrollados por Del Portillo y Pachler respectivamente.

La constelación Iridium Next tendrá la capacidad de desplegar 48 haces por satélite, logrando utilizar un ancho de banda total de 10,5 MHz. Así, mediante el uso de multiplexación por división de frecuencia, este sistema podrá distribuir 240 canales con un factor de reutilización de frecuencia de 12, donde cada canal tendrá un ancho de banda de 41,67 kHz, de los cuales sólo 35 kHz son útiles.

Tabla 2-14: Anchos de Banda de las Constelaciones Satelitales.

Sistema	User Links									
	Downlink					Uplink				
	BW _{CH}	# _{CH}	BW _{TOT}	k	# _{beams}	BW _{CH}	# _{CH}	BW _{TOT}	k	# _{beams}
OneWeb	250 MHz	8	2000 MHz	2	32	125 MHz	4	500 MHz	2	16
Starlink	250 MHz	8	2000 MHz	4	48	125 MHz	4	500 MHz	4	16
Telesat Lightspeed	-	-	3600 MHz	4	24	-	-	4200 MHz	4	16
Iridium Next	41.67 kHz	240	10.5 MHz	12	24	41.67 kHz	240	10.5 MHz	12	48
Kepler	100 MHz	5	500 MHz	3	8	50 MHz	4	200 MHz	3	4
Kuiper	100 MHz	5	500 MHz	4	64	50 MHz	4	200 MHz	4	32

Donde: BW_{CH} corresponde al ancho de banda del canal; $\#_{CH}$ al número de canales; k al factor de reutilización, es decir al número veces que se reutiliza la frecuencia en cada satélite; BW_{TOT} al ancho de banda total, $\#_{beams}$ al número de haces capaces de ser formados por estaciones terrenas y satélites, de acuerdo con lo mencionado en la documentación técnica y licencia por parte de la FCC.

Así, se debe considerar que los datos previamente entregados corresponden al ancho de banda de un canal y al ancho de banda de total luego de combinar múltiples canales, no así al ancho de banda disponible por cada constelación satelital para cada una de las sub-bandas de frecuencia disponibles.

Se destaca del resumen realizado la omisión de las características de ancho de banda para gateways y las estaciones de telecomando y control (TT&C), puesto que no son relevantes para el análisis del presente proyecto de tesis.

Capítulo 3. METODOLOGÍA

3.1. Modelo de presupuesto de enlace

El presupuesto del enlace (Link Budget) corresponde a un resumen de todos los elementos involucrados en la transmisión de señales, y permite cuantificar los distintos parámetros del enlace para verificar la calidad de este.

La ecuación (1) corresponde a la expresión general para el cálculo del presupuesto de enlace. Sin embargo, en las etapas tempranas del diseño de sistemas de comunicaciones, se utiliza una formulación simplificada, descrita en la ecuación (2), que relaciona las potencias y ganancias de los sistemas transmisores y receptores, además de las pérdidas del sistema. Estas pérdidas incluyen atenuaciones generadas por la atmósfera, pérdidas intrínsecas, atenuación en el espacio libre y atenuaciones causadas por factores como la polarización y el desalineamiento. [29] [30]

$$C/N_{0[dB]} = EIRP_{tx[dB]} - L_{fs[dB]} - L_{atm[dB]} - L_{pol[dB]} - L_{des[dB]} - L_{aco[dB]} + G_{rx[dB]} - 10 \log_{10}(k) - T_{sys[dB]} \quad (1)$$

$$P_{rx[dB]} = P_{tx[dB]} + G_{tx[dB]} - L_{tx[dB]} - L_{fs[dB]} - L_{atm[dB]} - L_{pol[dB]} - L_{des[dB]} - L_{aco[dB]} + G_{rx[dB]} \quad (2)$$

A continuación, se define cada uno de los términos y conceptos utilizados en las ecuaciones (1) y (2) para la obtención del presupuesto de enlace:

C/N_0 , es razón portadora a ruido, en dB-Hz.

$EIRP_{tx}$, es la potencia isotrópica equivalente, por su definición en inglés, del transmisor. Este parámetro puede estar dBW o dBm, dependiendo de la unidad de energía utilizada en el sistema. El cálculo del EIRP se puede obtener a través de la suma de la potencia del transmisor P_{tx} en la unidad de energía que se esté trabajando, más la ganancia de la antena transmisora G_{tx} en [dBi] y menos las pérdidas intrínsecas del sistema transmisor L_{tx} en [dB], es decir, $EIRP_{tx} = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx}$.

L_{fs} , son las pérdidas en espacio libre en dB.

L_{pol} , son las pérdidas por polarización en dB.

L_{des} , son las pérdidas por desapuntamiento en dB.

L_{aco} , son las pérdidas por desacoplamiento en dB.

L_{atm} , son las pérdidas atmosféricas en dB.

P_{rx} , es la potencia del receptor en dBW o dBm. La unidad de energía utilizada debe ser la misma considerada para el transmisor.

G_{rx} , es la ganancia de la antena receptora en dBi.

k , es la constante de Boltzmann.

T_{sys} , es la temperatura del sistema, en dB (K_{dB}). Donde K es la temperatura en Kelvin.

Estas expresiones asociadas al cálculo del presupuesto de enlace permitirán deducir la potencia requerida por cada estación terrena asociada a una respectiva compañía satelital.

Los resultados que se obtengan en esta etapa serán referenciales, puesto que algunos parámetros a utilizar serán supuestos definidos por el autor, como es el caso de la ganancia de la antena receptora. Estas conjeturas son asumidas puesto que algunas compañías satelitales tales como Kuiper, Kepler y Telesat aún se encuentran desarrollando sus dispositivos en órbita, por lo tanto, existe limitada información sobre el tipo o arreglo de elementos que formará parte de ellas.

En este sentido la ganancia de la antena receptora tendrá una relación directa con la frecuencia de operación de cada constelación satelital. En este sentido, debido a que las compañías satelitales trabajan en bandas espectrales, se utilizará la frecuencia central para los cálculos de ganancia.

La potencia del receptor será obtenida a partir de la temperatura del sistema o la figura de ruido del receptor, según corresponda, de acuerdo con lo expresado en la ecuación (3) [31].

$$P_{rx} = SNR \cdot P_n = SNR(k \cdot T_n \cdot B) = SNR(k \cdot [(F - 1) \cdot T_0] \cdot B) \quad (3)$$

La definición de las variables de la (3) se declara a continuación. Donde SNR corresponde a la razón señal a ruido, P_n equivale a la potencia del ruido en el receptor, B al ancho de banda del canal, T_0 es la temperatura de referencia considerada generalmente en 290 K y F es la figura de ruido.

Los parámetros k y P_{rx} ya fueron definidos anteriormente, sin embargo, ahora se debe considerar que todas las variables son lineales.

3.2. Modelo atmosférico

Las pérdidas en la atmósfera pueden ser generadas por distintos factores, siendo los principales factores la distancia entre el emisor y receptor que generan el enlace, las atenuaciones generadas por la lluvia, por las nubes y los gases atmosféricos.

La atenuación de una señal generada por la distancia entre el emisor y receptor se conoce como pérdidas de trayectoria en espacio libre (Free Space Path Loss), y específicamente corresponde a la atenuación de la señal a medida que aumenta la distancia. La expresión para las pérdidas de espacio libre se describe en la ecuación (4), tanto en su forma lineal como en decibelios, de acuerdo con lo establecido en Proakis [29].

$$L_{fs} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) [dB] \quad (4)$$

Del mismo modo, las pérdidas de propagación en un enlace de comunicación se pueden categorizar en dos tipos: pérdidas atmosféricas y pérdidas de puntería. Las pérdidas debidas a la atmósfera son causadas por la absorción de gases atmosféricos principalmente de oxígeno y vapor de agua, mientras que las pérdidas por puntería son causadas por el desalineamiento entre transmisor y receptor en un enlace.

Para frecuencias inferiores a 3 [GHz], la atenuación atmosférica es a menudo despreciable. Sin embargo, este efecto se torna relevante cuando se opera con frecuencias sobre los 3 [GHz], especialmente para ángulos de elevación bajos, ya que el trayecto que debe recorrer la señal es mayor.

Tal como se indicó previamente, una de las pérdidas atmosféricas corresponde a la atenuación de una señal debido a las nubes, para lo cual la ITU [32] nos entrega un modelo que permite obtener la atenuación específica de una señal en función de la densidad del agua líquida, la frecuencia de la señal y la temperatura.

La ecuación (5) nos entrega la atenuación específica para cada frecuencia que se desee analizar. En esta expresión γ_c es la atenuación específica, M es la densidad del agua líquida en g/m^3 , $K_l(f)$ es el coeficiente de atenuación específico y depende de la frecuencia.

$$\gamma_c = K_l(f)M \quad (5)$$

Por lo tanto, la atenuación total de la señal para un trayecto H se expresa según lo establecido en la ecuación (6). Se debe tener en consideración que H corresponde sólo al trayecto afectado por nubosidad y no al trayecto completo que debe ser transmitida la señal.

$$L_{c_i} = H\gamma_{c_i} \quad (6)$$

Como se indicó previamente, las ecuaciones (5) y (6) corresponden al cálculo de la atenuación para una frecuencia específica, por lo tanto, para señales de banda ancha se debe dividir la señal de banda ancha en sub-bandas de frecuencia, para así aplicar el modelo descrito y finalmente sumar todas las señales de sub-bandas atenuadas para obtener la señal atenuada total, tal como se representa en la ecuación (7).

$$L_c = \sum_{i=0}^n L_{c_i} \quad (7)$$

Para el caso de las atenuaciones generadas por la lluvia el modelo es más complejo ya que debe considerar un índice de precipitaciones, la frecuencia de operación, la polarización y el ángulo

de elevación del trayecto, tal como lo define la ITU en [33]. Así, la atenuación específica, γ_R , se modela según la ecuación (8). Donde R es el índice de lluvia en $[mm/h]$, mientras que el parámetro k y el exponente α dependen de la frecuencia, la polarización y el ángulo de elevación de la señal.

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (8)$$

Por lo tanto, para calcular la atenuación total se debe multiplicar la atenuación específica por la distancia de propagación efectiva, d_{eff} , resultando en la ecuación (9).

$$L_r = d_{eff}\gamma_R \quad (9)$$

Este modelo también es definido para señales de banda estrecha, por lo tanto, para la obtención de la atenuación de una señal de banda ancha se debe dividir el espectro en subbandas para posteriormente sumarlos, tal como se expresa en la ecuación (10).

$$L_r = \sum_{i=0}^n L_{r_i} \quad (10)$$

Por último, analizamos el efecto de las atenuaciones generadas por gases atmosféricos de acuerdo con lo establecido por la ITU [34]. Este tipo de atenuación se genera producto de la absorción de causada principalmente por partículas de oxígeno y vapor de agua, además de contribuciones en menor grado de nitrógeno.

El modelo definido por la ITU permite calcular la atenuación específica en función de la temperatura, la presión, la densidad del vapor de agua y la frecuencia de la señal, tal como se expresa en la ecuación (11), donde γ_o y γ_w son las atenuaciones específicas (dB/km) debidas al aire seco y al vapor de agua, respectivamente, y la función $N''()$ corresponde a la parte imaginaria de la refractividad atmosférica.

$$\gamma = \gamma_o(f) + \gamma_w(f) = 0.1820fN''(f). \quad (11)$$

Por lo tanto, la atenuación total generada por los gases atmosféricos para una frecuencia específica estará definida por la ecuación (12), mientras que la ecuación (13) definirá la atenuación total para un rango de frecuencias o señal de banda ancha.

$$L_g = R(\gamma_o + \gamma_w) \quad (12)$$

$$L_g = \sum_{i=0}^n L_{g_i} \quad (13)$$

A continuación, en la Figura 3-1, Figura 3-2, Figura 3-3 y Figura 3-4 se presentan las atenuaciones específicas causadas a señales que se encuentran bajo los 100 [GHz], considerando como

parámetros de entrada promedios de temperatura [°C], presión [kPa], densidad de agua líquida y densidad de vapor de agua [g/m³], de acuerdo con estimaciones meteorológicas del Polo Sur, según lo publicado en [35][36][37][38].

Para este proceso se consideraron los siguientes parámetros de entrada: $T^{\circ} = -60^{\circ}\text{C}$, $M = 0.01 \text{ [gm/m}^3\text{]}$, $R = 0.0023 \text{ [mm/h]}$, Presión = 680 hPa; un vapor de agua precipitable de $0.00128 \text{ [g/m}^3\text{]}$; y una variación de la altura de los sistemas de acuerdo con lo indicado en la Tabla 2-13.

Se destaca en la Figura 3-1, Figura 3-2, Figura 3-3 y Figura 3-4 el rango y nombre de las bandas espectrales utilizadas para comunicaciones microondas. El rango específico de cada una de las bandas se declara en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Rango bandas espectrales microondas.

Banda	Rango de frecuencias
L	1 -2 [GHz]
S	2 – 4 [GHz]
C	4 – 8 [GHz]
X	8 – 12.4 [GHz]
Ku	12.4 – 18 [GHz]
K	18 – 26.5 [GHz]
Ka	26.5 – 40 [GHz]
V	40 – 75 [GHz]

La Figura 3-1 presenta la atenuación específica causada por los gases atmosféricos. Como resultado se observa un peak cercano a los 60 [GHz] causado por la absorción del aire seco, razón por las cuales no se recomienda usar estas frecuencias para sistemas de comunicaciones en grandes trayectorias. Otro resultado generado a partir de este gráfico es la ausencia de un peak en los 22 [GHz], generado por el vapor de agua precipitable, situación que se asocia a las bajas temperaturas del sitio.

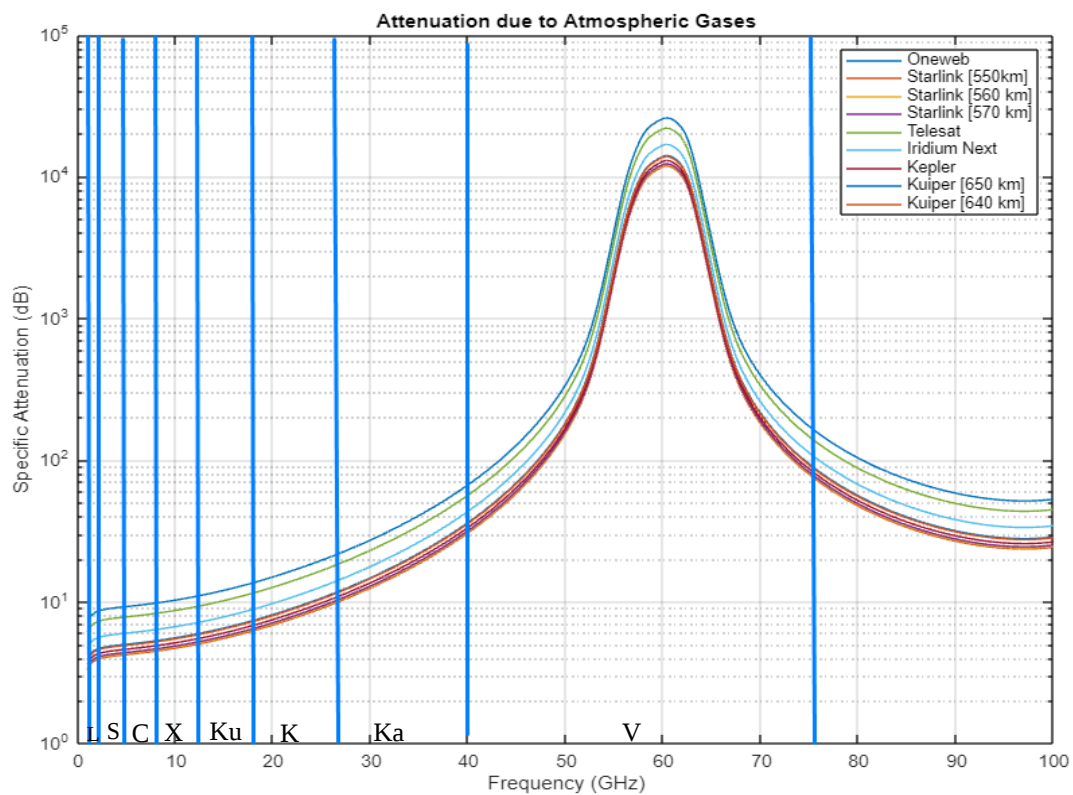


Figura 3-1 Comparación de atenuaciones producto de gases atmosféricos.

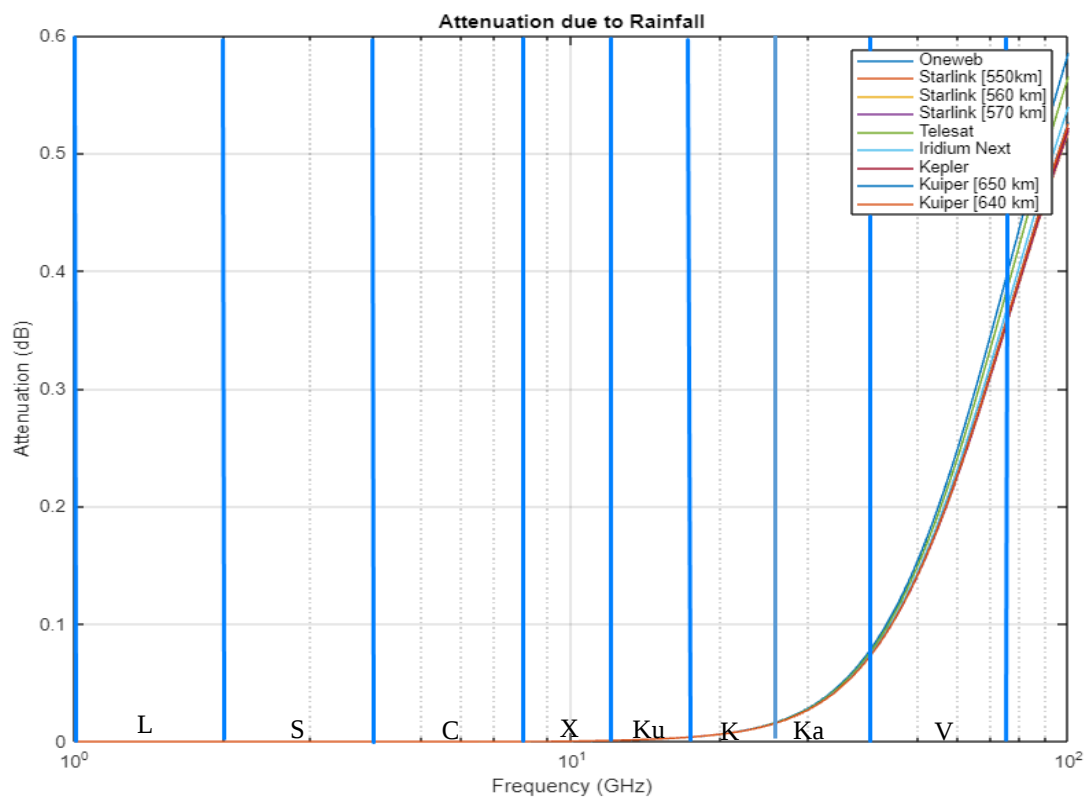


Figura 3-2 Atenuaciones causadas por la lluvia.

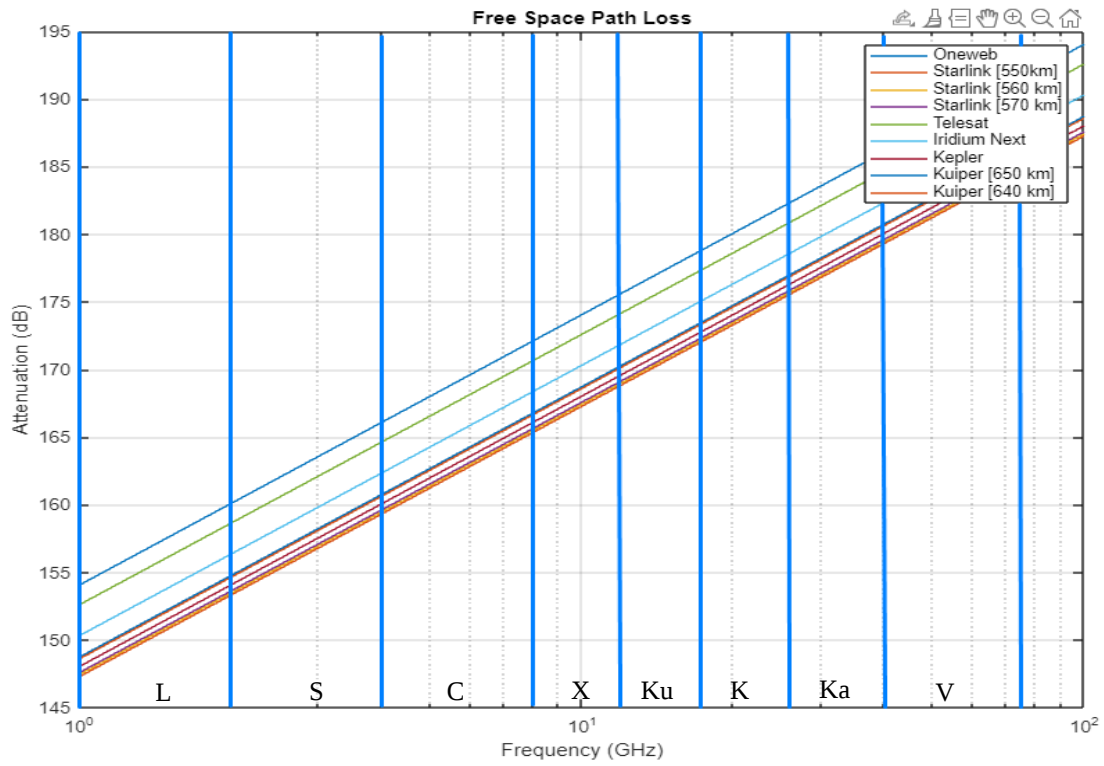


Figura 3-3 Atenuaciones causadas por la transmisión en espacio libre.

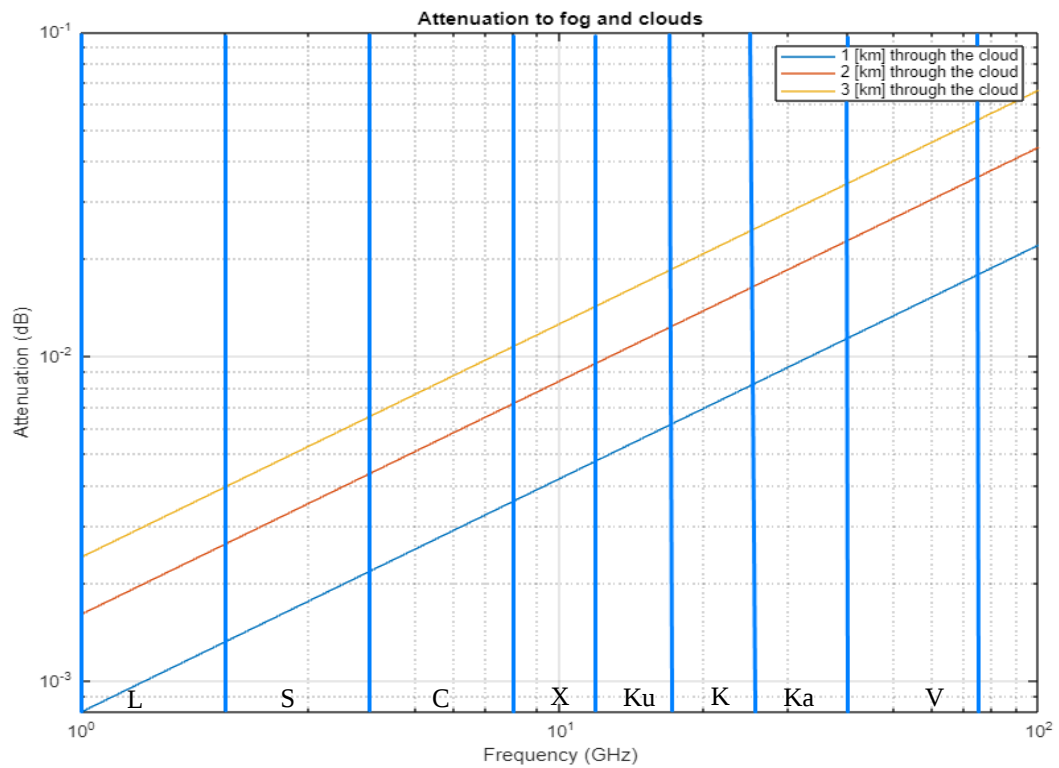


Figura 3-4 Atenuaciones causadas por nubes y niebla.

Además de la atenuación generada por la atmósfera, los sistemas de comunicación satelital se

enfrentan a pérdida de señalización o apuntamiento, la cual se genera debido al desalineamiento entre la estación terrena y el satélite. Las pérdidas por desapuntamiento no son consideradas en el presente trabajo debido a la dificultad que conlleva analizar esta variable en satélites de órbita baja, puesto que se mueven a gran velocidad para mantenerse en órbita.

Los resultados asociados a las pérdidas atmosféricas presentadas en la Figura 3-1, Figura 3-2, Figura 3-3 y Figura 3-4, son resumidos en la Tabla 3-2 para cada una de las constelaciones.

Tabla 3-2: Resultados condiciones atmosféricas.

	Rango $L_{fspl}[dB]$	Promedio $L_{fspl}[dB]$	Rango $L_{rain}[dB]$	Promedio $L_{rain}[dB]$	Rango $L_{cloud}[dB]$	Promedio $L_{cloud}[dB]$	Rango $L_{gases}[dB]$	Promedio $L_{gases}[dB]$
OneWeb	176-179	177.5	0.001-0.004	0.0025	0.015-0.019	0.017	11.06-13.67	12.36
Starlink	175.8-178.4	177.1	0.017-0.05	0.0335	0.02-0.03	0.025	10.28-19.35	14.81
Telesat	175.4-178.6	177	0.004-0.017	0.0105	0.019-0.025	0.022	18.3-11.57	14.93
Iridium Next	150-156	153	0	0.0	0.002-0.004	0.003	4.71-5.56	5.13
Kepler	170-173	171.5	0.001-0.004	0.0025	0.015-0.019	0.017	5.53 – 6.84	6.18
Kuiper	177-179.6	178.3	0.017-0.05	0.0105	0.02-0.03	0.025	11.7-22.06	16.88

De los resultados declarados en la Tabla 3-2 se observa que las variables que más atenúan la señal en una red satelital en el Polo Sur corresponden a las pérdidas en espacio libre y las pérdidas causadas por la absorción de gases. Por otro lado, se tiene que las pérdidas por lluvia son muy cercanas a cero, debido a las bajas temperaturas de esta zona geográfica y el aire seco que se genera. En relación a la atenuación por nubosidad se señala que esta fue calculada para un margen de 3 [km] de nubes, puesto que corresponde al caso más desfavorable, sin embargo, la atenuación aún es baja, lo que se puede asociar al poco vapor de agua precipitable que existe en esta región.

3.3. Demanda requerida

Como antecedente se tiene que el año 2017 se transportaron 200 TB de información en un periodo de 6 meses, por lo tanto, la tasa de transmisión deseada a ser enviada desde el South Pole Telescope (SPT) hacia las constelaciones satelitales es aproximadamente de 113,12 Mbps, para un sistema con visibilidad diaria del 100%.

La capacidad máxima de un canal de comunicaciones para transmitir una cantidad definida de información puede ser deducida de forma aproximada a partir del Teorema de Shannon – Hartley [29], tal como se describe en la ecuación (14).

$$C = B \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (14)$$

Donde, C corresponde a la capacidad del canal, B es el ancho de banda del canal y SNR

equivale a la razón señal a ruido (S/N), siendo S la potencia de la señal útil y N es la potencia del ruido del canal.

Sin embargo, debido a que la ecuación (14) corresponde a un teorema no considera varios aspectos relevantes en un enlace de comunicación real, tales como la modulación, la codificación, los errores y las atenuaciones en el canal de comunicación. Por lo tanto, un parámetro más utilizado para evaluar el rendimiento de distintos sistemas de comunicaciones corresponde a la eficiencia del enlace o también denominado la tasa de información (IR – Information Rate). Como se presenta en la ecuación (15) la tasa de información corresponde a la capacidad del canal multiplicada por un factor η que degrada nuestro sistema de comunicaciones, puesto que considera factores como el tipo de modulación, la codificación de corrección de errores y las condiciones del canal.

$$IR = \eta C \quad (15)$$

Sin embargo, la razón señal a ruido también se ve afectada por las atenuaciones en el canal debidas a las condiciones atmosféricas, lo que deriva en la razón señal a ruido efectiva como se describe en la ecuación (16).

$$SNR_{eff} = \frac{SNR}{L_{sys}} = \frac{P_{signal}}{P_{noise} \cdot L_{sys}} \quad (16)$$

Así, la tasa de información puede ser re-escrita según lo establecido en la ecuación (17).

$$IR = B \cdot \log_2(1 + SNR_{eff})\eta = B \cdot \log_2\left(1 + \frac{P_{signal}}{P_{noise} \cdot L_{sys}}\right)\eta = B \cdot \log_2\left(1 + \frac{P_t G_t G_r}{L_{sys} N_0 B}\right)\eta \quad (17)$$

Donde N_0 es la densidad espectral de potencia del ruido, y L_{sys} son las pérdidas del sistema.

Lo que falta por descubrir es cómo afecta la eficiencia η en nuestro sistema de comunicación, y en qué relevancia considera los factores de corrección de errores, el esquema de modulación y las condiciones del canal.

De esta forma, el factor η se puede interpretar como la eficiencia espectral, el cual depende del factor de roll-off y el esquema de modulación utilizado, además de un factor que considera la corrección de errores. Así, el factor de eficiencia quedaría según lo expresado en la ecuación (18).

$$\eta = \frac{n}{1 + \alpha} \cdot (1 - Overhead) = \frac{\log_2(M)}{1 + \alpha} \cdot (1 - Overhead) \quad (18)$$

Donde n corresponde al orden de la modulación (2^n), el parámetro Overhead corresponde a una fracción de los datos destinados para verificación, dirección y señalización de la trama y α equivale al factor de Roll-off.

El factor de roll-off es un parámetro importante en sistemas de comunicaciones y tiene por

objetivo describir la forma de la transición de la banda pasante a la banda de rechazo en la respuesta en frecuencia de un filtro, siendo la banda pasante el rango de frecuencias que pasan con poca o nula atenuación y la banda de rechazo el rango que se ve fuertemente atenuado.[29] [39]

Finalmente, nuestra fórmula para obtener la tasa de transferencia del sistema de comunicaciones queda de acuerdo con lo expresado en la ecuación (19)

$$IR = \left(\frac{B \cdot \log_2(M)}{1 + \alpha} \cdot (1 - \text{Overhead}) \right) \cdot \log_2(1 + SNR_{eff}) \quad (19)$$

Por otra parte, el parámetro Overhead puede ser desglosado en los conceptos de bits para la corrección de errores (FEC - Forward Error Correction), bits de señalización y bits asignados para la cabecera de la trama de datos. Específicamente el FEC corresponde a la acción de añadir bits a la información para permitir la detección y corrección de errores causados por el canal ($FEC = N^\circ \text{ de bits útiles} / N^\circ \text{ total de bits}$).

En los sistemas de comunicación satelital el parámetro de overhead varía entre el 10% y 20% de la tasa de información [40] [41]. Para incluir este cálculo en nuestro análisis de tasa de transferencia se considerará un factor de overhead del 20%

Algunas constelaciones satelitales bajo estudio consideran el uso de esquemas de codificación y modulación adaptativa, por lo que no especifican los tipos de modulación que son capaces de administrar, dificultando su análisis para estudios de eficiencia de las redes satelitales, la Tabla 3-3 presenta las modulaciones utilizadas por las mega constelaciones satelitales de acuerdo con los establecido en la FCC en alguna instancia de evaluación del sistema.

Tabla 3-3: Modulaciones utilizadas por las constelaciones satelitales.

Constelación Satelital	Dirección de la Comunicación	Modulación Utilizada	#Símbolos	Orden
Telesat Lightspeed	Uplink	256APSK	2^8	8
	Downlink	64APSK	2^6	6
Kuiper	Uplink	64QAM (*)	2^6	6
	Downlink	64QAM (*)	2^6	6
Kepler	Uplink	32APSK	2^5	5
	Downlink	32APSK	2^5	5
Starlink [42][43]	Uplink	64QAM	2^6	6
	Downlink	64QAM	2^6	6
Iridium NEXT [44]	Uplink	16APSK	2^4	4
	Downlink	8PSK	2^3	3
OneWeb	Uplink	BPSK	2^1	1
	Downlink	QPSK	2^2	2

(*) El esquema de modulación para la constelación Kuiper de Amazon ha sido asumido debido a que no se halló registro de un esquema utilizado por este sistema. El único antecedente es la utilización de codificación y modulación adaptativa, de acuerdo con los señalado por la FCC.

Sin embargo, las constelaciones Telesat Lightspeed, OneWeb y Kuiper poseen esquemas de modulación y codificación adaptativa (ACM - Adaptive Coding and Modulation). Del mismo modo, como se puede observar en la Tabla 3-3, OneWeb posee pruebas de su sistema de comunicaciones utilizando esquemas de modulación donde pocos bits forman un símbolo, a pesar de contar con modulación adaptativa.

3.4. Software System Tool Kit (STK)

El software System Tool Kit (STK) versión 11.2 de la compañía Ansys [45] es utilizado para la simulación de las constelaciones satelitales y el establecimiento del enlace de comunicación entre los equipos en órbita y la estación terrena proyectada en el Polo Sur.

La selección de este software para el desarrollo del presente estudio se debe a que el programa en mención permite modelar sistemas complejos dentro de una simulación tridimensional realista y dinámica en el tiempo que incluye terreno de alta resolución, imágenes y entornos de radiofrecuencia.

De acuerdo con las capacidades del software, este es utilizado para simular cada una de las constelaciones satelitales bajo estudio, así como la estación terrena proyectada en el Polo Sur. En cada uno de estos equipos se proyectan sensores que permiten obtener el campo de observación para

realizar análisis de cobertura y tiempos de disponibilidad de comunicación, además de evaluar los parámetros del enlace de comunicación mediante la proyección de elementos transmisores y receptores en los extremos del enlace de comunicación.

Para el diseño del sistema de comunicación satelital se requiere definir el esquema de modulación usado por cada compañía, los cuales fueron identificados en la Tabla 3-3 de acuerdo con las pruebas de las compañías entregadas a la FCC. Sin embargo, algunos esquemas de modulación no se encuentran disponibles en el software, por lo que se propone utilizar el esquema disponible que cuente con una respuesta similar en el análisis entre la tasa de error de bits y la razón señal a ruido.

Específicamente, el esquema de modulación M-APSK no se encuentra disponible en el software STK, a pesar de ser el esquema recomendado para comunicaciones satelitales debido a la distribución de sus símbolos en el plano de constelaciones, lo cual permite reducir las distorsiones no lineales.

La Figura 3-5 presenta distintos esquemas de modulación a través de un gráfico que compara la tasa de error de bits (BER – Bit Error Rate) con la razón señal a ruido (SNR – Signal to Noise Ratio). Estos resultados fueron obtenidos a través del software Matlab, en su formato Online. Para la simulación de los distintos esquemas se consideró un canal con ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN – Additive White Gaussian Noise) y las funciones de modulación y demodulación existentes en el software.

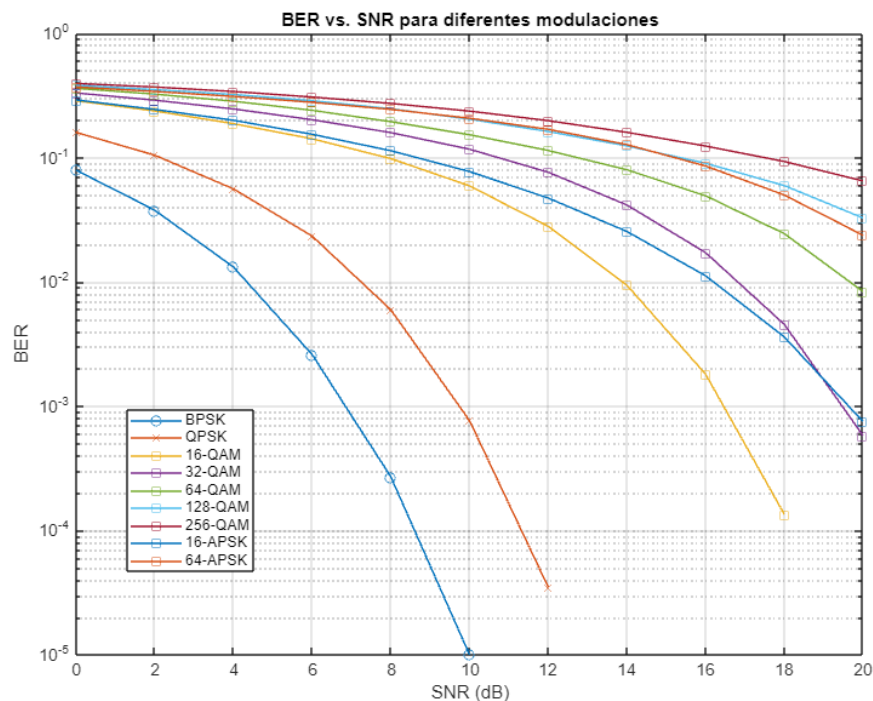


Figura 3-5 BER vs SNR para diferentes modulaciones.

De estos resultados se observa que el uso de la modulación M-APSK presenta una alta capacidad de datos combinada con una eficiencia espectral, mediante el uso de menos símbolos en comparación con otras modulaciones como M-QAM, lo cual lo hace apropiado para comunicaciones satelitales debido a las distorsiones que afectan al canal. Sin embargo, debido a que el esquema APSK no se encuentra disponible en el software STK, se utilizará la modulación M-QAM más cercana en su respuesta para los análisis.

La reportabilidad de los resultados generados por el software es a través de gráficos predeterminados en función del tiempo, aunque se debe considerar que en versiones posteriores del software es posible crear gráficos con la información que el autor desee en los ejes.

A la fecha de realización de este proyecto de tesis el software System Tool Kit (STK) se encuentra en su versión 12.7, la cual fue publicada en agosto del 2023.

3.5. Estación terrena

La estación terrena requerida se debe proyectar en la Base Amundsen-Scott, ubicada en el Polo Sur, sitio que coincide con la ubicación geográfica del South Pole Telescope.

Así, considerando la geografía y clima del sitio donde se estima la implementación de la estación terrena se establece como primera recomendación el uso de antenas de arreglos en fase, puesto que entregan ventajas relevantes en la etapa de operación al ser comparadas con antenas parabólicas.

Las compañías satelitales, en especial aquellas que se encuentran aún en desarrollo, no entregan abiertamente la información asociada a la infraestructura de sus dispositivos en órbita, por lo tanto, a priori no es posible saber si los satélites cuentan con un tipo de antena específica.

Como antecedente se tiene el trabajo desarrollado por Merino [46], en el cual se estimó la cantidad de elementos que forman parte de los arreglos de antenas en fase, basados en las características de propagación y rendimiento de la red que deben cumplirse. La limitación de esto se encuentra en la cantidad de elementos que puede soportar el software STK, el que corresponde a 5001 elementos.

Para la etapa de simulación se considera en el sistema receptor una antena parabólica cuyo diámetro será estimado en base al ángulo de observación que cada una de las constelaciones satelitales. Todas las antenas parabólicas simuladas contarán con una eficiencia de 0,55.

El método para obtener este el diámetro y ganancia de la estación receptora estará definido de

acuerdo con lo expresado en la ecuación (20), donde la ganancia está definida en base a D que corresponde al diámetro de la antena, η que equivale a la eficiencia y la longitud de onda de operación del sistema.

$$G = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \eta \quad (20)$$

Mientras que, por otro lado, el ángulo de apertura desde el nadir, θ , se puede relacionar al diámetro de la antena y la longitud de onda, según lo expresado en la ecuación (21).

$$\theta \approx \frac{70\lambda}{D} \rightarrow D \approx \frac{70\lambda}{\theta} \quad (21)$$

Los ángulos de observación para cada satélite que forma parte de las constelaciones satelitales bajo estudio se declaran en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Parámetros antena receptora en satélites.

	Ángulo de Observación	Frecuencia de operación	Diámetro antena receptora	Ganancia antena receptora
OneWeb	55°	12,8 GHz	1,71 m	44,6 dBi
Starlink (SpaceX)	44,85°	28 GHz	0,96 m	46,4 dBi
Telesat Lightspeed	45° (*)	19 GHz	1,41 m	46,34 dBi
Iridium NEXT	48.6°	1,6 GHz	15,5 m	45,69 dBi
Kepler	64°	12,8 GHz	1,47 m	43,3 dBi
Kuiper (Amazon)	35,5°/35,6°	28 GHz	1,21 m	48,41 dBi

(*) Valor estimado por autor, puesto que compañía Telesat no presenta información sobre su ángulo de observación en la FCC.

De los resultados detallados en la Tabla 3-4 se observa que en general la ganancia de las antenas receptoras es similar en todos los sistemas satelitales, al igual que las dimensiones referenciales de sus antenas, las que varían entre 1-metro y 2-metros. La excepción a este caso viene por parte de la compañía Iridium para la cual se estima una antena de 15,5 metros de diámetro, valor que puede resultar desproporcionado, pero es requerido para lograr un ángulo de cobertura como el presentado en su documentación técnica.

Para el equipo transmisor se evaluó la implementación de una antena parabólica de 1 metro, 2.5 metros y una antena de arreglos en fases constituida por 3103 elementos, que corresponde a una cantidad aproximada de elementos que forma parte de las antenas de la compañía Telesat, según lo recomendado por Merino en [46].

Los diámetros de las antenas parabólicas fueron elegidos puesto que corresponden a

dimensiones generales de antenas para sistemas de comunicación satelital, de acuerdo con lo señalado por las compañías en sus reportes a la FCC.

Así, la comparación entre los tres tipos de antenas arroja que una antena parabólica de 2.5 metros entrega mejores prestaciones que sus pares en términos de direccionalidad y supresión de interferencias, resultado que parece obvio debido a las dimensiones de la antena lo que implica que cuente con una mayor ganancia.

Por otro lado, una utilización de una antena parabólica de 1-metro y un arreglo de antenas en fase de 3103 elementos cuentan con un comportamiento similar en base a la razón portadora a ruido (C/N – Carrier to Noise), sin embargo, un arreglo de antenas en fase contará con ventajas por sobre el uso de una parabólica, puesto que esta última contará con limitaciones mecánicas para la realización del tracking de los satélites debido a la movilidad de la estructura, lo que implicará en el uso de cúpulas o alimentadores compuestos por arreglos de antenas en fase, para evitar el movimiento de los equipos.

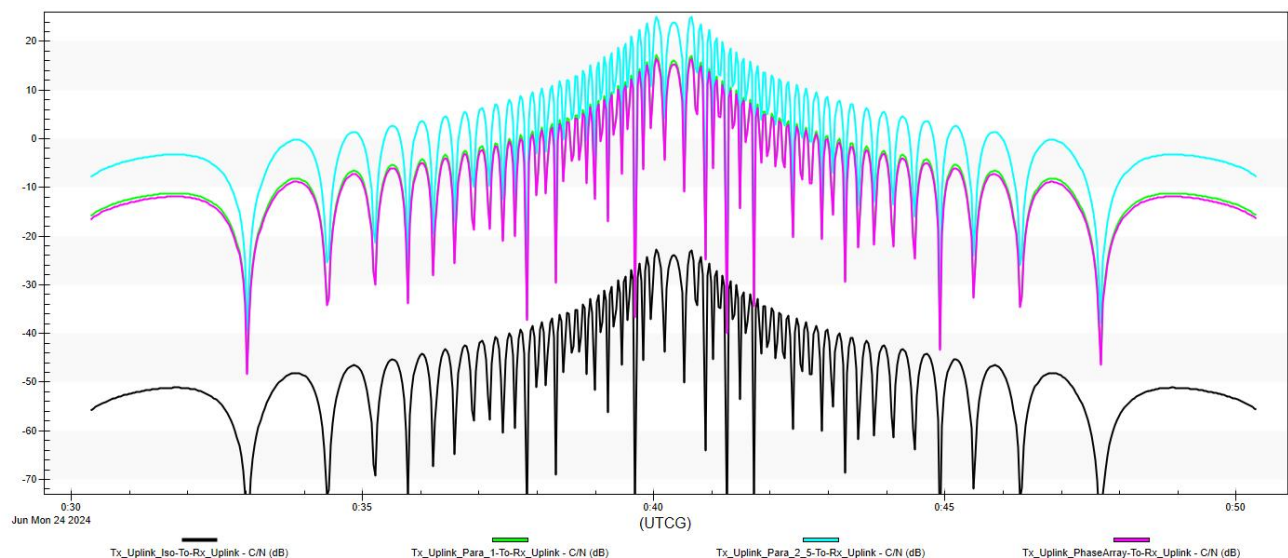


Figura 3-6: Comparación de razón portadora a ruido para diferentes antenas.

Otra recomendación relacionada a la estación terrena corresponde al ángulo de elevación mínimo que debe tener. La Tabla 3-5 entrega los ángulos de elevación de las estaciones terrestres asociadas a cada una de las constelaciones satelitales, sin embargo, en los mismos documentos técnicos señalan que estos ángulos dependerán del entorno donde sean implementadas, puesto que es difícil que las constelaciones operen con ángulos de elevación menores a 25° ya que impone restricciones adicionales a los terminales terrestres para reducir las interferencias generadas por los lóbulos laterales de las antenas.

Tabla 3-5: Ángulos mínimos de Elevación para las Estaciones Terrenas.

	Ángulo de elevación mínimo	Pruebas realizadas
OneWeb	30°	-
Starlink (SpaceX)	25°	-
Telesat Lightspeed	10°	35° / 41°
Iridium NEXT	8° / 10°	16°
Kepler	10°	-
Kuiper (Amazon)	20°	-

3.6. Ponderación de Costos

El último paso de la metodología a ser utilizada en el presente proyecto corresponde a un análisis del costo de implementación de una estación terrena para cada una de las constelaciones satelitales, considerando la tecnología utilizada y aspectos propios de cada una de las compañías satelitales propietarias.

Para la presente etapa se considera como referencia lo realizado por Aguilar en [47], en la cual plantea una metodología para la estimación de costos de constelaciones satelitales en base al nivel de madurez tecnológica (TRL - Technological Readiness Level). Para la asignación de las ponderaciones asociadas a cada nivel de madurez se propuso una matriz morfológica que permite categorizar los distintos componentes y soluciones que son implementados en las redes satelitales.

En nuestro caso se considerará una modificación de esta metodología, para la cual se asignarán puntuaciones para distintos niveles de desarrollo tecnológico, permitiendo comparar de forma equilibrada las distintas constelaciones. La adopción de esta metodología se considera la más adecuada y trascendente, puesto que algunas constelaciones aún no se encuentran en servicio, por lo que el concepto de costo es difícil de representar.

En primera instancia se identifica el espacio de diseño mediante una tabla de ponderaciones, en la cual se detallan los distintos parámetros y su respectivo nivel de desarrollo tecnológico, el cual permitirá generar nuestro quiebre para la decisión arquitectónica del sistema y se respectivo coste.

Así, inicialmente se estimará el costo asociado para una estación terrena de cada una de las constelaciones satelitales bajo estudio, considerando una puntuación basada en aspectos tales como la banda espectral en la cual opera, la cobertura y disponibilidad del sistema, el tipo de modulación y si la constelación permite o no comunicación inter-satelital. A continuación, se describe cada uno de los

parámetros que formará parte de la tabla de ponderaciones con la cual se evaluarán las estaciones terrenas.

3.6.1 Tipo de Antena

En relación con este parámetro se tiene que el presente estudio considera solo dos tipos de tecnologías para las antenas a ser proyectadas en estaciones terrenas, siendo un caso el arreglo de antenas en fase y, por otro lado, una antena parabólica.

Los costes de las antenas parabólicas y de arreglos de fases se basan en los sistemas de comunicación satelitales fijos, de acuerdo con lo extraído de proveedores como ThinKom Solutions [48], Intellian [49], Cobham SATCOM [50] y Kymeta [51].

Una antena de arreglo en fase, en una modalidad portátil, para estaciones terrestres de satélites LEO pueden adquirirse aproximadamente por entre 10.000 y 30.000 dólares, mientras que un terminal de usuario bordea entre los 500 a 1.000 dólares. Para el caso de las antenas parabólicas de 1 metro y 2,5 metros de diámetro los precios pueden variar entre 1.500 a 5.000 USD y entre 7.000 a 20.000 USD respectivamente.

Por lo tanto, complementado con esta información se considera una ponderación mayor al uso de una antena de arreglo en fase, debido al desarrollo tecnológico que posee y la factibilidad para generar un patrón de radiación electrónicamente ajustable, factor que resulta apropiado de implementar en las condiciones climáticas como las presentadas en el Polo Sur.

3.6.2 Cobertura

Para el caso de la cobertura, la puntuación será asignada en relación con los resultados extraídos del software STK, específicamente del porcentaje de disponibilidad diario de la constelación satelital.

3.6.3 Banda Espectral de Operación

La ponderación asociada a la banda espectral de operación de las constelaciones satelitales tiene relación con que el costo de los componentes de radiofrecuencia tiende a aumentar a medida que se incrementa la frecuencia de operación debido a diversos factores, tales como los materiales utilizados para la fabricación de los dispositivos, la miniaturización de los componentes y la eficiencia que deben manejar puesto que se encuentran más afectados por las pérdidas atmosféricas.

3.6.4 Tipo de Modulación

Las técnicas de modulación tales como BPSK y QPSK requieren equipos menos complejos y, por lo tanto, son menos costosos en comparación con los equipos capaces de generar técnicas de modulación más avanzadas como 8PSK, 16-QAM y 16APSK, las cuales al generar una mayor cantidad de símbolos necesitan de equipos más sofisticados requiriendo mayor precisión, lo que incrementa los costos. Esta capacidad de procesamiento es requerida tanto en la etapa de modulación como de demodulación.

De la mano con esto también va un sistema corrector de errores, puesto que, al tener la capacidad de transmitir más símbolos, se debe tener la precaución de que, al momento de la detección se identifique correctamente el Baudio recibido.

La asignación de la ponderación fue definida considerando los precios de sistemas de modulación de compañías tales como Iprium, Broadcast Store Europeo y Thomason Broadband Supply, además de las características técnicas y su robustez frente a errores e interferencias.

3.6.5 Comunicación Intersatelital

La comunicación Intersatelital es una ventaja en los sistemas de comunicaciones satelitales, puesto que permiten el traspaso de la información entre los equipos que conforman la constelación, otorgando resiliencia y fiabilidad en la disponibilidad de los datos con los cuales se está trabajando.

3.6.6 Altura de la constelación

La altura orbital de la constelación satelital será ponderada basados en dos lineamientos, siendo uno la dependencia directa entre la altura del satélite y costo de poner un Megabyte en órbita, tal como lo expresa Aguilar en [47] y, por otro lado, el costo energético de poner transmitir datos hacia los satélites, puesto que a medida que aumenta la distancia entre la constelación satelital y la superficie terrestre, más potencia será requerida por la estación terrena.

Un mayor requerimiento de potencia implica además generan un mayor nivel de calor, por lo tanto, estos requieren un sistema de enfriamiento más avanzados y por ende un sistema más costoso. Paralelamente, los sistemas de enfriamiento cuentan con mayores costos de operación debido al consumo de energía y el mantenimiento requerido, además del sistema de respaldo energético asociado.

También se puede evaluar el costo asociado al lanzamiento, el cual es comúnmente superior a medida que aumenta la altura de la órbita deseada. Sin embargo, este trabajo se basa en la idea de que

las constelaciones satelitales ya se encuentran instaladas y operativas, por lo tanto, el costo del lanzamiento de las constelaciones no será considerado en nuestro análisis.

3.6.7 Métricas

Se determinó que las métricas más importantes eran el costo ponderado de implementación de una estación terrena y el rendimiento del sistema, las cuales nos generarán el input para obtener el costo ponderado total del sistema que nos permita transmitir altas tasas de datos en sentido ascendente desde el SPT.

La Figura 3-7 presenta la metodología planteada para el cálculo y obtención del costo ponderado total de la implementación de una estación terrena, basados en el rendimiento del sistema y el nivel de desarrollo tecnológico de cada sistema.

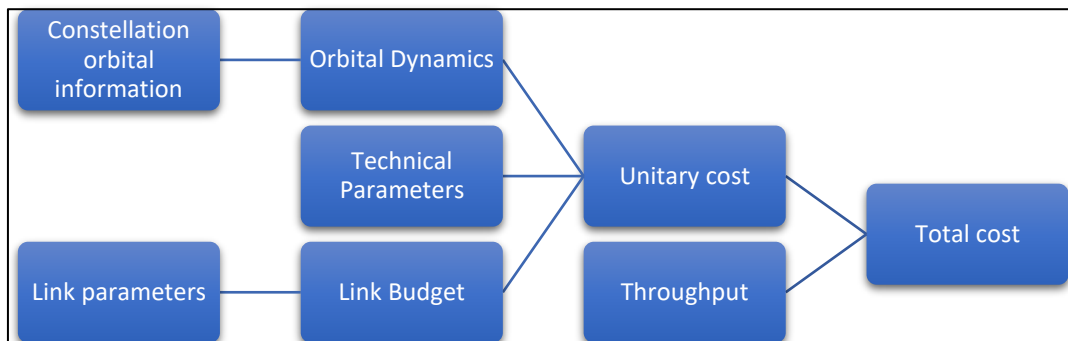


Figura 3-7 Estructura de implementación de metodología.

En específico, la métrica utilizada estará definida por un escalar de cero a nueve, siendo cero la opción con coste añadido y nueve la opción más recomendada para su implementación.

3.6.8 Matriz de Ponderaciones

La Tabla 3-6 presenta las ponderaciones asignadas para las distintas categorías de nivel de desarrollo tecnológico revisadas previamente. Se asigna con una ponderación mayor a la componente tecnológica más conveniente para la implementación de sistema terrestre. Considerando que nuestro foco es el nivel de desarrollo de las estaciones terrenas, las ponderaciones asociadas a la infraestructura satelital son valoradas una sola vez.

Tabla 3-6: Parámetros considerados por las constelaciones satelitales.

Categoría	Opción	Ponderación
Tipo de Antena (Estación Terrena) (*)	Parabólica (diámetro 1 metro)	5
	Parabólica (diámetro 2.5 metro)	6
	Phase Array Antenna	8
Cobertura diaria (**)	> 20%	2
	100%	9
Banda Espectral de Operación	Banda L	3
	Banda Ku	6
	Banda Ka	7
	Banda V	9
Tipo de Modulación	BPSK / QPSK	2
	16-QAM / 16-APSK	5
	64-QAM / 32-APSK	6
	256-QAM / 256-APSK	8
	ACM	9
Comunicación Intersatelital (**)	Sí (Óptica)	3
	Sí (RF)	2
	No	1
Altura de la constelación	500 km a 599 km	8
	600 km a 699 km	8
	780 km	7
	1015 km	6
	1200 km	5

(*) La ponderación entorno al tipo de antena no se incluyó dentro del análisis directo del sistema, puesto que se propone dejar este parámetro en decisión del usuario, con las ventajas y desventajas de cada uno de los casos. Su ponderación si es incluida para fundamentar los análisis realizados.

(**) Ponderación fija, es decir no varía con la cantidad de estaciones terrenas requeridas, ya que depende de la infraestructura satelital en órbita.

Capítulo 4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados y respectivos análisis obtenidos a partir de implementar la metodología planteada y las simulaciones de las constelaciones satelitales desarrolladas a partir del software STK, que tienen por objetivo dar solución puntual a la hipótesis del presente estudio.

4.1. Capacidad máxima de los sistemas satelitales

Un sistema de comunicaciones satelitales para que sea efectivo debe tener una baja probabilidad de errores, considerando que debe estar expuesto tales como atenuaciones atmosféricas, pérdidas por despolarizaciones o desapuntamiento entre los equipos receptores o transmisores.

En este sentido, se establece un umbral de tasa de error de bits de 10^{-7} puesto que corresponde al valor recomendado por el sitio web del Proyecto DVB para los estándares DVB-S2 y DVB-S2X [52][53]. Estos estándares definen las directrices para la transmisión de televisión y datos vía satélite, y en sus documentos técnicos se recomienda dicho BER, o mejor, para aseguran una alta calidad y fiabilidad en la transmisión de los datos.

A partir de la tasa de error de bit de 10^{-7} se procede a calcular la razón señal a ruido. El método para realizar este cálculo es utilizar la función Q, o específicamente en este caso utilizar la inversa de la función Q.

La función Q corresponde a una función matemática utilizada en teoría de comunicaciones para describir la cola de la distribución normal estándar, es decir entrega es la probabilidad de que una variable aleatoria normal obtenga un valor mayor que las desviaciones estándar. La ecuación (22) define la función Q, sin embargo, para el cálculo del SNR con cada esquema de modulación se utilizarán aproximaciones definidas en la literatura, como lo hace Proakis [29]

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (22)$$

Las ecuaciones (23), (24), (25), (26) y (27) representan el cálculo del BER par distintos esquemas de modulación [29].

BPSK

$$BER = Q(\sqrt{2 \cdot SNR}) \quad (23)$$

QPSK

$$BER = Q(\sqrt{2 \cdot SNR}) \quad (24)$$

DE-QPSK

$$BER = \frac{1}{2} e^{-\frac{SNR}{2}} \quad (25)$$

M-QAM

$$BER \approx \frac{2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)}{\log_2(M)} Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2(M)}{M-1} \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (26)$$

Donde, E_b la energía por bit y N_0 la densidad espectral de potencia del ruido.

M-APSK

$$BER \approx \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K Q \left(\sqrt{\frac{2E_{s,k}}{N_0} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{M_k} \right)} \right) \quad (27)$$

Donde, K es el número de anillos, $E_{s,k}$ es la energía de la señal en el k-ésimo anillo y N_0 la densidad espectral de potencia del ruido, $\sin^2 \left(\frac{\pi}{M_k} \right)$, representa la separación angular entre los puntos de fase en k-ésimo anillo y M_k , es el número de puntos de modulación en el k-ésimo anillo.

A continuación, se presenta en la Tabla 4-1 los resultados obtenidos para la razón señal a ruido de diferentes esquemas de modulación, frente a un BER de 10^{-7} .

Tabla 4-1: Razón señal a ruido de esquemas de modulación.

BPSK	QPSK	DE-QPSK	16 QAM	16 APSK	64 QAM	32 APSK	256 QAM	256 APSK
8,51 [dB]	8,51 [dB]	14,89 [dB]	15,62 [dB]	17,98[dB]	19,59 [dB]	20,05 [dB]	17,09 [dB]	19,06 [dB]

De los resultados indicados en la Tabla 4-1 se extrae que, al utilizar distintos esquemas de modulación, distintas SNR son requeridos, lo cual está asociado con la cantidad de símbolos y su disposición en el plano de constelación. Específicamente, esquemas de modulación como BPSK y QPSK, requieren un SNR más bajo lo que los hace más robustos para ser utilizados en canales de transmisión con mucho ruido, sin embargo, ofrecen menores tasas de datos. Por otro lado, esquemas como 64 QAM, 256 QAM y 256 APSK, que requieren SNR más altos, permitiendo a su vez mayores

tasas de transmisión, sin embargo, al generar más símbolos los hace más susceptibles al ruido.

De acuerdo con lo declarado en la sección 3.1, calcularemos la potencia de recepción a través de la ecuación (3). Para esta actividad se utilizarán los datos de SNR declarados en la Tabla 4-1, además de los parámetros técnicos dados en la Tabla 4-2. Se debe recordar en este punto que k corresponde a la constante de Boltzmann, T_0 es la temperatura de referencia considerada de 290 K y B al ancho de banda declarado en la Tabla 2-14.

Tabla 4-2: Temperatura de ruido en el sistema receptor.

	OneWeb	Starlink (SpaceX)	Telesat Lightspeed	Iridium NEXT	Kepler	Kuiper (Amazon)
Figura de ruido [dB] [24]	5	0,8	-	5,7	2	1,2
Temperatura del sistema (T_{sys}) [K]	1.226,7*	1.200,8*	1.200	1.201,8*	1.202,7*	1.225,1*

(*) Valores estimados por el autor.

De los resultados entregados en la Tabla 4-2 se extrae que todas las constelaciones bajo estudio presentan temperaturas de ruido del sistema de recepción (en el satélite) similares, lo que refleja el desarrollo tecnológico que poseen los satélites para mitigar los efectos de altas temperaturas causadas por los componentes electrónicos, otras fuentes de radiación galácticas o de fonde cósmico, o incluso generadas por otras fuentes terrestres.

Posterior al cálculo de la potencia del receptor se utiliza la ecuación (2) para obtener la potencia de transmisión desde la estación terrena. Estos parámetros son declarados en la Tabla 4-3 y serán utilizados como parámetros de entrada para la simulación a través del software STK.

Para el cálculo de la potencia del transmisor se consideraron las pérdidas atmosféricas obtenidas en la sección 3.2, además de la ganancia de la antena receptora obtenida en la Tabla 3-4.

La ganancia de la antena transmisora fue obtenida mediante la consideración de una antena de arreglos en fase, compuesta de 3103 elementos, siguiendo el lineamiento del trabajo desarrollado por Merino en [46], además de considerar 2.15 dBi como ganancia típica de dipolo de media onda.

Tabla 4-3: Potencias usadas en enlace de comunicación.

	OneWeb	Starlink (SpaceX)	Telesat Lightspeed	Iridium NEXT	Kepler	Kuiper (Amazon)
Potencia de recepción	≈ -62 [dBm]	≈ -35 [dBm]	≈ -54 [dBm]	≈ -74 [dBm]	≈ -32 [dBm]	≈ -77 [dBm]
Potencia de transmisión	$\approx 16,9$ [dBm]	≈ 30 [dBm]	$\approx 20,4$ [dBm]	$\approx -2,8$ [dBm]	≈ 38 [dBm]	≈ -11 [dBm]

Se debe considerar que los valores entregados son referenciales, y fueron calculados con el objetivo de llevar a cabo la simulación en el software STK y así verificar el establecimiento de la comunicación satelital.

Luego, nos enfocamos en calcular la tasa de datos, para lo cual nos basamos en las ecuaciones (14) y (19). De esta forma, la ecuación para el cálculo de la tasa de información capaz de transmitir cada sistema de comunicación se desarrollará a través de dos métodos, siendo el primero mediante el Teorema de Shannon – Hartley y el segundo método considerará las pérdidas atmosféricas, el factor de overhead, la corrección de errores, la modulación y el factor roll-off.

Los resultados obtenidos son revisados mediante un análisis comparativo de contenido de diversas fuentes. En el caso del sistema Starlink, de acuerdo con los antecedentes publicados en su sitio web [54] contará con tasas de datos que podrían variar entre 5 – 10 Mbps para comunicaciones fijas estándar y entre 8 – 25 Mbps para comunicaciones fijas con prioridad, sin embargo, antecedentes empíricos realizados a través de Speedtest [55] en mediciones cada cuatro horas durante un periodo comprendido entre agosto del 2023 y marzo del 2024 han demostrado la variabilidad que existe en la transmisión de los datos, donde en un análisis de la capa de transporte se obtuvo un valor medio de unos 120 Mbps de capacidad de descarga, con mediciones individuales de hasta 370 Mbps y tan bajas como 10 Mbps, y 15 Mbps de capacidad de subida, con variaciones de entre 5 Mbps y 50 Mbps, sólo para las comunicaciones de Starlink en la banda Ku [56]. OneWeb, por su parte logró tasas de transmisión ascendente de 32 Mbps, mediante la utilización de un terminal de usuario Hawk u8 de Kymeta montado sobre un vehículo [57]. Iridium NEXT son capaces proporcionar velocidades de datos de hasta 1,5 Mbps a terminales Iridium OpenPort [58], y de hasta 128 Kbps a terminales móviles [59], además de poder establecer enlaces intersatelitales a través de la banda Ka con tasas de transferencia de hasta 8 Mbps. La constelación Telesat Lightspeed no cuenta con gran divulgación de sus datos de transferencia, sin embargo, se prevé que cuente con tasas de transferencia de descarga a un mínimo de 50 Mbps y de subida a 10 Mbps, para así entregar una experiencia de banda ancha [60], aunque también existen antecedentes de tasas de datos de subida de hasta 20 Mbps como las obtenidas en las pruebas desarrolladas por el operador Spacecom [61], o los resultados obtenidos por la compañía PLDT en 2022 donde demostró velocidades de descarga de 100 Mbps, de subida de 96 Mbps y una latencia de 26,5 ms [62]. El sistema de Kepler Communications declara que ha proporcionado conectividad cercana a 100 Mbps a científicos que participan en una expedición de investigación en el Ártico. Específicamente las tasas de datos alcanzadas son de 38 Mbps de enlace descendente y 120 Mbps de enlace ascendente a bordo del rompehielos alemán Polarstern con un

terminal de muy pequeña apertura (VSAT) de 2,4 m en banda Ku [63]. Finalmente, el Proyecto Kuiper corresponde a una constelación aún en desarrollo y que no ha hecho público sus rendimientos de tasas de transferencia, sin embargo, se espera que sean competitivos como los de las compañías Starlink y OneWeb [64].

En la Tabla 4-4 se presentan los resultados obtenidos de la capacidad máxima del sistema según lo definido por el Teorema de Shannon-Hartley, las tasas de datos extraídas de los artículos bibliográficos señalados previamente y las tasas de datos obtenidas para un sistema de comunicación que considera las pérdidas atmosféricas, pérdidas de propagación, eficiencia del sistema y el esquema de modulación declarado en las solicitudes de la FCC para cada una de las constelaciones satelitales.

Tabla 4-4: Resultados de la transmisión de datos.

	OneWeb	Starlink (SpaceX)	Telesat Lightspeed	Iridium NEXT	Kepler	Kuiper (Amazon)
Teorema Shannon - Hartley	1.508 Mbps	3.262 Mbps	26.663 Mbps	63 Mbps	1.334 Mbps	1.302 Mbps
Referencia Bibliográfica	32 Mbps	25 Mbps	92 Mbps	1,5 Mbps	120 Mbps	30 Mbps (*)
Data Rate - FCC	0,03 Mbps	7 Mbps	34,3 Mbps	0,05 Mbps	2,5 Mbps	2,4 Mbps

(*) Tasa de datos promedio a partir de los resultados de las constelaciones Starlink y OneWeb.

De los resultados asociados a la Tabla 4-4 se observa que el teorema de Shannon – Hartley entrega una gran capacidad de transferencia de datos, lo cual se debe a que no considera errores o atenuaciones asociadas a la transmisión y recepción de la información. Se debe considerar que los datos obtenidos a través de este teorema no son generales, sino que corresponden para el ancho de banda y esquema de modulación utilizado en cada caso.

Por otro lado, las tasas de transferencia estimadas a partir de los esquemas de modulación indicados en las solicitudes de la FCC por parte de las compañías satelitales no son tan altas como las tasas de datos reportadas en la literatura actual ni como la tasa de datos deseada de 113,12 Mbps. Lo cual permite inducir que las tasas de transferencia de datos logradas en la literatura no se logran mediante los esquemas de modulación utilizados, o tal vez corresponden a modificaciones de estos complementados con multiplexaciones, una administración del espectro electromagnético o esquemas de modulación más avanzados.

El sistema OneWeb utilizando un esquema de modulación BPSK solo logra una tasa de transferencia de 0,03 Mbps, que corresponde a un 0,1% de la tasa de información reportada en las

referencias bibliográficas existentes a la fecha, lo que implica claramente que no es el esquema de modulación más eficiente para transmitir altas tasas de datos que posee esta compañía satelital.

El sistema Starlink logra una tasa máxima de transferencia cercana a 7 Mbps a través de una modulación 64-QAM, rendimiento similar al existente para comunicaciones domiciliarias propuesto por las compañías de telecomunicaciones mediante cable coaxial [65]. Sin embargo, no alcanza la eficiencia en transmisión de 25 Mbps expuesta en las referencias bibliográficas, aunque si se encuentra dentro del rango entre 5 Mbps y 50 Mbps obtenidos a través de pruebas empíricas del sistema Starlink en la banda Ku.

La constelación Telesat Lightspeed alcanza un rendimiento de transmisión de 34,3 Mbps haciendo uso de un esquema de modulación 256-APSK, sin embargo, corresponde solo a un 37% del rendimiento logrado a la fecha según la bibliografía, lo que al igual que la constelación Starlink hace intuir que un proceso de optimización es requerido. La utilización de todo el ancho de banda de esta constelación permite alcanzar elevadas tasas de transmisión de datos.

Iridium Next proporcionó 0,05 Mbps utilizando una modulación de 16 APSK, lo que corresponde a cerca de un 3% de la tasa de datos publicada en la literatura. Del análisis también se extrae que la capacidad máxima del canal indicada por el teorema de Shannon-Hartley tampoco cumple con el rendimiento deseado de 113,12 Mbps, por lo tanto, es requerido utilizar un esquema de modulación más eficiente para lograr transmitir más datos.

Por otro lado, de acuerdo con los datos publicados en los antecedentes bibliográficos, la constelación Kepler es la que ha logrado una mayor tasa de datos en sentido ascendente, rendimiento que es capaz de transmitir la información generada por en la actualidad por el South Pole Telescope. Sin embargo, utilizando un esquema de modulación de 32-APSK y un ancho de banda de 200 MHz sólo podemos lograr una tasa de transferencia de 2,5 Mbps, que equivale al 2% de lo logrado en la literatura.

Finalmente, el Proyecto Kuiper al encontrarse aún en desarrollo no presenta antecedentes de sus tasas de transferencia de datos logradas, sin embargo, señalan que se espera sea similar a las alcanzadas por las constelaciones OneWeb y Starlink, es decir, cercana a los 30 Mbps. Así, mediante una modulación 64-QAM se estimó una tasa de datos de 2,4 Mbps, es decir un 8% de la tasa de datos que se espera lograr al utilizar todos los recursos de la red satelital.

Como se indicó previamente, la capacidad máxima del canal no considera las pérdidas del sistema por propagación en espacio libre, las pérdidas atmosféricas, el esquema de modulación, ni la eficiencia del canal modificada por la redundancia de bits para la detección de errores, los bits usados

para señalización o la cabeceras de las tramas; razón por la cual existe tanta diferencia entre la capacidad teórica del canal y la tasa de datos obtenida.

Con estos resultados obtenidos es posible concluir que, con una primera aproximación a las tasas de transmisión por canal individual y por canales conjuntos de cada una de las constelaciones satelitales, de acuerdo con los antecedentes utilizados en las pruebas publicadas en la FCC, ningún sistema satelital de los analizados es capaz de transmitir la tasa de datos generada por el SPT.

Por lo tanto, con la obtención de tasas de transmisión de datos se puede deducir que los parámetros que intervienen principalmente en la obtención del presupuesto de enlace para un sistema de comunicaciones son los presentados a continuación:

- Latitud del sitio (estación terrena)
- Longitud del sitio (estación terrena)
- Altura del satélite
- Frecuencia de operación
- Disponibilidad del enlace
- Zona climática
- Apertura y Ganancia de la antena (Transmisora y Receptora)
- Temperatura de ruido del LNB
- Temperatura de ruido de antena
- Figura de mérito G/T (Ganancia/Temperatura) del receptor
- Densidad de flujo de saturación del satélite (SFD)
- Potencia Isótropa Radiada Equivalente (EIRP)
- Ancho de banda del canal
- Relación Eb/No requerida
- Tasa de Información
- Modulación
- Tasa de código de corrección de errores (FEC)
- Factor de Roll off
- Margen del sistema
- Tasa de error de bit (BER)

Se añade que existen variables tales como las interferencias por canales adyacentes, por polarización cruzada, por intermodulación u otra más comunes como las pérdidas por acoplamiento o

desapuntamiento que son difíciles de evaluar en sistemas o conceptos teóricos, y por lo general son agrupadas bajo el concepto de margen de error del sistema.

A raíz de esto, se complementa que el desarrollo del presente estudio no consideró las pérdidas intrínsecas del transmisor y receptor asociadas a cables, conectores; pérdidas relacionadas con el apuntamiento, margen de desvanecimiento, polarización e interferencia; debido a que no se hallaron registro de estos parámetros por parte de las compañías satelitales

4.2. Cobertura de Constelaciones Satelitales

De acuerdo con las características señaladas por cada una de las compañías bajo estudio, se presenta en las Figura 4-1, Figura 4-2, Figura 4-3, Figura 4-4, Figura 4-5 y Figura 4-6 el patrón de distribución de los satélites de las constelaciones orbitando alrededor de la Tierra con sus respectivos footprint de cobertura.

Algunas consideraciones asumidas en esta actividad corresponden a que no todas las constelaciones satelitales especifican el ángulo de mira (off-boresight angle - OBA), que corresponde al ángulo formado entre el eje de la antena y la dirección del objeto de interés, para los cuales se consideró un OBA de 45° , como es el caso de Telesat. En comunicaciones satelitales un OBA de 0° corresponde a la dirección nadir y un OBA de 90° a la dirección de la velocidad del satélite, o su dirección contraria.

Otros parámetros importantes para obtener una simulación real de las constelaciones satelitales, corresponde a la longitud de nodo ascendente (RAAN - Right Ascension of the Ascending Node) y la fase de anomalía verdadera (TAP - True Anomaly Phasing), los cuales nos indican cómo están distribuidos los satélites en cada una de sus constelaciones. Específicamente el RAAN indica la separación entre un plano orbital y otro, en cambio el TAP corresponde a la fase de separación entre satélites de un mismo plano orbital.

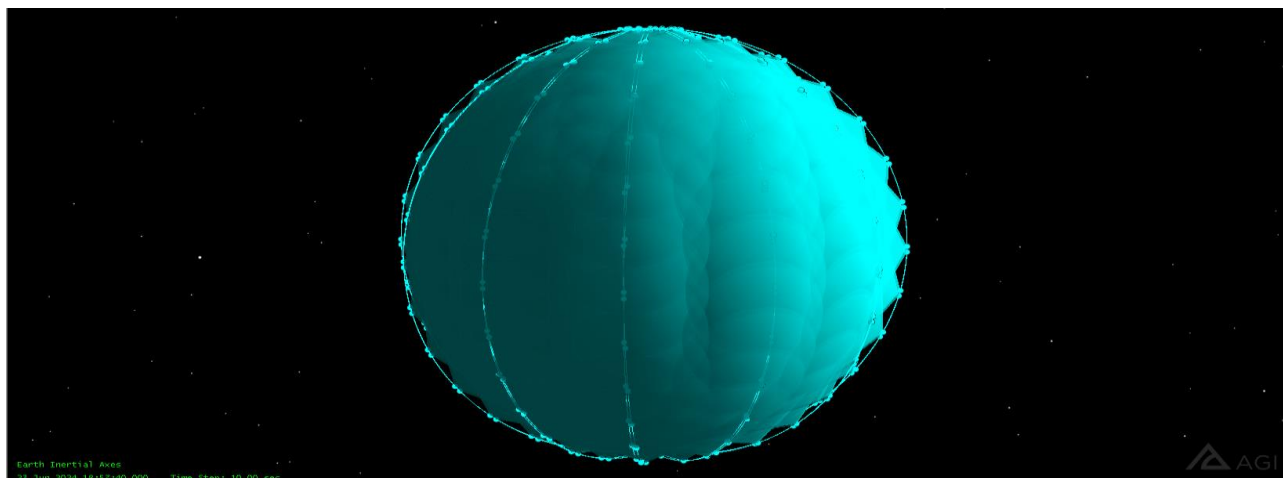


Figura 4-1 Constelación Kepler- 360 satélites (Software STK).

$$RAAN = 30^\circ \text{ y } TAP = 12^\circ.$$

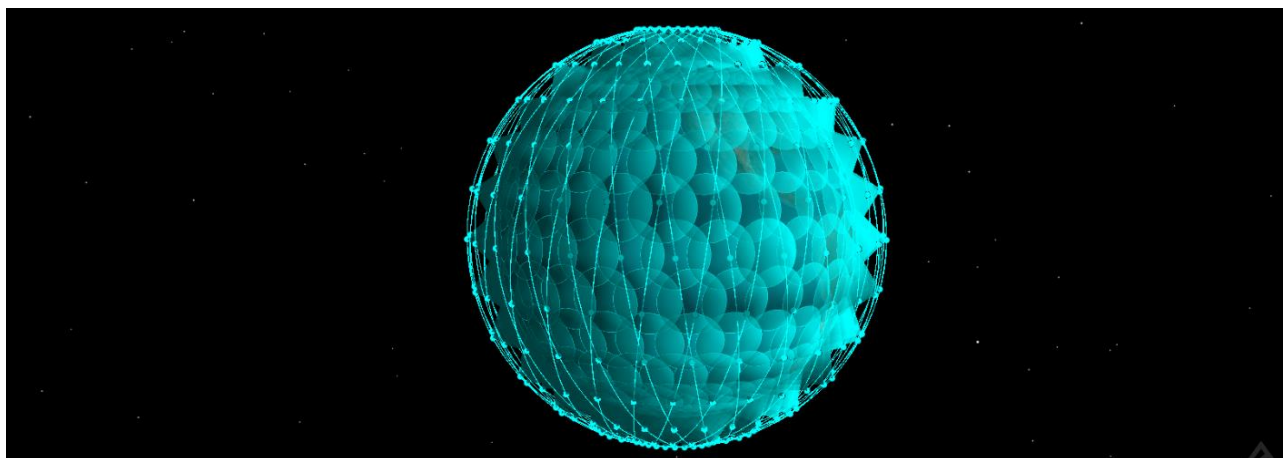


Figura 4-2 Constelación Telesat Lightspeed – 351 satélites (Software STK).

$$RAAN = 13,33^\circ \text{ y } TAP = 27,69^\circ.$$

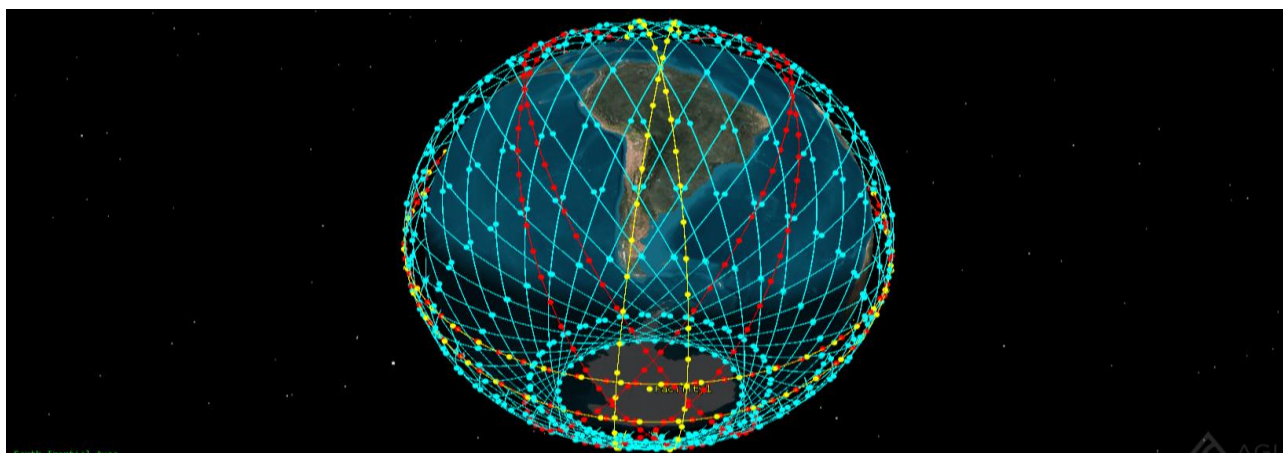


Figura 4-3 Constelación Starlink – 1240 satélites (Software STK).

$$RAAN = 10^\circ/60^\circ/90^\circ \text{ y } TAP = 18^\circ/6,2^\circ/8,37^\circ.$$

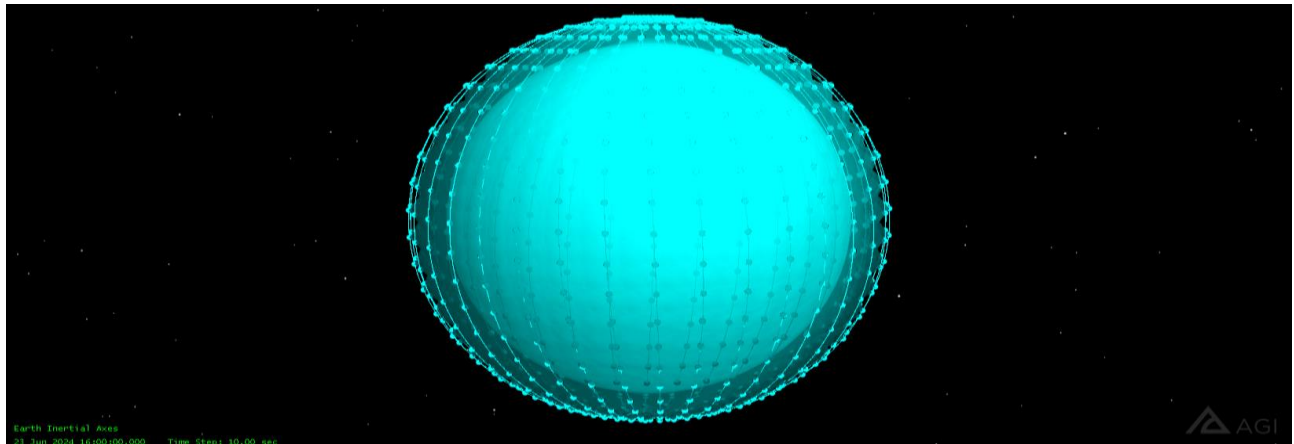


Figura 4-4 Constelación Oneweb – 1764 satélites (Software STK).

$RAAN = 10^\circ$ y $TAP = 7,35^\circ$.

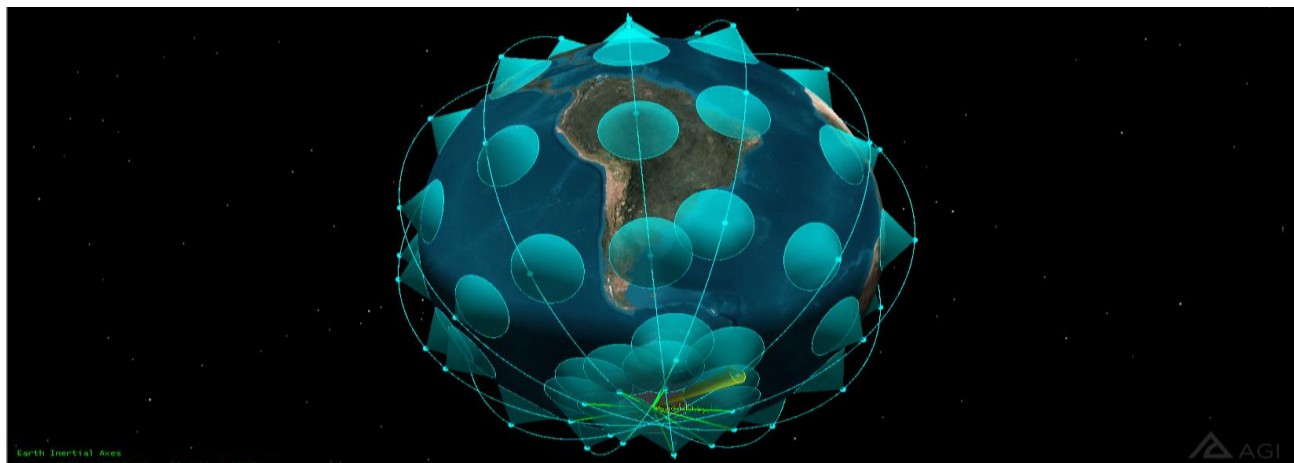


Figura 4-5 Constelación Iridium – 66 satélites (Software STK).

$RAAN = 60^\circ$ y $TAP = 32,75^\circ$.

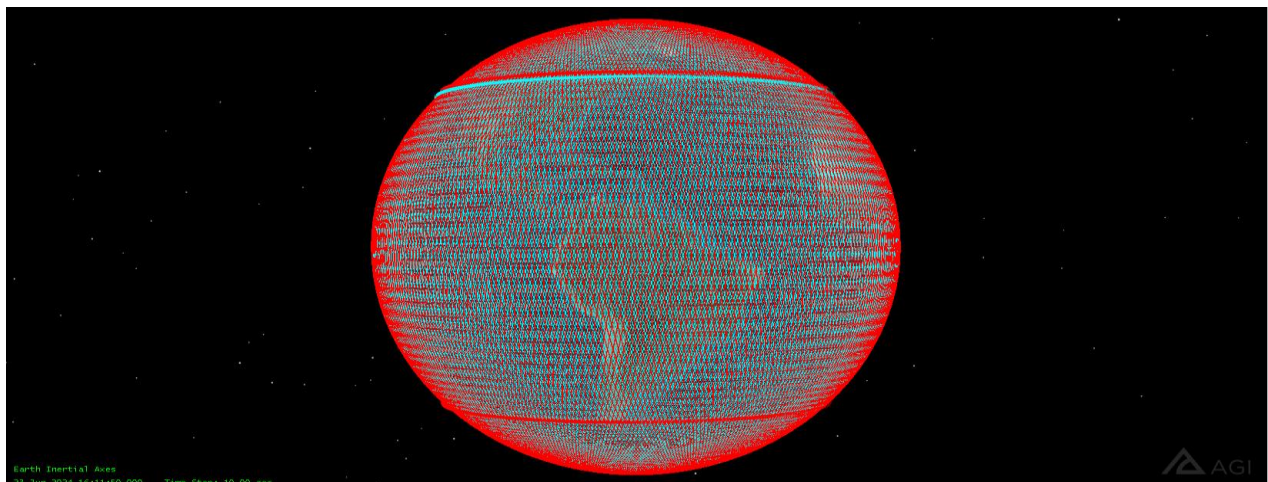


Figura 4-6 Constelación Kuiper – 1302 satélites (Software STK).

$RAAN = 0,55^\circ/1,107^\circ$ y $TAP = 360^\circ/180^\circ$.

De acuerdo con esta visualización es posible obtener la cobertura que proporcionará cada una de estas constelaciones satelitales en nuestro sitio de interés, por lo tanto, se procede a simular un objetivo (Facility) en el Polo Sur, en las coordenadas 89,9° Sur y 45,0° Oeste, o considerándose como referencia la ubicación del SPTR-2 (South Pole Tracking and Data Relay Satellite System (TDRSS) Relay 2), equipo existente de comunicación utilizado para el Seguimiento y Retransmisión de Datos por Satélite del Polo Sur (TDRSS - Tracking and Data Relay Satellite System).

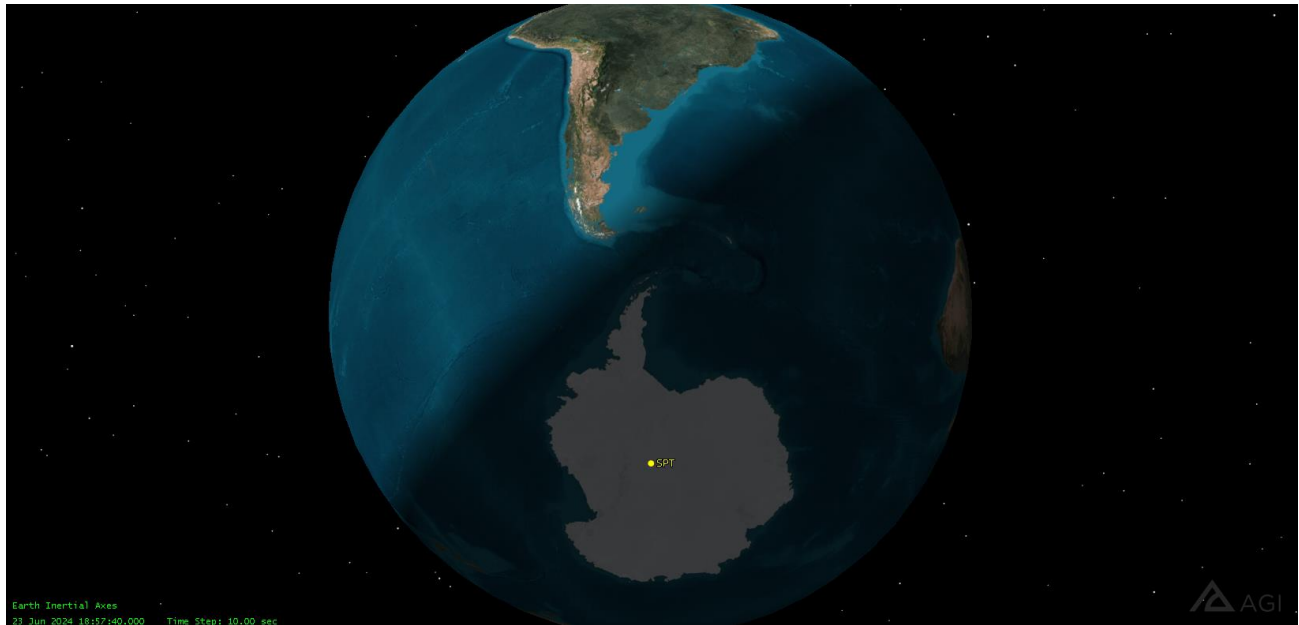


Figura 4-7 Representación – South Pole Telescope.

Con estos antecedentes se procedió a analizar los tiempos de acceso efectivo de cada una de las constelaciones satelitales con la estación terrena, lo cual se resume en la Tabla 4-5. Se debe considerar que los tiempos indicados en esta tabla corresponden al periodo donde se establece una comunicación eficiente, es decir, se logra una tasa de error de bit menor a 10^{-7} .

La verificación de la comunicación efectiva entre transmisor y receptor fue realizada mediante la obtención de la tasa de error desde el software STK, con la modificación que el footprint ya no debe estar fijo y ajustado al ángulo de observación, sino que debe existir un trackeo mutuo entre ambos equipos extremos en el enlace de comunicación.

Tabla 4-5: Disponibilidad de accesos para las constelaciones satelitales.

Constelación Satelital	Tiempo de Acceso	Disponibilidad del enlace
Iridium Next	84.600 segundos	100 %
OneWeb	84.600 segundos	100 %
Telesat Lightspeed	84.600 segundos	100 %
Starlink	84.600 segundos	100 %
Kepler Communications	84.600 segundos	100 %
Kuiper	22.816 segundos	26,9%

El porcentaje de disponibilidad de los enlaces de comunicación es obtenido a través de la ecuación (28):

$$Availability [\%] = 100 - [(100 - \% Cov_{Uplink}) + (100 - Cov_{Downlink})] \quad (28)$$

Como se puede observar, casi todas las constelaciones satelitales bajo estudio cuentan con una disponibilidad de comunicación del 100%, lo cual está asociado a la ubicación geográfica de la estación terrena y distribución de los satélites, puesto que todas las compañías orbitan cercanas al Polo Sur.

El caso de la constelación Kuiper se debe a que las orbitas polares que posee están compuestas por satélites configurados con el mismo Argumento del Perigeo, deduciendo que una comunicación continua en los polos no es una prioridad para esta compañía. Así, al enfocarnos a la tasa de transferencia deseada de 113,12 Mbps se tiene que es equivalente a 9.320.675 Mb/día, y para un sistema con disponibilidad del servicio de 26,9% diario implica transmitir 408,5 Mbps. Por lo tanto, una ventana de visualización más corta requiere transmitir una cantidad mayor de datos.

4.3. Estimación costo ponderado de implementación

De acuerdo con la ponderación para los niveles de madurez tecnológica definida en la Tabla 3-6 se presenta en la Tabla 4-6 el resultado de la ponderación para el desarrollo de una estación terrena, para cada una de las compañías bajo estudio.

Tabla 4-6: Ponderación de implementación de constelaciones satelitales.

Constelación Satelital	Configuración	Ponderación Unitaria
Iridium Next	Cobertura diaria (**)	9
	Banda Espectral	3
	Tipo de Modulación	6
	Comunicación Intersatelital (**)	2
	Altura de la constelación	7
OneWeb	Cobertura diaria (**)	9
	Banda Espectral	6
	Tipo de Modulación	2
	Comunicación Intersatelital (**)	3
	Altura de la constelación	5
Telesat Lightspeed	Cobertura diaria (**)	9
	Banda Espectral	7
	Tipo de Modulación	8
	Comunicación Intersatelital (**)	3
	Altura de la constelación	6
Starlink	Cobertura diaria (**)	9
	Banda Espectral	7
	Tipo de Modulación	6
	Comunicación Intersatelital (**)	3
	Altura de la constelación	8
Kepler Communications	Cobertura diaria (**)	9
	Banda Espectral	6
	Tipo de Modulación	6
	Comunicación Intersatelital (**)	3
	Altura de la constelación	8
Kuiper	Cobertura diaria (**)	2
	Banda Espectral	7
	Tipo de Modulación	6
	Comunicación Intersatelital (**)	3
	Altura de la constelación	8

(**) La ponderación fija, es decir no varía con la cantidad de estaciones terrenas requeridas, ya que depende de la infraestructura satelital en órbita.

Consecuentemente, la Tabla 4-8 resume ponderaciones totales de las estaciones terrenas requeridas para poder transmitir la tasa de datos generada por el SPT. Se declaran las estaciones terrenas requeridas y ponderaciones de desarrollo tecnológico para los rendimientos del ancho de banda conjunto y el uso completo de la sub-banda espectral.

Las estimaciones para el uso completo de la sub-banda espectral de cada una de las constelaciones es realizado en base a la información presentada en la sección 2.2. El resumen de las

sub-bandas utilizadas se detalla en la Tabla 4-7, no considerando en este resumen a las constelaciones Telesat Lightspeed e Iridium Next, puesto que los anchos de banda totales disponibles corresponden a los valores anteriormente expuestos en la Tabla 2-14, de 4.2 GHz y 10.5 MHz, respectivamente.

Tabla 4-7: Sub-bandas de frecuencia usadas en enlace ascendente.

Constelación Satelital	Servicio	Banda de frecuencia	Ancho de banda total
OneWeb	Uplink Usuario – Satélite	12.75 – 13.25 GHz	3.5 GHz
		14.00 – 14.50 GHz	
		27.50 – 30.00 GHz	
Starlink	Uplink Usuario – Satélite	14.00 – 14.50 GHz	1.25 GHz (Ku-Band)
		27.50 – 29.10 GHz	2.40 GHz (Ka-Band)
		29.50 – 30.00 GHz	
Kepler	Downlink	10,70 – 12,70 GHz	2,00 GHz
	Uplink	14.00 – 14.50 GHz	0,50 GHz
Kuiper	Uplink Usuario – Satélite	12.75 – 13.25 GHz	1.0 GHz (Ku-Band)
		14.00 – 14.50 GHz	

De la Tabla 4-7 se destaca que a pesar de que cada constelación satelital entrega las facilidades para transmitir altas tasas de datos mediante la agrupación de canales, en ocasiones este método no se ajusta a los reales requerimientos de transmisión deseados. Es por esto que en sitios donde la demanda de múltiples usuarios no es atingente, es posible destinar todos los recursos espectrales de un sistema satelital para dar solución a un requerimiento de alta tasa de transferencia de datos.

El Proyecto Kuiper también ha realizado solicitudes a la FCC para el uso de la banda V, sin embargo, el análisis de esta banda espectral no se considera para la estimación de nuestro rendimiento máximo, puesto que no es información confirmada ya que esta red satelital aún no se encuentra desplegada.

Para el análisis de la constelación Starlink se decidió trabajar sólo con la banda Ku (Ancho de banda total 1250 MHz en sentido ascendente), puesto que corresponde a la banda espectral con la cual se cuenta con antecedentes empíricos [56], además de contener en el rango de tasas de transmisión obtenidas en estas pruebas el rendimiento publicado por la compañía en su página web.

Por lo tanto, haciendo un uso total y dedicado del espectro electromagnético aprobado por la FCC para cada compañía satelital es posible aumentar la tasa de transferencia de datos para cada sistema. En este aspecto, la constelación OneWeb aumentó su rendimiento a 0,23 Mbps utilizando aún un esquema de modulación BPSK, Starlink logró una tasa de transferencia de 17,5 Mbps con una modulación de 64-QAM; Kepler alcanzó los 30 Mbps de transmisión ascendente y el sistema del Proyecto Kuiper puede ser capaz de transmitir 5,6 Mbps. Las constelaciones Telesat Lightspeed e Iridium Next no sufrieron modificaciones en la tasa de datos transmitida, puesto que su ancho de

banda no sufrió cambios.

Estos datos entregados previamente arrojan que las constelaciones satelitales tales como Starlink y Kuiper aumentaron su tasa de transmisión en 2,5 y 2,3 veces, con el solo hecho de utilizar toda la banda espectral autorizada por la FCC. Con la constelación Starlink particularmente se obtuvieron datos muy cercanos a los referenciados en los antecedentes bibliográficos de 25 Mbps.

Por otro lado, las constelaciones OneWeb y Kepler lograron aumentar su rendimiento un factor de 8 y 12,32 veces, sin embargo, aún se encuentran bastante lejos de los resultados publicados en los antecedentes bibliográficos a la fecha. Esta situación se puede deber a que ambas constelaciones podrían utilizar esquemas de modulación más avanzados que los descritos en las pruebas de la FCC, por lo que no es posible sacarle un provecho adecuado a esta característica, debido a la reducida eficiencia que poseen.

Tabla 4-8: Costo ponderado de estaciones terrenas para soporte de datos de transferencia.

Constelación Satelital	ET_{CH}	$DT_{Uplink_{CH}}$	$Costo_{CH}$	ET_{TOTAL}	$DT_{Uplink_{TOT}}$	$Costo_{TOTAL}$
Iridium Next	2.263	113,15 Mbps	61.101	2.263	113,15 Mbps	61.101
OneWeb	3.771	113,13 Mbps	94.275	492	113,16 Mbps	12.300
Telesat Lightspeed	4	137,2 Mbps	132	4	137,2 Mbps	132
Starlink	17	119 Mbps	561	7	122,5 Mbps	231
Kepler	46	115 Mbps	1.472	4	123 Mbps	128
Kuiper	171	410,4 Mbps	1.248	73	408,80 Mbps	1.898

Como se puede observar en la Tabla 4-8, considerando la zona geográfica del Polo Sur y el propósito deseado de transmitir una alta tasa de datos desde un sitio específico, las constelaciones no requieren generar cientos o miles de canales para lograr cubrir este requerimiento sino más bien concentrar sus recursos mediante la agrupación de canales y tratar de usar todo el espectro disponible para este fin.

En este sentido, todas las constelaciones satelitales bajo estudio cumplen con nuestro requerimiento de transmisión de una tasa de datos específica, sin embargo, la ponderación de implementación asociado varía considerablemente entre ellas. En este sentido las constelaciones que entregan mejores prestaciones a nuestros requerimientos son Kepler, Telesat y Starlink, sin embargo, la tecnología avanzada que utilizan sus sistemas de transmisión, modulación y corrección de errores, traen consigo otros factores secundarios que no fueron considerados en este estudio, tales como el requerimiento energético de sus equipos, por la generación de calor asociada. Sin embargo, cada una requiere proyectar más de cien estaciones terrenas o terminales usuarios para poder segmentar los

datos y transmitir la información, lo que resulta poco factible.

Los casos de Telesat y Kepler sobresalen debido a que pueden compartir su ancho de banda para transmitir y recibir datos, a diferencia de las otras compañías que poseen sub-bandas definidas para una de las dos labores. Y al menos la primera de estas compañías cuenta con un esquema de modulación y codificación adaptativa, lo cual la hace adecuada para implementarse en comunicaciones satelitales donde la variabilidad de canal juega un rol relevante para una transmisión efectiva de los datos. Entre estos dos sistemas satelitales, el mejor rendimiento reflejado por la compañía Kepler Communications se debe a la menor altura en la cual se encuentra implementada la red, lo cual reduce las pérdidas generadas por el canal.

Starlink por otra parte, no cuenta con registros de utilizar un esquema de modulación y codificación adaptativa, por lo que aprovecha su amplio ancho de banda y baja altura de la constelación satelital para lograr altas tasas de transmisión. Se debe considerar que los datos publicados, a la fecha, en los antecedentes bibliográficos para el sistema Starlink corresponden cuando esta red hace uso sólo de su espectro en la banda Ku, lo que implica que cuando la compañía tenga completamente operativa su red de comunicaciones contará con 1,25 GHz en la banda Ku y 2,4 GHz en la banda Ka, además de ancho de banda en la banda V con una cantidad espectral aún no identificada por parte de la FCC, permitiéndole aumentar la cantidad de datos a ser transmitidos.

Por otro lado, la constelación Iridium Next es la que presenta menores prestaciones para la transmisión de altas tasas de datos, lo que implica la necesidad de una gran cantidad de estaciones terrenas, lo cual encarece el proyecto además de requerir una amplia área para poder implementar esta solución, reduciendo así su viabilidad. Por ejemplo, basados en el Hawk u8 – LEO de la compañía Kymeta [51] se cuenta que esta antena posee un área superficial de $0,81 \text{ m}^2$, por lo tanto, la implementación de todas las estaciones terrenas estimadas previamente implicaría en el requerimiento de un espacio superior a 1.830 m^2 .

El caso de OneWeb es más crítico, puesto que no existen pruebas de su sistema de transmisión para altas tasas de transferencia, por lo tanto, no se cuentan con registros de las capacidades de su sistema de modulación y codificación adaptativo. Por ejemplo, si se modifica su esquema de modulación a 64-QAM mediante su sistema ACM, la cantidad de estaciones terrenas se reduciría hasta 9 equipos, al utilizar todo el espectro de frecuencia autorizado por la FCC.

Finalmente, el Proyecto Kuiper que presenta sólo un 26,9% de disponibilidad del servicio, obligaría casi a triplicar la cantidad de estaciones terrenas requeridas a diferencia de si se contara con una visualización del 100% al sitio de interés durante el día, esta situación implica usar múltiples

canales y a su vez múltiples equipos en tierra para lograr la tasa de datos deseada lo que deriva en un aumento de la interferencia por canales adyacentes reduciendo a su vez el rendimiento del sistema.

En este sentido y para dar respuesta a las dudas planteadas en la hipótesis en un principio se tiene que, tal como se ha observado a través de las simulaciones de las constelaciones satelitales, estas cuentan con la capacidad de transmitir altas tasas de información, sin embargo, al igual que los sistemas de comunicaciones utilizados en zonas urbanas, se prioriza la tasa de datos bajada para dar servicio a los usuarios, dejando reducidos anchos de banda disponibles para las transmisiones ascendentes, los cuales son aptos para transmitir altas tasas de datos siempre y cuando la tecnología se complemente con otros métodos como la segmentación de datos.

Por otro lado, la optimización de las estaciones terrenas para cumplir con los requerimientos de transmisión viene por el hecho de reducir los costos de implementar más de estos equipos, y en su lugar integrar tecnología para otorgar mejores capacidades de procesamiento de la información a las estaciones existentes. Esto debido a que la implementación de más estaciones terrenas trae consigo costos fijos escalables no considerados en nuestro análisis, tales como obras civiles, logística, equipos de respaldo energético y el costo asociado a labores de mantenimiento y la operación del sistema (OPEX).

Estos aspectos limitantes en la tecnología integrada en las estaciones de operación se deben a que las constelaciones satelitales no fueron diseñadas inicialmente para proveer altas tasas de transferencia en el enlace ascendente, sino que el foco de todas estas compañías es proveer de servicios a los usuarios ubicados en sitios remotos o apartados de una infraestructura de telecomunicaciones. Sin embargo, considerando que las estaciones terrenas no se encuentran especificadas detalladamente en las solicitudes de la FCC, es posible proponer mejoras como las indicadas en este proyecto para aumentar la tasa de transferencia de datos que se desea transmitir.

Otras mejoras podrían corresponder al intercambio de información entre constelaciones satelitales, lo cual traería consigo otros factores como la sincronización de los datos y los parámetros técnicos entre las distintas compañías. Además, de acuerdo con la disponibilidad de los sistemas de comunicaciones, según los resultados derivados del software STK, existirán pocos periodos en los cuales los dispositivos proyectados no cuenten con visibilidad.

Por lo tanto, se propone considerar la comunicación entre constelaciones para los sistemas que no cuentan con comunicación intersatelital o cuyo sistema sea ineficiente al utilizar enlaces de radiofrecuencia por sobre enlaces ópticos para este fin, lo que implicaría a modificar sólo algunos de los dispositivos en órbita para las constelaciones involucradas.

4.4. Optimización del sistema

Analizado los resultados previos, se propone una optimización de los sistemas de transmisión mediante la búsqueda del esquema de modulación que permita reducir el costo ponderado del sistema y aumentar la tasa de datos de cada sistema satelital.

De esta forma, para un $BER = 10^{-7}$ se obtuvo la razón señal a ruido para diferentes esquemas de modulación, entre los que se destaca BPSK, QPSK, DE-QPSK, 16-QAM, 16-APSK, 32-QAM, 64-QAM, etc.

La Figura 4-8 (a) presenta una visualización de la tasa de datos obtenida para cada sistema satelital al utilizar distintos esquemas de modulación, mientras que la Figura 4-8 (b) presenta la tasa de datos capaz de ser obtenida por cada sistema haciendo uso de la reutilización de frecuencia.

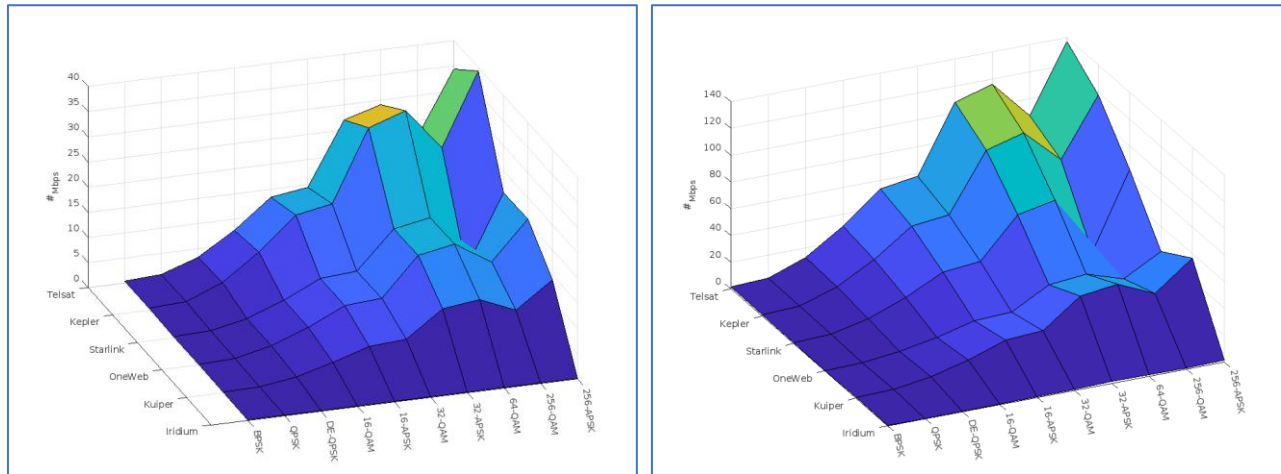
El factor de reutilización de frecuencias corresponde al número veces que una frecuencia puede ser reutilizada en una red de comunicaciones sin que haya interferencias significativas entre las señales y cuyo factor k se encuentra definido en la Tabla 2-14 para cada constelación satelital. Para entender esto es necesario recordar que los sistemas de comunicación de última generación cuentan con la tecnología para generar múltiples haces dentro de un área en lugar de un único haz de amplia cobertura que abarque todo el sitio de interés, concepto conocido como Multibeam.

La implementación de un factor de reutilización de frecuencia es posible realizarlo a través de dos métodos en el sentido ascendente de las comunicaciones, siendo el primer caso la proyección de múltiples estaciones terrenas distanciadas geográficamente para establecer comunicación con un único satélite a través del uso de la misma frecuencia. La consideración que debe tenerse al implementar este método es que las estaciones terrenas que se integren a un mismo satélite deben contar con una polarización ortogonal entre ellas.

El segundo método corresponde a tener una única estación terrena y múltiples satélites orbitando a su alrededor, por lo que la estación terrena asigna frecuencias específicas de forma dinámica a cada satélite con el que se comunica, puesto que los satélites LEO están en constante movimiento. Esta implementación se ve beneficiada de la proyección de antenas direccionales en las estaciones terrenas ya que reduce las interferencias co-canal, además de la utilización de la formación de haces, conceptos que respaldan la utilización de arreglos de antenas en fase.

Así, la reutilización de frecuencias presenta ventajas destacables en el aumento de capacidad de transmisión, permitiendo conexiones simultáneas sin necesidad de frecuencias adicionales lo que genera una optimización del espectro electromagnético, lo que obliga a tener una gestión cuidadosa

de las frecuencias para evitar interferencias.



(a) Sin reutilización de frecuencias; (b) Con reutilización de frecuencias

Figura 4-8 Evaluación de esquemas de modulación.

La Figura 4-8 (a) entrega como resultado que el uso de los esquemas de modulación de la familia M-APSK alcanza una mayor tasa de datos que la familia M-QAM. En la Tabla 4-9 se presentan los resultados asociados al proceso de optimización del esquema de modulación. Para las constelaciones satelitales OneWeb, Telesat y Kuiper que poseen dentro de su desarrollo tecnológico un esquema de modulación adaptativo (ACM) se evalúa su rendimiento considerando todas las modulaciones simuladas, sin embargo, las constelaciones de Iridium Next, Starlink y Kepler son evaluadas con un esquema máximo de 64-QAM.

Tabla 4-9: Sistema de comunicaciones satelitales optimizado.

Constelación Satelital	Tipo de modulación	Tasa de datos alcanzada (*)	Tasa de datos alcanzada (†)	Ponderación Unitaria	Estaciones Terrenas Requeridas (*)	Estaciones Terrenas Requeridas (†)
Iridium Next	64-QAM	0,1 Mbps	1,3 Mbps	27	1.131	87
OneWeb	256-APSK	20,8 Mbps	41,7 Mbps	32	6	3
Telesat Lightspeed	256-APSK	34,3 Mbps	137 Mbps	34	4	1
Starlink	64-QAM	17,5 Mbps	70 Mbps	33	7	2
Kepler Communications	64-QAM	33,3 Mbps	100 Mbps	32	4	2
Kuiper	256-APSK	14,3 Mbps	57 Mbps	29	29	8

(*) Valores obtenidos sin considerar reutilización de frecuencia.

(†) Valores obtenidos considerando reutilización de frecuencia.

Con los resultados descritos en la Tabla 4-9 se observa que el uso de esquemas de modulación

más sofisticados, sin reutilización de frecuencias, influye directamente en la tasa de transferencia de datos, reduciendo cerca de un 50% la cantidad de estaciones terrenas requeridas para Iridium Next, un 60% para Kepler y sobre un 98% para OneWeb. Por otro lado, la cantidad de estaciones terrenas para los sistemas Telesat Lightspeed, Starlink y Kuiper no presentan modificaciones en sus cantidades.

En cambio, si se implementan comunicaciones con reutilización de frecuencias se observan mejoras en los sistemas de todas las compañías. Esto se ve reflejado en la reducción de un 92% de las estaciones terrenas proyectadas para Iridium Next, sin embargo, la cantidad resultante es de 87 dispositivos, lo que corresponde a una cantidad con poca factibilidad en su implementación. El resto de las constelaciones satelitales exponen un requerimiento menor a 10 equipos transmisores, lo que resulta en una condición más lograda de poner en servicio.

Con estos resultados se tiene que la constelación más recomendada para ser utilizada en la transmisión de datos es Telesat Lightspeed, puesto que con una adecuada configuración de su sistema transmisor y una gestión del espectro electromagnético es capaz de utilizar una sola estación terrena para transmitir los datos generados por el South Pole Telescope. Este sistema es seguido de cerca por las constelaciones Kepler, Starlink y OneWeb, respectivamente, lo cual se debe al uso de un esquema de modulación más avanzado y el amplio ancho de banda disponible.

El caso de Iridium Next, como se indicó previamente, continúa requiriendo gran cantidad de estaciones terrenas transmisoras, lo cual se debe a que esta constelación fue creada para servicios IoT no para la transferencia de altas tasas de datos.

Kuiper toma el quinto lugar entre las constelaciones evaluadas que requieren menos estaciones terrenas para la transmisión de altas tasas de datos, lo que se debe a su limitada visibilidad entre estación terrena y satélites durante el día, situación que se puede corregir modificando el Argumento del Perigeo en sus satélites en órbita.

Finalmente, si existe la posibilidad de utilizar el esquema de modulación que entregue mejores prestaciones para la transmisión de los datos generados por el South Pole Telescope, habría que realizar modificaciones a los equipos en órbita para que acepten el esquema de modulación 256-APSK habilitado por el estándar DVB-S2X. Los resultados para las compañías Telesat, OneWeb y Kuiper ya están declarados en la Tabla 4-9, mientras que Starlink logra una tasa de transmisión 82,6 Mbps (2 estaciones terrenas), Iridium alcanza 1,5 Mbps (76 estaciones terrenas) y Kepler alcanza un rendimiento de 117,9 Mbps requiriendo un solo equipo transmisor, al igual que lo expresado por Fletcher en [63].

Capítulo 5. CONCLUSIONES

5.1. Resumen

Para el desarrollo del trabajo presentado, se han estudiado diversos aspectos y características de la próxima generación de constelaciones satelitales, que buscan explorar los beneficios de utilizar satélites en órbita LEO para dar cobertura en zonas de difícil acceso. La evaluación de las constelaciones satelitales se centró en proporcionar comunicación en el Polo Sur para la transmisión de datos desde el Telescopio del Polo Sur (SPT), con el objetivo de contribuir al Telescopio Horizonte de Eventos (EHT).

La evaluación de las constelaciones satelitales consideró la simulación de los dispositivos asociados a las compañías Telesat Canadá, OneWeb, Iridium, SpaceX, Amazon y Kepler Communications, lo que permitió conocer la cobertura y disponibilidad que cada una de ellas entregaba en el Polo Sur, además de comparar distintas tecnologías y métodos de comunicación.

Los datos considerados para la simulación, cálculos y estimación de ponderaciones de cada una de las compañías satelitales fueron extraídos de los documentos publicados en la FCC, asumiendo como verídicos las últimas modificaciones subidas cronológicamente.

La estimación de ponderaciones de implementación se basó en una modificación a la metodología planteada por Aguilar [47], en la cual se le asignaban distintas ponderaciones a las tecnologías o técnicas de comunicación utilizada por las distintas constelaciones.

5.2. Conclusiones

Finalmente, con los resultados obtenidos se ha demostrado que las constelaciones satelitales Starlink, Telesat Lightspeed, Kuiper, OneWeb, Kepler Communications e Iridium Next, pertenecientes al grupo de constelaciones satelitales de la siguiente generación, cuentan con las capacidades técnicas para transmitir altas tasas de datos, comparables a lo requerido por el South Pole Telescope (113,12 Mbps), en beneficio del EHT. Sin embargo, la cantidad de estaciones terrenas requeridas para este propósito hace que la implementación de algunas de ellas no sea factible desde el punto de vista de la logística asociada.

Entre las constelaciones satelitales bajo estudio, la que presentó mejores capacidades para transmitir altas tasas de datos, fue la constelación Telesat Lightspeed de la compañía Telesat Canadá, alcanzando 137 Mbps para un 100% de disponibilidad de la constelación satelital hacia la estación terrena. Esta tasa de transferencias es lograda utilizando todo el espectro electromagnético habilitado por la FCC, un esquema de modulación de 256-APSK, el método de reutilización de frecuencias y el uso de segmentación de paquetes de datos para así generar múltiples canales y transmitir a través de múltiples haces desde la estación terrena hacia los satélites en órbita de forma simultánea.

Otras constelaciones satelitales, preliminarmente diseñadas para la transmisión de altas tasas de datos, no cuentan con una declaración de los esquemas de modulación utilizados, por lo tanto, se cuenta con un conocimiento limitado de sus capacidades. De forma similar, este trabajo respalda que algunas constelaciones satelitales a pesar de entregar cobertura global sólo están diseñadas para soportar servicios de bajas tasas de transferencia, como es el caso de productos IoT.

Luego del análisis de transferencia de datos de las constelaciones satelitales, en base a los parámetros orbitales publicados por las compañías se procedió a analizar a optimizar dichas tasas de transferencia, buscando en primera instancia el esquema de modulación más adecuado para la constelación proyectada y posteriormente hacer uso de la reutilización de frecuencia para así lograr una mejor eficiencia espectral.

En conclusión, este trabajo entrega una primera aproximación para el análisis de alternativas que permitan recuperar datos desde el South Pole Telescope, en beneficio del EHT. El análisis se consideró comparando las tasas de datos capaz de transmitir cada constelación satelital, además de una comparación de métricas que permitían ponderar distintas características entorno a su implementación.

En resumen, las compañías que entregan mejores prestaciones y debiesen ser consideradas para establecer un sistema de comunicación satelital en el Polo Sur para la transmisión de datos desde el South Pole Telescope (SPT) es Telesat Lightspeed, puesto que con una sola estación terrena se logra cubrir la tasa de datos deseada. Kepler, también es capaz de con un solo equipo transmisor alcanzar una tasa de transferencia superior a 113,12 Mbps, sin embargo, para esto debe soportar un esquema de modulación de 256-APSK.

No se descarta la utilización de otras constelaciones satelitales tales como Starlink y OneWeb, puesto que pueden funcionar de respaldo o para un análisis a priori de los datos generados por el South Pole Telescope. La implementación del Proyecto Kuiper quedará pausada, a la espera de que Amazon implemente modificaciones al parámetro Argumento del Perigeo en sus satélites en órbita, con el objetivo de aumentar la disponibilidad de servicio diaria entre la estación terrena y los equipos en órbita.

En base al trabajo desarrollado, no se recomienda la utilización de la constelación Iridium Next debido a la baja tasa de transferencia que posee su sistema, implicando una gran cantidad de estaciones transmisoras para lograr el rendimiento deseado.

Se debe considerar que la cantidad de datos generados por el SPT puede aumentar hasta en cuatro veces en el corto o mediano plazo con el aumento de las observaciones, la instalación de nuevos telescopios en la Antártida y la duplicación o triplicación de las bandas de frecuencias de observación. Por lo tanto, la implementación de cualquier constelación debe implicar la gestión y administración de recursos para operar simultáneamente con las demás constelaciones analizadas.

5.3. Trabajo Futuro

Como trabajo futuro y/o complementario al presente proyecto de tesis se pueden describir las siguientes actividades:

- Evaluación de convivencia espacial de constelaciones satelitales: Debido al costo computacional que implica simular más de una constelación satelital de forma simultánea, se limitó el alcance de este estudio a la simulación independientes de las constelaciones, lo que excluye el estudio de cómo funcionarían de forma conjunta los sistemas satelitales. Por lo tanto, una actividad futura podrá implicar un estudio conjunto que considere el análisis de la convivencia de estos grupos de satélites.
- Acuerdos con compañías satelitales para testeo de su infraestructura: De acuerdo con la información existente en la literatura y entregada a la FCC, varias compañías satelitales se han abierto con entidades académicas para probar sus sistemas de comunicación en propósitos de investigación. Por lo tanto, un trabajo futuro puede considerar acuerdos con estas compañías satelitales para adquirir a través de ellos sus sistemas. No se recomienda en estos casos la compra independiente de sus estaciones terrena, puesto que se requiere un contrato precio de confidencialidad de los datos.
- Ampliar constelaciones bajo análisis: El presente trabajo consideró constelaciones satelitales que ya han iniciado su proceso de construcción y/u operación, a través de su respectivo proceso de registro en la FCC, sin embargo, durante el proceso de investigación varias entidades se pronunciaron sobre su intención de construir mega constelaciones satelitales con cobertura global. Se desconoce si estos nuevos sistemas contarán con equipos en órbita polar y LEO, o si los sistemas considerados en este estudio sufrirán modificaciones, pero una actividad futura debe contemplar una actualización de la información presentada.

Bibliografía

- [1] M. A. Arifn and N. M. N. Khamsah, "A Case Study in User Capacity Planning for Low Earth Orbit Communication Satellite," 2018 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES), 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICARES.2018.8547056.
- [2] Channasandra Ravishankar, John Corrigan and Rajeev Gopal, "High Data Rate and Bandwidth Efficient Designs for Satellite Communication Systems"; AIAA 2017-5417, Session: High Data Rate Architectures and Bandwidth Efficient Schemes II, Published Online:23 Oct 2017<https://doi.org/10.2514/6.2017-5417>.
- [3] Inigo del Portillo, Bruce G. Cameron, Edward F. Crawley, "A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband"; Acta Astronautica, Volume 159, 2019, Pages 123-135, ISSN 0094-5765.
- [4] Nils Pachler and Iñigo Del Portillo and Edward F. Crawley and Bruce G. Cameron, "An Updated Comparison of Four Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband"; 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 2021, pages 1-7.
- [5] Silva García, Carlos (2022); Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatenco, México; "Estudio de la coexistencia entre las mega constelaciones satelitales de órbita baja".
- [6] Flink, E. (2020). A simple fragmentation protocol for satellite telemetry: Transmission of large telemetry from the MIST satellite (Dissertation). Retrieved from <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-279417>.
- [7] Vázquez Frías, Ignacio; Rodríguez Donaire, Silvia; García-Almiñana, Daniel; GRAU EN ENGINYERIA EN TECNOLOGIES AEROESPACIALS (Pla 2010); Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Organització d'Empreses; 2022; "Study of the benefits and applications of LEO (Low Earth Orbit) for Communications and definition of space new business models. Case study: Telesat".
- [8] Ma, S., Chou, Y. C., Zhao, H., Chen, L., Ma, X., & Liu, J. (2022). Network Characteristics of LEO Satellite Constellations: A Starlink-Based Measurement from End Users. arXiv preprint

arXiv:2212.13697.

- [9] Kuiper Systems LLC. (2021, November). Application for Fixed Satellite Service by Kuiper Systems LLC. Federal Communications Commission (FCC). Filed by Jennifer D. Hindin. <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20211104-00145>
- [10] Kepler Communications Inc. (2016, November). Application for Fixed Satellite Service by Kepler Communications Inc. Federal Communications Commission (FCC). Filed by Nick G. Spina. <https://fcc.report/IBFS/SAT-PDR-20161115-00114>
- [11] Kepler Communications Inc. (2020, May). Application for Fixed Satellite Service by Kepler Communications Inc. Federal Communications Commission (FCC). Filed by Kepler Communications Inc. <https://fcc.report/IBFS/SAT-PDR-20200526-00059>
- [12] Kepler Communications Inc. (2021, July). Application for Fixed Satellite Service Other by Kepler Communications Inc. Federal Communications Commission (FCC). Filed by Simon Molgat Laurin. <https://fcc.report/IBFS/SES-LIC-INTR2021-02869>
- [13] Space Exploration Holdings, LLC. (2019, August). Application for Fixed Satellite Service by Space Exploration Holdings, LLC. Federal Communications Commission (FCC). Filed by Brita D. Strandberg. <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20190830-00087>
- [14] Space Exploration Holdings, LLC. (2020, April). Application for Fixed Satellite Service by Space Exploration Holdings, LLC. Federal Communications Commission (FCC). Filed by William Wiltshire. <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20200417-00037>
- [15] Space Exploration Holdings, LLC. (2021, August). Application for Fixed Satellite Service by Space Exploration Holdings, LLC. Federal Communications Commission (FCC). Filed by William Wiltshire. <https://fcc.report/IBFS/SAT-AMD-20210818-00105>
- [16] Telesat Canada. (2016, November). Application for Fixed Satellite Service by Telesat Canada. Federal Communications Commission (FCC). Filed by Jonathan L. Wiener. <https://fcc.report/IBFS/SAT-PDR-20161115-00108>
- [17] Telesat Canada. (2020, May). Application for Fixed Satellite Service by Telesat Canada. Federal Communications Commission (FCC). Filed by Joseph A. Godles and Ryan N. Terry. <https://fcc.report/IBFS/SAT-MPL-20200526-00053>
- [18] Telesat LEO Inc. (2021, November). Application for Fixed Satellite Service by Telesat LEO

- Inc. Federal Communications Commission (FCC). Filed by Joseph A. Godles Esq. <https://fcc.report/IBFS/SAT-PPL-20211104-00138>
- [19] WorldVu Satellites Limited. (2016, April). Application for Fixed Satellite Service by WorldVu Satellites Limited. Federal Communications Commission (FCC). Filed by Brian D. Weimer. <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOI-20160428-00041>
- [20] WorldVu Satellites Limited. (2021, January). Application for Fixed Satellite Service by WorldVu Satellites Limited. Federal Communications Commission (FCC). Filed by Brian D. Weimer. <https://fcc.report/IBFS/SAT-MPL-20210112-00007>
- [21] WorldVu Satellites Limited, Debtor-in-Possession. (2020, May). Application for Fixed Satellite Service by WorldVu Satellites Limited. Federal Communications Commission (FCC). Filed by Brian D. Weimer. <https://fcc.report/IBFS/SAT-MPL-20200526-00062>
- [22] WorldVu Satellites Limited. (2021, November). Application for Fixed Satellite Service by WorldVu Satellites Limited. Federal Communications Commission (FCC). Filed by Brian D. Weimer. <https://fcc.report/IBFS/SAT-MPL-20211104-00144>
- [23] Iridium Carrier Services LLC. (1996, January). Application for Domestic Fixed Satellite Service Mobile Satellite Service by IRIDIUM CARRIER SERVICES LLC. Federal Communications Commission (FCC). Filed by Steptoe & Johnson LLP. <https://fcc.report/IBFS/SES-LIC-19960116-01967>
- [24] Iridium Constellation LLC. (2013, December). Application for Mobile Satellite Service by Iridium Constellation LLC. Federal Communications Commission (FCC). Filed by Jennifer D. Hindin. <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20131227-00148>
- [25] Iridium Constellation LLC. (2015, October). Application for Mobile Satellite Service by Iridium Constellation LLC. Federal Communications Commission (FCC). Filed by Jennifer D. Hindin. <https://fcc.report/IBFS/SAT-AMD-20151022-00074>
- [26] Thales Alenia Space/Master Image Programmes, IRIDIUM NEXT – SETTING THE STANDARD IN CONSTELLATIONS, <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press-release/iridium-next-setting-standard-constellations>, 09/2018.
- [27] Krebs, Gunter D. “Iridium-NEXT”. Gunter's Space Page. Retrieved February 16, 2024, from

https://space.skyrocket.de/doc_sdat/iridium-next.htm.

- [28] The IRIDIUM system. Internet Archive. <https://web.archive.org/web/20180514111719/http://www.iridium.it/en/iridium.htm>, 2018, May 14.
- [29] Proakis, J. Digital Communications. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [30] Pozar, D. M. (2012). *Microwave Engineering* (4th ed.). Wiley.
- [31] Carlson, A. B., & Crilly, P. B. (2009). *Communications Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- [32] Radiocommunication Sector of International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.840-9: Attenuation due to clouds and fog. 2013.
- [33] Radiocommunication Sector of International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.838-3: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. 2005.
- [34] Radiocommunication Sector of International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.676-13: Attenuation by atmospheric gases 2013.
- [35] National Snow and Ice Data Center (NSIDC). (n.d.). *Antarctic Meteorology and Climate*. Retrieved from NSIDC.
- [36] Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Program. (n.d.). *Research Data and Publications*. U.S. Department of Energy. Retrieved from ARM.
- [37] National Centers for Environmental Information (NCEI), NOAA. (n.d.). *Climate Data Online*. Retrieved from NOAA
- [38] WeatherSpark. (n.d.). *Average Weather in South Pole, Antarctica*. Retrieved from WeatherSpark.
- [39] Haykin, S. (2008). *Communication systems* (4th ed.). Wiley.
- [40] Dolphin, L., Speidel, U., Fuli, F. J. E., & Tu, W. (2020). *Network coding over satellite links: Scheduling redundancy for better goodput*. APNIC Foundation. <https://apnic.foundation/projects/network-coding-over-satellite-links-scheduling-redundancy-for-better-goodput/technicalreport/>
- [41] NASA. (2019). *Technical Report: Network Coding over Satellite Links*. NASA Technical

<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190029259/downloads/20190029259.pdf>.

- [42] SatMagazine. (s.f.). Telesat's Lightspeed LEO Network poised to transform global communications. SatMagazine.
<http://www.satmagazine.com/story.php?number=1026762698>
- [43] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2006, May 19). Draft Iridium technical specification Version 1.1 [PDF]. ICAO. <https://www.icao.int/safety/acp/ACPWGF/ACP-WG-M-11/ACP-WGM11-WP04-Draft%20Iridium%20Technical%20Specification%20Version%201.1%20-%20051906.pdf>
- [44] Kim, E., Andrews, J. G., & Roberts, I. P. Feasibility Analysis of In-Band Coexistence in Dense LEO Satellite Communication Systems. The University of Texas at Austin, USA; University of California, Los Angeles, USA.
- [45] Ansys. (2023). Ansys STK | Digital mission engineering software. Ansys. Recuperado de <https://www.ansys.com/products/missions/ansys-stk>.
- [46] Merino Fernández, I. (2021). *Análisis y diseño de arrays de antenas en fase para constelaciones de satélites LEO* (Tesis de maestría). Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España.
- [47] Aguilar, A., Butler, P., Collins, J., Guerster, M., Kristinsson, B., McKeen, P., Cahoy, K., & Crawley, E. F. (2019). Tradespace Exploration of the Next Generation Communication Satellites. AIAA Scitech 2019 Forum, San Diego, California. <https://doi.org/10.2514/6.2019-0768>
- [48] ThinKom Solutions. (2024) ThinSat Mobile SATCOM Antennas. Recuperado de <https://www.thinkom.com/ground/mobile>
- [49] Intellian. (2024). Satellite Communication. Recuperado de <https://www.intelliantech.com/en/products/#section-satellitecommunication>.
- [50] Cobham SATCOM. (2024). Tracker Antennas. <https://cobham-satcom.com/tracker>.
- [51] Kymeta. (2024). Hawk u8. <https://www.kymetacorp.com/solutions/hawk-u8-leo/>.
- [52] DVB. (2021, January 28). *Implementation guidelines for the second-generation system for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications*;

- Part 2: S2 Extensions (DVB-S2X)*. DVB. <https://dvb.org/?standard=dvb-s2x-implementation-guidelines>
- [53] DVB. (2019, December). *DVB-S2X highlights - White paper*. DVB. https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a172_dvb-s2x_highlights_-_white_paper.pdf
- [54] SpaceX. (2024). *Starlink Specifications*. Recuperado de <https://www.starlink.com/legal/documents/DOC-1400-28829-70>.
- [55] Ookla. (2024). *Speedtest by Ookla*. Recuperado de <https://www.speedtest.net/>
- [56] Huston, G. (2024). *A transport protocol's view of Starlink*. APNIC Blog. Recuperado de <https://blog.apnic.net/2024/05/17/a-transport-protocols-view-of-starlink/>
- [57] Jackson, M. (2023). *OneWeb LEO Satellite Test Delivers 195Mbps Broadband Speed*. ISPreview UK. Recuperado de <https://www.ispreview.co.uk/index.php/2023/06/oneweb-leo-satellite-test-delivers-195mbps-broadband-speed.html>
- [58] Embrands. (2024). *Open Port Iridium*. Recuperado de <https://embrands.com/producto/open-port-iridium/>
- [59] Spaceflight101. (2024). *Iridium-NEXT: Spacecraft & Satellites*. Recuperado de <https://spaceflight101.com/spacecraft/iridium-next/>
- [60] Telesat. (2024). *Universal Connectivity*. Recuperado de <https://www.telesat.com/universal-connectivity/>
- [61] GlobeNewswire. (2022). *Spacecom Completes Successful Testing Campaign of Telesat's LEO Demonstration Satellite*. Recuperado de <https://www.einpresswire.com/article/606089019/spacecom-completes-successful-testing-campaign-of-telesat-s-leo-demonstration-satellite>
- [62] PLDT. (2023). *PLDT and Telesat make country's first successful broadband connection using low Earth orbit*. Recuperado de https://main.pldt.com/article/pldt-telesat-make-countrys-first-successful-broadband-connection-using-low-earth-orbit?cl_system=mapi&cl_system_id=872c3779-f38c-44d7-9a28-0006e624bd26&clreqid=872c3779-f38c-44d7-9a28-0006e624bd26&kbid=88472
- [63] Fletcher, B. (2023). *Kepler delivers 120 Mbps uplink to Arctic via satellite broadband*. Fierce Network. Recuperado de <https://www.fierce-network.com/tech/kepler-delivers-120-mbps->

uplink-to-arctic-via-satellite-broadband.

- [64] Meter.net. (2024). *Amazon aims for space. Kuiper project to assist*. Recuperado de <https://www.meter.net/news/amazon-aims-for-space-kuiper-project-to-assist/>.
- [65] VTR. (2024). *Internet Hogar*. Recuperado de <https://vtr.com/productos/hogar-packs/internet-hogar/>.