

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

UNIDAD ZACATENCO

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

SECCIÓN DE COMUNICACIONES

**“Estudio de la coexistencia entre las mega
constelaciones satelitales de órbita baja”**

T E S I S

Que presenta

CARLOS SILVA GARCÍA

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

**EN LA ESPECIALIDAD DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Director de la Tesis:

Dr. Hildeberto Jardón Aguilar

Ciudad de México

Abril, 2022

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a mi familia y amigos el apoyo brindado en todo momento, la motivación y confianza que depositaban en mi para realizar este trabajo fue clave para llegar hasta aquí.

Al Dr. Hildeberto Jardón Aguilar por su gran apoyo, guía, conocimiento y paciencia durante la realización de este trabajo.

Al Mtro. Ángel Pérez Miguel y al Mtro. Rubén Flores Leal, quienes me apoyaron mediante sus consejos y asesorías para la realización de algunos apartados de este trabajo.

Al CINVESTAV y al CONACYT por el apoyo académico y económico brindado para la realización de mis estudios de posgrado.

A todos aquellos que me dieron una palabra de aliento durante todo este tiempo.

Gracias.

Índice

AGRADECIMIENTOS	I
ÍNDICE	II
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS	IX
INTRODUCCIÓN	XII
OBJETIVOS	XIV
CAPÍTULO 1: VISIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS SATELITALES DE COMUNICACIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Principio de los sistemas satelitales de comunicación	1
1.2.1 Segmento Espacial	4
1.2.2 Segmento Terrestre	8
1.3 Tipos de servicios proporcionados por los sistemas de comunicaciones satelitales	13
1.3.1 Servicios Fijos por Satélite	14
1.3.2 Servicios Móviles por Satélite	15
1.3.3 Servicios de Radiodifusión por Satélite	16
1.4 Clasificación de los sistemas satelitales según su órbita de operación	17
1.4.1 Sistemas satelitales de órbita geoestacionaria	19
1.4.2 Sistemas satelitales de órbita baja	21
1.4.3 Sistemas satelitales de órbita media	24
1.5 Cobertura de los sistemas satelitales	25
1.5.1 Cobertura global	26
1.5.2 Cobertura regional	27
1.6 Bandas de frecuencia	28
1.7 Conclusiones	32

1.8 Referencias	32
CAPÍTULO 2: MEGA CONSTELACIONES DE SATÉLITES DE ÓRBITA BAJA	35
2.1 Introducción	35
2.2 Estado del arte de las mega constelaciones satelitales de órbita baja	35
2.2.1 Tecnología basada en GaN para sistemas satelitales	38
2.2.2 Transpondedor satelital con procesamiento a bordo OBP	40
2.2.3 Formación de haz	44
2.2.4 Mega constelaciones satelitales	47
2.2.4.1 Mega constelación Starlink de SpaceX	48
2.2.4.2 Mega constelación planteada por OneWeb	52
2.2.4.3 Mega constelación planteada por Telesat	55
2.2.4.4 Mega constelación planteada por Amazon	58
2.2.4.5 Otras mega constelaciones satelitales planteadas	63
2.2.4.6 Aplicaciones provistas por las mega constelaciones satelitales	64
2.3 El enlace de radiofrecuencia RF	65
2.3.1 Elementos básicos de la propagación en el espacio libre	65
2.3.2 Densidad de potencia	66
2.3.3 Potencia Isotrópica Radiada Equivalente	67
2.3.4 Ganancia de la antena	67
2.3.5 Pérdidas por propagación en espacio libre	69
2.3.6 Polarización	71
2.3.7 Rotación de Faraday	72
2.3.8 Efecto Doppler en satélites de órbita baja	74
2.3.9 Ruido e interferencia	76
2.3.9.1 Ruido radioeléctrico	77
2.3.9.2 Ruido interno	78
2.3.9.3 Factor de ruido	79
2.3.9.4 Figura de mérito	81
2.3.9.5 Interferencia	81
2.3.9.6 Múltiples fuentes de interferencia	85

2.3.10 Parámetros de desempeño del enlace _____	87
2.3.10.1 Relación portadora a ruido _____	88
2.3.10.2 Relación energía por bit a densidad espectral de potencia de ruido _____	89
2.4 Conclusiones _____	89
2.5 Referencias _____	90
CAPÍTULO 3: COMPARACIÓN ENTRE LAS MEGA CONSTELACIONES SATELITALES DE ÓRBITA BAJA. _____	97
3.1 Introducción _____	97
3.2 Estudio de las mega constelaciones satelitales _____	97
3.2.1 Comparación entre las frecuencias de los enlaces satélite - usuario	97
3.2.2 Comparación entre los anchos de banda _____	99
3.2.3 Enlaces de los diversos sistemas _____	100
3.2.4 Comparación de las antenas de los diferentes sistemas _____	103
3.2.5 Pérdidas por propagación _____	105
3.3 Modelamiento y simulación de las mega constelaciones satelitales _____	107
3.3.1 Starlink _____	108
3.3.1.1 Simulación de la constelación Starlink _____	108
3.3.1.2 Modelación del corrimiento Doppler de la constelación Starlink _____	112
3.3.2 OneWeb _____	113
3.3.2.1 Simulación de la constelación de OneWeb _____	113
3.3.2.2 Modelación del corrimiento Doppler de la constelación OneWeb _____	117
3.3.3 Telesat _____	119
3.3.3.1 Simulación de la constelación de órbita baja de Telesat _____	119
3.3.3.2 Modelación del corrimiento Doppler de la constelación Telesat _____	123
3.3.4 Kuiper de Amazon _____	125
3.3.4.1 Simulación de la constelación Kuiper _____	125
3.3.4.2 <i>Modelación del corrimiento Doppler de la constelación Kuiper</i>	129

3.4 Atenuación debida a los gases atmosféricos en la Ciudad de México	130
3.5 Conclusiones	133
3.6 Referencias	133
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE INTERFERENCIAS ENTRE LAS MEGA CONSTELACIONES SATELITALES DE ÓRBITA BAJA.	136
4.1 Introducción	136
4.2 Comparación de interferencias entre las mega constelaciones satelitales	136
4.2.1 Propuesta de antena a utilizar para la simulación y análisis de interferencias	137
4.2.2 Análisis de interferencias para Starlink	141
4.2.2.1 Starlink vs Kuiper	141
4.2.2.2 Starlink vs OneWeb	144
4.2.2.3 Starlink vs Telesat	147
4.2.3 Análisis de interferencias para OneWeb	149
4.2.3.1 OneWeb vs Kuiper	149
4.2.3.2 OneWeb vs Starlink	151
4.2.3.3 OneWeb vs Telesat	153
4.2.4 Análisis de interferencias para Telesat	155
4.2.4.1 Telesat vs Kuiper	155
4.2.4.2 Telesat vs OneWeb	157
4.2.4.3 Telesat vs Starlink	159
4.2.5 Análisis de interferencias para Kuiper	161
4.2.5.1 Kuiper vs OneWeb	161
4.2.5.2 Kuiper vs Starlink	163
4.2.5.3 Kuiper vs Telesat	165
4.3 Análisis de interferencia entre las mega constelaciones y los radio enlaces terrestres de línea de vista directa.	167
4.4 Conclusiones	172
4.5 Referencias	173

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, PRINCIPALES CONTRIBUCIONES Y TRABAJO FUTURO.	175
APÉNDICE A: PROGRAMA PARA EL ANÁLISIS DE INTERFERENCIAS	178
APÉNDICE B: DATOS DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE LA ANTENA PROPUESTA	191
APÉNDICE C: CÁLCULO DE DISTANCIAS DE LOS SATÉLITES EN SU RECORRIDO VISTOS DESDE LA ES	193
APÉNDICE D: CÁLCULO CORRIMIENTO DOPPLER DE LAS MEGA CONSTELACIONES	195
APÉNDICE E: ATENUACIÓN DEBIDA A LOS GASES ATMOSFÉRICOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO	196

Resumen

Este trabajo de tesis presenta un análisis comparativo entre cuatro diferentes mega constelaciones satelitales de órbita baja, resaltando sus ventajas y limitaciones como complemento a las tecnologías actuales de comunicación.

Además, se realizó el estudio de sus enlaces de comunicación para poder determinar los niveles de interferencias que estos nuevos sistemas causarían tanto en sistemas satelitales similares como sistemas de comunicaciones terrestres. Para esto se simularon las cuatro mega constelaciones objeto del presente trabajo utilizando el *software* especializado SaVi. Igualmente, se realizó la simulación del patrón de radiación de una antena de características similares a las utilizadas por estos sistemas satelitales para realizar los análisis.

Abstract

This thesis work presents a comparative analysis between four Low Earth Orbit satellite mega-constellations to highlight their advantages and limitations as a complement of nowadays communications technology.

In addition, an analysis of their link budgets was done to determine interference levels received by similar satellite systems and terrestrial communications systems. To accomplish this, the four mega-constellations were simulated by using SaVi *software*. Also was made the simulation of the radiation pattern of an antenna with the characteristics used by these satellite systems.

Lista de abreviaturas

5G	<i>Fifth Generation</i>	Quinta Generación
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>	Convertidor Analógico a Digital
ASIC	<i>Application-Specific Integrated Circuit</i>	Circuito Integrado de Aplicación Especifica
BFN	<i>Beamforming Network</i>	Red de Formación de Haz
BSS	<i>Broadcast Satellite Service</i>	Servicio de Radiodifusión por Satélite
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>	Acceso Múltiple por División de Código
CNR	<i>Carrier to Noise Ratio</i>	Relación Portadora a Ruido
CPU	<i>Central Processing Unit</i>	Unidad Central de Procesamiento
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>	Convertidor Digital a Analógico
dB	<i>Decibel</i>	Decibel
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>	Procesador Digital de Señales
DTP	<i>Digital Transparent Processor</i>	Procesamiento Digital Transparente
EHF	<i>Extremely High Frequency</i>	Frecuencia Extremadamente Alta
epfd	<i>Equivalent Power Flux Density</i>	Densidad de Flujo de Potencia Equivalente
ES	<i>Earth Station</i>	Estación Terrena
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>	-
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>	Acceso Múltiple por División de Frecuencia
FSS	<i>Fixed Satellite Service</i>	Servicio Fijo por Satélite
GEO	<i>Geostationary Orbit</i>	Órbita Geoestacionaria

GPS	<i>Global Positioning System</i>	Sistema de Posicionamiento Global
GSO	<i>Geosynchronous Orbit</i>	Órbita Geosíncrona
HF	<i>High Frequency</i>	Alta Frecuencia
HPA	<i>High Power Amplifier</i>	Amplificador de Potencia
HTS	<i>High Throughput Satellite</i>	Satélites de alta tasa de transmisión de datos
IFT	-	Instituto Federal de Telecomunicaciones
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>	Internet de las Cosas Industrial
IoT	<i>Internet of Things</i>	Internet de las Cosas
ISL	<i>Intersatellite Link</i>	Enlaces Intersatelitales
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>	Unión Internacional de Telecomunicaciones
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>	Órbita Baja
LF	<i>Low Frequency</i>	Baja Frecuencia
LHCP	<i>Left Hand Circular Polarization</i>	Polarización Circular Izquierda
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>	Amplificador de Bajo Nivel de Ruido
LOS	<i>Line of Sight</i>	Línea de Vista
LTE	<i>Long Term Evolution</i>	Estándar de comunicaciones móviles de cuarta generación
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>	Órbita Media
MF	<i>Medium Frequency</i>	Frecuencia Media
MIMO	<i>Multiple Input - Multiple Output</i>	Múltiples Entradas - Múltiples Salidas
MSS	<i>Mobile Satellite Service</i>	Servicio Móvil por Satélite
NF	<i>Noise Figure</i>	Figura de Ruido
NGSO	<i>Non-geosynchronous Orbit</i>	Órbita No Geosíncrona
OBP	<i>On-board Processing</i>	Procesamiento a Bordo

PDF	<i>Power Flux Density</i>	Densidad de Flujo de Potencia
PIRE	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente
RAN	<i>Radio Access Network</i>	Red de Acceso por Radio
RF	<i>Radio Frequency</i>	Radio Frecuencia
RFFE	<i>Radio Frequency Front-End</i>	Interfaz de Radio Frecuencia
RHCP	<i>Right Hand Circular Polarization</i>	Polarización Circular Derecha
SDN	<i>Software-Defined Network</i>	Redes Definidas por <i>Software</i>
SDR	<i>Software Defined Radio</i>	Radio Definido por <i>Software</i>
SHF	<i>Super High Frequency</i>	Super Alta Frecuencia
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>	Relación Señal a Ruido
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>	Multiplexaje por División de Tiempo
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>	Acceso Múltiple por División de Tiempo
TT&C	<i>Tracking, Telemetry and Command</i>	Seguimiento, Telemetría y Comando
TWTA	<i>Traveling Wave Tube Amplifier</i>	Amplificadores de tubo de onda progresiva
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>	Ultra Alta Frecuencia
VHF	<i>Very High Frequency</i>	Muy Alta Frecuencia
VLf	<i>Very Low Frequency</i>	Muy Baja Frecuencia
VSAT	<i>Very Small Aperture Terminal</i>	Terminales de Apertura Muy Pequeña
XPD	<i>Crosspolar Discrimination</i>	Discriminación por Polarización Cruzada
XPI	<i>Crosspolar Isolation</i>	Aislamiento por Polarización Cruzada

Introducción

En la actualidad, con un mundo cada vez más conectado, la necesidad de mantener comunicaciones en todo momento y en cualquier parte del planeta se ha vuelto cada vez más indispensable. Sin embargo, los sistemas terrestres de comunicaciones tienen problemas para satisfacer dicha demanda por sí solos, debido a sus limitaciones inherentes de cobertura, pues el instalar la infraestructura necesaria para ello, principalmente en zonas remotas, resultaría inviable. En ese sentido, los sistemas satelitales de comunicaciones han supuesto una nueva oportunidad para satisfacer esta demanda debido a los avances tecnológicos conseguidos en tiempos recientes, en especial aquellos presentes en las mega constelaciones satelitales de órbita baja.

En el presente trabajo de tesis se realizó una investigación comparativa entre cuatro mega constelaciones satelitales de órbita baja que operarán en un futuro cercano, las cuales proveerán comunicaciones de alta velocidad de manera global. Se analizaron los enlaces de comunicaciones de cada una de ellas centrándose en los niveles de potencia recibidos en tierra, principalmente, los niveles de interferencia que provocarán estos nuevos sistemas entre ellos, así como en sistemas de comunicaciones terrestres.

En el capítulo 1 se estudian los aspectos generales de los elementos que conforman a los sistemas satelitales de comunicación, la manera en que se clasifican estos sistemas, los servicios que proporcionan, su cobertura y las bandas de frecuencia que utilizan para sus enlaces.

En el capítulo 2 se aborda el estado del arte de las mega constelaciones satelitales de órbita baja, se describe con mayor profundidad los elementos del enlace de radiofrecuencia de estos sistemas.

En el capítulo 3 se comparan los enlaces de las diferentes mega constelaciones satelitales, destacando las frecuencias de operación de cada una de ellas, así como las tecnologías utilizadas, igualmente en este capítulo se realiza un estudio comparativo de la cobertura de cada una de las constelaciones.

En el capítulo 4 se realiza el análisis de interferencias provocadas por las mega constelaciones entre ellas, además de las interferencias potenciales que sufrirían sistemas de comunicaciones terrestres.

En el capítulo 5 se discuten los principales resultados obtenidos y se plantean áreas de oportunidad para realizar investigaciones futuras y ahondar en el tema.

Objetivos

General:

Describir y estudiar mediante simulaciones por computadora los efectos de la coexistencia entre los enlaces de comunicaciones de diversas mega constelaciones de satélites de órbita baja.

Específicos:

- Estudiar las principales características de las mega constelaciones satelitales de órbita baja además de analizar sus ventajas y limitaciones.
- Realizar simulaciones de la cobertura de las mega constelaciones satelitales de órbita baja.
- Estimar el patrón de radiación de un enlace de bajada de las mega constelaciones.
- Calcular la interferencia cocanal entre los enlaces de comunicaciones de las mega constelaciones satelitales de órbita baja.
- Analizar los efectos que causará la atmósfera en los enlaces de comunicación de las mega constelaciones.

Capítulo 1: Visión general de los sistemas satelitales de comunicación

1.1 Introducción

En la actualidad, al tener un mundo donde la necesidad por mantener comunicaciones en todo momento y disponer de acceso a la información desde cualquier parte del mundo es una realidad, los sistemas satelitales de comunicación vienen a ser una parte primordial de todos los sistemas de comunicaciones existentes que, en conjunto con los sistemas terrestres, pueden hacer posible la satisfacción de dicha demanda.

En este capítulo se estudian los principales aspectos de los sistemas de comunicaciones satelitales, abordando temas tales como, los elementos que conforman a un sistema satelital de comunicaciones y los componentes necesarios para su funcionamiento, ejemplos de tipos de servicio que pueden ser provistos por los sistemas de comunicaciones satelitales, sus principales características, incluyendo ventajas y limitaciones de este tipo de sistema de comunicaciones, además de su clasificación dependiendo de la órbita que describan con respecto a la Tierra, así como las principales bandas de frecuencia utilizadas en los sistemas satelitales de comunicación.

1.2 Principio de los sistemas satelitales de comunicación

En el ámbito de la ingeniería, un satélite es una astronave diseñada con el propósito de permanecer orbitando la Tierra u otro cuerpo celeste, acondicionado con el equipamiento necesario que le permita recabar y transmitir

información de algún tipo. Un satélite de comunicaciones es un módulo espacial, el cual principalmente funciona como un repetidor inalámbrico, que permite que exista un enlace de comunicaciones entre dos o más estaciones ubicadas ya sea en tierra o en el espacio, el cual es posicionado en una órbita dada alrededor de la Tierra o algún otro cuerpo celeste [1].

Los sistemas satelitales son aquellos en los que se utilizan uno o varios satélites en constelación, y una o varias estaciones terrenas que trabajando en conjunto tienen como fin proveer de algún servicio en específico a usuarios en la Tierra o a otros satélites en órbita. Estos sistemas pueden proporcionar servicios tales como: difusión de radio o televisión, observación meteorológica, prospección terrestre, telecomunicaciones, aplicaciones militares, investigación científica, entre otras [2]. Estos sistemas tienen la capacidad de brindar servicios fijos o móviles, terrestres, aéreos, marítimos o espaciales.

En principio, desde un punto de vista básico, en un sistema satelital de comunicaciones, una estación terrena emite una señal de información sobre una portadora modulada de determinada frecuencia, correspondiente al enlace de subida, la cual es recibida por el satélite de comunicaciones, el que a su vez, se encarga de amplificar dicha señal para posteriormente ser trasladada a la frecuencia de la portadora del enlace de bajada, y poder de esta manera ser retransmitida hacia la o las estaciones receptoras, ya sea que se encuentren ubicadas en tierra o en el espacio.

En este tipo de sistemas de comunicación, el satélite nunca será el origen o destino final de la señal de información [3], sino que, su función básica es la de realizar la retransmisión de la información proporcionada por la fuente siendo éstas las estaciones terrenas.

Las principales ventajas que se pueden obtener de la utilización de sistemas satelitales de comunicación es que estos, además de la gran área de cobertura gracias a su huella, proveen de enlaces de comunicación de larga distancia entre dos o más estaciones terrenas sobre cualquier punto de la superficie terrestre, únicamente utilizando como repetidor al satélite, siempre y cuando las estaciones terrenas se encuentren dentro de la huella de cobertura del mismo, o realizando varios saltos entre satélites hasta conseguir que ambas estaciones se encuentren dentro de la cobertura de algún satélite de la constelación, sin necesidad de mayor infraestructura, a diferencia de redes terrestres, donde para poder establecer dicho enlace mediante ondas de radio, se pueden requerir de una gran cantidad de estaciones repetidoras, o la instalación de fibra óptica o algún otro medio guiado, lo que no posibilita tener cobertura en cualquier punto de la Tierra, además de ser tardado y su instalación muy costosa. Por tal motivo los sistemas de comunicación satelital son una alternativa a las redes de comunicación terrestre en sitios de difícil acceso donde la construcción de la infraestructura necesaria puede no ser costeable, o en situaciones donde se tenga una alta densidad de terminales tal como lo requiere el IoT masivo, tal como lo proporciona la 5G.

También, al ser independientes en su mayoría de los sistemas terrestres, son de gran importancia en la mayoría de los casos de emergencia que pueden ser provocados por desastres naturales, los cuales pudieran afectar a las redes terrestres. Lo anterior permite afirmar que los sistemas satelitales pueden proveer de comunicaciones de manera confiable, en cualquier lugar del planeta y a un costo relativamente bajo cuando se consideran enlaces de gran distancia.

La mayoría de los sistemas satelitales cuentan con una comunicación de dos vías o full-dúplex, es decir, tanto transmisión como recepción mediante la misma huella de cobertura, por lo que solamente se requiere de un satélite para realizar ambas tareas [1].

Como tal, un sistema satelital de comunicaciones está conformado por un segmento espacial que atiende a un segmento terrestre específico. Además, las características propias de cada segmento dependerán del tipo de servicio que se planea proporcionar, siendo principalmente servicios fijos, móviles o de difusión [3],[4].

1.2.1 Segmento Espacial

El segmento espacial de un sistema satelital de comunicaciones se encuentra conformado por dos elementos, el satélite o constelación de satélites situados en órbitas específicas que conforman el sistema de comunicaciones, y la o las estaciones de Seguimiento, Telemetría y Comando o TT&C por sus siglas en inglés (*Tracking, Telemetry and Command*).

Los satélites, que son la parte principal del sistema de comunicaciones, están conformados por la carga útil y por diversos subsistemas que dan soporte al satélite en general. En estos subsistemas se incluyen el control de órbita y altitud, los cuales se encargan de mantener al satélite en la órbita e inclinación adecuada, la cual será inevitablemente afectada por las interacciones gravitacionales que presenta con la Tierra, la Luna y otros cuerpos celestes o a la interacción que se puede dar con la atmósfera, esto principalmente en los satélites de órbita baja; control de temperatura, suministro de energía para el satélite, en el que se encuentran las baterías y celdas solares necesarias para

recolectar la energía requerida para el adecuado funcionamiento del satélite; sistemas de propulsión, el cual es utilizado para posicionar al satélite en la órbita correcta o hacer correcciones en su trayectoria; telemetría, entre otros. En el presente trabajo no se ahondará en profundidad en estos subsistemas y sólo se centrará en la carga útil.

Por otra parte, la carga útil del satélite está compuesta por las antenas de transmisión y recepción además de todo el equipo electrónico que se requiera para poder realizar las tareas de comunicación, llamado transpondedor, término que se utiliza para hacer referencia a un canal completo de radio frecuencia, que es empleado por el satélite para las funciones de comunicaciones.

Un transpondedor, de manera elemental, está conformado principalmente por un filtro pasa banda, el cual se encargará de rechazar todas aquellas señales que se encuentren fuera de la banda de interés generadas por estaciones terrenas ajenas al sistema, un amplificador de bajo nivel de ruido (*Low Noise Amplifier*, LNA) para la parte receptora, el que se encargará de recuperar la señal de muy baja potencia recibida por el satélite, un oscilador local y luego por un mezclador, el cual se encargará de trasladar la portadora recibida a la frecuencia del enlace de bajada, para después pasar por un filtro pasa banda y posteriormente por un amplificador de potencia (*High Power Amplifier*, HPA) [1], [5]. En la figura 1.1 se presenta el diagrama básico de un transpondedor satelital.

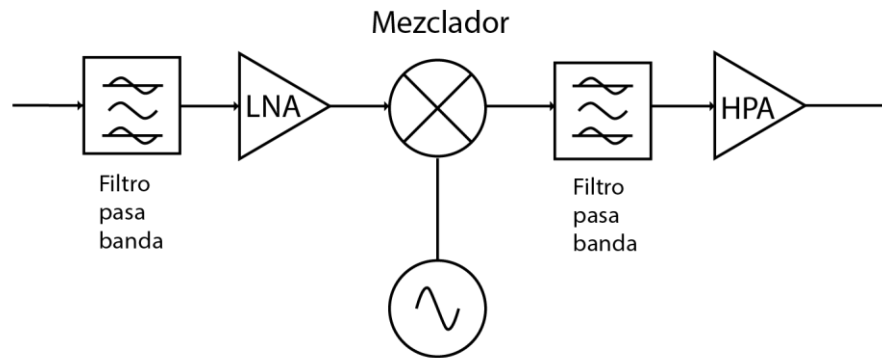


Figura 1. 1 Diagrama a bloques básico de un transpondedor satelital sin procesamiento digital de señales.

En la carga útil se pueden utilizar dos tipos de transpondedores: transpondedores transparentes, es decir, el transpondedor del satélite únicamente se encargará de amplificar y retransmitir la señal que recibió haciendo el cambio de frecuencia del enlace de subida al de bajada, y transpondedores regenerativos, en éstos, además de realizar el cambio de frecuencia tiene lugar un procesamiento digital de la portadora a bordo (*On-board Processing*, OBP) lo cual permitiría que el satélite demodule la señal recibida y realice algún procesamiento en banda base sobre ella para luego volver a modularla y transmitirla hacia las estaciones terrenas, siendo este último método mucho más complejo y requiriendo de más consumo de potencia, pero siendo más robusto contra oscilaciones interferentes y ruido que se encuentre presente en la señal recibida por el satélite [5].

Adicionalmente, las antenas con las que cuenta el satélite son una parte primordial de la carga útil de éste, pues son las que se encargan de formar la huella que estará impregnada en la superficie terrestre, la cual conformará la zona de cobertura con la que el satélite puede llevar a cabo la transmisión y recepción de las señales.

Los satélites están equipados con antenas destinadas a diferentes propósitos, pues se disponen de antenas enfocadas únicamente para la transmisión de los datos de telemetría hacia las estaciones de TT&C, así como antenas destinadas para establecer enlaces intersatelitales, aunque éstos también pueden ser establecidos mediante enlaces ópticos, y las antenas destinadas para la transmisión y recepción de información hacia la Tierra.

Entre las antenas más utilizadas en los satélites se encuentran las de tipo corneta, de parche y con reflector. De las cuales las más comúnmente utilizadas son antenas de reflector parabólico, y arreglos de antenas. La principal ventaja al elegir arreglos de antenas radica en que permiten modificar dinámicamente el patrón de radiación, y, por tanto, la huella del sistema satelital de manera dinámica.

También se debe tener en cuenta que la vida útil de los satélites de telecomunicaciones varía de entre 10 a 15 años dependiendo de la órbita en la que se encuentren, debido a que no se les puede dar mantenimiento estando en órbita y a la incapacidad de poder ser reabastecidos de combustible, por lo que se debe mantener en consideración la disposición de satélites de repuesto en órbita listos para poder reemplazar a aquellos que ya no puedan continuar con su funcionamiento.

Por otro lado, las estaciones de seguimiento, telemetría y comando tienen como función el monitorear y asegurar el correcto funcionamiento de los satélites en órbita a lo largo de su vida útil, principalmente monitoreando todo lo relacionado con los subsistemas con los que cuenta el satélite, siendo estos operados por separado de los sistemas de comunicación, revisando y en su caso corrigiendo aspectos tales como la altitud del satélite en órbita, parámetros de la órbita del

satélite como su velocidad o rotación, también monitorear el voltaje, corriente y temperatura de todos los subsistemas, la presión de los tanques de propulsión y la cantidad de combustible [4], [6].

Además, se debe asegurar de que las características del enlace de comunicación del satélite cumplan con los parámetros requeridos, como lo son la potencia radiada, la polarización, anchos de banda de transmisión, verificar que las antenas estén formando la huella adecuada en tierra para mantener comunicación en el área de cobertura y el correcto funcionamiento de los transpondedores en general.

También, la estación de TT&C se encarga de enviar todos los comandos necesarios al satélite para que realice los ajustes necesarios en los sistemas que lo requieran después de haber recibido la señal de telemetría por parte del satélite [4]. Adicionalmente, la señal de telemetría enviada por el satélite a la estación de TT&C también puede ser utilizada como baliza, la cual proporcione información de la posición del satélite a las estaciones terrenas para ayudar a realizar el seguimiento de éste cuando sea necesario. Tanto la órbita descrita por los satélites como las características con las que cuentan las estaciones de TT&C dependerá de la aplicación que se pretenda dar al sistema satelital [6], [7].

1.2.2 Segmento Terrestre

El segmento terrestre de los sistemas satelitales de comunicaciones está conformado por todas las estaciones terrenas dispuestas a lo largo del área en la cual el sistema satelital cuente con cobertura, las que utilizarán los servicios proporcionados por las estaciones espaciales para poder proveer a los usuarios del enlace de comunicación, pues para establecer comunicación entre

estaciones terrenas se utiliza al satélite como repetidor. Adicionalmente, varias estaciones terrenas pueden emplear un sólo satélite para establecer el enlace de comunicación, haciendo más eficiente la utilización de los recursos del segmento espacial del sistema satelital.

El término *estación terrena* (*Earth Station, ES*) es un término aceptado internacionalmente, el cual hace referencia a todas aquellas estaciones de comunicación situadas tanto en tierra, el aire (en aeronaves) y el mar (en embarcaciones)[1]. Aunque las estaciones de TT&C se encuentren situadas en tierra, estas no son consideradas parte del segmento terrestre del sistema [3].

La principal función de las estaciones terrenas es el de recibir y transmitir información desde y hacia la red satelital de la forma más económica y confiable posible, pero a su vez manteniendo la calidad de comunicación deseada. Adicional a esto, para poder satisfacer las necesidades anteriores se debe tener en consideración qué aplicaciones y tipos de servicio requerirá el sistema de comunicación, pues dependiendo de esto la estación terrena podría contar con el equipamiento necesario para realizar las tareas tanto de transmisión como de recepción de la información, o según sea el caso, únicamente contar con alguna de ellas [4].

Las estaciones terrenas, al igual que los satélites, están constituidas por diversos subsistemas que conforman tanto el equipo de comunicaciones necesario para poder realizar la transmisión y recepción de información hacia el satélite, como con los subsistemas que le darán soporte en general a la propia estación para que pueda funcionar de manera adecuada. Entre estos subsistemas se encuentran principalmente los encargados del rastreo de la posición del satélite, los cuales se encargan de realizar los ajustes necesarios en la antena de la

estación terrena. Este ajuste puede ser de manera mecánica o electrónica para que se mantenga apuntando en la dirección adecuada en todo momento. Adicionalmente, se cuenta con subsistemas de transmisión y recepción, además de incluir el subsistema de suministro eléctrico que alimente a todos los componentes activos de la estación.

En general, las estaciones terrenas están equipadas únicamente con una antena, la cual se utiliza tanto para transmisión como recepción de señales, siendo estas secciones separadas por un duplexor. Además, dependiendo de la aplicación de la que se trate, las dimensiones de las antenas ocupadas en estaciones terrenas pueden ir desde unos cuantos centímetros a varias decenas de metros, como es el caso de las antenas de INTELSAT Standard A, las cuales son antenas de 32 metros de diámetro, mientras que para aplicaciones como la recepción de la señal de televisión satelital se pueden llegar a ocupar antenas de tan sólo unas decenas de centímetros de diámetro [5]. En la figura 1.2 se muestra la organización de una estación terrena [5].

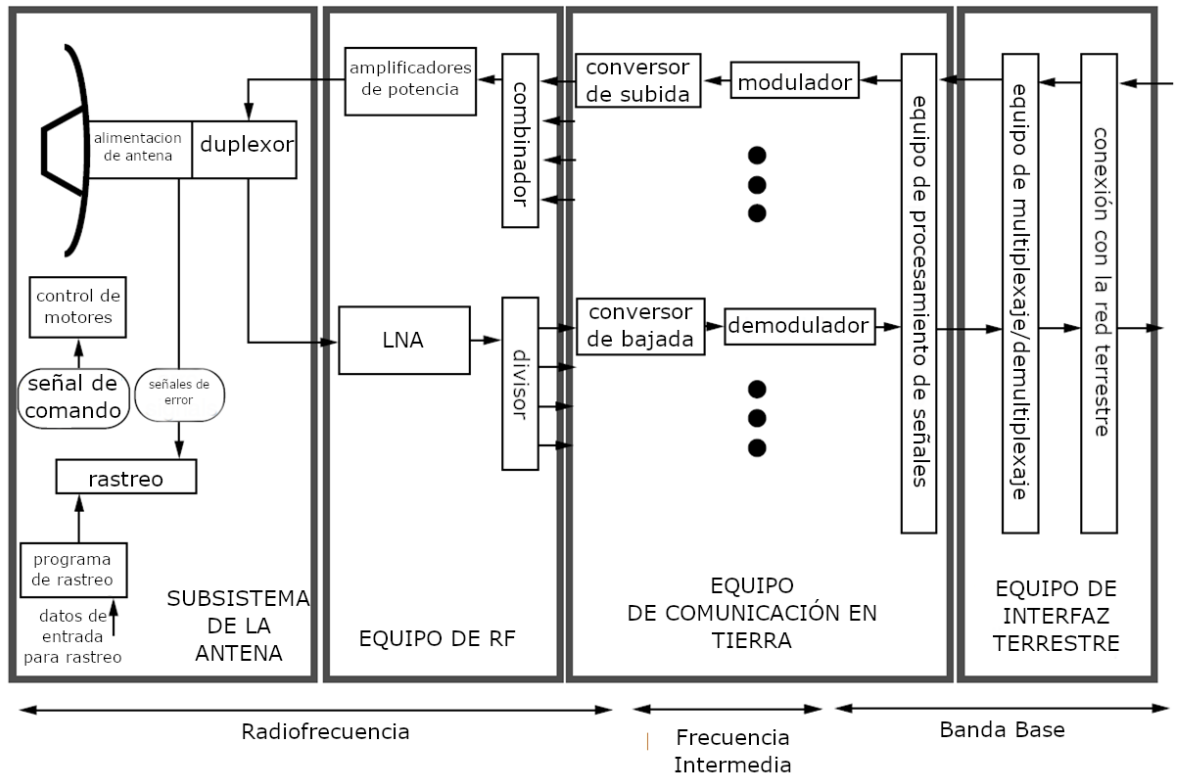


Figura 1. 2 Ejemplo de la organización de una estación terrena.

Las estaciones terrenas pueden brindar sus servicios a los usuarios de dos maneras principales: primeramente, pueden estar conectadas al usuario final de forma directa mediante un computador personal, un teléfono o algún otro dispositivo terminal [1], utilizando fundamentalmente para esto, terminales de apertura muy pequeña o VSAT (*Very Small Aperture Terminal*), brindando al usuario un acceso directo al segmento espacial, o bien, como interfaz entre el segmento espacial conectando la estación terrena a una red de comunicación terrestre, la cual será la encargada de proporcionar el servicio al usuario final.

Las estaciones terrenas, se pueden clasificar en tres tipos diferentes: estaciones fijas, las cuales establecen el enlace de comunicación desde un punto en específico y permanecen ahí en todo momento; estaciones móviles, las cuales pueden establecer el enlace de comunicación satelital mientras se encuentran

en movimiento; y estaciones transportables, las que pueden ser transportadas a diferentes sitios pero sólo establecen el enlace una vez situadas en una locación específica y no se mueven hasta terminar la comunicación [3]. El tipo de estación de la que se trate se relaciona con la clase de servicio satelital que proporcionará el sistema de comunicación. Estos servicios se clasifican principalmente en servicios fijos vía satélite, servicios móviles vía satélite y servicios de difusión vía satélite, de los cuales se analizarán posteriormente.

En la figura 1.3 se puede ver la arquitectura básica de un sistema satelital de comunicaciones [4].

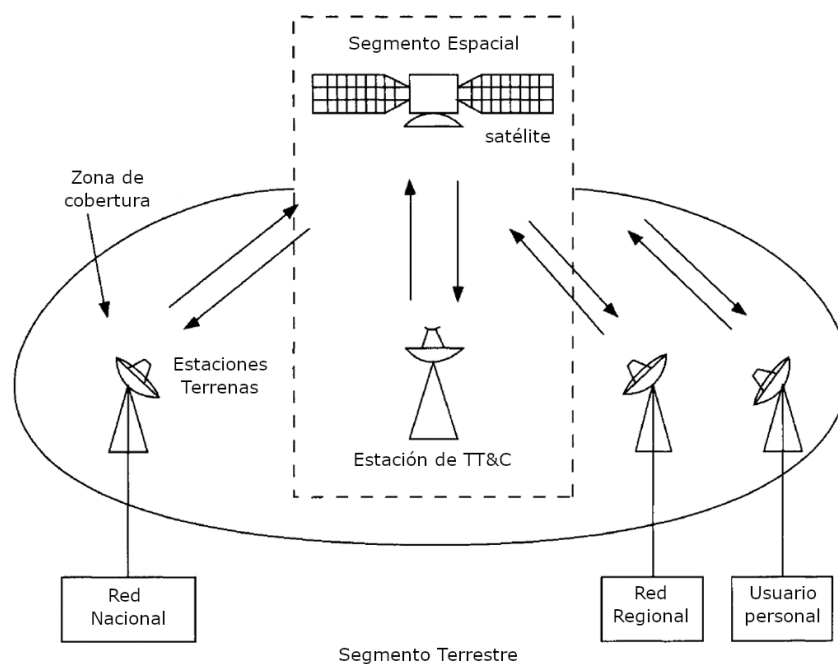


Figura 1. 3 Arquitectura básica de un sistema satelital de comunicaciones.

1.3 Tipos de servicios proporcionados por los sistemas de comunicaciones satelitales

Como se ha tratado en la sección anterior, el segmento terrestre de los sistemas de comunicaciones satelitales puede ser muy diverso, contando con mayor adaptabilidad que el segmento espacial y con gran variedad de estaciones terrenas, las cuales son diseñadas dependiendo de la aplicación que se busque proporcionar al usuario, entre las cuales se pueden mencionar la transmisión de voz, datos o multimedia; redes telefónicas en poblaciones rurales; proporcionar Internet de banda ancha a empresas o usuarios finales; televisión vía satélite; entre otros.

Ahora, cada una de las aplicaciones diferentes que puede proporcionar un sistema satelital de comunicaciones requiere de la utilización de cierto servicio satelital en específico. Los sistemas de comunicación satelital se pueden clasificar dependiendo del tipo de servicio que se encuentren proporcionando a los usuarios en tierra. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (*International Telecommunications Union*, ITU) considera los siguientes como los servicios por satélite que pueden ser proporcionados [8]:

- Servicio fijo por satélite.
- Servicio entre satélites.
- Servicio móvil por satélite.
- Servicio móvil terrestre por satélite.
- Servicio móvil marítimo por satélite.
- Servicio móvil aeronáutico por satélite.
- Servicio de radiodifusión por satélite.

- Servicio de radiodeterminación por satélite.
- Servicio de radionavegación por satélite.
- Servicio de radionavegación marítima por satélite.
- Servicio de radionavegación aeronáutica por satélite.
- Servicio de radiolocalización por satélite.
- Servicio de exploración de la Tierra por satélite.
- Servicio de meteorología por satélite.
- Servicio de frecuencias patrón y de señales horarias por satélite.
- Servicio de aficionados por satélite.

Dentro de estos, los principales para los sistemas satelitales de comunicación son: servicio fijo por satélite (*Fixed Satellite Service*, FSS); servicios móviles por satélite (*Mobile Satellite Service*, MSS); y servicios de radiodifusión por satélite (*Broadcasting Satellite Service*, BSS) [7]. Aquí es importante resaltar que las nuevas constelaciones masivas de LEOs se proporciona todo un conjunto de nuevos servicios, por ejemplo, internet industrial de las cosas IIoT, telefonía celular, etc.

1.3.1 Servicios Fijos por Satélite

La ITU define un servicio fijo por satélite como: “servicio de radiocomunicación entre estaciones terrenas situadas en emplazamientos dados cuando se utilizan uno o más satélites; el emplazamiento específico puede ser un punto determinado o cualquier punto fijo situado en una zona dada. En algunos casos, se pueden incluir enlaces entre satélites; el servicio fijo por satélite puede

también incluir enlaces de conexión para otros servicios de radiocomunicación espacial” [7], [8].

Este tipo de servicio es principalmente utilizado para proveer de aplicaciones como lo pueden ser el internet de banda ancha, la alimentación de una red telefónica terrestre, transmisión de datos, además de que se emplean estaciones terrestres fijas para poder proporcionar la señal que después será utilizada para realizar la radiodifusión por satélite.

Las características de las estaciones terrenas que utilizan este tipo de servicio pueden ser muy variadas, pues se puede estar utilizando desde una VSAT hasta estaciones terrenas muy grandes que suelen ser la interfaz entre una red terrestre de comunicaciones, todo esto dependiendo de la cantidad de información y tráfico que sea requerido para el sistema de comunicación.

1.3.2 Servicios Móviles por Satélite

Según la ITU, un servicio móvil por satélite es un “servicio de radiocomunicación entre estaciones terrenas móviles y una o varias estaciones espaciales” [8]. En este servicio por satélite se encuentran incluidos los servicios móviles terrestres, marítimos y aeronáuticos por satélite.

En general, las estaciones terrenas utilizadas para este servicio suelen ser pequeñas, ya que éstas pueden estar instaladas en automóviles, aviones, embarcaciones o cualquier otro elemento que pueda estar en constante movimiento y requiera de acceso a las comunicaciones. Este servicio proveerá principalmente de aplicaciones tales como internet de banda ancha, transmisión de datos o telefonía por satélite, comunicaciones móviles personales, entre otros. De esta manera se pueden mantener comunicaciones en todo momento

sin importar la ubicación en la que se encuentren las estaciones terrenas del sistema.

Debido a que se trata de estaciones terrenas pequeñas, las antenas más utilizadas son de baja ganancia e inclusive de tipo omnidireccional, dado que gracias a su patrón de radiación, éstas pueden recibir la señal proveniente del satélite en todo momento sin requerir de algún sistema de seguimiento, simplificando de esta manera el diseño de la estación terrena y optimizando el uso de potencia, ya que al estar en movimiento, puede no estar conectada a una fuente de alimentación considerable como lo puede ser una red de suministro eléctrico.

Tomando en cuenta los nuevos sistemas satelitales basados en mega constelaciones de LEO's, las estaciones terrenas experimentan cambios muy amplios, siendo desde muy pequeñas con volúmenes y pesos muy reducidos.

1.3.3 Servicios de Radiodifusión por Satélite

La definición que maneja la ITU para el servicio de radiodifusión por satélite es: “servicio de radiocomunicación en el cual las señales emitidas o retransmitidas por estaciones espaciales están destinadas a la recepción directa por el público en general. En el servicio de radiodifusión por satélite el término *recepción directa* abarca tanto la recepción individual como la recepción comunal” [8].

La aplicación más popular que utiliza este tipo de servicio es la de la difusión de televisión satelital, la cual llega directamente al público en general y se encuentra conectada al usuario final, en su mayoría, mediante la utilización de VSAT debido a su pequeño tamaño y bajos costos de instalación. Adicional a la difusión de televisión satelital, también se realiza la difusión de servicios de audio, entre

otros. Generalmente las estaciones terrenas que utilizan este servicio únicamente cuentan con las funciones de recepción de la información.

Este tipo de servicio hace uso principalmente de estaciones espaciales situadas en órbitas geoestacionarias debido a la cobertura que éstas pueden llegar a tener, pero no es exclusivo. En general, la elección de la órbita de los sistemas satelitales depende de la aplicación que se preste al usuario.

1.4 Clasificación de los sistemas satelitales según su órbita de operación

Además de la clasificación que se les puede dar a los sistemas satelitales de comunicaciones dependiendo del servicio para el cual se estén utilizando, se les puede clasificar por la órbita en la que están situados los satélites del sistema.

Al encontrarse orbitando alrededor de la Tierra o cualquier otro cuerpo celeste, las órbitas descritas por los satélites se encuentran regidas por las leyes de Kepler, las cuales establecen lo siguiente [4]:

Primera Ley de Kepler: La órbita de cada planeta describe una trayectoria elíptica alrededor del Sol, estando situado el Sol en uno de los focos de la elipse. En la figura 1.4 se muestra la primera ley aplicada a satélites orbitando la Tierra [3].

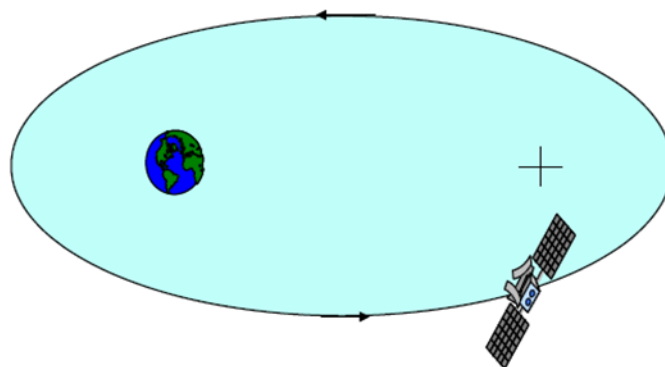


Figura 1. 4 Primera ley de Kepler.

Segunda Ley de Kepler: La línea recta que une a un planeta con el Sol recorre áreas iguales en tiempos iguales. En la figura 1.5 se muestra la segunda ley de Kepler aplicada a satélites orbitando la Tierra [3].

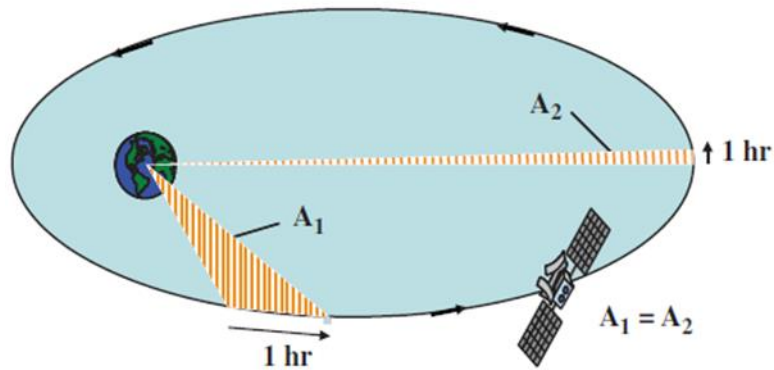


Figura 1. 5 Segunda ley de Kepler.

Tercera Ley de Kepler: El cuadrado del periodo orbital de un planeta es proporcional al cubo de su distancia media al Sol. Descrita por la siguiente ecuación:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{\mu} a^3 \quad (1.1)$$

Donde:

T = Periodo orbital en segundos.

a = Distancia entre los dos cuerpos en kilómetros.

μ = Constante de Kepler ($3.986004 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$).

De esta forma, considerando las leyes de Kepler para los satélites, y suponiendo una órbita circular alrededor de la Tierra con radio r , entonces se tiene que:

$$r = \left(\frac{\mu}{4\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}} T^{\frac{2}{3}} \quad (1.2)$$

Por lo tanto, bajo estas condiciones, un periodo orbital específico está determinado únicamente por la elección de un radio orbital en concreto, lo que permite al diseño del sistema satelital hacer la elección de la órbita en que se encontrarán los satélites dependiendo del periodo orbital requerido para satisfacer ciertas aplicaciones del sistema [3], aun así, pueden requerirse aplicaciones en donde la órbita descrita sea elíptica.

De esta órbita dependerá principalmente la cobertura con la cual contará el sistema de comunicación vía satélite, así como de la cantidad de satélites necesarios para poder alcanzar una cobertura global en caso de ser requerido, además de que afrontará otras particularidades en mayor o menor medida dependiendo del tipo de órbita.

Las principales órbitas que se utilizan para los sistemas de comunicación vía satélite son órbita baja (*Low Earth Orbit*, LEO), órbita media (*Medium Earth Orbit*, MEO) y órbita geoestacionaria (*Geostationary Orbit*, GEO) [3].

1.4.1 Sistemas satelitales de órbita geoestacionaria

En los sistemas satelitales que están colocados en este tipo de órbita, se tiene como objetivo el poder tener un satélite que parezca estar fijo en un punto del cielo en todo momento, por lo que su periodo orbital debe ser igual al periodo de rotación de la Tierra, es decir, un día sideral, el cual tiene una duración de 86,164.09 segundos [3], en adición a esto se debe considerar que la órbita es circular y con un ángulo de inclinación igual a cero, es decir, que el plano orbital se encuentre ubicado sobre el ecuador. Teniendo en cuenta todos esos

parámetros se puede calcular directamente el radio orbital donde deben ser situados estos satélites. Utilizando la tercer ley de Kepler, se obtiene que esta órbita se encuentra a 35,786 km sobre la superficie terrestre, aunque este valor es comúnmente redondeado a 36,000 km [3].

Como es de esperar, la necesidad de cumplir tantos parámetros de una manera exacta, el poder tener sistemas satelitales que los cumplan es prácticamente imposible debido a todas las interacciones gravitacionales y otros efectos adversos a las que se verá sometido el satélite en órbita, por lo que en la realidad las órbitas no tienen una excentricidad ni inclinación igual a cero, lo que resulta en una órbita llamada geosíncrona (*Geosynchronous Orbit, GSO*), cuyo comportamiento se aproxima bastante al deseado de una órbita geoestacionaria, por lo que los términos GEO o GSO se pueden utilizar indistintamente.

Debido a que el satélite aparenta estar fijo sobre un punto en el cielo, las estaciones terrenas de estos sistemas satelitales no requieren de un sistema de seguimiento para poder rastrear la posición del satélite, adicional a esto, en este sistema el efecto por corrimiento Doppler es mínimo, y, debido a la altitud de su órbita la huella de un solo satélite en órbita geoestacionaria puede cubrir aproximadamente un tercio de la superficie del planeta, por lo que con una constelación de tres satélites colocados con una separación de 120° entre ellos sobre el plano ecuatorial se podría tener una cobertura casi global, exceptuando latitudes tanto al Norte como al Sur más allá de los 70° o 75° [3], [4]. Adicional a esto, los satélites situados en esta órbita suelen tener los periodos de vida útil más extensos, siendo de alrededor de 15 a 20 años, y gracias a la gran cobertura que estos satélites pueden proveer, son principalmente utilizados para

proporcionar servicios como la radiodifusión por satélite, entre otros servicios fijos.

Las desventajas de los sistemas satelitales que se encuentran en esta órbita radican en que, al tener una órbita tan alejada de la superficie del planeta, la latencia es muy alta, teniendo aproximadamente 260 ms de retraso en una dirección, entonces el viaje de la señal en ida y vuelta toma alrededor de medio segundo, por lo que este tipo de sistema satelital no es conveniente para proveer aplicaciones que sean sensibles al retardo, así como pérdidas por propagación muy grandes igualmente ocasionadas por las grandes distancias entre el satélite y la Tierra.

En la actualidad, México cuenta con cuatro posiciones orbitales geoestacionarias aprobadas por la ITU que tienen permitido aterrizar señales en el país, las cuales están concesionadas a tres empresas, siendo estas Telecomunicaciones de México, QuetzSat S. de R.L. de C.V. y Satélites Mexicanos S.A. de C.V., regulados por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) [9].

1.4.2 Sistemas satelitales de órbita baja

Los sistemas satelitales de órbita baja (LEO), o también llamados en ocasiones como no geosíncronos (*Non-geosynchronous Orbit, NGSO*) son los sistemas satelitales que se encuentran orbitando más cercanos a la Tierra. En este tipo de sistemas, los satélites se encuentran orbitando a una altura de entre 160 km a 2,500 km de la superficie de la Tierra, donde la altitud máxima en la que orbitan los satélites LEO se encuentra delimitada por el cinturón de Van Allen más próximo [10] los cuales son zonas donde se tiene gran cantidad de partículas

cargadas, que pueden repercutir en el funcionamiento del equipo electrónico de los satélites.

A diferencia de los sistemas con órbita geoestacionaria, los LEO's sólo son visibles en una región en específico de la Tierra por un periodo de tiempo que puede ser de entre 10 a 20 minutos por cada periodo orbital, por lo que las estaciones terrenas que hacen uso de estos sistemas requieren de algún método de seguimiento para ubicar al satélite, haciendo que sean más complejas que las estaciones terrenas de sistemas GEO, además, para poder tener una cobertura amplia y continua se requiere de una constelación de satélites.

Los métodos de rastreo requeridos por la estación terrena pueden variar, siendo los principales el rastreo mediante recursos mecánicos, es decir, la estación terrena cuenta con una serie de mecanismos como motores, los cuales direccionan la antena hacia la posición requerida, o el rastreo de manera electrónica, en el cual, mediante arreglos de antenas, desfasadores y amplificadores variables, así como con la utilización de diversos algoritmos se puede hacer que se modifique el patrón de radiación haciendo que el lóbulo principal se encuentre apuntando en todo momento hacia la dirección de interés. Además, debido a que los satélites en esta órbita se encuentran en movimiento, los efectos por el corrimiento Doppler tienen un papel importante en estos sistemas satelitales, adicional a lo anterior, debido a la menor altitud de la órbita, la huella que proyectan en la superficie de la Tierra es significativamente menor que la de los sistemas satelitales en órbita geoestacionaria, cubriendo aproximadamente un diámetro de 6,000 km considerando un ángulo de elevación de 10° [7]. Por lo que se requiere de un número mayor de satélites en constelación si se desea tener una cobertura global y continua, pero gracias a

que en este tipo de sistemas no se requiere que el satélite esté orbitando exclusivamente en el plano ecuatorial, una constelación de satélites de órbita baja puede proporcionar cobertura en regiones donde los satélites con órbita geoestacionaria no la tienen, pudiendo llegar a cubrir incluso zonas polares.

Además, al tener una órbita a menor altitud, los sistemas satelitales de órbita baja son los que presentan la menor latencia en comparación con los demás sistemas satelitales, teniendo un retraso aproximado de 10 ms. Adicional a eso, se tienen menores pérdidas por propagación, lo cual conlleva a que se requiera de menores niveles de potencia para establecer el enlace y a poder utilizar antenas de menor tamaño, por lo que estos sistemas satelitales de comunicación son adecuados para comunicaciones móviles vía satélite, pero también siendo favorables para proveer de aplicaciones que requieran de un tiempo de respuesta corto. Es importante considerar que, los efectos adversos que se presentan en la órbita del satélite debido a la atmósfera terrestre no son despreciables. Además, al tener un área de menor cobertura es más fácil conseguir el reuso más intensivo de frecuencias en este tipo de sistemas satelitales [3], [10].

Gracias a las ventajas que presenta la utilización de este tipo de sistemas satelitales, y con el surgimiento de la nueva generación de comunicaciones móviles, también llamada 5G, se plantea que la utilización de sistemas satelitales de órbita baja en mega constelaciones sean una parte de la infraestructura para el despliegue de esta nueva tecnología [11], ayudando a proveer enlaces de conexión que brinden de servicios como comunicaciones móviles o internet de las cosas (IoT), o también se han propuesto como parte del *backhaul* requerido para la red 5G [12].

1.4.3 Sistemas satelitales de órbita media

Los sistemas satelitales de órbita media (MEO) son muy similares a los sistemas de órbita baja, pero estos se encuentran orbitando a una altura de entre 8,000 a 20,000 km de la superficie terrestre. Al igual que los satélites LEO, los satélites de órbita media sólo son visibles para las estaciones terrenas por un periodo de tiempo determinado, por lo que también requieren de algún método de seguimiento para poder mantener comunicación con el satélite, que en general son los mismos métodos utilizados para el rastreo en los sistemas LEO, aunque éstos no requieren de un método de rastreo tan rápido como el de los sistemas satelitales LEO, pues los satélites de órbita media son visibles de entre 2 a 8 horas por cada periodo orbital.

Al tener una órbita de mayor altitud, estos sistemas requieren de una constelación con menor cantidad de satélites para poder proporcionar una cobertura global en comparación de los sistemas de órbita baja, pero significativamente mayor en comparación con los satélites en órbita geoestacionaria.

Uno de los principales problemas de los sistemas satelitales de órbita media radica en el hecho de que sus satélites se ven mucho más afectados por los cinturones de radiación de Van Allen, los cuales encuentran sus puntos máximos de radiación a alturas de alrededor de 3,500 y 18,000 km [7]. Por este motivo se requiere que estos satélites tengan métodos para poder evitar en mayor medida las afectaciones que estos cinturones pudieran producir en sus componentes, de igual modo la vida útil de estos satélites se puede ver afectada por efecto de dichos cinturones de radiación. Una de las principales aplicaciones para

sistemas satelitales de órbita media se encuentra en los sistemas de posicionamiento global GPS [3].

En la Tabla 1.1 se muestra una comparación entre los tres sistemas satelitales mencionados [7].

Órbita	LEO	MEO	GEO
Periodo orbital	1.5 – 2 horas	5 – 10 horas	24 horas
Altitud de la órbita	160 – 1,500 km	8,000 – 20,000 km	36,000 km
Tiempo de visibilidad	10 – 20 minutos	5 – 10 horas	24 horas
Retardo de propagación	<15 ms	Decenas de milisegundos	>250 ms
Díámetro de huella (10° de elevación)	~6,000 km	~12,000 – 15,000 km	~16,000 km

Tabla 1. 1 Comparación entre sistemas satelitales con diferentes tipos de órbita.

1.5 Cobertura de los sistemas satelitales

Los enlaces provistos por los sistemas de comunicaciones satelitales permiten tener comunicación entre dos puntos de la Tierra sin necesidad de que exista alguna infraestructura entre ellas, siempre y cuando se encuentren dentro del área de cobertura, la cual dependerá tanto de la órbita en la cual estén posicionados los satélites, lo que define el área de cobertura a largo plazo, como de la huella que proyectan los haces de las antenas del satélite en tierra, lo que delimita el área de cobertura instantánea del sistema.

El área de cobertura de los sistemas satelitales debe abarcar la zona de servicio, lo que corresponde a las regiones donde se localizan las estaciones terrenas. En la Figura 1.6 se presenta la cobertura a largo plazo y la instantánea [5].

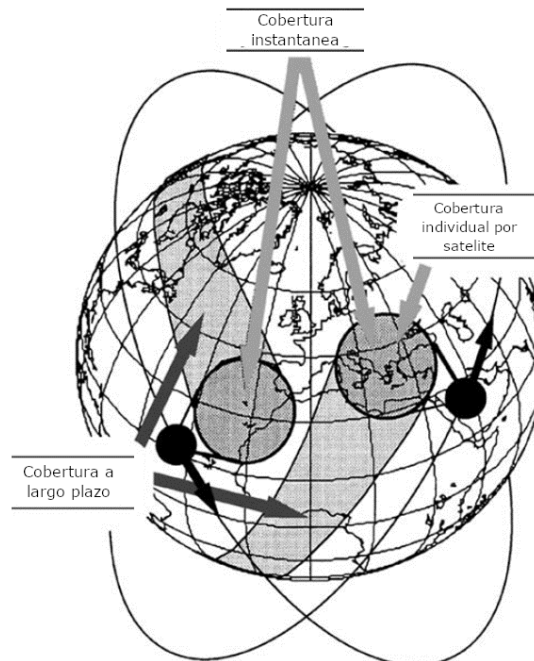


Figura 1. 6 Tipos de cobertura de un sistema satelital.

Esta cobertura puede ser global o regional, dependiendo de las necesidades que se busquen cubrir con los sistemas satelitales, además de las consideraciones en aspecto regulatorio de la operación de dichos sistemas.

1.5.1 Cobertura global

Los sistemas satelitales de comunicación con cobertura global, como su nombre lo indica, están diseñados para poder operar en todo el mundo, y de esta manera poder establecer enlaces de muy larga distancia, por ejemplo, el establecer un enlace de un continente a otro sin necesidad de mayor infraestructura más que

el sistema satelital. Estos sistemas se encargan principalmente de transmitir tráfico internacional. El principal operador de un sistema de cobertura global es INTELSAT, aunque existen otros como INTERSPUTNIK, PANAMSAT u ORION [5], [7], y en la actualidad, se plantea el despliegue de las nuevas mega constelaciones de satélites de órbita baja que cuenten con una cobertura global [13].

1.5.2 Cobertura regional

La cobertura regional surgió debido a los avances en la formación de haz de las antenas en los satélites, pues se podía crear una huella que cubriera las áreas de interés para poder brindar de los servicios en lugares específicos del planeta, logrando de esta manera tener una mayor cantidad de reutilización de frecuencias en los diversos sistemas satelitales, así como el uso más eficiente de la potencia radiada.

En un sistema satelital con cobertura regional el sistema de comunicaciones provee de servicios a una región reducida del planeta, que puede estar conformada por una región de un país, un país completo o un conjunto de países que se encuentren geográficamente cercanos o que compartan intereses similares en cuanto a comunicaciones [3], [8].

Algunos países pueden optar por un sistema nacional de comunicación vía satélite debido a que los precios de dichos sistemas son comparables con sistemas terrestres o para poder brindar servicios de telecomunicaciones a territorios con obstáculos naturales tales como densos bosques, desiertos, o cualquier entorno de difícil acceso o sin infraestructura [7]. En este aspecto, los

satélites con los que cuenta México son de carácter regional y son utilizados principalmente para servicios fijos y servicios móviles por satélite.

1.6 Bandas de frecuencia

Los sistemas de comunicación vía satélite, al ser sistemas inalámbricos, hacen uso del espectro electromagnético, el cual, es un recurso natural limitado, por lo que es de principal importancia la selección de la banda de frecuencia que se utilizará para establecer los enlaces de comunicaciones, debido a que la longitud de onda de la señal es el factor principal que determina cuál será la interacción de la señal con la atmósfera, lo que puede ocasionar degradación en el enlace. Adicionalmente, se intenta que se transmita con la menor cantidad de potencia posible debido a que los costos del transmisor están directamente relacionados con su potencia de salida, por lo que haciendo más eficiente los consumos de potencia del transmisor se pueden reducir costos, principalmente del satélite, y, al transmitir con menos potencia se reduce la posibilidad de interferir a otros sistemas radioeléctricos. En la Figura 1.7 se muestra la atenuación que presenta una onda electromagnética atravesando la atmósfera de la Tierra en relación con su frecuencia [4].

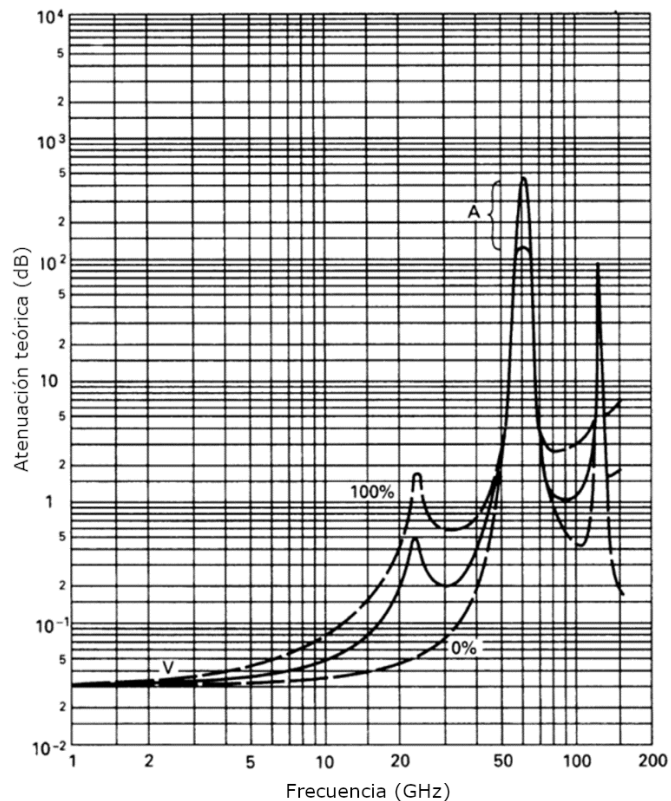


Figura 1. 7 Atenuación de una onda electromagnética dependiendo su frecuencia y la humedad presente en el ambiente.

Adicional a esto, se debe tener en consideración todos los aspectos regulatorios de carácter internacional y regional para hacer la utilización del espectro electromagnético, en este marco, la ITU es la encargada de la asignación de las bandas de frecuencias de los sistemas de comunicaciones, para evitar que se puedan tener problemas en cuanto al desempeño de éstos, dependiendo de la aplicación en que se utilicen, así como también destinar asignaciones de uso exclusivo o compartido entre sistemas [8].

Para hacer referencia a las diferentes bandas de frecuencia del espectro se utilizan dos métodos, el primero es la designación por longitud de onda, donde se divide el espectro electromagnético por décadas, a partir de 3 Hz hasta 300 GHz.

En la Tabla 1.2 se pueden apreciar las bandas de frecuencia utilizando esta nomenclatura [3], [7].

Frecuencia	Longitud de onda	Banda de Frecuencia
3 Hz – 30 kHz	10^8 m – 10^4 m	VLF
30 kHz – 300 kHz	10^4 m – 10^3 m	LF
300 kHz – 3 MHz	10^3 m – 10^2 m	MF
3 MHz – 30 MHz	10^2 m – 10 m	HF
30 MHz – 300 MHz	10 m – 1 m	VHF
300 MHz – 3 GHz	1 m – 10 cm	UHF
3 GHz – 30 GHz	10 cm – 1 cm	SHF
30 GHz – 300 GHz	1 cm – 1 mm	EHF

Tabla 1. 2 Designación de bandas de frecuencia por longitud de onda.

Otro método es una designación por letras, la cual es una nomenclatura adoptada desde la aparición de los radares en 1940. Este método divide el espectro de frecuencias en diferentes bandas a partir de 1 GHz y que llega hasta los 300 GHz [3], siendo la forma en la que los sistemas de comunicación vía satélite definen la banda de frecuencia en la que se encuentran operando, debido a que es donde se sitúa la ventana donde se pueden propagar las ondas electromagnéticas a través de la ionósfera y atmósfera.

A frecuencias menores de 30 MHz los efectos causados por la ionósfera impiden, en su mayoría, que las señales puedan atravesarla, y a frecuencias de alrededor de 30 y 60 GHz se tienen picos en la atenuación de la onda electromagnética causados por el oxígeno y el vapor de agua presentes en la atmósfera, como se

pudo apreciar en la figura 1.7. Esta división de bandas es más ambigua que la anterior pues no se tienen intervalos constantes para cada banda de frecuencia. En la tabla 1.3 se pueden observar las diferentes bandas de frecuencia con la designación por letras [3], [7].

Frecuencia en GHz	Banda de Frecuencia
1 – 2	L
2 – 4	S
4 – 8	C
8 – 12	X
12 – 18	Ku
18 – 27	K
27 – 40	Ka
40 – 60	Q
60 – 75	V
75 – 110	W

Tabla 1. 3 Designación de bandas de frecuencia por letra.

Donde cada una de las diferentes bandas son utilizadas para propósitos diferentes, entre los que se pueden destacar para la banda L el proporcionar servicios de comunicaciones móviles o GPS, la banda S ha sido utilizada para investigación por la NASA y otras agencias gubernamentales alrededor del mundo, la banda C se ha utilizado principalmente para transmisión de señal de televisión vía satélite, mientras que algunos usos de la banda X han sido para sistemas satelitales meteorológicos y militares, asimismo, la banda Ku, K y Ka

han sido utilizadas para diversas aplicaciones de servicios fijos y estas son las propuestas principalmente para utilizarse en las nuevas mega constelaciones satelitales planteadas por empresas como SpaceX, OneWeb o Telesat [14]–[16].

1.7 Conclusiones

Como se ha descrito a lo largo de este capítulo, los sistemas satelitales tienen grandes ventajas en comparación con otros sistemas de comunicaciones, como lo son el poder cubrir grandes porciones de la Tierra utilizando un solo satélite. Esto facilita la prestación de los servicios de comunicación en zonas de difícil acceso que no cuenten con infraestructura o donde la implementación de sistemas de comunicación terrestres sería inviable. Gracias a esta característica se pueden tener enlaces de comunicación de muy larga distancia a un bajo costo, requiriendo menos infraestructura que un sistema de comunicaciones terrestre, adicional a esto, cuentan con la versatilidad de poder ser utilizados para diferentes propósitos, por lo que la utilización de este tipo de sistemas es de gran importancia en las comunicaciones actualmente. En ese sentido, con el surgimiento de la nueva generación de comunicaciones móviles y el creciente uso de sistemas de comunicación para transmisión de datos por el público en general, se hace relevante el estudio de la utilización de sistemas satelitales de órbita baja como una parte importante de las comunicaciones en la actualidad.

1.8 Referencias

- [1] B. Elbert, *Introduction to Satellite Communications*, Third Edit. Artech House, Inc., 2009.
- [2] J. Penttinen, *The Telecommunications Handbook*. John Wiley & Sons, Ltd, 2015.

- [3] L. J. Ippolito Jr., *Satellite Communications Systems Engineering*, Second Edi. John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
- [4] M. Richharia, *Satellite Communications Systems Design Principles*. Macmillan New Electronics Series, 1995.
- [5] G. Maral and M. Bousquet, *Satellite Communications Systems*, Fifth Edit. John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [6] B. Elbert, *The Satellite Communication Applications Handbook*, Second Edi. Artech House, Inc., 2004.
- [7] ITU-R, *HANDBOOK ON SATELLITE COMMUNICATIONS*, 3rd ed. 2002.
- [8] WRC-15, "Radio Regulations Volume 1, Articles," *Int. Telecommun. Union*, p. 430, 2016.
- [9] "Los Recursos Orbitales en México," *Instituto Federal de Telecomunicaciones*. [Online]. Available: <http://www.ift.org.mx/espectro-radioelectrico/recursos-orbitales/en-mexico>. [Accessed: 11-Feb-2020].
- [10] J. N. Pelton, *Satellite Communications*. Springer, 2012.
- [11] S. Krishna Sharma, S. Chatzinotas, and P.-D. Arapoglou, *Satellite Communications in the 5G Era*, First edit. The Institution of Engineering and Technology, 2018.
- [12] X. Artiga *et al.*, "Shared access satellite-terrestrial reconfigurable backhaul network enabled by smart antennas at MmWave band," *IEEE Netw.*, vol. 32, no. 5, pp. 46–53, 2018.
- [13] I. del Portillo, B. G. Cameron, and E. F. Crawley, "A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband," *Acta Astronaut.*, vol. 159, no. March, pp. 123–135, 2019.
- [14] "SpaceX Ka-band NGSO constellation FCC filing SAT-LOA-20161115-00118." [Online]. Available: http://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.hts?q_set=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number/%3D/SATLOA2016111500118&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number. [Accessed: 11-Feb-2020].
- [15] "OneWeb Ka-band NGSO constellation FCC filing SATLOI- 20160428-00041." [Online]. Available: http://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.hts?q_set=V_SITE_ANTENNA

_FREQ.file_numberC/File+Number/%3D/SATLOI2016042800041&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number.
[Accessed: 11-Feb-2020].

- [16] “Telesat Ka-band NGSO constellation FCC filing SAT-PDR- 20161115-00108.” [Online]. Available: http://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.hts?q_set=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number/%3D/SATPDR2016111500108&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number.
[Accessed: 11-Feb-2020].

Capítulo 2: Mega constelaciones de satélites de órbita baja

2.1 Introducción

En este capítulo, se describirán las principales tecnologías que están siendo tendencia en los nuevos sistemas satelitales, incluyendo las características de diversas mega constelaciones de órbita baja, propuestas por varias compañías alrededor del mundo.

Se analizarán aspectos tales como la cantidad de satélites que se planean desplegar para cada constelación, incluyendo las tecnologías empleadas en sus satélites y estaciones terrenas. Además, se especifican las frecuencias a utilizar en el enlace de microondas de subida y bajada. Se estudiarán las ventajas y desventajas que se presentan debido a el tipo de órbita en que operen, y se exponen los parámetros con los que se cuantifica el desempeño de los enlaces.

2.2 Estado del arte de las mega constelaciones satelitales de órbita baja

En las comunicaciones satelitales, el término constelación, hace referencia a un conjunto de satélites que trabajan de manera coordinada para poder proveer de servicios de comunicación de manera continua a una región geográfica en específico.

La utilización de constelaciones satelitales para proveer servicios de comunicaciones no es nueva, pues ya se han utilizado constelaciones, tanto GSO como NGSO, para proporcionar servicios fijos, móviles o de difusión, tanto de manera regional o mundial. Estas constelaciones cuentan con una pequeña cantidad de satélites, rondando de entre 40 a 80 satélites para constelaciones LEO, y de 8 a 24 para constelaciones MEO [1]. Algunas de éstas constelaciones son, por ejemplo, el sistema satelital de órbita baja, *Iridium*, con una constelación de 66 satélites [2] o el sistema *Globalstar* con 48 [3], mientras que el sistema GPS, situado en órbita media, cuenta en su constelación con 31 satélites en operación [4].

En años recientes, gracias a los avances que se han logrado en los sistemas satelitales, incluyendo las tecnologías de comunicaciones ópticas en el espacio libre, el desarrollo de transpondedores con procesamiento a bordo, la utilización de antenas inteligentes, además de la implementación de radios definidos por *software* (*Software Defined Radio*, SDR) [5], se han podido desarrollar sistemas con satélites de alta tasa de transmisión de datos (*High Throughput Satellite*, HTS) [5].

Se espera que con la puesta en operación de constelaciones con HTS se reduzcan significativamente los costos por bit transmitido con los nuevos sistemas satelitales, para conseguir que las redes terrestres y las comunicaciones satelitales trabajen en conjunto en una gran red heterogénea. Para esto, las redes deben operar de una manera transparente para los usuarios, por lo que el uso de tecnologías como las redes definidas por *software* (*Software-Defined Networks*, SDN) es indispensable [5]. Lo anterior da paso a que las

constelaciones satelitales se conviertan en una parte activa de redes terrestres como la 5G y tecnologías subsecuentes [5].

Las constelaciones satelitales de órbita baja poseen una gran ventaja en comparación con otros sistemas satelitales, principalmente en el enlace, pero se ven limitados por su reducida cobertura instantánea, lo que provoca que se requiera de grandes constelaciones para proveer la cobertura deseada. Adicionalmente, los satélites son diseñados dependiendo que tipo de tráfico están planteados a soportar, lo que hace que se consideren características específicas con la que cuente la carga útil.

Algunos aspectos importantes que se consideran en el diseño de la carga útil de los satélites son los siguientes [6] :

- Los requerimientos de potencia del sistema deben ser proporcionales a la demanda de tráfico soportada, para permitir que las baterías se recarguen cuando el tráfico sea bajo o inexistente.
- Analizar los requerimientos del ancho de haz de las antenas, para especificar que tipos de antenas se requieren, ya sean antenas simples o arreglos de antenas.
- Buscar una reducción de costos debido a la gran cantidad de satélites que se requieren en órbita. Para esto se implementan mejoras en la manufactura o mayor automatización del proceso.
- Se busca aumentar el nivel de integración.
- Introducir enlaces intersatelitales (*Intersatellite Link*, ISL) para reducir la cantidad de estaciones terrenas de interconexión del sistema.

- Utilizar procesamiento a bordo para rutear el tráfico a satélites adyacentes mediante ISL, además de eliminar posibles defectos en la información recibida.

Las nuevas mega constelaciones satelitales de LEOs, a diferencia de sus predecesoras, contarán con un desempeño superior en cuanto a tasa de transmisión de datos, esto debido a la implementación de HTS en sus constelaciones, incluyendo también el uso de técnicas de reuso de frecuencias más sofisticado y esquemas de modulación más avanzados [7].

Adicionalmente, gracias al avance en las tecnologías para circuitos integrados de nitruro de galio (GaN), se han podido desarrollar alternativas para la amplificación de potencia, lo que promete ser una opción bastante viable para el desarrollo de la mayoría de la sección de radiofrecuencia (RF) de los satélites [5].

2.2.1 Tecnología basada en GaN para sistemas satelitales

Durante varios años, tecnologías como los amplificadores de tubo de onda progresiva (*Traveling Wave Tube Amplifier*, TWTA), además de los circuitos integrados basados en arseniuro de galio (GaAs), habían sido tendencia para ser implementados en el segmento de RF para realizar las tareas de amplificación de potencia en los satélites.

Esto ha cambiado en años recientes gracias a los avances obtenidos en circuitos integrados fabricados con GaN, los cuales son una alternativa viable para reemplazar a los TWTA en las labores de amplificación de potencia.

Los amplificadores basados en GaN, comparados con los TWTA o amplificadores de GaAs, ofrecen un mejor desempeño en alta potencia, mayor confiabilidad, un pequeño factor de forma, bajo nivel de ruido, mayor linealidad, además de tener un bajo consumo de potencia, es decir, mayor eficiencia de potencia, cuentan con una alta velocidad de saturación, un alto voltaje de ruptura y una alta conductividad térmica, lo que permite una mayor densidad de potencia de salida a altas frecuencias, incluyendo frecuencias milimétricas [5], [8],[9].

Adicionalmente, estos amplificadores son altamente resistentes a la radiación y a temperaturas extremas, lo que los hace ideales para ser utilizados en aplicaciones espaciales, y, gracias a todas las bondades que poseen, son menos demandantes energéticamente, por lo que se pueden reducir los costos de operación [9].

La utilización de amplificadores de potencia de GaN, no se limita a los satélites, pues esta tecnología se está implementando de manera comercial y militar en estaciones terrenas, tanto fijas como móviles, principalmente en estaciones terrenas pequeñas, aprovechando sus ventajas en cuanto a tamaño, peso y eficiencia, haciendo que se pueda expandir el uso de VSAT para aplicaciones personales, comerciales, militares, adquisición de datos y de monitoreo remoto, además de ser utilizados para la tecnología 5G [8], [9].

Algunas de las características que los fabricantes de amplificadores de GaN mencionan en sus hojas técnicas incluyen: un amplio rango de frecuencia de operación de sus amplificadores, los cuales pueden ir desde 2 GHz hasta 46 GHz, esto para diferentes circuitos integrados, además de ser capaces de soportar temperaturas extremas, las cuales oscilan entre -40° C y 150° C, y

proporcionar ganancias de hasta 46 dB, adicionalmente, las dimensiones de cada circuito integrado es de unos cuantos milímetros [10].

2.2.2 Transpondedor satelital con procesamiento a bordo OBP

Como se estudió en el primer capítulo, los satélites de comunicaciones pueden utilizar dos tipos de transpondedores, los transparentes o no regenerativos, y transpondedores que cuentan con procesamiento a bordo. Los satélites que incorporan transpondedores con OBP, esencialmente separan el enlace de subida del de bajada para permitir que se realicen diversas técnicas que mejoren la señal en cualquiera de los dos enlaces [11].

Para que se considere que un transpondedor cuenta con OBP, debe ser capaz de realizar una o más de las siguientes funciones: conmutar la señal ya sea en frecuencia, tiempo o espacio; regenerar la señal y realizar un procesamiento en banda base [12].

En los sistemas con este tipo de transpondedor, el procesamiento se hace de manera digital. Las formas de onda recibidas por el satélite son demoduladas y decodificadas en órbita, para luego realizar algún proceso de corrección o regeneración de la señal de información, y posteriormente ser retransmitida hacia su destino. Con este tipo de transpondedor, se hace más flexible la retransmisión de la información en satélites que cuenten con múltiples haces o antenas en el enlace de bajada, conmutando la señal hacia los haces requeridos [5], [13].

Estos transpondedores, además de ofrecer ventajas en la regeneración de la señal recibida, proporcionan mayor flexibilidad a los satélites en cuanto a

señalización, ruteo de información y manejo de recursos, además de aumentar la capacidad de transmisión de datos del sistema y aumentar la eficiencia del enlace, lo que se consigue gracias a la mitigación de interferencia y distorsión que estuviera presente en la señal recibida [5].

Debido a esto, los satélites están siendo equipados más frecuentemente con transpondedores que realicen procesamiento a bordo. Los transpondedores con OBP, se pueden clasificar en dos tipos diferentes: con procesamiento digital transparente y transpondedores con procesos regenerativos.

Los transpondedores con procesamiento digital transparente (*Digital Transparent Processor*, DTP), son utilizados en los satélites para incrementar el nivel de flexibilidad en el procesamiento de señales, como filtrado o ruteo, con la desventaja de consumir más potencia que los transpondedores transparentes.

La arquitectura básica de un transpondedor de este tipo, además de los elementos de un transpondedor transparente, consta de un conversor analógico digital (*Analog to Digital Converter*, ADC), seguido de un circuito integrado de propósito específico (*Application-Specific Integrated Circuit*, ASIC), el cual se encarga de realizar el procesamiento digital sobre la señal y realizar las tareas de conmutación, un conversor digital a analógico (*Digital to Analog Converter*, DAC), como se puede apreciar en la Figura 2.1.

Debido a que en este tipo de transpondedor no se realizan tareas de regeneración de señal, puede utilizarse para señales analógicas o digitales [13].

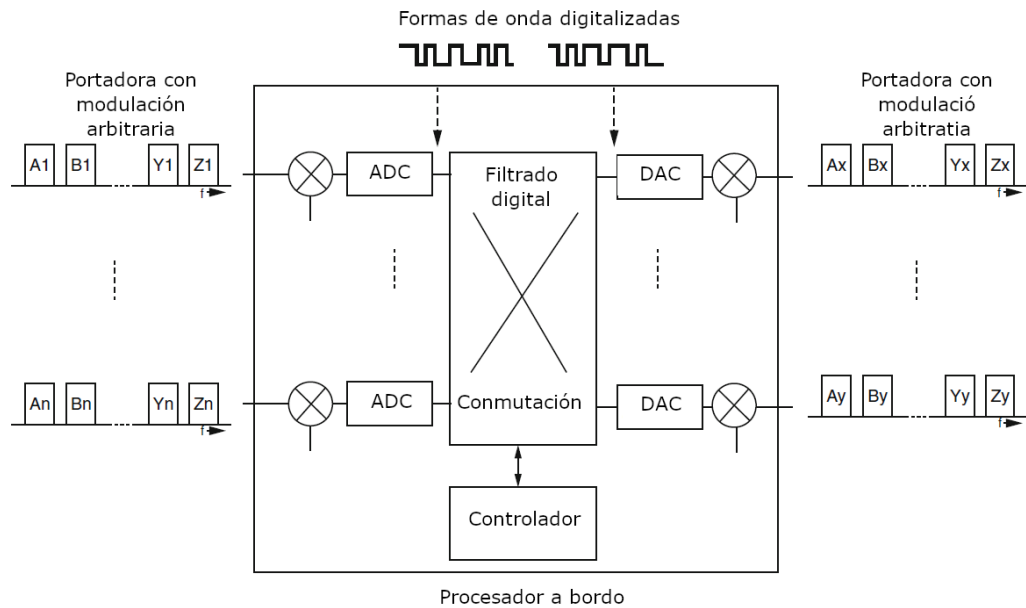


Figura 2. 1 Arquitectura de un transpondedor con procesamiento digital transparente [13].

Los transpondedores con procesos regenerativos pueden conseguir que se incremente la ganancia del enlace, debido a que como su nombre lo indica, son capaces de regenerar la señal recibida a bordo del satélite, mediante la demodulación y decodificación de la señal, para posteriormente realizar un procesamiento digital sobre ella, eliminando los defectos que se hayan producido por la interferencia o el ruido. Después, es codificada y modulada nuevamente, para retransmitirse hacia las estaciones terrenas, o a otros satélites mediante enlaces intersatelitales. La complejidad de estos transpondedores radica en que, al estar enfocados para los HTS, necesitan manejar grandes anchos de banda [14].

En la Figura 2.2 se presenta la arquitectura básica de un transpondedor regenerativo.

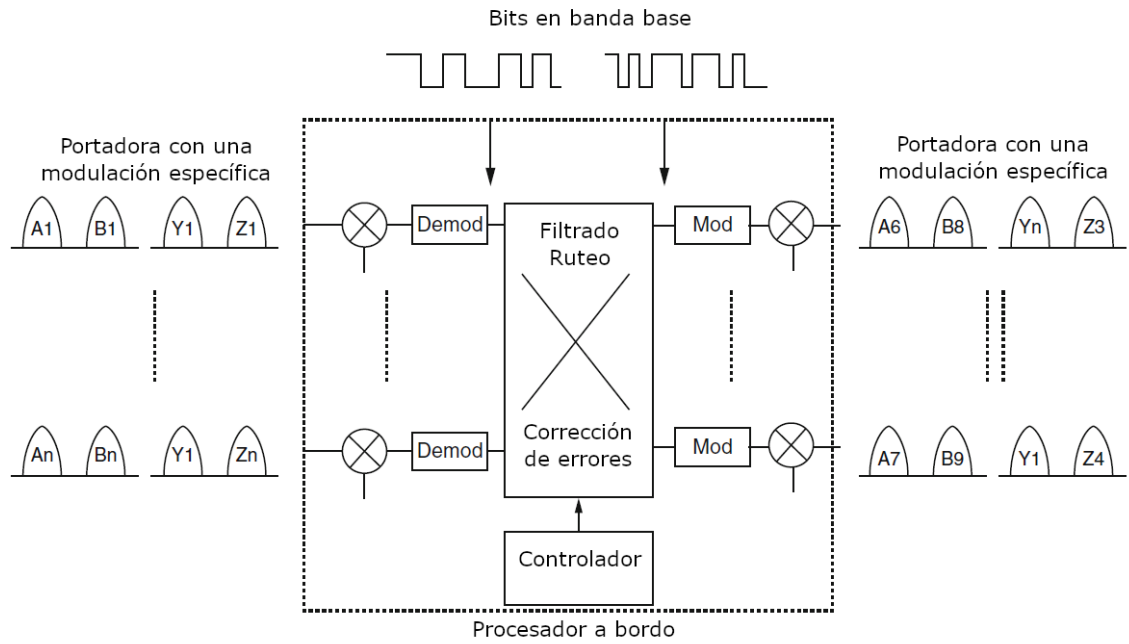


Figura 2. 2 Arquitectura básica de un transpondedor regenerativo [13].

Entre las características que se ofrecen en la industria para realizar el procesamiento a bordo, se incluye un circuito integrado que cuenta con un radio definido por *software*, moduladores y demoduladores de banda ancha DVB-S2X, con un ancho de banda mayor a 500 MHz, interfaces de alta velocidad además de incluir un DSP y una CPU [15], como se puede apreciar en la Figura 2.3.

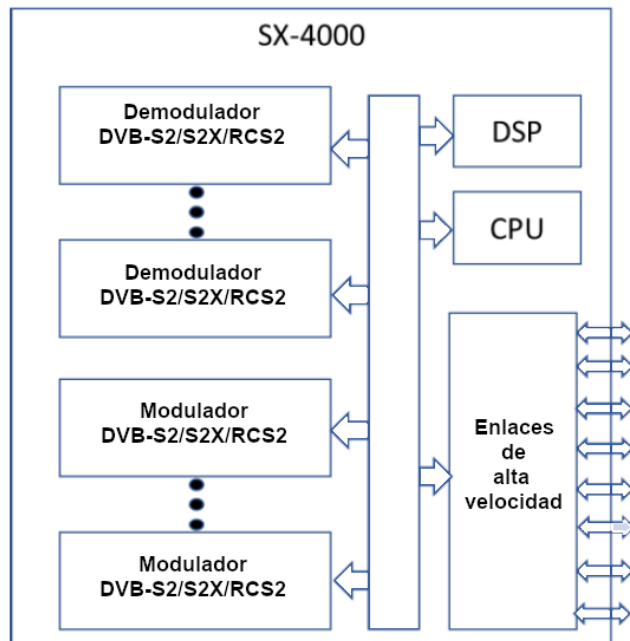


Figura 2. 3 Arquitectura del CI para OBP de SATIXFY SX-4000 [15].

2.2.3 Formación de haz

Dado que los nuevos sistemas de mega constelaciones de LEO's plantean la utilización de ondas milimétricas, deben afrontar los retos que esto representa, principalmente a causa de las pérdidas por propagación a las que se ven expuestos, debido en gran parte a la atenuación atmosférica, por lo cual, la utilización de tecnologías de formación de haz se presenta como una de las alternativas más viables para hacer frente a este problema [16].

La formación de haz es una técnica mediante la cual, al manipular diversos parámetros en un arreglo de antenas, como pueden ser la fase o el retardo de la señal, se consigue modificar el patrón de radiación de ésta. Esto se consigue con la combinación constructiva o destructiva de las señales procedentes de cada elemento, con el propósito de que el lóbulo principal de la antena se dirija hacia un punto en específico o se generen múltiples haces. Con la

formación de haz se consigue que el sistema sea más robusto ante las señales interferentes o el ruido.

Al utilizar ondas milimétricas, el ancho de haz de los arreglos de radiadores puede ser más estrecho en comparación a frecuencias más bajas, por lo que se puede tener una reutilización de frecuencias más intensiva o la capacidad de transmitir información diferente en distintos haces de la misma antena, por ende, se puede utilizar más eficientemente el espectro electromagnético y transmitir mayor cantidad de información [14].

La formación de haz puede ser de dos tipos, pasiva o activa. La formación de haz pasiva consiste en un arreglo de radiadores direccionales con haces fijos, las cuales conmutan entre sus haces para conseguir apuntar un haz en la orientación deseada.

La formación de haz activa, consiste en la modificación del patrón de radiación de manera dinámica con la utilización de desfasadores en cada elemento del arreglo de antenas. Existen tres tipos de arquitecturas con las cuales se puede hacer la formación de haz de manera activa: analógica, digital e híbrida.

La formación de haz analógica consiste en la utilización de desfasadores y amplificadores de ganancia variable para provocar retardos y variaciones en la amplitud de la señal para cada elemento del arreglo de radiadores. Este tipo de formación de haz es popular debido a los bajos costos que conlleva su implementación, en particular para ondas milimétricas, debido a su bajo consumo energético y su fácil incorporación en el segmento de radiofrecuencia, además de requerir menor procesamiento. Sin embargo, este método se ve limitado debido a que los desfasadores y en general, toda la red de formación de

haz (*Beamforming Network*, BFN) deben ser diseñados para una frecuencia de operación en específico, haciendo que sea menos flexible y más difícil de reconfigurar [16], [17].

La formación de haz digital se realiza principalmente en banda base mediante un procesamiento digital de la señal, y la conexión de ADC's y DAC's directamente a cada módulo del transceptor. Esto requiere un formador de haz y un RFFE para cada elemento del arreglo de antenas, lo que permite que todo el proceso se haga con *hardware* digital sin necesidad de implementar desfasadores como en la formación analógica.

La formación de haz digital cuenta con un alto grado de control y mayor adaptabilidad para transmitir y recibir señales de banda ancha, además de incorporar la transmisión de información por múltiples haces, lo que es favorable para entornos de alta demanda de tráfico y redes con usuarios móviles. Su principal desventaja es el mayor consumo de potencia, factor que es crítico en estaciones espaciales [16].

Por último, la formación de haz híbrida, utiliza la combinación de las arquitecturas anteriores, por lo que es una formación de dos etapas, combina la utilización de desfasadores y amplificadores de ganancia variable para un subgrupo de elementos del arreglo de antenas, los cuales son controlados por un procesamiento digital. En esta técnica, los procesos digitales necesarios y el consumo de potencia son menores que en la formación digital, pero brindan mayor flexibilidad que la formación de haz analógica. La formación híbrida tiene limitada su capacidad de crear múltiples haces por la cantidad de subgrupos de elementos con las que cuenta.

La utilización de formación de haz en las antenas, adicionalmente de los transpondedores con procesamiento a bordo, dan cabida a la implementación de antenas inteligentes en los sistemas satelitales, ya sea en estaciones terrenas o en estaciones espaciales, lo que permitiría la utilización de diversas técnicas para hacer un reuso más eficiente del espectro electromagnético, así como prevenir interferencias, dirigir de forma dinámica el haz a una dirección requerida, aumentar la confiabilidad de los enlaces y poder aumentar la capacidad de transmisión de información.

2.2.4 Mega constelaciones satelitales

Como se estudió en el capítulo anterior, la creciente necesidad de contar con acceso a las comunicaciones en todo momento, y teniendo presente la capacidad inherente de las comunicaciones satelitales de poder brindar cobertura en grandes zonas geográficas, así como proporcionar sus servicios a regiones remotas sin necesidad de mayor infraestructura, ha hecho que diversas empresas alrededor del mundo comiencen el despliegue de mega constelaciones satelitales de órbita baja.

Estas constelaciones tienen el objetivo de proveer comunicaciones en cualquier lugar del mundo, con las cuales se espera que se consiga reducir los costos y aumentar el alcance de las comunicaciones satelitales actuales, siendo además indispensables como complemento de las redes de comunicaciones terrestres.

Teniendo en cuenta lo anterior, múltiples compañías alrededor del mundo, entre las cuales destacan SpaceX, OneWeb, Telesat, entre otras [7], [18], han comenzado con el despliegue de constelaciones satelitales de órbita baja.

Dichas constelaciones contarán con una cantidad de satélites muy superior a las constelaciones consideradas anteriormente, superando en algunos casos los cientos, e incluso miles de satélites colocados en órbita y operativos. Por este motivo, estas nuevas constelaciones satelitales han recibido el nombre de mega constelaciones, para diferenciarlas de sus predecesoras [5], [7].

2.2.4.1 Mega constelación Starlink de SpaceX

Starlink es el nombre de la constelación de la compañía SpaceX, que tiene como objetivo proveer de una amplia variedad de comunicaciones de banda ancha a usuarios residenciales, comerciales, gubernamentales, entre otros. Proporcionará servicios como internet de alta velocidad alrededor del mundo, utilizando el servicio fijo por satélite, llegando a zonas remotas, donde dicho servicio ha sido hasta ahora inviable, costoso o inexistente [19].

SpaceX ha comenzado el despliegue de una de las mega constelaciones satelitales más ambiciosas, la cual fue aprobada por la FCC desde el año 2016. Plantea poner en órbita 4,426 satélites, con un peso aproximado de 260 kg. Su sistema utilizará el espectro de las bandas Ku y Ka, y sus satélites estarán dispuestos en 83 planos orbitales, los cuales estaban originalmente planteados a orbitar en un rango de alturas de 1,110 km a 1,325 km sobre la superficie de la Tierra [20]. Posteriormente, se solicitó la relocalización de 1,584 de sus satélites a una altura de 550 km, colocados en 72 planos orbitales, con 22 satélites por plano orbital, debido a que a esta altitud se conseguiría mejorar el desempeño de su sistema, sin incrementar la interferencia que produciría en otras constelaciones [21].

Al ser una constelación tan grande, SpaceX hará su despliegue en varias fases, comenzando con los satélites que orbitarán a una altitud de 550 km, para posteriormente realizar el despliegue del sistema completo en sus demás órbitas.

Adicional a las órbitas descritas a una altitud de 550 km, para la constelación completa se consideran cuatro altitudes complementarias para los demás planos orbitales, como se puede apreciar en la Tabla 2.1 [22].

Parámetro	Constelación completa					Despliegue inicial
Altitud [km]	550	1110	1130	1275	1325	550
Elevación mínima	40°					25°
Planos orbitales	72	32	8	5	6	24°
Satélites/Plano	22	50	50	75	75	22
Satélites/Capa	1584	1600	400	375	450	1584

Tabla 2. 1 Características orbitales de la constelación Starlink de SpaceX.

En cuanto a las bandas de frecuencia a utilizar por el sistema, en su despliegue inicial, SpaceX utilizará el espectro de la banda Ku para establecer los enlaces de usuarios y de interconexión. Posteriormente, cambiará a banda Ka para sus enlaces de interconexión, conforme vaya aumentando su cantidad de satélites en órbita. Así mismo, se comenzará con la utilización de antenas parabólicas en las estaciones terrenas de interconexión, para posteriormente introducir arreglos de antenas en fase.

En la Tabla 2.2 se detallan los rangos de frecuencia que se emplearán en el sistema, tanto en su despliegue inicial como en su despliegue total [21].

Tipo de enlace	Rangos de frecuencia iniciales	Rangos de frecuencia Finales
Bajada de usuario	10.7 – 12.7 GHz	10.7 – 12.7 GHz
Bajada de interconexión	10.7 – 12.7 GHz	10.7 – 12.7 GHz 17.8 – 18.6 GHz 18.8 – 19.3 GHz 19.7 – 20.2 GHz
Subida de usuario	14.0 – 14.5 GHz	12.75 – 13.25 GHz 14.0 – 14.5 GHz
Subida de interconexión	14.0 – 14.5 GHz	14.0 – 14.5 GHz 27.5 – 29.1 GHz 29.5 – 30.0 GHz
Bajada de TT&C	12.15 – 12.25 GHz	12.15 – 12.25 GHz 18.55 – 18.60 GHz
Subida de TT&C	13.85 – 14.00 GHz	13.85 – 14.00 GHz

Tabla 2. 2 Bandas de frecuencia utilizadas por SpaceX.

Debido a la baja altitud de la capa más próxima a la Tierra de la constelación satelital, en las fases iniciales del despliegue, las estaciones terrenas sólo podrán mantener comunicación con los satélites con ángulos mínimos de elevación de 25°. Posteriormente, se modificará para terminar con la elevación mínima de 40° para el sistema completo, como se puede apreciar en la Tabla 2.1.

En fases iniciales, los satélites proporcionarán servicios a 56.55° alejados de su posición objetivo que es 44.85° en su despliegue total, siendo capaz de

cubrir un área de aproximadamente 1 millón de kilómetros cuadrados por satélite, como se puede apreciar en la Figura 2.4.

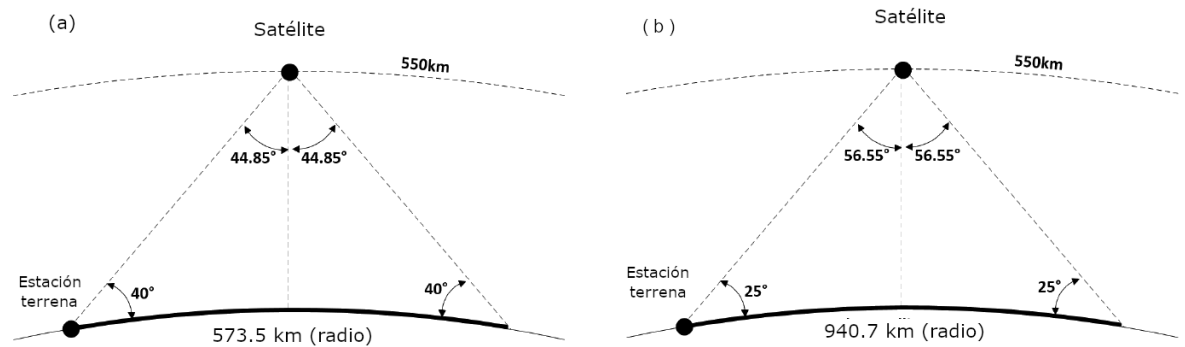


Figura 2. 4 Elevación mínima del sistema: (A) Constelación completa (b) Fase inicial [21].

En la carga útil del satélite se incluyen cuatro arreglos de antenas en fase, las cuales contarán con formación de haz y procesamiento digital, esto proporcionará alta adaptabilidad al sistema en cuanto al uso del espectro en las bandas Ku y Ka. Cada haz de bajada podrá ser direccionado individualmente a través de todo el campo de visión del satélite. Se utiliza RHCP para enlaces de bajada y LHCP para enlaces de subida de usuarios. Para los enlaces de interconexión, cada satélite transmite dos haces con la misma frecuencia, utilizando RHCP y LHCP, por lo que cada estación terrena de interconexión soportará un máximo de 4 satélites simultáneamente [21].

Adicional a esto, se contará con antenas omnidireccionales en cada satélite para su sistema de TT&C, por lo que se podrán mantener comunicaciones con las estaciones de TT&C con un ángulo mínimo de elevación de 5° [23].

El sistema incluye la utilización de enlaces intersatelitales ópticos, para poder disponer de una mejor continuidad del servicio, además, ayudará a cumplir con los límites de emisión de potencia permitidos, para de este modo, facilitar la compartición del espectro con otros sistemas, evitando así interferirlos.

Las estaciones terrenas del sistema utilizarán arreglos de antenas en fase y antenas inteligentes, para que se disponga de una alta directividad y poder realizar el seguimiento de los satélites. Se tendrá la capacidad de elegir entre los múltiples satélites, los que tengan línea de vista, para evitar de manera dinámica interferencia con otros sistemas satelitales, tanto GSO como NGSO, contando también con una gran capacidad de supresión de lóbulos laterales.

2.2.4.2 Mega constelación planteada por OneWeb

OneWeb [24] es una compañía de comunicaciones que se plantea desplegar una mega constelación satelital de órbita baja, con el propósito de proveer servicios de alta velocidad y gran capacidad de transmisión de datos con cobertura global y una baja latencia, entre los cuales se incluyen el internet de banda ancha y la conexión con sistemas celulares como enlace de *backhaul* [24] mediante la utilización del servicio fijo por satélite.

La constelación de OneWeb fue aprobada en 2017, la cual originalmente consideraba el despliegue de 720 satélites, sin embargo, se realizó una actualización, la cual fue aprobada por la FCC [25], para que se aumentara su constelación a un total final de 1,980 satélites en órbita baja.

Estos satélites estarían distribuidos en 36 planos orbitales con 55 satélites por plano, con un ángulo de inclinación de 87.9° , que operasen en las bandas de

frecuencia Ku y Ka, recorriendo órbitas circulares, casi polares, a una altitud de 1,200 km, con lo cual, el sistema experimentará una latencia menor a 50 ms.

En su sistema se incluyen estaciones de TT&C, estaciones terrenas de interconexión y estaciones terrenas de usuario [25], [26].

El sistema de OneWeb, utilizará la banda Ku para los enlaces entre las estaciones terrenas de usuarios y los satélites, y la banda Ka para los enlaces con las estaciones terrenas de interconexión.

Las estaciones terrenas de usuario serán estaciones pequeñas, con antenas con dimensiones de entre 30 a 75 cm, las cuales podrían ser antenas parabólicas con un sistema de direccionamiento mecánico, así como arreglos de antenas en fase. Para las estaciones terrenas de interconexión se utilizarán antenas con dimensiones de aproximadamente 2.4 m. Adicionalmente, el ángulo mínimo de elevación con que contarán las estaciones terrenas será de 55° , como se muestra en la figura 2.5.

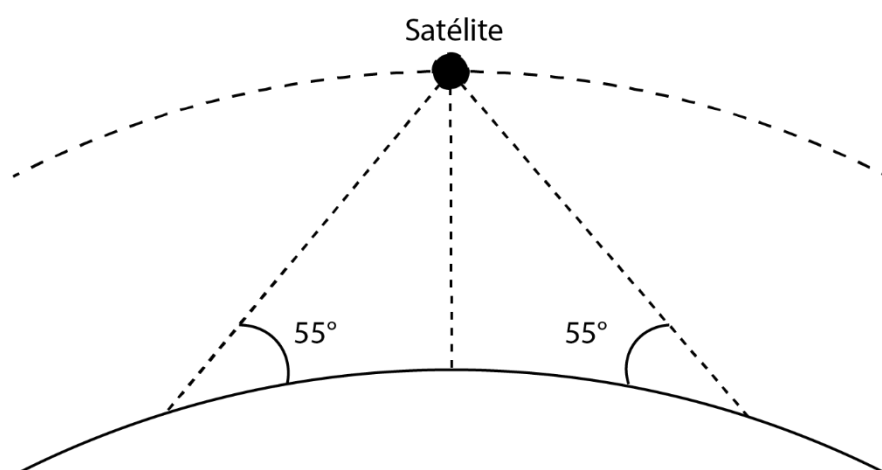


Figura 2. 5 Ángulo mínimo de elevación para estaciones terrenas de OneWeb.

Las frecuencias que utiliza el sistema se detallan en la Tabla 2.3 [27].

Tipo de enlace	Rango de Frecuencias
Subida de interconexión	27.5 – 29.1 GHz
	29.5 – 30.0 GHz
Bajada de interconexión	17.8 – 18.6 GHz
	18.8 – 19.3 GHz
	19.7 – 20.2 GHz
Subida de usuario	12.75 – 13.25 GHz
	14.0 – 14.5 GHz
Bajada de usuario	10.7 – 12.7 GHz

Tabla 2. 3 Bandas de frecuencia utilizadas por la constelación de OneWeb.

Cada satélite de la constelación dispone de 16 haces fijos idénticos, altamente elípticos, como se presenta en la Figura 2.6, los que cubren un área aproximada de 1.7 millones de kilómetros cuadrados. Estos haces se utilizan para establecer comunicación con los usuarios en banda Ku. Cada haz es capaz de proveer comunicación a múltiples estaciones terrenas de usuario, utilizando multiplexaje por división de tiempo (*Time Division Multiplexing*, TDM). Para los enlaces de interconexión, se cuenta con dos haces idénticos direccionales que operan en banda Ka. Además, dispone de una porción específica en la banda Ka para establecer el enlace con las estaciones de TT&C.

Se utilizan las polarizaciones RHCP y LHCP tanto para enlaces de interconexión como de usuario. El ancho de banda dispuesto para el enlace de subida de las estaciones de interconexión es de 250 MHz por portadora, mientras que para los enlaces de usuario es de 125 MHz.

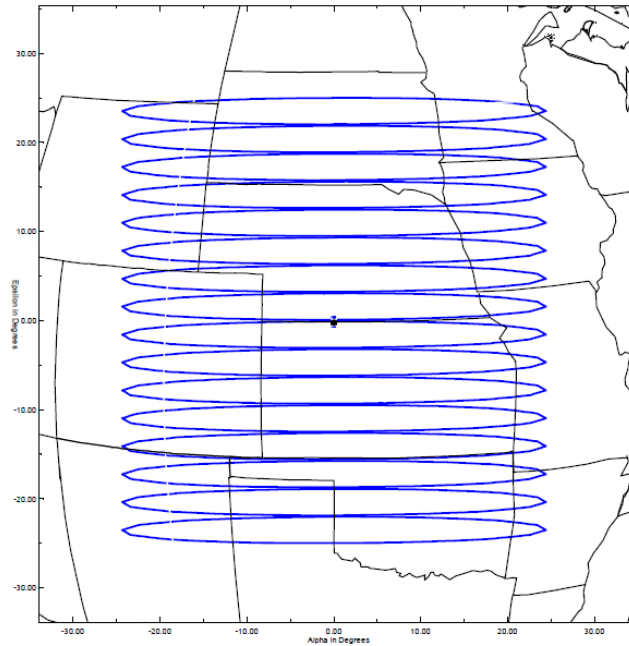


Figura 2. 6 Huella proyectada por un satélite de la constelación de OneWeb [27].

Este sistema no considera enlaces intersatelitales, por lo que el servicio solamente podrá ser ofrecido en las regiones donde los usuarios y estaciones terrenas estén simultáneamente en línea de vista de algún satélite.

OneWeb plantea que cada uno de sus satélites será capaz de operar por un periodo de 10 años [26].

2.2.4.3 Mega constelación planteada por Telesat

Telesat es una compañía de telecomunicaciones satelitales, la cual plantea el despliegue de una mega constelación de órbita baja, que deberá estar operativa en 2022. Ofrecerá comunicaciones con cobertura global, de banda ancha y muy

baja latencia, la cual podrá asemejarse a la latencia de las comunicaciones terrestres [28].

Su constelación estaba originalmente planeada para disponer de 117 satélites, siendo después modificada y aprobada por la FCC para que incremente a 298 [29], aun así, se busca que en un futuro la constelación final conste de 1671 satélites en órbita. Los satélites de esta constelación utilizarán la banda Ka, y serán posicionados en dos conjuntos de órbitas. El primer conjunto estará compuesto por al menos 6 planos orbitales, mínimo con 13 satélites por plano, a una altitud de 1,015 km en órbitas polares, con una inclinación de 98.98° . El segundo conjunto orbital, será compuesto por al menos 20 planos orbitales, con 11 satélites por plano, a una altitud de 1,325 km, situados en órbitas circulares con una inclinación de 50.88° . Se utilizarán estos dos conjuntos para proporcionar cobertura global, utilizando el primero para zonas polares o muy alejadas del ecuador, mientras que el segundo conjunto se utilizará para satisfacer la demanda de localizaciones cercanas al ecuador y de latitudes medias, donde se concentra una mayor demanda de servicios de comunicaciones [30], [31].

Cada satélite de la constelación contará con arreglos de antenas en fase, que posean la capacidad de generar al menos 16 haces de usuario para el enlace de bajada y 16 para los enlaces de subida. Dichos haces podrán ser individualmente direccionables y adaptables. Podrán utilizar polarizaciones tanto RHCP como LHCP, ya sea para los enlaces de subida o de bajada. Cada haz de usuario puede conformar un área circular en tierra que va desde 35 km hasta 560 km de diámetro.

Adicional a esto, cada satélite incluirá dos haces más para establecer comunicaciones con las estaciones terrenas de interconexión, y de un haz que cubrirá toda la huella de cobertura del satélite, destinado a detectar peticiones de conexión de los usuarios, así como de enlaces intersatelitales ópticos.

Cada satélite incluirá una carga útil con procesamiento a bordo regenerativo, y con formación de haz digital, con el propósito de mejorar las comunicaciones y eliminar todos los defectos provenientes del enlace de subida [31].

Con respecto a las estaciones terrenas, el sistema contará con estaciones de interconexión y estaciones de usuario. Las estaciones terrenas de usuario podrán ser fijas o móviles, además, podrán emplear antenas direccionables electrónica o mecánicamente, adicionalmente, poseerán un ángulo mínimo de elevación de 20° , como se muestra en la figura 2.7. En algunos casos, las estaciones de interconexión también podrán funcionar como estaciones de TT&C, para brindar al sistema de mayor confiabilidad.

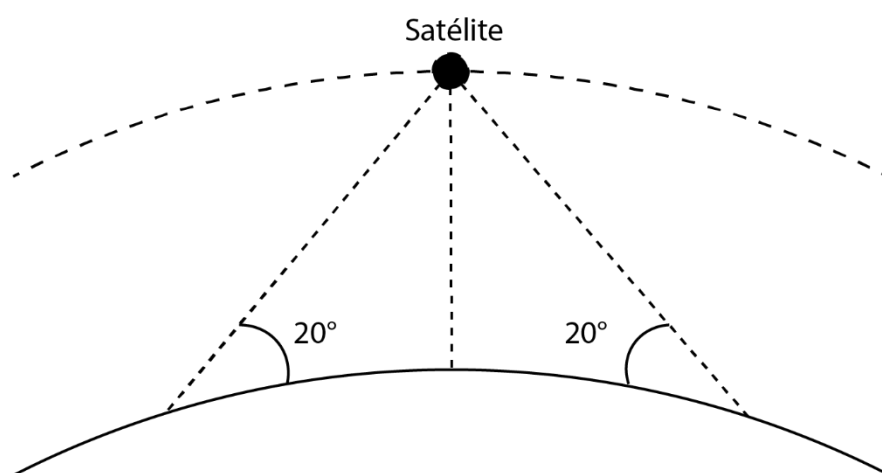


Figura 2. 7 Ángulo mínimo de elevación para estaciones terrenas de Telesat.

Esta constelación utilizará rangos de frecuencia comprendidos en banda Ka para establecer sus enlaces de comunicación como se puede observar en la Tabla 2.4.

Tipo de enlace	Rango de Frecuencias
Bajada	17.8 – 18.6 GHz
	18.8 – 19.3 GHz
	19.7 – 20.2 GHz
Subida	27.5 – 29.1 GHz
	29.5 – 30.0 GHz

Tabla 2. 4 Frecuencias utilizadas por la constelación de Telesat [30].

2.2.4.4 Mega constelación planteada por Amazon

El sistema satelital Kuiper [32] es el nombre de la mega constelación de órbita baja propuesta por la compañía Amazon, la cual considera proveer servicios de comunicaciones de baja latencia, alta velocidad y banda ancha, tanto a usuarios particulares como a empresas, con cobertura en gran parte del mundo.

Esta constelación será conformada por 3,236 satélites, situados en tres capas orbitales a alturas de 590, 610 y 630 km. Se utilizará el espectro de la banda Ka para los enlaces de comunicaciones. La cantidad de satélites por capa y por plano orbital se describen en la Tabla 2.5 [32].

Altitud	Inclinación	Planos orbitales	Satélites/Plano	Satélites/Capa
630 km	51.9°	34	34	1156
610 km	42°	36	36	1296
590 km	33°	28	28	784

Tabla 2. 5 Características orbitales de la constelación del sistema Kuiper.

Aunque esta constelación tendrá una gran cantidad de satélites, no será capaz de proveer cobertura global, pues está limitada únicamente a latitudes de 56° norte y 56° sur del ecuador, con lo que tendrá cobertura en las partes más pobladas de la Tierra.

Los satélites de la constelación emplearán sistemas avanzados de arreglos de antenas en fase, que puedan generar múltiples haces de usuarios. Adicionalmente, incluirán un módulo de procesamiento a bordo, y control de las funcionalidades mediante radios definidos por *software*, para permitir una mayor flexibilidad del enlace, dependiendo de las necesidades de cada región.

Un conjunto separado de antenas será destinado a establecer los enlaces de comunicación con las estaciones terrenas de interconexión. Además, se podrán establecer enlaces de TT&C utilizando los enlaces y las estaciones terrenas de interconexión, permitiendo de esta manera a Amazon, tener control de sus satélites la mayor parte del tiempo sin necesidad de la construcción de numerosas estaciones exclusivas de TT&C.

Los haces de usuario de cada satélite proveerán de servicios a múltiples consumidores. Estos haces podrán ser formados y direccionados

individualmente mediante el uso de los arreglos de antenas en fase, además, las antenas utilizadas para este propósito serán de alta ganancia.

Cada haz será asignado para un propósito en específico por la SDN del sistema Kuiper, con el fin de reducir la posibilidad de interferencia con haces del mismo sistema o de otros sistemas satelitales o terrestres, además de que podrá asignar anchos de banda diferentes, dependiendo de la demanda de los usuarios.

Estos haces podrán ser formados para cubrir áreas desde 300 kilómetros cuadrados, es decir, un radio de 10 km, e incluso, conformar haces con áreas de hasta 500 kilómetros cuadrados, esto en zonas donde así se requiera.

El área total de cobertura de cada satélite de la constelación dependerá de la altitud en la que se encuentren posicionados, pues los satélites a una altitud de 630 km podrán proveer cobertura hasta 48.2° alejados de su nadir, como se muestra en la Figura 2.8, lo que equivale aproximadamente a 1.56 millones de kilómetros cuadrados.

Las elevaciones mínimas para las estaciones terrenas son de 35° , 35.2° y 35.4° para los satélites situados a 590 km, 610 km y 630 km, respectivamente. Los ángulos mínimos de elevación para cada tipo de estación terrena se detallan en la Tabla 2.6.

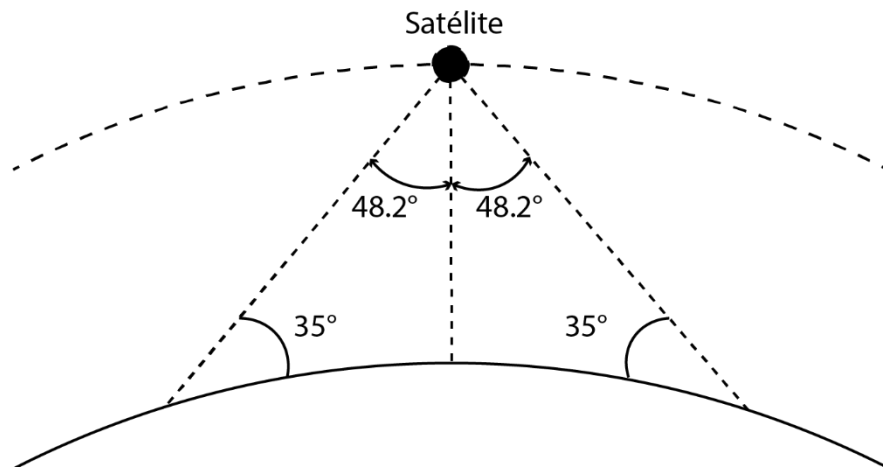


Figura 2. 8 Ángulo mínimo de elevación para las estaciones terrenas del sistema Kuiper [32].

Tipo de estación terrena	Angulo mínimo de elevación
Interconexión	20°
Usuario	35°
TT&C	5°

Tabla 2. 6 Ángulos mínimos de elevación para el sistema Kuiper [32].

Todas las comunicaciones del sistema Kuiper, tanto para enlaces de usuarios, de interconexión y de TT&C, se llevarán a cabo en las frecuencias de la banda Ka. En la Tabla 2.7 se muestra a detalle las frecuencias a utilizarse en esta constelación.

Tipo de enlace	Rango de frecuencias
Subida de usuario	28.35 – 28.6 GHz
	28.6 – 29.1 GHz
	29.5 – 30.0 GHz
Bajada de usuario	17.7 – 18.6 GHz
	18.8 – 19.3 GHz
	19.3 – 19.4 GHz
	19.7 – 20.2 GHz
Subida de interconexión	27.5 – 28.6 GHz
	28.6 – 29.1 GHz
	29.1 – 29.5 GHz
	29.5 – 30.0 GHz
Bajada de interconexión	17.7 – 18.6 GHz
	18.8 – 19.3 GHz
	19.3 – 19.7 GHz
	19.7 – 20.2 GHz
Subida de TT&C	27.5 – 28.05 GHz
Bajada de TT&C	19.25 – 19.4 GHz

Tabla 2. 7 Frecuencias de operación de la constelación satelital Kuiper [32], [33].

Para establecer cada enlace con los usuarios se utilizarán arreglos en fase en los satélites, mientras que en la estación terrena se podrá utilizar antenas parabólicas o antenas en fase. Para los enlaces de bajada de usuario se pueden tener canales de 100 MHz, los que se pueden ampliar a 200 y 500 MHz. Para el enlace de subida se dividirá en canales de 50 MHz, los cuales también podrán ser ampliados a 100 y 200 MHz. Todos los enlaces de usuario podrán utilizar RHCP y LHCP, además, los canales de subida de los usuarios son compartidos utilizando una combinación de TDMA, FDMA y CDMA [33].

En cuanto a los enlaces de interconexión, éstos serán establecidos mediante la utilización de antenas parabólicas tanto en el satélite como en las estaciones

terrenas. Las estaciones terrenas de interconexión emplearán antenas de entre 1 a 2.4 metros de diámetro. Para estos enlaces, se dispondrá de canales de 50 MHz para los enlaces de subida y de 100 MHz para los enlaces de bajada.

El área de cobertura de los haces de interconexión se extiende más allá de la cobertura de los haces de usuario, siendo capaces de cubrir un área de aproximadamente 3.2 millones de kilómetros cuadrados por satélite. Para los enlaces de TT&C se utilizarán antenas de alta ganancia, de 2 a 3 metros de diámetro para las estaciones terrenas, y antenas de parche colocadas en distintos sitios del satélite para permitir conectividad en todo momento [32], [33].

2.2.4.5 Otras mega constelaciones satelitales planteadas

Adicional a las mega constelaciones descritas, diversas compañías alrededor del mundo han mostrado interés en realizar el despliegue de sus propias constelaciones satelitales de órbita baja, las cuales tendrían como principal objetivo el proveer de internet de banda ancha de manera global o a gran parte de la superficie de la Tierra [34]. Entre estas compañías se encuentran LeoSat [35], Kratos Defense & Security Solutions [36], Samsung [37], Boeing [38], Kepler Communications[39], [40]. Aunque estas compañías se muestran optimistas en cuanto al despliegue de sus propias constelaciones, no se tienen fechas definidas para la puesta en órbita de sus sistemas ni el alcance final que pudiesen llegar a tener, pero se plantea que podría ocurrir en el transcurso de la década [41], [42].

2.2.4.6 Aplicaciones provistas por las mega constelaciones satelitales

Las mega constelaciones satelitales de órbita baja están orientadas a proveer diversos servicios de comunicaciones, tanto fijos como móviles, todo esto de manera global, o al menos, en gran parte de la superficie terrestre, aprovechando las ventajas que brinda esta órbita, principalmente su baja latencia en comparación con otros sistemas satelitales, pues las aplicaciones en que se enfocarán, en algunos casos, serán sensibles al retardo.

Como ya se ha estudiado en apartados anteriores, se plantea que estas constelaciones provean, principalmente, de comunicaciones de banda ancha y ofrezcan servicio de internet de alta velocidad de manera global, pero no limitándose a esa única aplicación.

Se ha propuesto la integración de estas constelaciones en redes de comunicaciones terrestres, integrando LTE en sistemas satelitales para ser utilizados en la parte de RAN (*Radio Access Network*), o como complemento en la red 5G, especialmente como parte del enlace de *backhaul* del sistema [43]–[45], pues el despliegue de una red como la 5G, que considera tener conexión en todo lugar y todo momento, requiere de la gran cobertura que pueden brindar sistemas de comunicaciones como lo son los sistemas satelitales.

Adicionalmente, se tienen propuestas para que se utilicen constelaciones satelitales de órbita baja como parte de la red que implementará el internet de las cosas (*Internet Of Things*, IoT) y el internet de las cosas industrial (*Industrial Internet Of Things*, IIoT) [46]–[49], debido a que esta aplicación puede requerir operar en zonas remotas, donde la geografía dificulte la utilización de redes

terrestres y se pueda tener cobertura únicamente gracias a los sistemas satelitales. Estas aplicaciones se inclinan a la utilización de constelaciones de LEOs debido, primordialmente, a su baja latencia en comparación con otros sistemas satelitales, pues su retardo oscila entre los 10 a los 30 milisegundos [5].

2.3 El enlace de radiofrecuencia RF

Como se ha descrito en apartados anteriores, los sistemas de comunicaciones satelitales utilizan el espectro electromagnético para poder establecer los enlaces de comunicaciones, y dado que es un recurso natural limitado, es indispensable compartirlo con otros sistemas, por lo tanto, también realizar el análisis de los parámetros que afectan la compatibilidad electromagnética entre sistemas. Para ello, se deben tener en cuenta aspectos como la propagación de las ondas electromagnéticas, la potencia isotrópica radiada equivalente de las antenas, así como su ganancia, su patrón de radiación, su polarización, además de las degradaciones que se puedan presentar debido a: la atmósfera; la presencia de la tierra;-fenómenos atmosféricos; y la generación de oscilaciones potencialmente interferentes introducidas por diferentes sistemas de radiocomunicación tanto terrestres como vía satélite.

2.3.1 Elementos básicos de la propagación en el espacio libre

Dado que el enlace que se establece en los sistemas satelitales de comunicación se presenta mayormente en el espacio libre, es indispensable hacer el análisis

de su comportamiento, pues es un elemento que impacta directamente en el desempeño de todo el sistema. Los parámetros básicos, como se muestra en la Figura 2.9, que definen al enlace son [11], [50]:

f = Frecuencia de la portadora.

p_t = Potencia transmitida en watts.

p_r = Potencia recibida en watts.

g_t = Ganancia de la antena transmisora.

g_r = Ganancia de la antena receptora.

d = Distancia del enlace en metros.

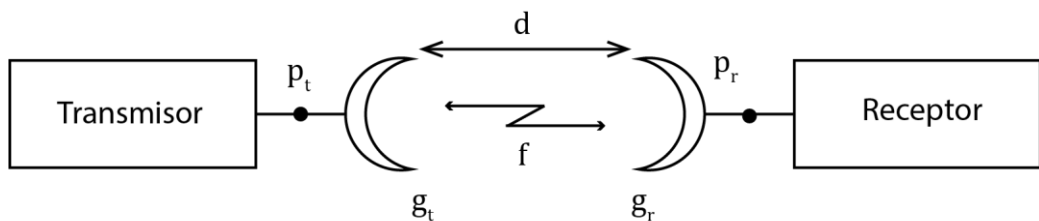


Figura 2. 9 Enlace básico de comunicación [11].

2.3.2 Densidad de potencia

Si se considera una onda electromagnética que se propaga en el espacio libre desde una fuente P , con una potencia p_t , en watts, y siendo la onda propagada de manera isotrópica en el espacio, se tiene que la densidad de potencia (*power flux density*, pfd) a una distancia d de la fuente es:

$$pfd = \frac{p_t}{4\pi d^2}, \text{W/m}^2 \quad (2.1)$$

Luego, la densidad de potencia radiada en una cierta dirección debida a una antena con una ganancia g_t , se describe como:

$$pfd = \frac{p_t g_t}{4\pi d^2}, \text{W/m}^2 \quad (2.2)$$

2.3.3 Potencia Isotrópica Radiada Equivalente

La potencia isotrópica radiada equivalente, o *pire*, es una característica muy importante del transmisor, la cual describe la potencia que debería ser radiada por un radiador isotrópico para poder conseguir la misma densidad de potencia que una antena direccional en la orientación de su máxima ganancia [51].

$$pire = p_t g_t \quad (2.3)$$

O en dB:

$$PIRE = P_t + G_t \quad (2.4)$$

2.3.4 Ganancia de la antena

Una antena isotrópica radiará de manera uniforme en todas direcciones (θ, φ) , luego, una antena direccional radiará la potencia $p(\theta, \varphi)$ en la dirección (θ, φ) , como se puede apreciar en la Figura 2.10. La definición de ganancia de la antena es [12]:

$$g(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{p_0/4\pi} \quad (2.5)$$

Donde p_0 es la potencia disponible a la entrada de la antena.

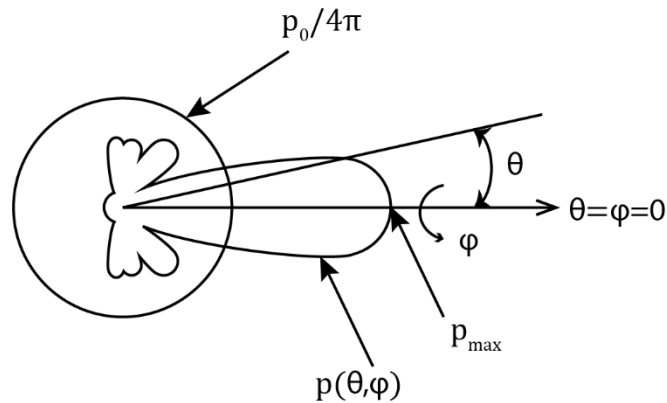


Figura 2. 10 Potencia radiada por una antena [12].

$$g_{max} = \frac{p_{max}}{p_0/4\pi} \quad (2.6)$$

La ganancia máxima, g_{max} , es usualmente llamada ganancia de la antena g , y es expresada en decibeles referidos a la ganancia de una antena isotrópica (dBi):

$$G = 10 \log g \quad (2.7)$$

Ahora, la antena receptora será capaz de recolectar la potencia de las ondas radioeléctricas que inciden sobre su área efectiva A_e . Si la antena fuera perfecta y sin pérdidas, el área efectiva de la antena sería el área total de la antena, sin embargo, no es así, y se debe tener en cuenta la eficiencia de la antena, entonces, el área efectiva de la antena se define como:

$$A_e = \eta A, \text{ m}^2 \quad (2.8)$$

Donde:

η = Eficiencia de la antena ($\eta < 1$).

Lo anterior permite tener una relación entre la ganancia de la antena y su área efectiva:

$$g = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2.9)$$

Donde:

λ = Longitud de onda.

O expresando la ganancia en dBi, se tiene:

$$G = 10 \log\left(\frac{4\pi A_e}{\lambda^2}\right), \text{ dBi} \quad (2.10)$$

2.3.5 Pérdidas por propagación en espacio libre

Para analizar las pérdidas por propagación en el espacio libre, se deben considerar la densidad de potencia captada por la antena receptora y el área efectiva de la misma, por lo que si se tiene una potencia recibida en la antena receptora p_r , ésta se puede expresar de la siguiente manera:

$$p_r = \frac{p_t g_t}{4\pi d^2} A_e \quad (2.11)$$

Luego, tomando en cuenta la ecuación (2.9), despejando el área efectiva de la antena receptora y sustituyendo en (2.11) se tiene:

$$p_r = p_t g_t g_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.12)$$

Donde el término entre paréntesis de la ecuación (2.12) representa las pérdidas provocadas por la propagación en el espacio libre entre antenas isotrópicas, l , o expresada en dB:

$$L = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (2.13)$$

Escribiendo (2.13), en función de la frecuencia en MHz y la distancia en km [52], se tiene:

$$L = 32.4 + 20 \log (f) + 20 \log (d) \quad (2.14)$$

Debido a que los satélites de órbita baja son los más próximos a la Tierra, son los que menores pérdidas por propagación presentan en comparación a los demás sistemas satelitales, como se puede apreciar en la Figura 2.11.

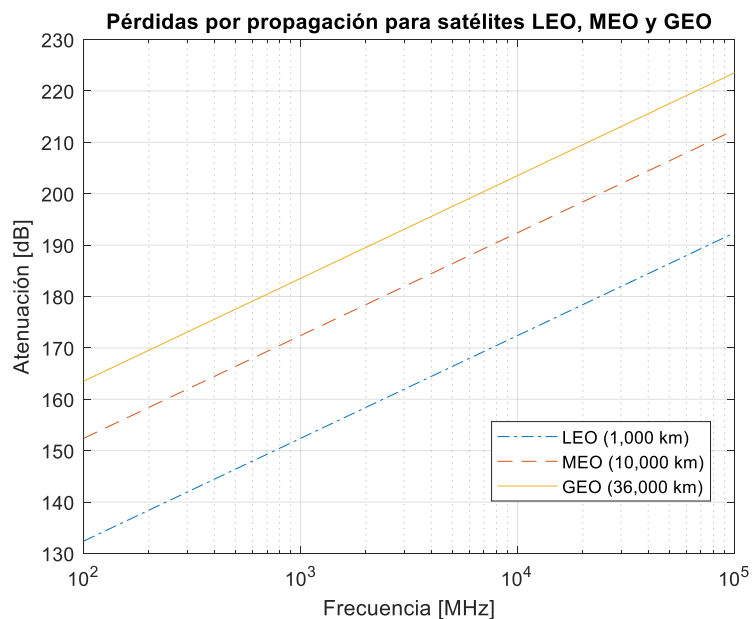


Figura 2. 11 Atenuación en espacio libre [12].

2.3.6 Polarización

Otro parámetro importante, en particular para los sistemas vía satélite, es la polarización de los campos radiados por la antena transmisora. La polarización se define como: la propiedad de una onda electromagnética que describe las variaciones de dirección y magnitud del vector de campo eléctrico, específicamente, la figura que es trazada en función del tiempo por el extremo del vector en un punto fijo del espacio, y el sentido en el cual está trazada tal como se observa a lo largo de la dirección de propagación [53].

Si una antena está diseñada para transmitir o recibir una onda electromagnética con una polarización específica, no podrá transmitir o recibir de manera eficiente una onda con una polarización diferente. Esta propiedad da paso a que se puedan tener dos enlaces simultáneamente con la misma frecuencia en localizaciones cercanas, utilizando así un reuso de frecuencias por polarización ortogonal [54]. En otras palabras, se requiere que la antena receptora cuente con la misma polarización que la onda electromagnética para poder tener la mayor transferencia de energía.

Debido a que las antenas no son perfectas, pueden radiar una onda al medio de propagación con un cierto grado de polarización ortogonal que puede resultar en interferencia entre enlaces que utilicen polarizaciones diferentes. Esto se puede caracterizar con el aislamiento por polarización cruzada y por la discriminación de polarización cruzada.

Si se tiene que a y b , son las amplitudes del campo eléctrico de dos ondas transmitidas simultáneamente con polarización lineal, y a_c y b_c las amplitudes

recibidas con su misma polarización, mientras a_x y b_x son las amplitudes recibidas con una polarización ortogonal a la original, como se muestra en la Figura 2.12, se tiene que el aislamiento por polarización cruzada, expresado en dB, es:

$$XPI = 20 \log(a_c/b_x); \text{ ó } XPI = 20 \log(b_c/a_x) \quad (2.15)$$

Y la discriminación por polarización expresada en dB es:

$$XPD = 20 \log(a_c/a_x); XPD = 20 \log(b_c/b_x) \quad (2.16)$$

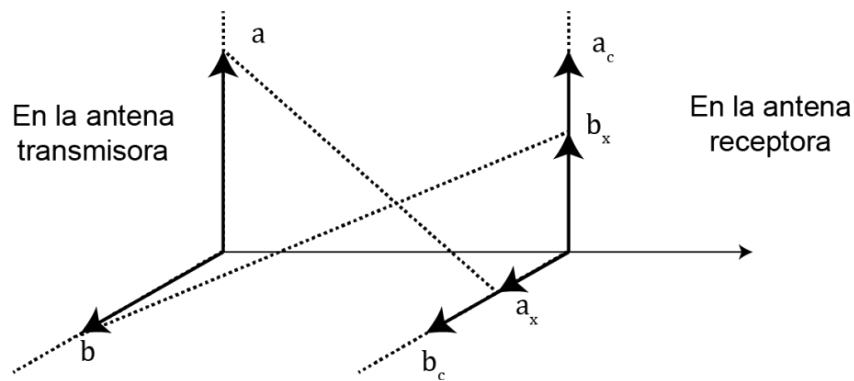


Figura 2.12 Polarización cruzada [54]

2.3.7 Rotación de Faraday

La ionósfera es una capa de la atmósfera, en la cual se producen constantes procesos de ionización.

La presencia de electrones libres en la atmósfera, adicional al campo magnético de la Tierra, provocan que cuando una onda electromagnética atraviese por ese medio, experimente una rotación en su plano de polarización, lo que se conoce como rotación de Faraday, o efecto Faraday. Dicho fenómeno afecta a todos los

sistemas de comunicaciones satelitales, principalmente aquellos que utilizan polarizaciones lineales.

Esta rotación ocurre debido a que, al propagarse en el medio cargado, provoca que los componentes de la onda se propaguen a través de la ionósfera a diferentes velocidades.

El ángulo de rotación del plano de polarización debido a la rotación de Faraday θ_F , depende de la frecuencia de la onda electromagnética, de la intensidad del campo magnético de la Tierra y de la densidad de electrones libres en la ionósfera [11]:

$$\theta_F = 236B_{av}N_Tf^{-2} \quad (2.17)$$

Donde:

θ_F = Ángulo de la rotación de Faraday en radianes.

B_{av} = Campo magnético de la Tierra promedio, en Wb/m².

f = Frecuencia de la onda electromagnética, en GHz.

N_T = Densidad de electrones, en el/m².

Dado que la rotación de Faraday es directamente proporcional a la densidad de electrones presente en la ionósfera, y al campo magnético de la Tierra, sus valores presentan cambios regulares durante periodos diurnos, estacionales y ciclos solares, por lo que son usualmente predecibles. Esto hace posible que se puedan realizar ajustes en cuanto al ángulo de polarización en las antenas de la estación terrena. Sin embargo, si la estación terrena se toma como referencia, los planos de polarización rotan en la misma dirección tanto para el enlace de

subida como el de bajada, por lo que si se utiliza la misma antena para transmisión y recepción, no será posible realizar dichos ajustes [54].

La rotación de Faraday solamente afecta a aquellos enlaces que utilicen una polarización lineal. Enlaces con polarizaciones circulares no requieren de ajustes provocados por este efecto [2], [11], [51], por lo que muchos enlaces satelitales optan por la utilización de polarizaciones circulares.

2.3.8 Efecto Doppler en satélites de órbita baja

El efecto Doppler es el cambio aparente de la frecuencia de una onda relativo al movimiento de la fuente con respecto a un observador [55]. En los sistemas satelitales, el corrimiento Doppler se presenta debido al movimiento de los satélites respecto a las estaciones terrenas.

Los sistemas satelitales de órbita baja, al ser los más próximos a la Tierra, cuentan con los periodos orbitales más cortos, es decir, la velocidad con la que se mueven los satélites en órbita es muy alta, por lo que los efectos provocados por el corrimiento Doppler en estos sistemas, comparados con sistemas satelitales en órbitas diferentes, es más notorio. Esto puede causar diversos problemas en las comunicaciones, incluyendo traslape de bandas, reducción del espectro libre, una mayor tasa de errores, etc. Por lo que para mantener comunicaciones confiables se debe poder estimar de una manera precisa este efecto, para así compensarlo.

La relación entre la frecuencia recibida y la transmitida está dada por [13]:

$$f_r = \left(1 - \frac{v_r}{c}\right) f_{tx} \quad (2. 18)$$

Donde:

f_r = Frecuencia recibida.

v_r = Velocidad relativa entre el satélite y la estación terrena.

c = Velocidad de la luz.

f_{tx} = Frecuencia transmitida.

Debido a que el satélite se encuentra en constante movimiento con respecto a las estaciones terrenas, el corrimiento Doppler será dependiente del tiempo y la posición del satélite. El corrimiento de frecuencia será cero cuando el satélite se encuentre en el zenit, mientras que a diferentes ángulos de elevación se presentará el corrimiento de frecuencias, recibiendo frecuencias mayores mientras el satélite se esté acercando hacia la estación terrena, y menores mientras se esté alejando de ella. Con ayuda de la Figura 2.13 se puede formular el corrimiento en función del tiempo como [56]:

$$f_d(t) = \frac{f_0 \omega_{SAT} R_E \cos(\theta(t))}{c} \quad (2. 19)$$

Donde:

f_0 = Frecuencia de la portadora.

ω_{SAT} = Velocidad angular del satélite.

R_E = Radio de la Tierra.

$\theta(t)$ = Ángulo de elevación.

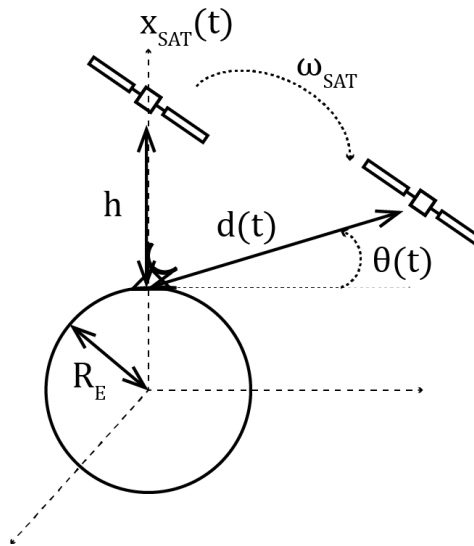


Figura 2. 13 Geometría para el cálculo del corrimiento Doppler [56].

Siendo la velocidad angular del satélite:

$$\omega_{SAT} = \sqrt{GM_E / (R_E + h)^3} \quad (2. 20)$$

Donde:

G = Constante gravitacional ($6.671 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$).

M_E = Masa de la Tierra ($5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$).

h = Altura de la órbita.

2.3.9 Ruido e interferencia

Dado que en los sistemas satelitales de comunicaciones las potencias con las que se reciben las señales son muy pequeñas, en el orden de fracciones de los

picowatts, el ruido y la interferencia presentes en el sistema son un factor importante que considerar, pues ya que siempre existirá ruido a la entrada, éste será amplificado en conjunto con la señal de interés.

El ruido se puede clasificar de acuerdo a diversos parámetros, como ruido propio, externo, por su ancho de banda, por su carácter temporal, o por si es aleatorio o determinístico [57].

2.3.9.1 Ruido radioeléctrico

El ruido radioeléctrico, es aquel que puede ser ocasionado de manera externa o interna en un sistema de comunicaciones. Se debe considerar que este ruido impone un límite de calidad de funcionamiento de todos los sistemas de radiocomunicaciones, por lo que es necesario conocer las emisiones radioeléctricas causadas por fuentes naturales y artificiales, para evaluar sus efectos [58].

Existen muchas fuentes de donde puede proceder el ruido radioeléctrico, tanto naturales como causadas por la actividad humana. Entre las fuentes de ruido naturales se pueden encontrar: el ruido provocado por la presencia de gases en la atmósfera, hidrometeoros, radiación procedente de descargas de rayos, radiación que sea causada por fuentes celestes como el sol u otras estrellas, entre otros. Entre las fuentes de ruido causadas por la actividad humana se pueden incluir los transmisores de cualquier sistema de radiocomunicación, radiación que provenga de equipos eléctricos o electrónicos, líneas de transmisión de energía, etc. [50], [57], [58].

2.3.9.2 Ruido interno

Adicional al ruido que puede ser captado por los receptores proveniente de fuentes externas, se tiene el ruido interno. Las principales fuentes de ruido interno son: el ruido térmico, de disparo, de baja frecuencia y de alta frecuencia [57].

El ruido que mayormente contribuye es el ruido térmico, el cual es causado por el movimiento aleatorio de los electrones libres ya sean de elementos activos o pasivos, debido a que no se encuentran a una temperatura del cero absoluto. El ruido que introduce cada elemento del sistema depende de la temperatura física a la que se encuentre el elemento. La potencia de ruido térmico en cierto ancho de banda está dada por:

$$n_N = kt_e b_N, \text{ Watts} \quad (2. 21)$$

Donde:

k = Constante de Boltzmann.

t_e = Temperatura del elemento de la fuente de ruido en grados Kelvin.

b_N = Ancho de banda del ruido en Hz.

De forma aproximada, el ancho de banda del ruido es el ancho de banda de la señal de información.

Dado que el ruido térmico es independiente de la frecuencia de operación, es usualmente expresado en términos de la densidad espectral de potencia de ruido de la forma [11]:

$$n_o = \frac{n_N}{b_N} = kt_e, \text{ W/Hz} \quad (2.22)$$

2.3.9.3 Factor de ruido

El factor de ruido es una manera en la que se puede describir cual es la degradación que sufre la relación señal a ruido al pasar la señal por un dispositivo. Dado que cada componente del receptor genera cierto ruido, al pasar una señal por dicho dispositivo, el ruido generado por éste se adicionará a la señal, degradando su relación señal a ruido.

$$F = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_e}{\left(\frac{S}{N}\right)_s} \quad (2.23)$$

Donde:

$\left(\frac{S}{N}\right)_e$ = Relación señal a ruido de la fuente de señal.

$\left(\frac{S}{N}\right)_s$ = Relación señal a ruido del puerto de salida del receptor.

Entre más cercano sea el valor del factor de ruido a la unidad, el dispositivo introduce menor cantidad de ruido a la señal. Al factor de ruido expresado en dB, se le conoce como figura de ruido:

$$NF = 10 \log (F) \quad (2.24)$$

Además de poder utilizar el factor de ruido para caracterizar cuanto ruido introduce un circuito a una señal, de forma equivalente se puede emplear la temperatura de ruido.

La temperatura de ruido, T_N , es una temperatura ficticia a la cual debería estar una resistencia conectada a la entrada de una fuente de señal sin ruido, para generar en la salida del circuito una cantidad igual de ruido que el circuito físico. Entonces, la temperatura de ruido en términos del factor de ruido es [57]:

$$T_N = (F - 1)T \quad (2. 25)$$

Donde T , es la temperatura física a la cual se encuentra la resistencia interna de la fuente de señal. Esta temperatura también es conocida como temperatura de referencia en la entrada, usualmente establecida a 290 K [11].

En general, los componentes que conforman al receptor se encuentran conectados en cascada, entonces, el ruido de cada etapa contribuye al ruido total del receptor, por lo que la temperatura de ruido del receptor se puede escribir como:

$$T_N = T_{N1} + \frac{T_{N2}}{G_1} + \frac{T_{N3}}{G_1 G_2} + \dots \quad (2. 26)$$

Donde G_i es la ganancia de potencia de la etapa i .

En la Ecuación 2.26 se puede observar que la contribución de la segunda etapa al ruido total está afectada por la ganancia de potencia de la primera etapa, la contribución al ruido total de la tercera etapa está reducida por la ganancia de potencia de las etapas 1 y 2 y así sucesivamente, la contribución al ruido total de la etapa i esta reducida por las ganancias de potencia de todas las etapas $(i-1)$ predecesoras a la etapa i .

Por lo que para reducir la temperatura de ruido del sistema lo más que sea posible, el primer bloque deberá ser activo y tener una alta ganancia de potencia y una baja temperatura de ruido [2].

2.3.9.4 Figura de mérito

La figura de mérito es un parámetro con el que se puede caracterizar la calidad o eficiencia del receptor. Se define como la relación que existe entre la ganancia de la antena receptora, G_r , y la temperatura de ruido del sistema en grados Kelvin, T_N [11]:

$$\frac{G}{T} = G_r - 10 \log(T_N), \text{ dB/K} \quad (2. 27)$$

Mientras más grande sea el valor de la figura de mérito, es mejor la calidad del receptor. La figura de mérito puede variar dependiendo del ángulo de elevación, debido a que la temperatura de ruido cambiaría. Los valores de figura de mérito para enlaces satelitales pueden ir de valores desde -3 dB/K hasta 20 dB/K, o incluso mayores. Los valores menores son encontrados típicamente en los receptores de los satélites [11], [13].

2.3.9.5 Interferencia

Dado que el espectro electromagnético se encuentra congestionado, la compartición de recursos es necesaria para poder satisfacer las necesidades de los sistemas de comunicaciones actuales. Dicha compartición del espectro hace que la probabilidad de que un sistema dado sea interferido por otro u otros

sistemas, ya sean terrestres, espaciales o entre sistemas del mismo tipo, aumente.

La interferencia, u oscilaciones interferentes, son aquellas que tienen la capacidad de afectar el enlace de comunicaciones, las cuales no forman parte de la portadora útil, además de que se pueden presentar en intervalos continuos o intermitentes de tiempo. La interferencia es vista por el sistema como un ruido añadido.

Las oscilaciones interferentes se pueden clasificar en externas e internas, y, a su vez, las externas se pueden clasificar en naturales y artificiales [57].

Entre las causas de la interferencia producida por fuentes naturales se encuentran el aumento de la actividad solar, procesos radioeléctricos en la atmósfera de la tierra, o las causadas por otros cuerpos celestes, mientras que las artificiales, son el producto de diversos sistemas de radiocomunicaciones, ya sean terrestres o satelitales, además de equipos o sistemas industriales [11], [57].

Entre las interferencias que pueden afectar a los sistemas satelitales de comunicaciones se encuentran:

- Interferencia de radiofrecuencia: Es aquella causada por fuentes fuera del sistema satelital o del sistema que está siendo interferido.
- Interferencia mutua: Es aquella causada por dos o más elementos de diversos sistemas que se afectan entre sí.
- Interferencia dentro de banda o cocanal: Es aquella que se encuentra en la misma banda que la portadora útil, pero es ajena al enlace de comunicaciones de interés.

- Interferencia fuera de banda: Es aquella que se encuentra fuera del ancho de banda del filtro de RF.
- Interferencia de canal adyacente: Es la interferencia que se encuentra dentro del ancho de banda del filtro de RF pero fuera del ancho de banda más angosto de FI [57].

Existen varias maneras en que un sistema satelital sufra o cause interferencia a otros sistemas, tanto satelitales como terrestres. Primeramente, se pueden presentar oscilaciones interferentes entre sistemas terrestres y satelitales de cuatro posibles maneras, las cuales pueden impactar ya sea en el sistema terrestre, en el satelital, o en ambos [12]:

- Transmisiones terrestres podrían causar interferencia en la recepción de estaciones terrenas (A1).
- Transmisiones de estaciones terrenas podrían causar interferencia en la recepción de estaciones de comunicaciones terrestres (A2).
- Transmisiones satelitales podrían causar interferencia en la recepción de una estación de comunicaciones terrestres (C1).
- Transmisiones terrestres podrían causar interferencia en la recepción de un satélite (C2).

Cada uno de los escenarios anteriores puede ocurrir de manera continua, intermitente o periódicamente, dependiendo de la órbita de los satélites, condiciones meteorológicas y la geometría de recepción de las estaciones [11].

Adicionalmente, se puede presentar interferencia entre sistemas satelitales que se encuentren operando en las mismas frecuencias. En este caso, existen cuatro

posibles maneras en las que podría presentarse la interferencia entre los sistemas:

- Transmisiones del satélite de un sistema causando interferencia en la recepción de una estación terrena de otro sistema satelital (B1).
- Transmisiones de una estación terrena causando interferencia en la recepción de un satélite de otro sistema satelital (B2).

Además, si un sistema satelital utiliza para su enlace de bajada la misma frecuencia que otro sistema para su enlace de subida y viceversa:

- Se puede presentar interferencia en los satélites debido a que la transmisión de uno podría afectar la recepción del otro (E).
- Transmisión de una estación terrena afecta la recepción de otra estación terrena de un sistema diferente (F).

Estos posibles escenarios de interferencia se muestran gráficamente en la Figura 2.14

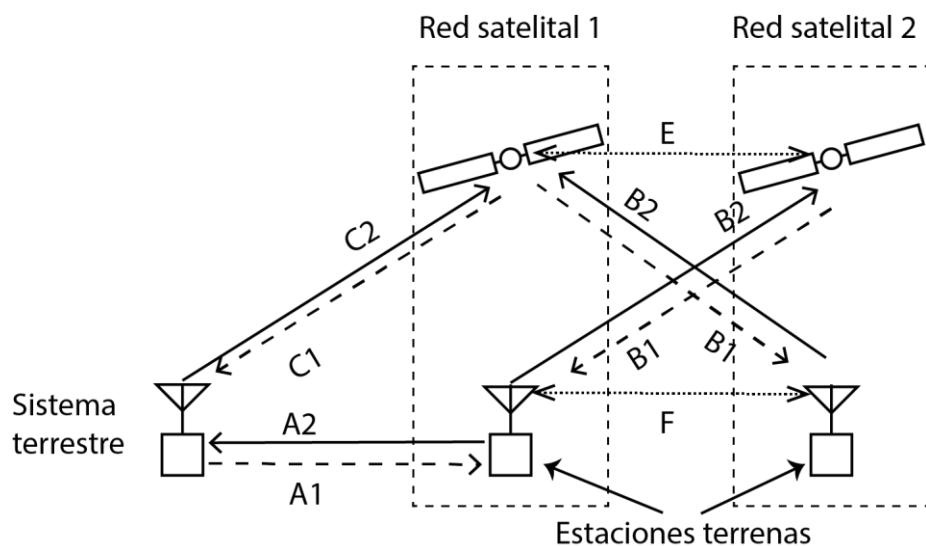


Figura 2. 14 Modos de interferencia [12].

La ITU, recomienda que la coordinación entre sistemas satelitales para la compartición del espectro, será necesaria únicamente si se detecta que la temperatura de ruido de sus sistemas, causada por la interferencia, aumenta en más de un 6%, con el fin de separar espacialmente sistemas que utilicen las mismas frecuencias, o frecuencias muy próximas, con el objetivo de reducir así la interferencia entre los sistemas [12].

2.3.9.6 Múltiples fuentes de interferencia

Para poder caracterizar el caso en que varios transmisores están interfiriendo a un receptor, se debe tomar en cuenta la posible dirección de las transmisiones interferentes en la cual están incidiendo sobre la antena receptora. La dirección de dichas transmisiones podría ser de la tierra al espacio, donde la señal interferente provendrá de tierra; y del espacio a tierra, donde la señal interferente provendría del espacio.

Dado que la antena receptora no estaría alineada con la dirección de la señal interferente, y, para saber cuál es la potencia de la interferencia recibida, se utiliza la densidad de potencia. Entonces, la densidad de potencia en la antena receptora será:

$$pfd = \frac{p_t g_t(\theta_t)}{4\pi d^2} \quad (2.28)$$

Donde:

$g_t(\theta_t)$ = Ganancia de la antena transmisora en dirección de la antena receptora.

θ_t = Ángulo entre el punto de máxima ganancia de la antena transmisora y la dirección de la antena receptora, en grados.

Luego, la potencia recibida por la antena receptora debida a la interferencia es:

$$p_r = \frac{p_t g_t(\theta_t)}{4\pi d^2} A_r(\varphi_r) \quad (2. 29)$$

Donde:

$A_r(\varphi_r)$ = Área efectiva de la antena receptora en la dirección de la antena transmisora.

φ_r = Ángulo entre la dirección de máxima ganancia de la antena receptora y la antena transmisora.

Partiendo de esto, cuando se tiene más de un transmisor interferente, la contribución de todos estos determinará cuales son los niveles de interferencia del receptor, para lo cual se utiliza la densidad de flujo de potencia equivalente (*equivalent power flux density*, *epfd*).

La densidad de flujo de potencia equivalente se define como la suma ponderada de las densidades de potencia de los transmisores interferentes vistas en el receptor. Se calcula utilizando la siguiente fórmula (Artículo 22 de [59]):

$$epfd = 10 \log \left[\sum_{i=1}^{N_a} 10^{P_i/10} \frac{G_t(\theta_i)}{4\pi d_i^2} \frac{G_r(\varphi_i)}{G_{r,max}} \right] \quad (2. 30)$$

Donde:

epfd = Densidad de flujo de potencia equivalente (dB(W/m²)) en el ancho de banda de referencia, el cual es usualmente de 40 kHz o 1 MHz [11].

N_a = Número de transmisores interferentes vistos por el receptor.

P_i = Potencia a la entrada de la antena transmisora i -ésima en dBW en el ancho de banda de referencia.

θ_i = Ángulo entre la dirección de máxima ganancia de la antena transmisora y el receptor.

$G_t(\theta_i)$ = Ganancia de la antena transmisora (expresada como relación) en la dirección del i -ésimo receptor.

d_i = Distancia en metros entre transmisor i con el receptor.

φ_i = Ángulo entre la dirección de máxima ganancia de la antena receptora y la i -ésima antena transmisora.

$G_r(\varphi_i)$ = Ganancia de la antena receptora (expresada como relación) en la dirección del i -ésimo transmisor.

$G_{r,max}$ = Máxima ganancia (expresada como relación) de la antena receptora.

2.3.10 Parámetros de desempeño del enlace

Para poder caracterizar el desempeño del enlace de comunicaciones, son comúnmente utilizados diversos parámetros, los cuales dan una cuantificación de la calidad de la comunicación obtenida con el enlace de interés, principalmente en relación con el ruido presente en el sistema.

2.3.10.1 Relación portadora a ruido

La relación portadora a ruido, CNR, es un parámetro similar a la SNR, el cual expresa la relación que existe entre la potencia de la señal portadora y la potencia de ruido. La CNR, es un parámetro de interés para poder definir el desempeño del sistema de comunicaciones, donde se requiere conocer el ruido total del sistema, así como la potencia de la portadora que es recibida por el receptor. Esta relación es muy útil para saber cuál es la calidad de las transmisiones en el caso analógico [12].

Esta relación puede definirse en cualquier punto del enlace, tanto en el enlace de subida como en el enlace de bajada. Mientras más alto sea el valor de la CNR mejor será el desempeño del enlace.

$$CNR = \frac{c}{n} = \frac{p_r}{n_r} \quad (2.31)$$

Donde:

p_r = Potencia recibida en la antena receptora.

n_r = Potencia de ruido recibida en la antena receptora.

También se puede expresar como la relación entre la potencia de la portadora y la densidad de potencia del ruido [11]:

$$\frac{c}{n_0} = \frac{c}{n} b_N \quad (2.32)$$

Donde se tiene:

n_0 = Densidad espectral de potencia de ruido.

b_N = Ancho de banda de ruido.

2.3.10.2 Relación energía por bit a densidad espectral de potencia de ruido

Esta relación es más utilizada para sistemas que manejen comunicaciones digitales, la cual describe el desempeño del enlace de comunicación. Tiene una correspondencia con la relación portadora a ruido de la siguiente manera [11] :

$$\frac{e_b}{n_0} = \frac{1}{R_b} \frac{c}{n_0} \quad (2.33)$$

Donde:

e_b = Energía por bit en Joules.

c = Potencia de la portadora en Watts.

R_b = Tasa de bits, en bits por segundo.

2.4 Conclusiones

La evolución que han tenido las redes de comunicaciones satelitales, principalmente al plantear y comenzar a desplegar las mega constelaciones de satélites de órbita baja, hace que se observe una tendencia por la implementación de dichos sistemas en conjunto con las redes terrestres, para poder crear una gran red de comunicaciones heterogénea, aprovechando cada una de ellas las bondades con la que la otra cuenta.

Adicionalmente, debido a que las nuevas mega constelaciones de órbita baja utilizan bandas de frecuencia muy similares a las que ocupan los sistemas de comunicaciones terrestres, se debe analizar que su coexistencia no genere ningún impedimento en el funcionamiento (interferencia) de alguna de estas dos redes de comunicaciones, por lo que examinar parámetros de sus enlaces es de vital importancia.

En este sentido, se hace primordial el realizar un análisis de la coexistencia de ambos sistemas, para poder observar el desempeño con el que contarán, y verificar que puedan trabajar ya sea en conjunto, o de manera separada, sin mayores inconvenientes.

2.5 Referencias

- [1] J. N. Pelton, *Satellite Communications*. Springer, 2012.
- [2] D. Roddy, *Satellite Communications, Fourth Edi*. McGraw-Hill, 2006.
- [3] B. Elbert, *The Satellite Communication Applications Handbook, Second Edi*. Artech House, Inc., 2004.
- [4] "GPS.gov: Space Segment." [Online]. Available: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/#>. [Accessed: 28-Feb-2020].
- [5] S. Krishna Sharma, S. Chatzinotas, and P.-D. Arapoglou, *Satellite Communications in the 5G Era, First edit*. The Institution of Engineering and Technology, 2018.
- [6] R. De Gaudenzi, P. Angeletti, D. Petrolati, and E. Re, "Future technologies for very high throughput satellite systems," *Int. J. Satell. Commun. Netw.*, vol. 38, no. 2, pp. 141–161, 2020, doi: 10.1002/sat.1327.

- [7] I. del Portillo, B. G. Cameron, and E. F. Crawley, "A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband," *Acta Astronaut.*, vol. 159, no. March, pp. 123–135, 2019, doi: 10.1016/j.actaastro.2019.03.040.
- [8] K. Yuk, G. R. Branner, and C. Cui, "Future directions for GaN in 5G and satellite communications," *Midwest Symp. Circuits Syst.*, vol. 2017-Augus, pp. 803–806, 2017, doi: 10.1109/MWSCAS.2017.8053045.
- [9] D. Schnauffer and D. White, "How GaN is Changing the Satcom RF Front-End," *Qorvo*, no. March, pp. 1–8, 2019.
- [10] "High Frequency Amplifiers (> 6 GHz) - Qorvo." [Online]. Available: <https://www.qorvo.com/products/amplifiers/high-frequency-amplifiers>. [Accessed: 26-Mar-2020].
- [11] L. J. Ippolito Jr., *Satellite Communications Systems Engineering*, Second Edi. John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
- [12] ITU-R, *HANDBOOK ON SATELLITE COMMUNICATIONS*, 3rd ed. 2002.
- [13] J. N. Pelton, M. Scott, and C. L. Sergio, Eds., *Handbook of Satellite Applications*, Second Edi., vol. 12, no. 5. Springer, 2017.
- [14] A. I. Pérez-Neira, M. Á. Vázquez, and M. R. B. Shankar, "Signal Processing for High-Throughput Satellites," *IEEE Signal Process. Mag.*, no. July, 2019, doi: 10.1109/MSP.2019.2894391.
- [15] G. Shacham, "On board processing payload," *Ka and Broadband Communications Conference*, 2018. [Online]. Available: <https://www.satixfy.com/wp-content/uploads/2020/01/Ka-Conference-2018-On-Board-Processing-Payload-Paper.pdf>.
- [16] M. Kappes, "All-Digital Antennas for mmWave Systems," *Microw. J.*, vol. 62, no. 6, pp. 84–94, 2019.
- [17] D. Sikri and R. M. Jayasuriya, "Multi-Beam Phased Array with Full Digital Beamforming for SATCOM and 5G," *Microw. J.*, vol. 62, no. 4, pp. 64–79, 2019.

- [18] T. Butash, "Industry disruption, transformation continue into fourth year | Aerospace America," 2018. [Online]. Available: <https://aerospaceamerica.aiaa.org/year-in-review/industry-disruption-transformation-continue-into-fourth-year/>. [Accessed: 18-Jun-2020].
- [19] "Starlink." [Online]. Available: <https://www.starlink.com/>. [Accessed: 27-Mar-2020].
- [20] "Spacex Non-Geostationary Satellite System," 2016. [Online]. Available: http://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.hts?q_set=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number/%3D/SATLOA2016111500118&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number.
- [21] "SPACE X NON-GEOSTATIONARY SATELLITE SYSTEM ATTACHMENT A TECHNICAL INFORMATION TO SUPPLEMENT SCHEDULE S SCOPE AND PURPOSE The Commission authorized Space Exploration Holdings, LLC ('SpaceX') on," 2018. [Online]. Available: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20190830-00087/1877671.pdf>. [Accessed: 27-Mar-2020].
- [22] "SPACE X NON-GEOSTATIONARY SATELLITE SYSTEM ATTACHMENT A TECHNICAL INFORMATION TO SUPPLEMENT SCHEDULE S." [Online]. Available: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20181108-00083/1569860.pdf>. [Accessed: 29-Mar-2020].
- [23] "Space Exploration Holdings, LLC, SpaceX Ka-band NGSO constellation FCC filing SAT-LOA-20161115-00118," 2016. [Online]. Available: http://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.hts?q_set=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number/%3D/SATLOA2016111500118&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number. [Accessed: 16-Mar-2020].
- [24] "OneWeb." [Online]. Available: <https://www.oneweb.world/>. [Accessed: 02-Apr-2020].

- [25] “OneWeb Ka-band NGSO constellation expansion FCC filing SAT-MOD-20180319-00022.” [Online]. Available: http://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.hts?q_set=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number/%3D/SATMOD2018031900022&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number. [Accessed: 02-Apr-2020].
- [26] FCC, “Attachment Schedule S Tech Report - Amendment to Petition for Declaratory Ruling Granting Access to the U.S. Market for the OneWeb NGSO FSS System,” Fed. Commun. Comm. [FCC] - IBFS File Number SATMOD2018031900022, no. April, pp. 1–99, 2018.
- [27] FCC, “OneWeb Non-Geostationary Satellite System Amendment of the MEO Component - Attachment A - Technical Information to Supplement Schedule S,” Fed. Commun. Comm. [FCC], pp. 1–53, 2018.
- [28] “About Telesat-Satellite Services for Broadcast-Telecom-Corporate-Government-Satellite Services in North America-South America-Asia-Europe-Ka Band-Ku Band | Telesat.” [Online]. Available: <https://www.telesat.com/about-us/who-we-are>. [Accessed: 03-Apr-2020].
- [29] E. Neasmith, H. Goldberg, and J. A. Godles, “Application to Modify Petition for Declaratory Ruling to Grant Access to the U.S. Market for Telesat’s NGSO Constellation,” 2020. [Online]. Available: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MPL-20200526-00053/2378318.pdf>. [Accessed: 25-Aug-2020].
- [30] “Telesat Canada, Telesat Ka-band NGSO constellation FCC filing SAT-PDR- 20161115-00108.” [Online]. Available: http://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.hts?q_set=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number/%3D/SATPDR2016111500108&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number. [Accessed: 03-Apr-2020].
- [31] FCC, Attachment Schedule S Tech Report - Non-Geostationary Low-Earth Orbit Satellite Network in Ka Band (Telesat Canada), no. April. 2016.

- [32] FCC, “Technical Appendix - Application of Kuiper Systems LLC for Authority to Launch and Operate a Non-Geostationary Satellite Orbit System in Ka-band Frequencies,” Fed. Commun. Comm. [FCC] - IBFS File Number SAT-LOA-20190704-00057, pp. 1–168, 2019.
- [33] “Kuiper Systems LCC, FCC Application Number: SAT-LOA-20190704-00057 Attachment Sched S Tech Report.” [Online]. Available: https://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.hts?q_set=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number/%3D/SATLOA2019070400057&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number. [Accessed: 10-Apr-2020].
- [34] T. G. R. Reid, A. M. Neish, T. F. Walter, and P. K. Enge, “Leveraging commercial broadband LEO constellations for navigation,” 29th Int. Tech. Meet. Satell. Div. Inst. Navig. ION GNSS 2016, vol. 4, no. September, pp. 2300–2314, 2016, doi: 10.33012/2016.14729.
- [35] L. Enterprises, “LeoSat Enterprises.” [Online]. Available: <http://www.leosat.com/>. [Accessed: 08-Apr-2020].
- [36] “Kratos, bullish on satellite communications, in talks with LEO constellations - SpaceNews.com.” [Online]. Available: <https://spacenews.com/kratos-bullish-on-satellite-communications-in-talks-with-leo-constellations/>. [Accessed: 13-Apr-2020].
- [37] F. Khan, “Mobile Internet from the Heavens,” 2015.
- [38] “Boeing proposes big satellite constellations in V- and C-bands - SpaceNews.com.” [Online]. Available: <https://spacenews.com/boeing-proposes-big-satellite-constellations-in-v-and-c-bands/>. [Accessed: 13-Apr-2020].
- [39] “FCC approves SpaceX, Telesat, LeoSat and Kepler internet constellations - SpaceNews.com.” [Online]. Available: <https://spacenews.com/fcc-approves-spacex-telesat-leosat-and-kepler-internet-constellations/>. [Accessed: 13-Apr-2020].

- [40] “Kepler Communications Inc.” [Online]. Available: <https://www.keplercommunications.com/newsroom/press-releases/post/canadian-nanosatellite-launch-from-china-heralds-new-era-of-satellite-services>. [Accessed: 13-Apr-2020].
- [41] M. Sheetz and M. Petrova, “SpaceX, OneWeb and Amazon to launch thousands more satellites in 2020s,” 2019. [Online]. Available: <https://www.cnbc.com/2019/12/14/spacex-oneweb-and-amazon-to-launch-thousands-more-satellites-in-2020s.html>. [Accessed: 18-Jun-2020].
- [42] Analytical Graphics Inc., “10 Years of Planned Satellites - Spacecast 28 - YouTube,” 2019. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=8sYtPe9ycWQ>. [Accessed: 18-Jun-2020].
- [43] X. Artiga et al., “Shared access satellite-terrestrial reconfigurable backhaul network enabled by smart antennas at MmWave band,” *IEEE Netw.*, vol. 32, no. 5, pp. 46–53, 2018, doi: 10.1109/MNET.2018.1800030.
- [44] “Satellite and Terrestrial Network for 5G (SAT5G).” [Online]. Available: <https://www.sat5g-project.eu/>. [Accessed: 02-Mar-2020].
- [45] O. Kodheli, A. Guidotti, and A. Vanelli-Coralli, “Integration of Satellites in 5G through LEO Constellations,” in *2017 IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2017 - Proceedings, 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 1–6, doi: 10.1109/GLOCOM.2017.8255103.
- [46] K. M. O’Hara and G. J. Skidmore, “Providing Narrowband IoT Coverage with Low Earth Orbit Satellites,” *Microw. J.*, vol. 62, no. 12, pp. 74–84, 2019.
- [47] Z. Qu, G. Zhang, H. Cao, and J. Xie, “LEO Satellite Constellation for Internet of Things,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18391–18401, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2735988.
- [48] W. C. Chien, C. F. Lai, M. S. Hossain, and G. Muhammad,

- “Heterogeneous Space and Terrestrial Integrated Networks for IoT: Architecture and Challenges,” *IEEE Netw.*, vol. 33, no. 1, pp. 15–21, 2019, doi: 10.1109/MNET.2018.1800182.
- [49] N. Alagha, “Satellite air interface evolutions in the 5G and IoT era,” *Perform. Eval. Rev.*, vol. 46, no. 3, pp. 93–95, 2019, doi: 10.1145/3308897.3308941.
- [50] L. J. Ippolito Jr., *Radiowave Propagation in Satellite Communications*, First edit. Springer, 1986.
- [51] E. Lutz, M. Werner, and A. Jahn, *Satellite Systems for Personal and Broadband Communications*. Springer, 2000.
- [52] U. I. de Telecomunicaciones, “UIT-R P.525-2 - Cálculo de la atenuación en el espacio libre,” *Uit*, vol. 1, no. 2, p. 3, 1994.
- [53] B. Constantine A., *Antenna Theory Analysis and Design*, Fourth Edi. John Wiley & Sons, Ltd, 2016.
- [54] G. Maral and M. Bousquet, *Satellite Communications Systems*, Fifth Edit. John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [55] H. Rouzegar and M. Ghanbarisabagh, “Estimation of Doppler Curve for LEO Satellites,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 108, no. 4, pp. 2195–2212, 2019, doi: 10.1007/s11277-019-06517-5.
- [56] A. Guidotti et al., “Satellite-enabled LTE systems in LEO constellations,” *2017 IEEE Int. Conf. Commun. Work. ICC Work. 2017*, pp. 876–881, 2017, doi: 10.1109/ICCW.2017.7962769.
- [57] H. Jardón Aguilar, *Fundamentos de los Sistemas Modernos de Comunicación*. Alfaomega, 2002.
- [58] UIT-R, *Ruido Radioeléctrico*. 2001.
- [59] WRC-15, “Radio Regulations Volume 1, Articles,” *Int. Telecommun. Union*, 2016.

Capítulo 3: Comparación entre las mega constelaciones satelitales de órbita baja.

3.1 Introducción

En este capítulo se realizará un estudio comparativo a detalle entre las diferentes mega constelaciones satelitales de órbita baja objeto de este estudio, así como de sus enlaces de comunicación. Además, se realizará un análisis por computadora de las constelaciones para poder determinar su área de cobertura y también se investigará por computadora la cantidad de satélites en línea de vista desde diversos emplazamientos alrededor del planeta.

Para lograr estos objetivos específicos se empleará el paquete de simulación SaVi y se desarrollarán un conjunto de programas en Matlab

3.2 Estudio de las mega constelaciones satelitales

Para poder realizar el análisis de la coexistencia entre las constelaciones a estudiar, en esta sección se harán diversas comparaciones entre ellas, en las cuales se incluirán parámetros como las frecuencias de las portadoras que utilizarán para proveer sus servicios, los anchos de banda de sus canales, y los ángulos mínimos de elevación de las antenas de sus estaciones terrenas.

3.2.1 Comparación entre las frecuencias de los enlaces satélite - usuario

Debido a que las constelaciones satelitales a estudiar brindarán servicios fijos por satélite, y en algunos casos de servicios móviles por satélite, y en concordancia con las atribuciones específicas que señala la ITU en el Artículo 5

de su Reglamento de Radiocomunicaciones [1], y el Artículo 21 de las Actas finales de la Conferencia mundial de radiocomunicaciones 2019 [2], deberán compartir el espectro designado para esos servicios, comprendidos en las bandas Ku y Ka para algunos de sus enlaces, ya sea de subida o bajada.

En la Tabla 3.1 se muestra la comparación entre las frecuencias que utilizará cada constelación satelital para brindar sus servicios.

Tipo de enlace	SpaceX	OneWeb	Telesat	Kuiper
Bajada de usuario [GHz]	10.7 – 12.7	10.7 – 12.7	17.8 – 20.2	17.7 – 20.2
Subida de usuario [GHz]	14.0 – 14.5 12.75 – 13.25	12.75 – 13.25 14.0 – 14.5	27.5 – 29.1 29.5 – 30.0	28.35 – 29.1 29.5 – 30.0
Bajada de interconexión [GHz]	10.7 – 12.7 17.8 – 18.6 18.8 – 19.3 19.7 – 20.2	17.8 – 18.6 18.8 – 19.3 19.7 – 20.2	17.8 – 18.6 18.8 – 19.3 19.7 – 20.2	17.7 – 18.6 18.8 – 19.3 19.3 – 19.7 19.7 – 20.2
Subida de interconexión [GHz]	14.0 – 14.5 27.5 – 29.1 29.5 – 30.0	27.5 – 29.1 29.5 – 30.0	27.5 – 29.1 29.5 – 30.0	27.5 – 29.1 29.1 – 29.5 29.5 – 30.0

Tabla 3. 1 Frecuencias utilizadas por las diversas mega constelaciones.

Aunque en las regulaciones estipuladas por la ITU se consideran métodos para la compartición del espectro, de la tabla 3.1 se observa que existen un conjunto de opciones probables para que se presenten condiciones de interferencia por oscilaciones interferentes cocanal entre los sistemas satelitales objeto de este trabajo, y también se concluye que la probabilidad interferencia puede

presentarse con frecuencia por el número tan grandes de LEOS de las mega constelaciones y condiciones de movilidad de las estaciones terrenas.

Lo anterior, permite afirmar que el estudio de la coexistencia entre sistemas es de relevancia actual ya que es indispensable reducir la probabilidad de interferencia en los enlaces de usuario o de interconexión y así evitarla afectación severa en el rendimiento de los sistemas.

3.2.2 Comparación entre los anchos de banda

En cuanto a los anchos de banda utilizados por las diversas constelaciones de LEOS, algunas de las compañías han optado por tener canales con anchos de banda fijos, como Starlink o OneWeb, mientras que otras pueden modificarlo dependiendo de la demanda con la que cuente su servicio, como Telesat o Kuiper. En la Tabla 3.2 se muestra la comparación entre los anchos de banda a utilizar por los enlaces de las diferentes constelaciones.

Tipo de enlace		SpaceX	OneWeb	Telesat	Kuiper
Usuario	Subida	125 MHz	125 MHz	500 MHz 1600 MHz	50 MHz 100 MHz 200 MHz
	Bajada	250 MHz	250 MHz	500 MHz 800 MHz	100 MHz 200 MHz 500 MHz
Interconexión	Subida	500 MHz	250 MHz	500 MHz 1600 MHz	50 MHz 100 MHz 200 MHz
	Bajada	250 MHz	155 MHz	500 MHz 800 MHz	100 MHz 200 MHz 500 MHz

Tabla 3. 2 Anchos de banda por canal de los enlaces.

El ancho de banda de la portadora es un parámetro importante para tener en cuenta, pues mientras mayor sea el ancho de banda de los receptores de las estaciones terrestres y de los satélites, crecerá la probabilidad que oscilaciones interferentes queden dentro del ancho de banda.

3.2.3 Enlaces de los diversos sistemas

En esta sección se hará una comparativa entre diversos parámetros de los enlaces de las mega constelaciones que están bajo estudio en este trabajo. Para ello se utilizaron los datos proporcionados por las compañías en sus reportes técnicos [3]–[6], con los cuales se realizó el cálculo de la temperatura de ruido para cada constelación para los receptores y los valores de las potencias utilizadas para la transmisión.

En la Tabla 3.3 se muestran los valores de ganancia y figura de mérito correspondientes para los receptores de las mega constelaciones y se realizó el cálculo de sus temperaturas de ruido despejando de la expresión (2.27).

Constelación	Tipo de enlace	Ganancia de la antena [dBi]	G/T [dB/K]	Temp. del sistema [K]*
Kuiper	Usuario	39	12.4	457.09
		37	10.4	457.09
	Interconexión	40.7	14.1	457.09
		38.2	11.6	457.09
OneWeb	Usuario	26	-1	501.19
	Interconexión	38	11.4	457.09
Starlink	Usuario	37.1	9.8	537.03
		35.7	8.4	537.03
	Interconexión	41	13.7	537.03
Telesat	Usuario	42.5	13.2	851.14
	Interconexión	31.8	2.5	851.14

Tabla 3. 3 Temperaturas del sistema. *Valores calculados.

De la tabla anterior se puede observar que el sistema que cuenta con antenas de la mayor ganancia para sus enlaces de usuario es Telesat con 42.5 dBi, mientras que OneWeb tiene la menor ganancia para esos mismos enlaces, con 26 dBi. Por otra parte, para los enlaces de interconexión la constelación Starlink cuenta con antenas de mayor ganancia, siendo de 41 dBi, y Telesat con la menor ganancia, de 31.8 dBi, todo esto para sus enlaces de subida. Adicionalmente, se puede observar que Telesat tiene el mayor valor en cuanto a la temperatura de ruido para su sistema, siendo de 851 Kelvin, aproximadamente.

En la Tabla 3.4 se presentan los valores de PIRE y ganancia correspondientes para los transmisores de las mega constelaciones, además, se realizó el cálculo de la potencia transmitida por cada uno de ellos, despejando de la expresión (2.4).

Constelación	Tipo de enlace	Ganancia [dBi]	PIRE [dBW]	Pt [W]*
Kuiper	Interconexión	36.9	36	0.8128
		36.9	33.8	0.4898
		36.9	29	0.1622
		36.9	32	0.3236
		34.4	36	1.45
		34.4	33.8	0.8710
		34.4	29	0.2884
		34.4	32	0.5754
	Usuario	39	43.1	2.57
		39	40.9	1.55
		39	36.1	0.5129
		39	33.1	0.2570
		37	43.1	4.07
		37	40.9	2.45
37		36.1	0.8128	
OneWeb	Interconexión	33	28	0.3162
	Usuario	24.5	34.6	10.23
Starlink	Interconexión	41	36.7	0.3715
		41	23.8	0.0191
		41	39.5	0.7079
		41	26.6	0.0363
	Usuario	37.1	31	0.2455
		34	32.7	0.7413
Telesat	Interconexión	27.3	39	14.79
		27.3	37	9.33
		27.3	30.6	2.14
	Usuario	38	39	1.26
		38	37	0.7943
		38	30.6	0.1820

Tabla 3. 4 Ganancias y potencias de transmisión. *Valores calculados.

De la tabla anterior se puede observar que diversas compañías, aunque utilicen la misma antena para realizar transmisiones ya sea de usuario o interconexión, modifican la potencia con las que se radia ya sea debido a las frecuencias que

utilice el enlace o la distancia de la órbita del sistema satelital en sus diferentes órbitas.

Adicionalmente, se puede encontrar que el sistema que dispone con la mayor ganancia para sus enlaces de interconexión es Starlink, con 41 dBi, mientras que la menor ganancia la tiene Telesat con 27.3 dBi. En los enlaces de usuario quien cuenta con la mayor ganancia es el sistema Kuiper con 39 dBi, mientras que la menor ganancia la tiene OneWeb, con 24.5 dBi. En cuanto a las potencias transmitidas, Telesat es quien radia con mayor potencia, con 14.79 W para sus enlaces de bajada de interconexión, mientras que la menor potencia es para Starlink con 0.019 W transmitidos para un enlace de bajada de interconexión.

3.2.4 Comparación de las antenas de los diferentes sistemas

En cuanto a las antenas que utilizará cada sistema, cada uno contará con tecnologías diferentes para sus enlaces tanto de interconexión como de usuario, entre las que se incluyen arreglos de antenas en fase, antenas parabólicas y antenas omnidireccionales, estas últimas utilizadas principalmente para los enlaces con las estaciones de TT&C [5].

El sistema satelital Kuiper contará para sus estaciones espaciales con sistemas de arreglos de antenas en fase dedicados tanto para los enlaces de usuario como de interconexión, capaces de generar múltiples haces. Para sus estaciones terrenas se utilizarán antenas parabólicas, las cuales tendrán unas dimensiones de 1 a 2.4 metros [3] para las estaciones de interconexión, las cuales serán direccionadas mecánicamente, mientras que para las estaciones terrenas de usuario serán de 52 cm de diámetro [7] utilizando direccionamiento tanto mecánico como electrónico.

Para el sistema satelital de OneWeb, en sus estaciones espaciales se contará con arreglos de antenas que generarán haces fijos altamente elípticos para sus enlaces de usuario, mientras que los enlaces de interconexión si podrán ser direccionables [4]. Las estaciones terrenas de interconexión contarán con antenas parabólicas de 2.4 metros de diámetro, con un sistema de apuntamiento mecánico, mientras que las estaciones de usuario dispondrán de antenas con dimensiones entre los 30 a 70 cm, las cuales podrán ser antenas parabólicas direccionables mecánicamente o arreglos de antenas en fase.

El sistema satelital de Starlink contará en sus estaciones espaciales con arreglos de antenas en fase las cuales permitirán que sus haces puedan ser formados y direccionados individualmente, mientras que para las estaciones terrenas se prevé el uso de antenas parabólicas de 5 m de diámetro para sus estaciones de TT&C y de arreglos de antenas en fase para las estaciones de interconexión y de usuario [8], estas últimas teniendo unas dimensiones aproximadas de 75 cm [9].

En cuanto al sistema de Telesat, sus estaciones espaciales contarán con arreglos de antenas tanto para sus enlaces de usuario como de interconexión capaces de generar hasta 16 haces de manera individual [10][6]. Para sus estaciones terrenas y para sus estaciones de interconexión utilizará antenas parabólicas de 3.5 metros de diámetro [8].

En la Tabla 3.5 a continuación se puede apreciar una comparativa entre las dimensiones descritas de las antenas que se utilizarán en las estaciones terrenas de cada uno de los sistemas tanto para estaciones de interconexión como estaciones de usuario.

Sistema Satelital	Dimensión de la antena	
	Interconexión	Usuario
Kuiper	1 - 2.4 m	52 cm
OneWeb	2.4 m	30 – 75 cm
Starlink	-	75 cm
Telesat	3.5 m	-

Tabla 3. 5 Dimensiones de las antenas de las estaciones terrenas de los sistemas satelitales.

3.2.5 Pérdidas por propagación

En cuanto a las pérdidas por propagación en el espacio libre, considerando la altura de la órbita de cada constelación, así como las frecuencias en las que operará cada uno de los sistemas, y utilizando la expresión (2.14) se obtuvieron los valores promedio de pérdidas que experimenta cada constelación, presentados en la Tabla 3.6.

Constelación	Altura de la órbita [km]	Pérdidas por propagación [dB]
Starlink	550	173.02
OneWeb	1200	179.80
Telesat	1015	179.98
	1325	182.29
Kuiper	590	175.27
	610	175.56
	630	175.84

Tabla 3. 6 Pérdidas por propagación promedio en espacio libre.

En la Figura 3.1 se muestra la comparativa de las pérdidas por propagación en espacio libre que experimenta cada constelación en sus diferentes órbitas y frecuencias de operación. Como era de esperar, la constelación que sufre las

menores pérdidas por propagación es Starlink, debido que es la más próxima a la superficie terrestre, mientras que Telesat por contar con la órbita de mayor altitud sufre más pérdidas.

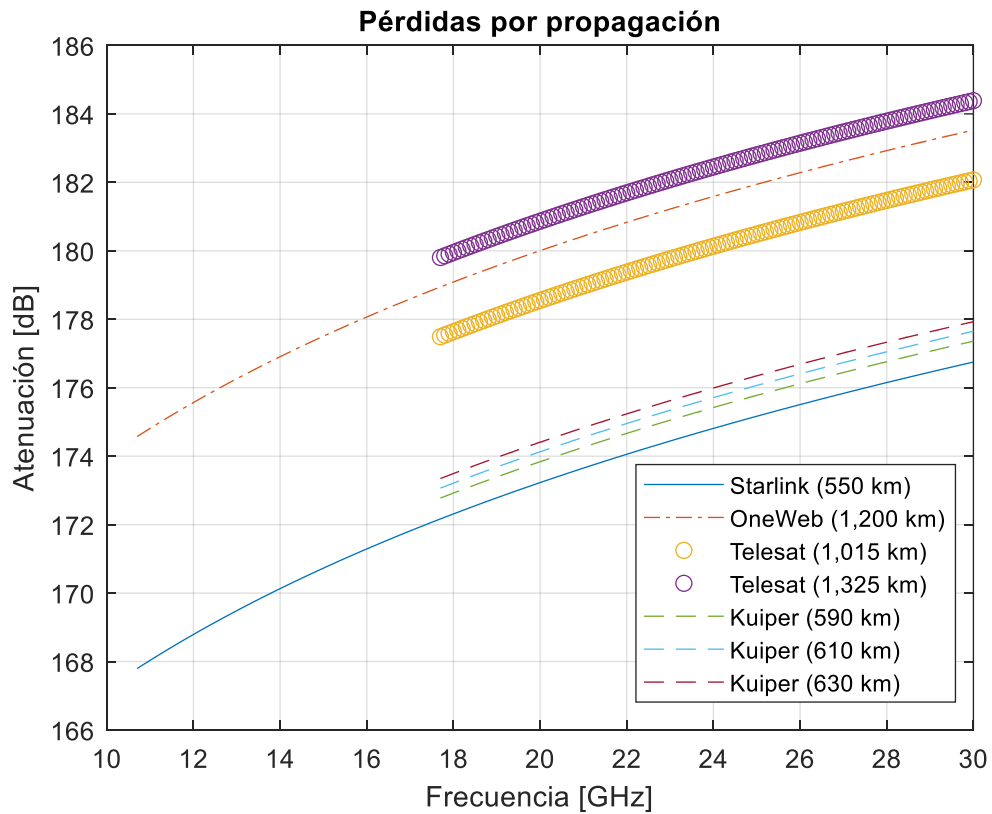


Figura 3. 1 Pérdidas por propagación promedio para cada constelación.

Sin embargo, al estar los satélites en constante movimiento con respecto a la estación terrena, la distancia a la que se encuentren de ella cambiará muy rápidamente, por lo que las pérdidas por propagación también dependerán de la posición en que se encuentre el satélite en el cielo, siendo el punto de menores pérdidas los 90°, es decir, en el nadir. En la Figura 3.2 se muestran los resultados obtenidos de las variaciones en las pérdidas por propagación debidas al espacio

libre, considerando el ángulo de elevación que describen los satélites con respecto a la estación terrena y una frecuencia de operación de 19 GHz.

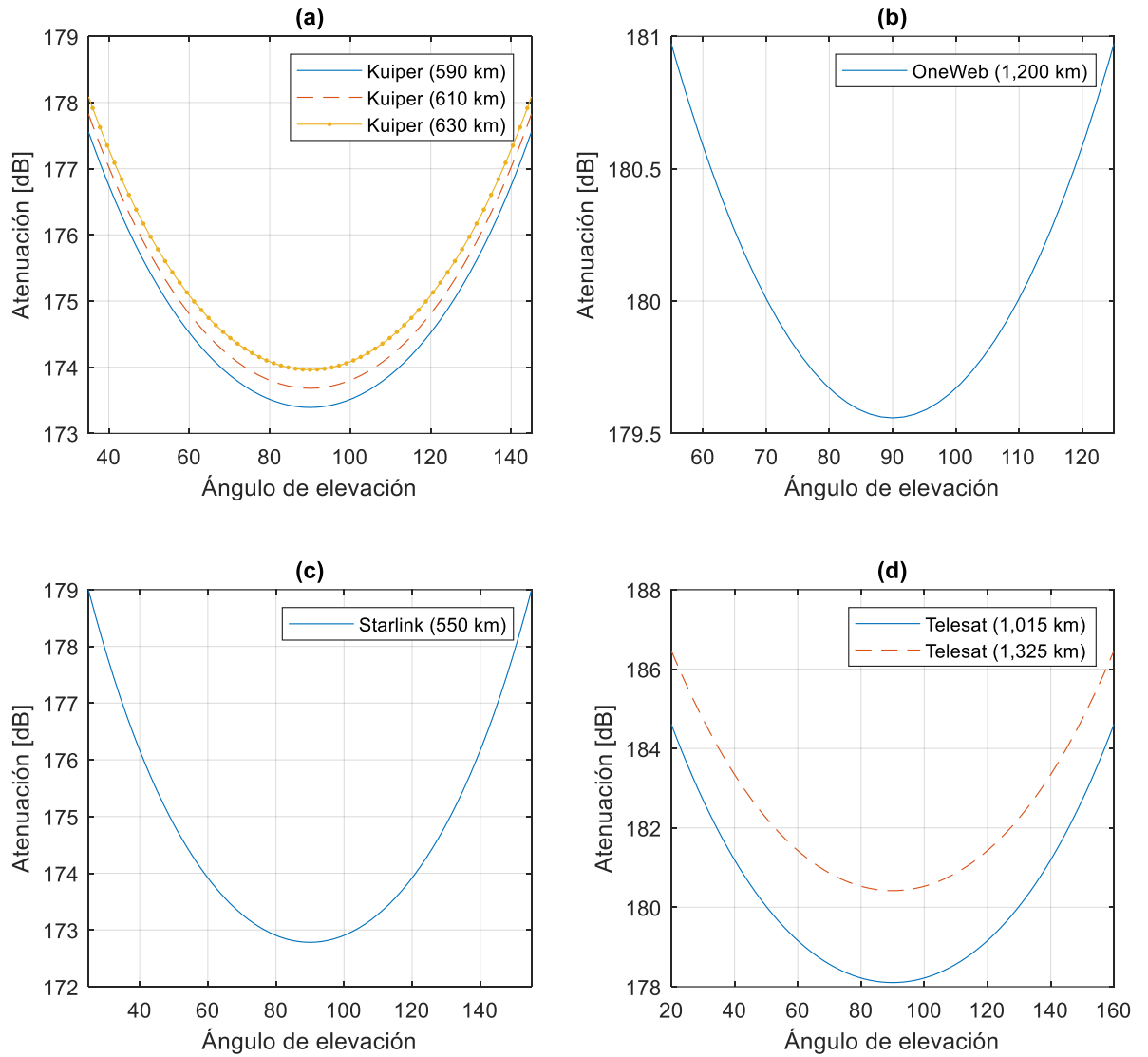


Figura 3. 2 Pérdidas por propagación dependiendo del ángulo de elevación. (a)Kuiper (b) OneWeb (c) Starlink (d) Telesat.

3.3 Modelamiento y simulación de las mega constelaciones satelitales

En este apartado se abordan las características de las diferentes mega constelaciones satelitales, haciendo énfasis en sus zonas de cobertura, en el

número la cantidad de satélites en línea de vista desde diversas locaciones alrededor de la Tierra, así como la cantidad de satélites de cada constelación y su disposición en sus órbitas. Para realizar el modelamiento y el estudio por computadora se empleará el *software* especializado SaVi [11]. Adicionalmente se hará un análisis del corrimiento Doppler que experimentará la frecuencia de la portadora de cada una de las constelaciones bajo estudio.

3.3.1 Starlink

Como se analizó en el capítulo anterior, la constelación Starlink de SpaceX es una de las más ambiciosas que se ha planteado, pues considera poner en órbita baja 4,426 satélites. En esta sección se realizará el estudio por computadora de la constelación en sus fases iniciales.

3.3.1.1 Simulación de la constelación Starlink

En esta sección se presenta un estudio por computadora de la primera etapa planteada por Starlink, en la cual se desplegarán 1,584 satélites en órbita, los cuales serán los más cercanos a la Tierra, con una altitud de 550 km. Se espera que la primera etapa se encuentre completamente operativa a finales de 2022 [9].

Utilizando el *software* SaVi se puede tener una visualización de como serían las órbitas descritas por los satélites alrededor de la Tierra, como se muestra en la Figura 3.3.

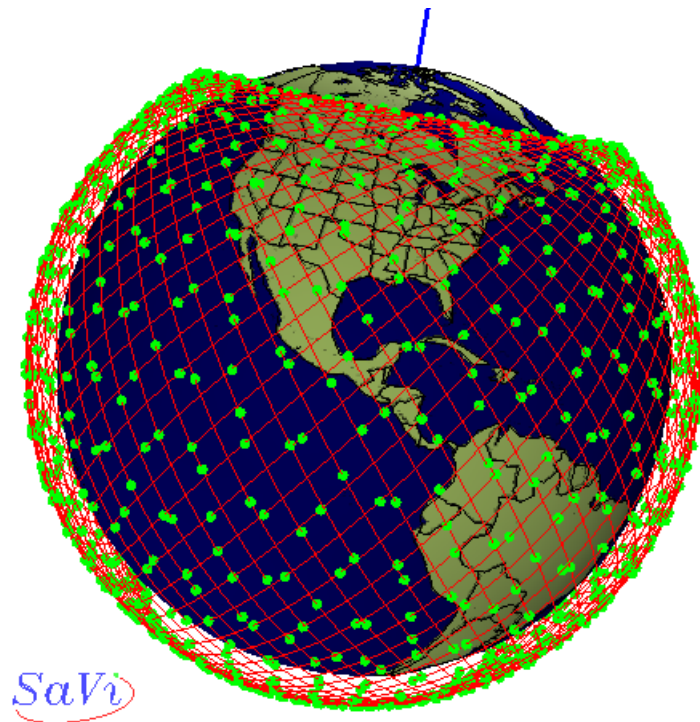


Figura 3. 3 Primer etapa de la constelación Starlink.

Considerando el ángulo mínimo de elevación de la primera etapa será de 25° y la disposición de las órbitas de los satélites, se puede inducir que en esta fase se tenga una cobertura casi global, excluyendo zonas cercanas a los polos, donde fases posteriores del despliegue proveerán servicios. En la Figura 3.4 se puede apreciar el mapa con la cobertura prevista para esta etapa del despliegue.

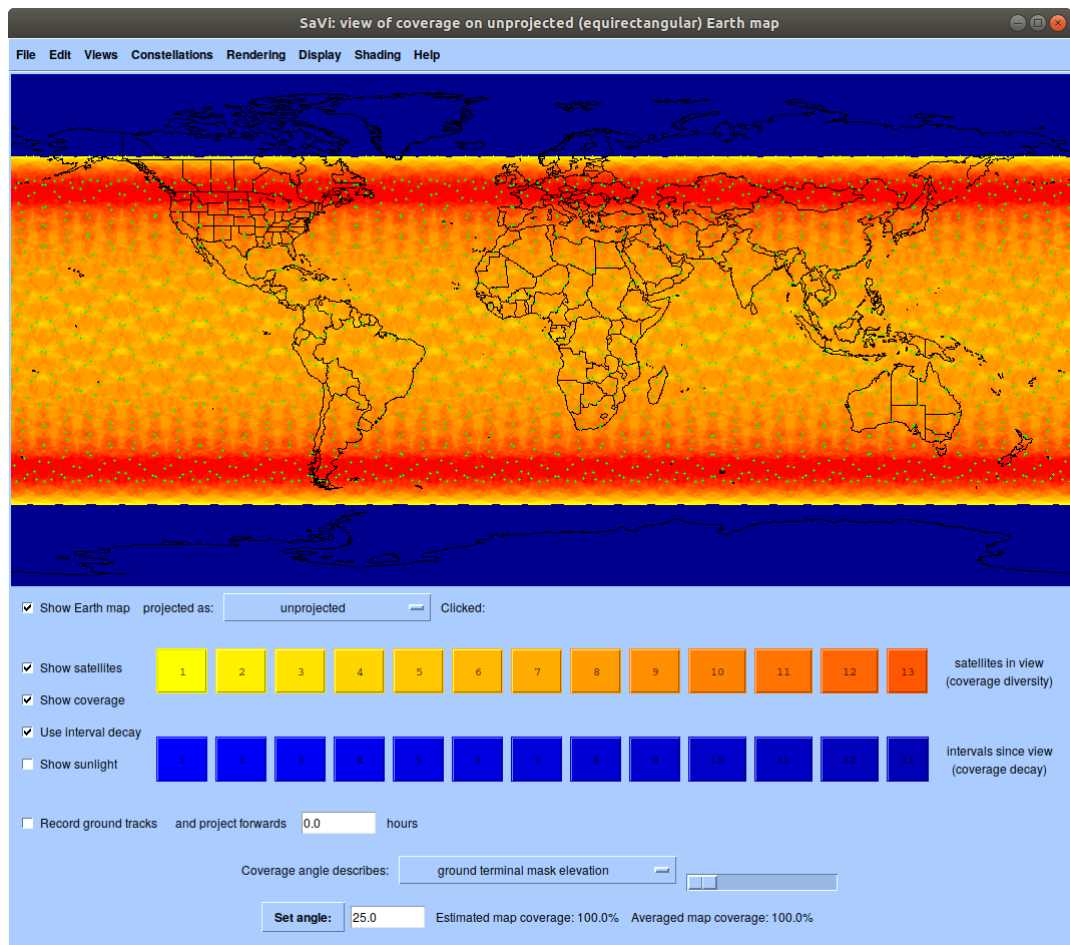


Figura 3. 4 Mapa de cobertura de la primera etapa de la constelación Starlink.

Como se puede apreciar en esta etapa se tiene una mayor concentración de satélites en las zonas donde se espera una mayor cantidad de tráfico, debido a esto, estaciones terrenas situadas en diferentes zonas geográficas de la Tierra tendrán una cantidad diferente de satélites en línea de vista.

En la Tabla 3.8 se muestra la cantidad de satélites que se podrán observar desde diferentes ciudades alrededor del mundo.

Cantidad de satélites		Ciudad de México	Nueva York	Moscú	Berlín
En LOS	Máximo	9	15	13	19
	Mínimo	6	10	12	16
En el cielo	Máximo	61	90	74	83
	Mínimo	56	85	69	77

Tabla 3. 7 Satélites en línea de vista de estaciones terrenas de la constelación Starlink.

En la Figura 3.5 se muestra la cantidad de satélites que se encuentran en línea de vista de una estación terrena situada en la Ciudad de México, mientras que en la Figura 3.6 ejemplifica una estación terrena situada en Nueva York.

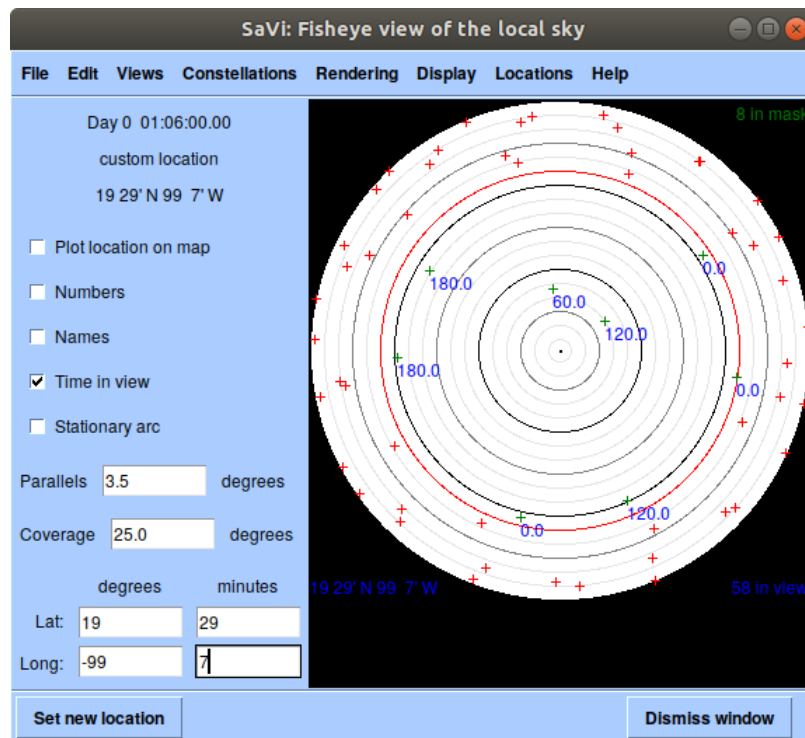


Figura 3. 5 Satélites en línea de vista de una estación terrena de Starlink en Ciudad de México.

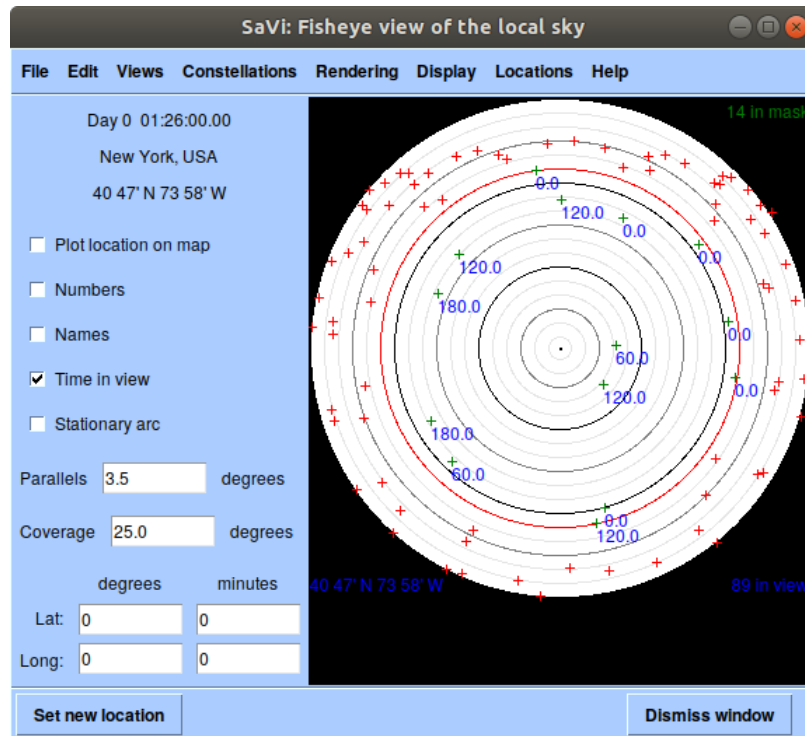


Figura 3. 6 Satélites en línea de vista de una estación terrena de Starlink en Nueva York.

3.3.1.2 Modelación del corrimiento Doppler de la constelación Starlink

En esta sección se realizó el análisis del corrimiento Doppler que experimentará la frecuencia de la portadora. Para realizar este estudio se utilizó la expresión (2.19). En la Tabla 3.9 se muestran los resultados obtenidos, los cuales reflejan los valores promedio que sufrirá la portadora de la constelación Starlink, considerando las frecuencias de operación de los enlaces de subida y bajada.

Tipo de enlace			
Subida		Bajada	
Usuario	Interconexión	Usuario	Interconexión
± 317.4064 kHz	± 669.7566 kHz	± 272.5618 kHz	± 442.6217 kHz

Tabla 3. 8 Corrimiento Doppler para enlaces de Starlink.

En la Figura 3.7 se muestra el corrimiento Doppler experimentado para cada tipo de enlace durante el tiempo en que el satélite se encuentra en el horizonte de la estación terrena.

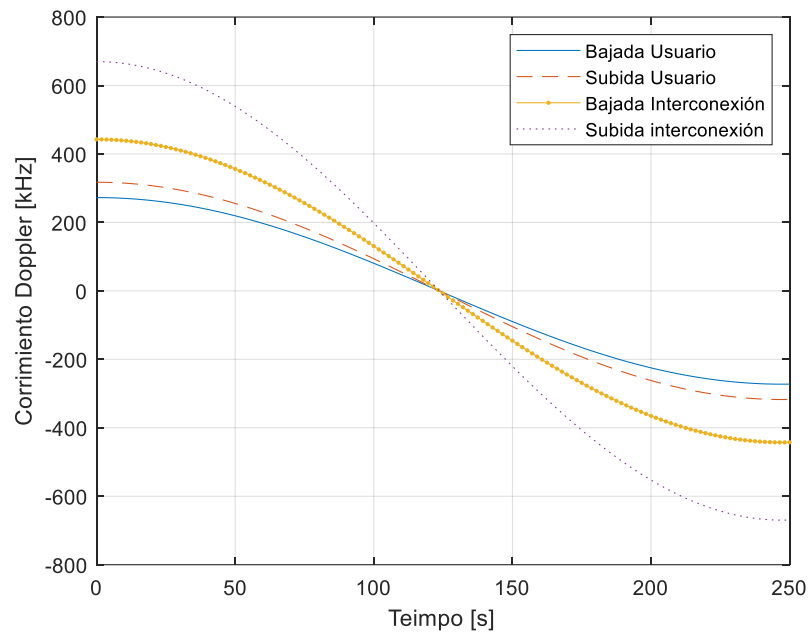


Figura 3. 7 Corrimiento Doppler para enlaces de Starlink.

3.3.2 OneWeb

3.3.2.1 Simulación de la constelación de OneWeb

Como se mencionó en el capítulo anterior, esta constelación contará con 1,980 satélites en órbita baja, a 1,200 km de altura. Con ayuda del *software* SaVi se realizó un estudio de la distribución espacial de los satélites de esta constelación, lo anterior resulta indispensable para determinar el número de satélites que se encuentran en línea de vista de un área dada. La geometría de la constelación se muestra en la Figura 3.8.

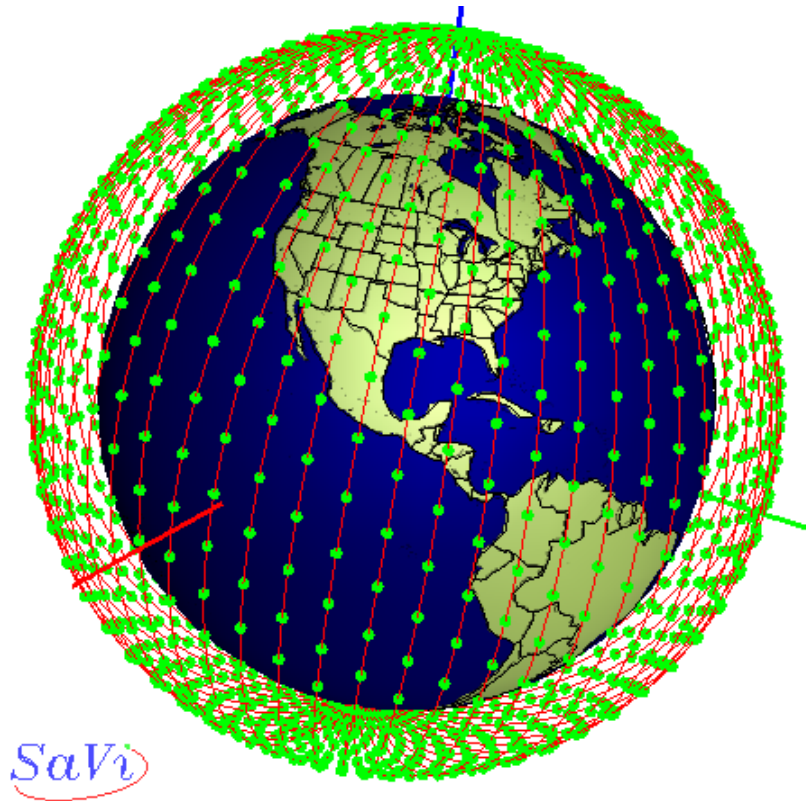


Figura 3. 8 Constelación satelital de OneWeb.

Las estaciones terrenas de este sistema contarán con el mayor ángulo mínimo de elevación, siendo éste de 55° , teniendo esta particularidad en consideración se realizó el estudio por computadora de la cobertura con que contará este sistema.

Como se puede apreciar en la Figura 3.9, el sistema dispondrá con una cobertura global, con tendencia a tener una mayor concentración de satélites en las regiones cercanas a los polos, esto a causa de la naturaleza de sus órbitas polares.

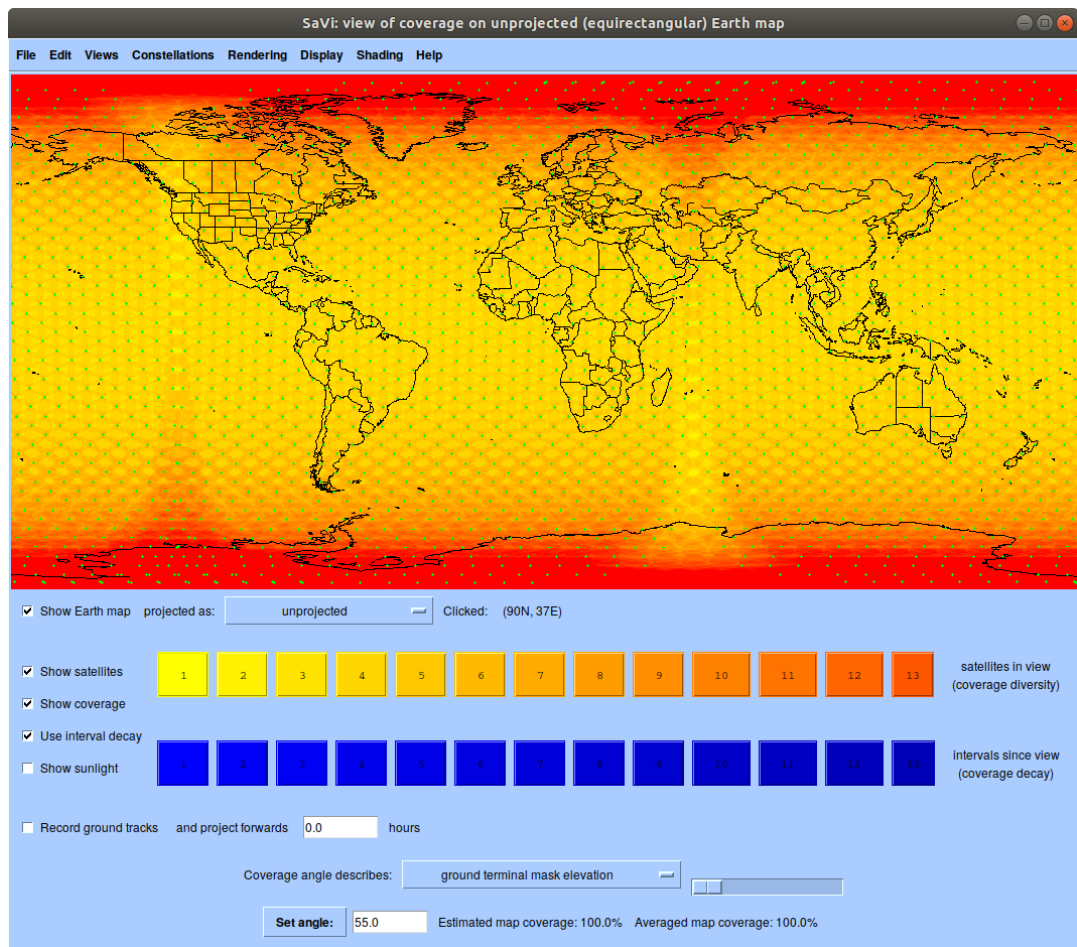


Figura 3. 9 Mapa de cobertura de la constelación de OneWeb.

En la Tabla 3.9 se muestra la cantidad de satélites en línea de vista para estaciones terrenas del sistema, situadas en diferentes ciudades del mundo.

Cantidad de satélites		Ciudad de México	Nueva York	Moscú	Berlín
En LOS	Máximo	5	7	10	9
	Mínimo	3	3	4	4
En el cielo	Máximo	119	154	252	211
	Mínimo	107	132	191	171

Tabla 3. 9 Satélites en línea de vista de estaciones terrenas de la constelación de OneWeb.

En la Figura 3.10 se puede apreciar la cantidad de satélites en línea de vista de una estación terrena situada en la Ciudad de México, mientras que en la Figura 3.11 se muestra el número de satélites que se observan desde Moscú, Rusia.

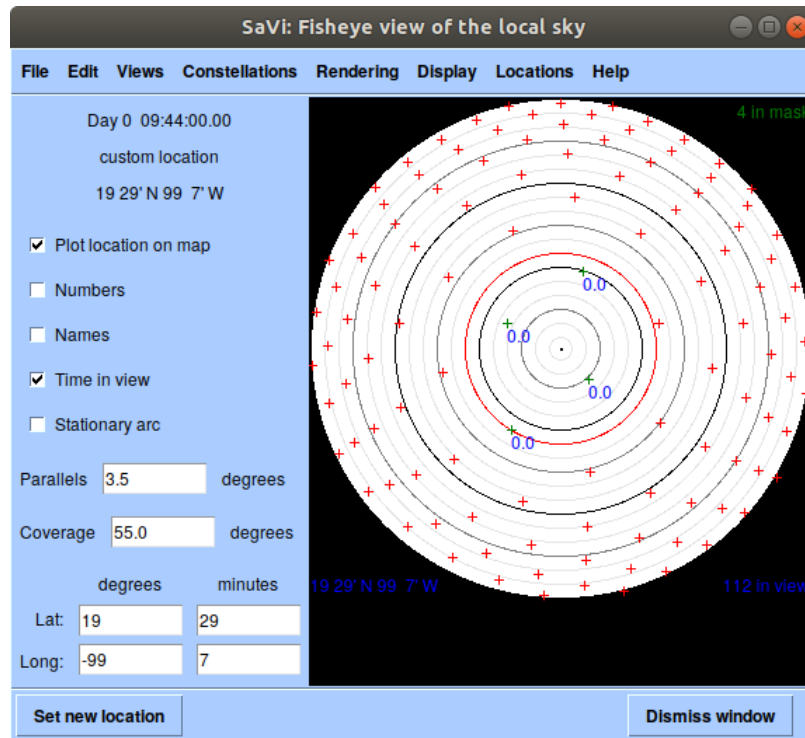


Figura 3. 10 Satélites en Línea de Vista de una estación terrena de OneWeb en Ciudad de México.

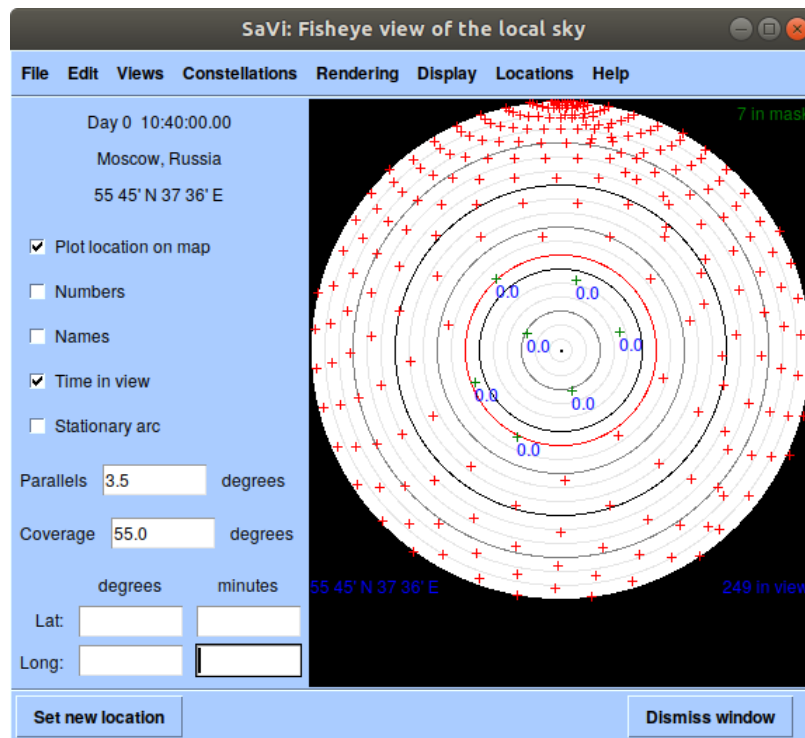


Figura 3. 11 Satélites en línea de vista de una estación terrena de OneWeb en Moscú.

En ambos casos se puede concluir que, debido al gran ángulo de elevación, aunque se encuentre una gran cantidad de satélites en el cielo, solo unos cuantos se encuentran en línea de vista para las estaciones terrenas.

3.3.2.2 Modelación del corrimiento Doppler de la constelación OneWeb

Se realizó el análisis del corrimiento Doppler experimentado por la frecuencia de las portadoras de esta constelación, y se plasmaron los resultados en la Tabla 3.10. Estos datos son valores promedio estimados, considerando todas las frecuencias de operación de los enlaces de subida y bajada.

Tipo de enlace			
Subida		Bajada	
Usuario	Interconexión	Usuario	Interconexión
± 277.4208 kHz	± 585.3834 kHz	± 238.2256 kHz	± 386.8621 kHz

Tabla 3. 10 Corrimiento Doppler para enlaces de OneWeb.

De la tabla 3.10 se concluye que el mayor corrimiento Doppler se presenta para el enlace de subida de interconexión, mientras que el corrimiento mínimo lo experimenta el enlace de bajada para los usuarios.

En la Figura 3.12 se muestra el corrimiento Doppler experimentado para cada tipo de enlace de los satélites de esta constelación en función del tiempo que son visibles los satélites desde el horizonte.

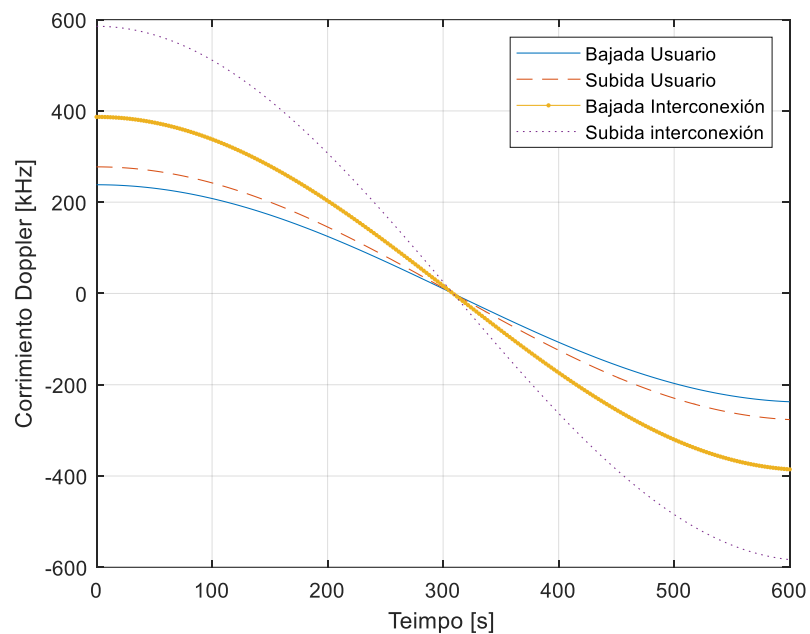


Figura 3. 12 Corrimiento Doppler para enlaces de OneWeb.

3.3.3 Telesat

Es la compañía canadiense de comunicaciones satelitales que tiene como objetivo lanzar una constelación de 298 satélites de órbita baja, siendo la constelación con menor cantidad de satélites de las que se analizarán en este trabajo, la cual plantean que se encuentre completamente operativa en 2022.

3.3.3.1 Simulación de la constelación de órbita baja de Telesat

En esta sección se hará, de forma similar al análisis realizado para las constelaciones analizadas anteriormente el estudio de la geometría de la constelación de órbita baja mediante el *software* SaVi, simulando los dos conjuntos de órbitas, con sus planos polares e inclinados situados a 1,015 y 1,325 km respectivamente.

En la Figura 3.13 se muestra el resultado obtenido para esta constelación, donde se pueden apreciar tanto las órbitas inclinadas como las polares.

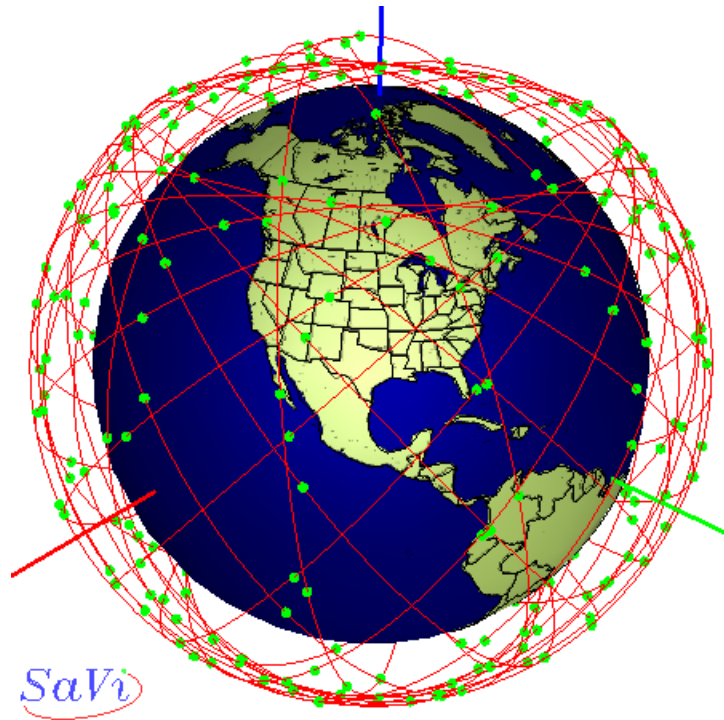


Figura 3. 13 Constelación satelital de Telesat.

En este sistema satelital las estaciones terrenas contarán con un ángulo de elevación mínimo de 20 grados para poder proporcionar una cobertura global, siendo el sistema que cuente con el menor ángulo de elevación de los que se analizarán en este trabajo. En la Figura 3.14 se muestra el resultado del estudio por computadora de la cobertura de la constelación.

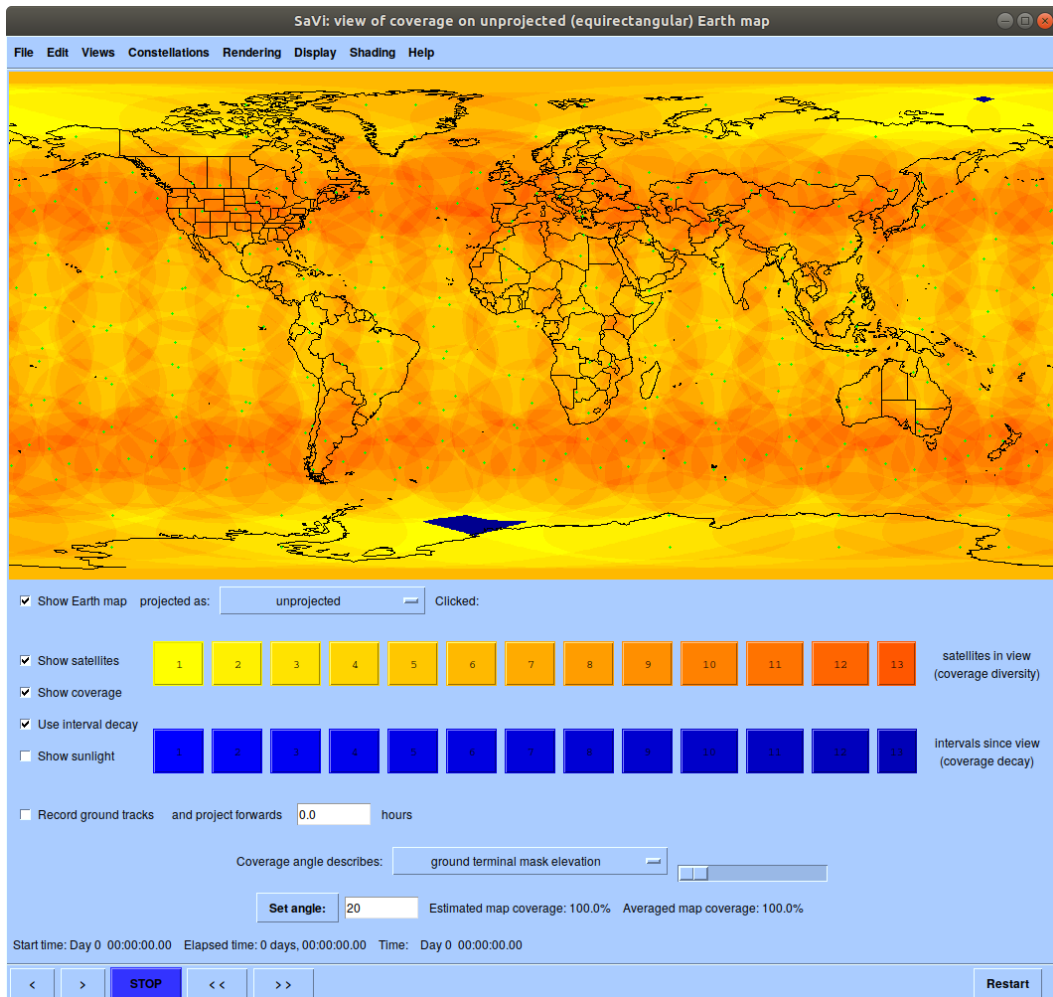


Figura 3. 14 Mapa de cobertura de la constelación de Telesat.

De los resultados de la simulación realizada de la cobertura, se pudo concluir que habría zonas cercanas a la Antártida y al Polo Norte donde de momentos no se dispondría de servicio, lo que sería una limitación debido a que un objetivo central es que el sistema cuente con cobertura global, aunque posiblemente este problema se solucione al desplegar los 1,671 satélites que pretenden tener para la etapa final de su constelación.

En la Tabla 3.11 se muestra el resultado para la ciudad de México y otras tres ciudades de otros países, del número de satélites que se encontrarán en línea de vista para estaciones terrenas situadas en las áreas de ciudades bajo estudio.

Cantidad de satélites		Ciudad de México	Nueva York	Moscú	Berlín
En LOS	Máximo	9	13	11	11
	Mínimo	4	8	6	7
En el cielo	Máximo	26	29	30	31
	Mínimo	19	23	19	20

Tabla 3. 11 Satélites en línea de vista para estaciones terrenas de Telesat.

En la Figura 3.15 se pueden apreciar los satélites que se encuentran en línea de vista para una estación terrena en la Ciudad de México, y en la Figura 3.16 se muestra para una estación terrena en Berlín, Alemania.

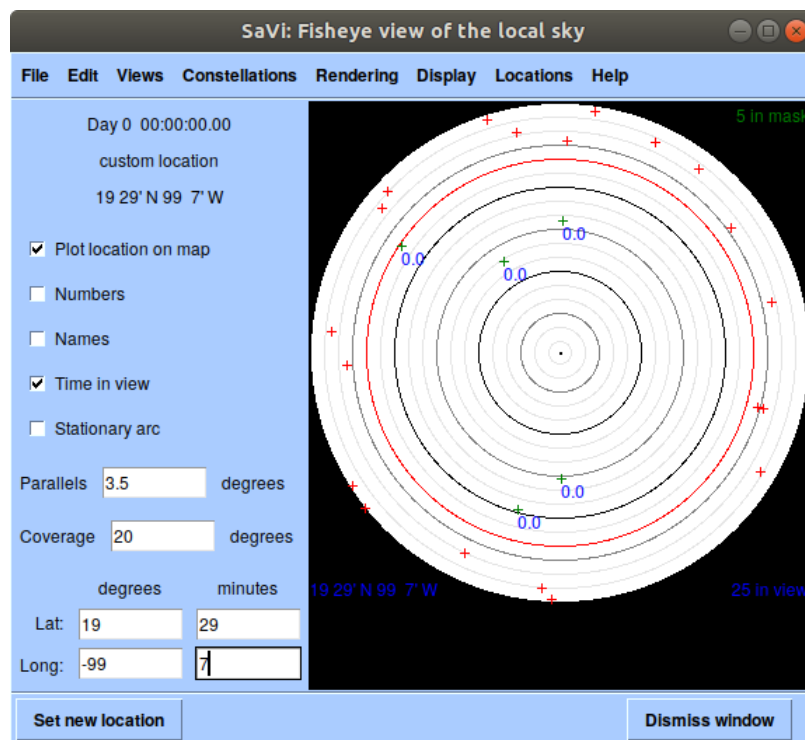


Figura 3. 15 Satélites en línea de vista para una estación terrena de Telesat en Ciudad de México.

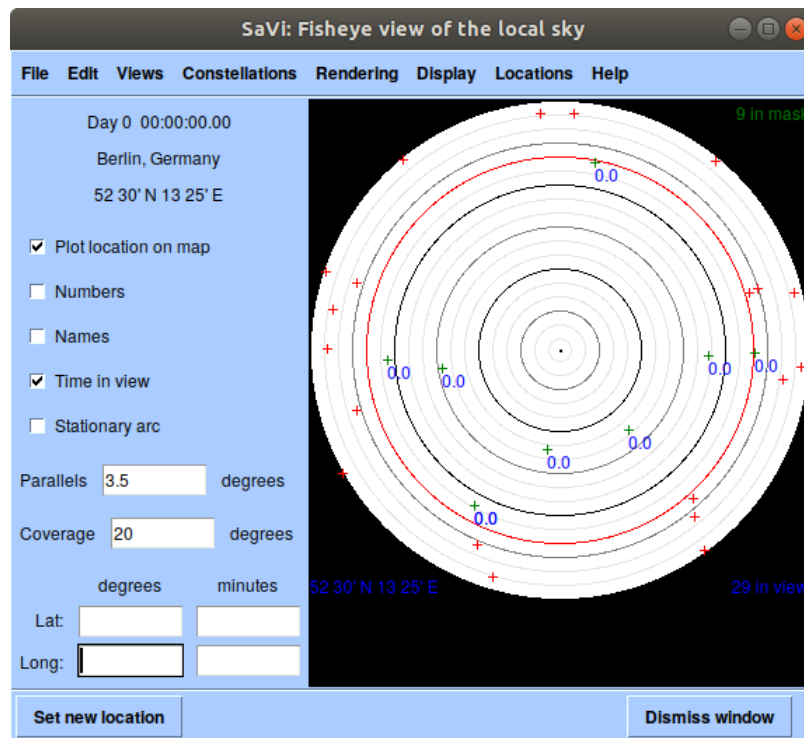


Figura 3. 16 Satélites en línea de vista para una estación terrena de Telesat en Berlín.

Como conclusión se puede afirmar que, aunque, este es el sistema que cuente en su constelación con la menor cantidad de satélites, gracias a su ángulo de elevación las estaciones terrenas siempre encontrarán una buena cantidad de satélites en línea de vista. Sin embargo, debido a su bajo ángulo de elevación puede ser más susceptible a las oscilaciones interferentes provenientes de sistemas ajenos o de elementos naturales, y también crece la probabilidad de que estos sistemas provoquen condiciones de interferencia a sistemas terrestres de comunicaciones.

3.3.3.2 Modelación del corrimiento Doppler de la constelación Telesat

Como en los casos de estudio anteriores, para este sistema también se determinó el corrimiento Doppler que experimentará la frecuencia de las portadoras de esta constelación tanto para sus enlaces de subida como de bajada. Los resultados se muestran en la Tabla 3.12.

Tipo de enlace	
Subida	Bajada
± 588.8801 kHz	± 389.1729 kHz

Tabla 3. 12 Corrimiento Doppler para enlaces de Telesat.

Simultáneamente, en la Figura 3.17 se muestra el corrimiento Doppler como función del tiempo que experimentan la frecuencia de las portadoras de los enlaces de subida y bajada en el lapso en que el satélite es visible en el horizonte. Los datos obtenidos representan un valor promedio del corrimiento que experimentará el sistema, considerando todas las frecuencias de operación de los enlaces de subida y bajada.

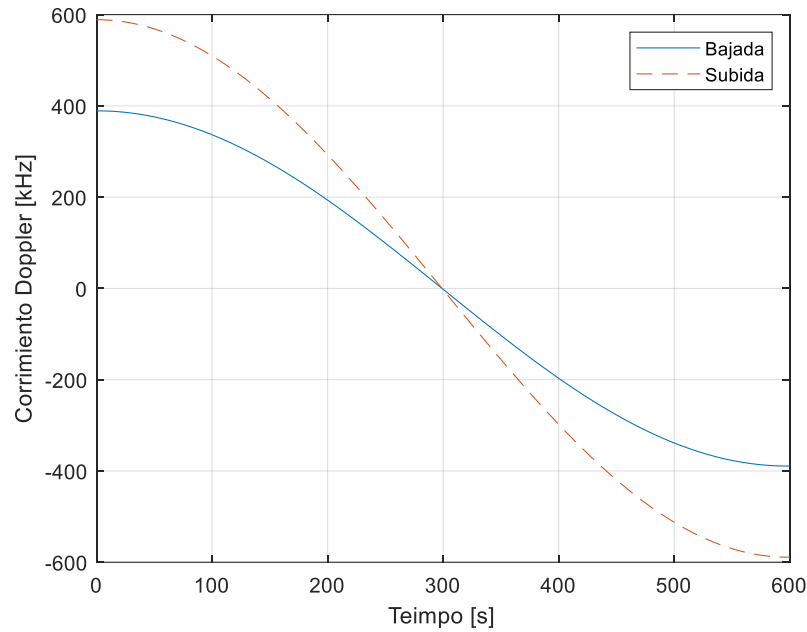


Figura 3. 17 Corrimiento Doppler para enlaces de Telesat.

3.3.4 Kuiper de Amazon

Finalmente se presentan los resultados obtenidos con respecto a la constelación Kuiper. Como se trató en el capítulo anterior, Kuiper es el proyecto de Amazon para desplegar una constelación satelital de órbita baja que se caracterizará por una cobertura cuasi global, contando con 3,236 satélites.

3.3.4.1 Simulación de la constelación Kuiper

En esta sección se continúa con la modelación por computadora de la distribución de los satélites en sus diferentes orbitas de la constelación Kuiper. Para este estudio se toman en cuenta sus tres capas orbitales situadas a las alturas de 590, 610 y 630 km. La distribución de los satélites en sus diferentes orbitas se determinará empleando el *software* SaVi. En la Figura 3.18 se muestra el resultado obtenido respecto a la distribución de los satélites de la constelación.

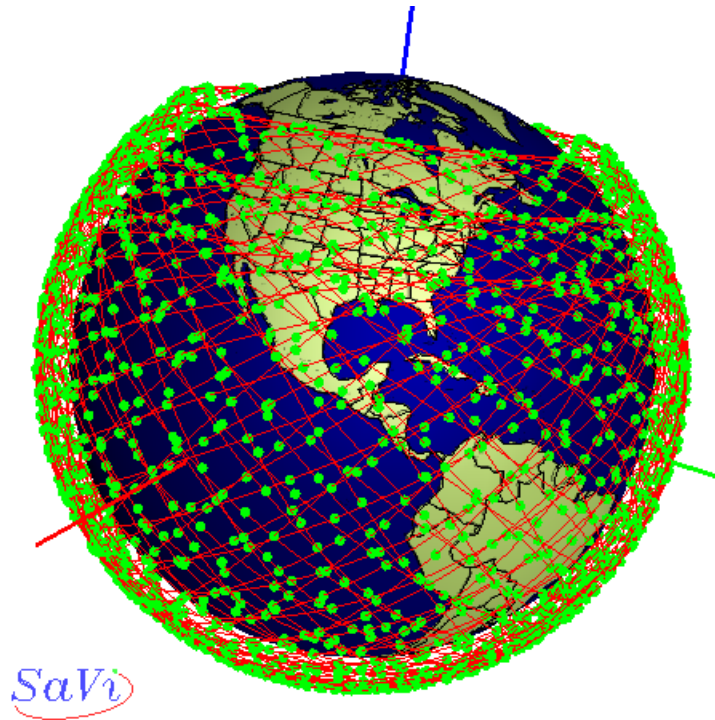


Figura 3. 18 Constelación satelital Kuiper de Amazon.

De los resultados obtenidos se observa que esta constelación está planteada para tener una mayor cantidad de satélites en las zonas más pobladas del planeta, donde se espera tener gran cantidad de tráfico, pero no cuenta con cobertura en regiones cercanas a los polos. En la Figura 3.19 se muestra el mapa de cobertura para este sistema satelital.

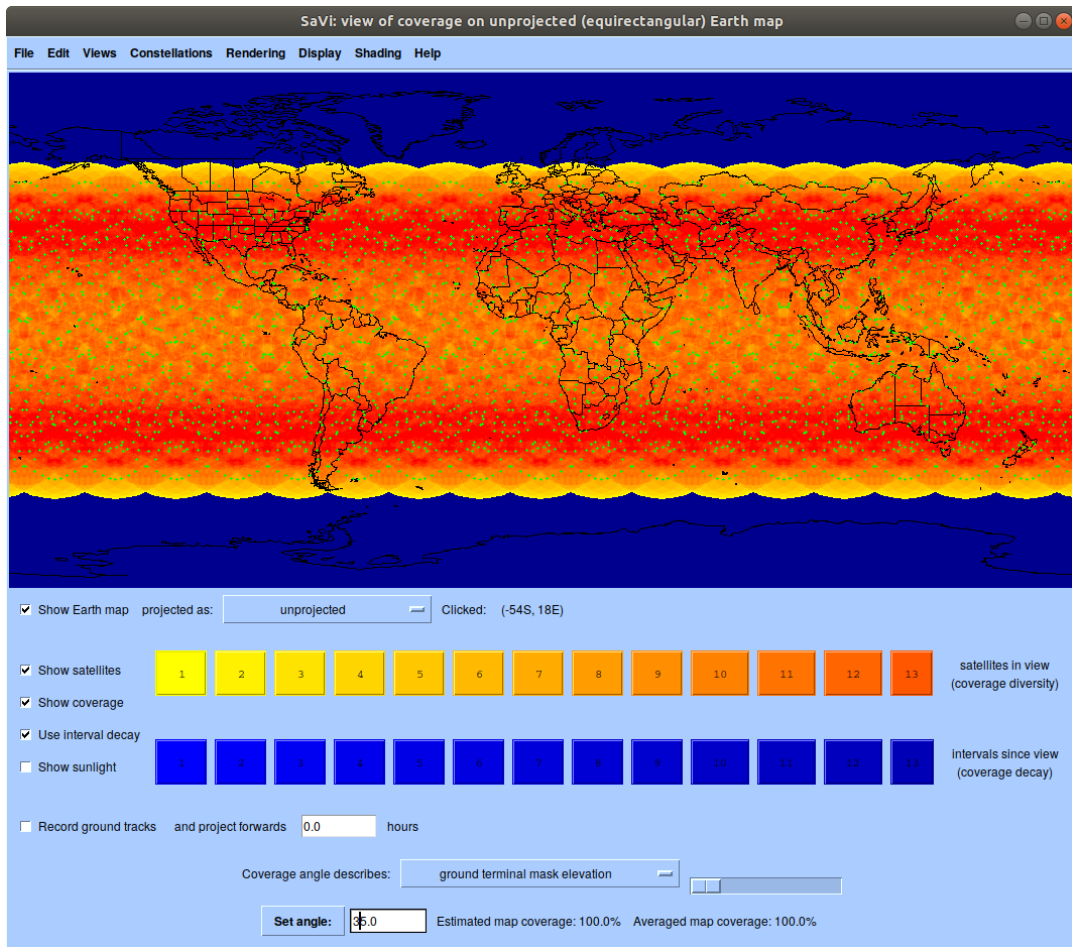


Figura 3. 19 Mapa de cobertura de la constelación Kuiper.

De los resultados ya presentados se muestra que: a pesar de que el sistema no cuenta con cobertura global, las estaciones terrenas que se encuentren dentro de su área de cobertura tendrán gran cantidad de satélites en línea de vista que puedan proporcionar sus servicios, un ejemplo de esto, se muestra la Tabla 3.13.

Cantidad de satélites		Ciudad de México	Nueva York	Moscú	Berlín
En LOS	Máximo	15	20	6	11
	Mínimo	8	13	3	6
En el cielo	Máximo	182	175	101	123
	Mínimo	171	163	90	112

Tabla 3. 13 Satélites en línea de vista para estaciones terrenas del sistema satelital Kuiper

En la Figura 3.20 se presenta una distribución de los satélites en línea de vista para una estación terrena en Ciudad de México, mientras que en la Figura 3.21 se muestran para una estación terrena situada en Nueva York, Estados Unidos de América.

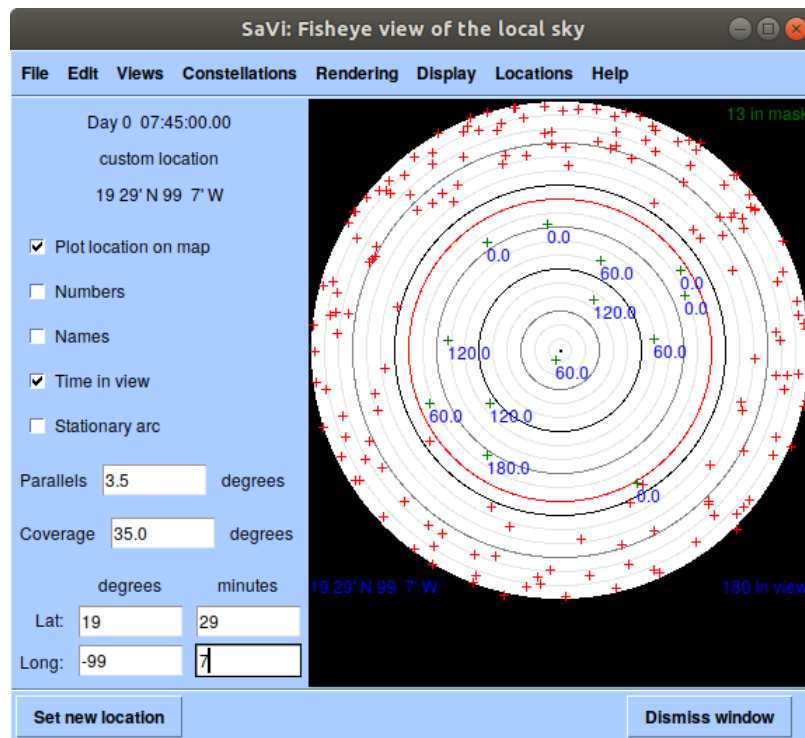


Figura 3. 20 Satélites en línea de vista para una estación terrena del sistema Kuiper en Ciudad de México.

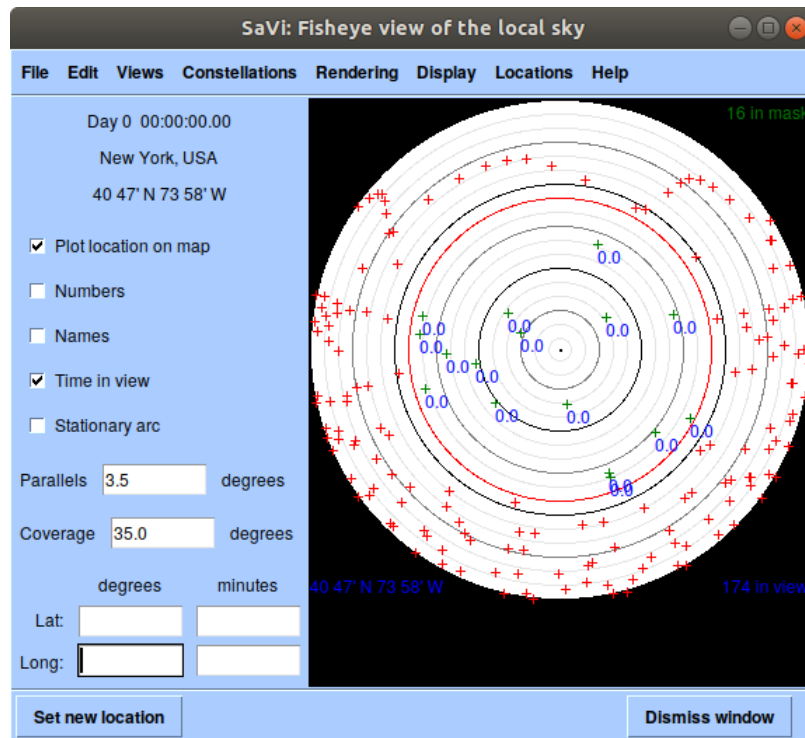


Figura 3. 21 Satélites en línea de vista para una estación terrena del sistema Kuiper en Nueva York.

3.3.4.2 Modelación del corrimiento Doppler de la constelación Kuiper

En esta sección se incluyen los resultados de los cálculos para determinar el efecto Doppler que experimentarán la frecuencia de las portadoras de los enlaces de subida y bajada de la constelación Kuiper. En la Tabla 3.14 se muestran los resultados obtenidos.

Tipo de enlace	
Subida	Bajada
± 661.1406 kHz	± 436.9277 kHz

Tabla 3. 14 Corrimiento Doppler para enlaces de Kuiper.

En la Figura 3.22, se presenta la dependencia del corrimiento Doppler como función del tiempo que experimentará la frecuencia de la portadora de los enlaces de subida y bajada del sistema durante el periodo de tiempo en que los satélites se encuentren en línea de vista de la estación terrena. Los datos plasmados representan una estimación promedio, considerando el rango en que se encuentran las frecuencias de operación del sistema.

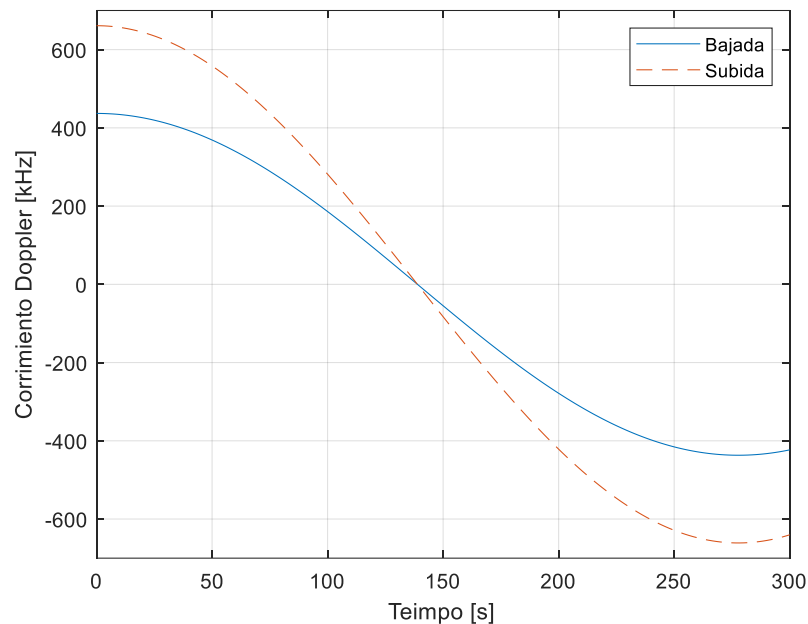


Figura 3. 22 Corrimiento Doppler para enlaces de Kuiper.

3.4 Atenuación debida a los gases atmosféricos en la Ciudad de México

También, como caso de estudio, en este trabajo de tesis se evalúa la atenuación que sufriría la portadora de enlaces cuando las estaciones terrenas se encuentran en la zona metropolitana de la Ciudad de México. Lo anterior tiene

relevancia debido a que estas constelaciones operarán en una órbita baja, y el análisis de los efectos provocados por la atmósfera en la atenuación de la portadora de sus enlaces de comunicaciones es de gran relevancia.

Con base en la recomendación ITU-R P. 676-12 [12] se obtuvieron los resultados de las pérdidas por propagación ocasionadas por la atmósfera terrestre, principalmente por la interacción con el oxígeno y el vapor de agua. Primero se hizo el cálculo de dicha atenuación tomando en cuenta los valores de presión, temperatura y densidad de vapor de agua para una atmósfera normalizada, es decir 288 K, 1013.25 hPa y 7.5 g/m³ [12], respectivamente. Posteriormente, se realizaron estos cálculos utilizando los datos atmosféricos para presión y temperatura de la Ciudad de México [13], [14], y los datos de la recomendación ITU-R P. 835-6 [15], obteniendo los promedios de cada uno de ellos. Los resultados se presentan en la Tabla 3.15 y en la Figura 3.23. Tanto las ecuaciones utilizadas como el programa de Matlab desarrollado para estas evaluaciones se encuentran en el Apéndice E.

Parámetro	Presión [hPa]	Temperatura [K]	Humedad [g/m ³]
Atmosfera Normalizada	1013.25	288.15	7.5
CDMX	608.67	291.44	4.06

Tabla 3. 15 Datos atmosféricos promedio.

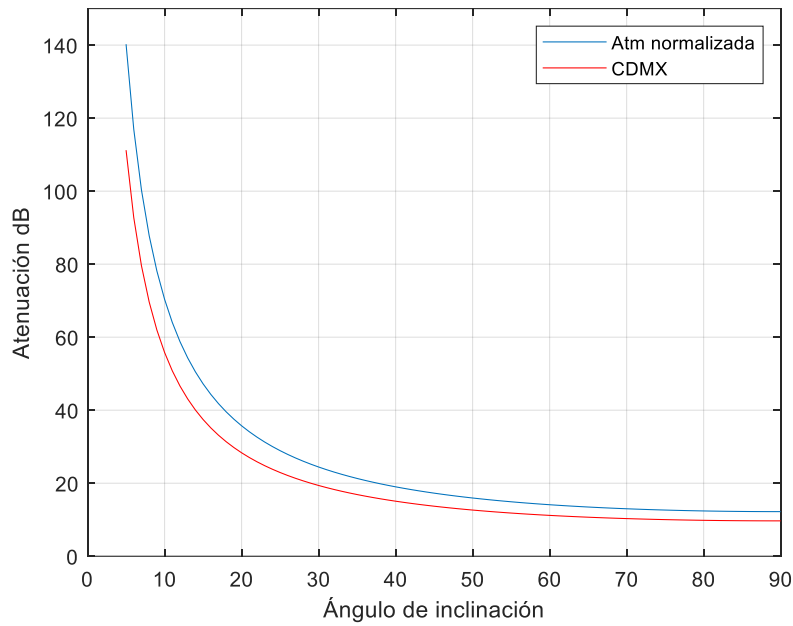


Figura 3. 23 Atenuación debida a efectos atmosféricos respecto al ángulo de inclinación.

Parámetro	Atenuación [dB]		
	Mínima	Media	Máxima
Atm Normalizada	12.22	26.41	140.24
CDMX	9.69	20.94	111.22

Tabla 3. 16 Atenuación debida a efectos atmosféricos.

De estos resultados se puede concluir que, debido a las condiciones geográficas de la Ciudad de México, las atenuaciones en general son menores a las esperadas para unas condiciones normalizadas de presión, temperatura y humedad. Se debe considerar que estos son valores promedio que toman en cuenta datos de todo el año, en un periodo de tiempo que comprende los últimos 10 años, por lo que pueden existir variaciones si se desea conocer el comportamiento de esta atenuación en estaciones específicas. También, de esta tabla se puede observar el intervalo tan amplio de la atenuación de la portadora como función de las condiciones atmosféricas probables.

3.5 Conclusiones

En este capítulo se pudo apreciar que todas las mega constelaciones utilizarán una cantidad de satélites no vista con anterioridad en sistemas similares, sin embargo, no todas tendrán una cobertura global en las primeras etapas de sus despliegues. Aun así, tendrán cobertura en gran parte de las zonas con mayor demanda de comunicaciones. Adicionalmente se pudo apreciar que todas las mega constelaciones utilizarán tecnologías similares para proveer de sus servicios en sus estaciones terrenas, incluyendo la compartición de las bandas de frecuencia en las que operarán.

Además, se resaltaron los efectos adversos provocados por la atmósfera específicamente en la Ciudad de México, niveles de atenuación que no resultan despreciables dadas las características de los diferentes sistemas bajo estudio en esta tesis.

3.6 Referencias

- [1] WRC-15, "Radio Regulations Volume 1, Articles," *Int. Telecommun. Union*, 2016.
- [2] "Final Acts WRC-19." [Online]. Available: <https://www.itu.int/pub/R-ACT-WRC.14-2019/en>. [Accessed: 17-Aug-2020].
- [3] "Kuiper Systems LCC, FCC Application Number: SAT-LOA-20190704-00057 Attachment Sched S Tech Report." [Online]. Available: https://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.hts?q_set=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number/%3D/SATLOA2019070400057&prepa

re=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number.

[Accessed: 10-Apr-2020].

- [4] “WorldVu Satellites Limited, OneWeb Ka-band NGSO constellation FCC filing SATLOI- 20160428-00041,” 2016. [Online]. Available: http://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.hts?q_set=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number/%3D/SATLOI2016042800041&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number. [Accessed: 18-Jun-2020].
- [5] “Space Exploration Holdings, LLC, SpaceX Ka-band NGSO constellation FCC filing SAT-LOA-20161115-00118,” 2016. [Online]. Available: http://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.hts?q_set=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number/%3D/SATLOA2016111500118&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number. [Accessed: 16-Mar-2020].
- [6] “Telesat Canada, Telesat Ka-band NGSO constellation FCC filing SAT-PDR- 20161115-00108.” [Online]. Available: http://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.hts?q_set=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number/%3D/SATPDR2016111500108&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number. [Accessed: 01-Apr-2020].
- [7] “Nima Mahanfar discusses the science behind Project Kuiper customer terminal antenna.” [Online]. Available: <https://www.amazon.science/latest-news/nima-mahanfar-discusses-the-science-behind-project-kuiper->

- customer-terminal-antenna. [Accessed: 17-Mar-2021].
- [8] I. del Portillo, B. G. Cameron, and E. F. Crawley, “A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband,” *Acta Astronaut.*, vol. 159, no. March, pp. 123–135, 2019, doi: 10.1016/j.actaastro.2019.03.040.
- [9] “Starlink.” [Online]. Available: <https://www.starlink.com/>. [Accessed: 27-Mar-2020].
- [10] “Telesat Canada, Telesat Ka-band NGSO constellation FCC filing SAT-PDR- 20161115-00108.” [Online]. Available: http://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.hts?q_set=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number/%3D/SATPDR2016111500108&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/File+Number. [Accessed: 03-Apr-2020].
- [11] “SaVi - Satellite constellation Visualization.” [Online]. Available: <https://savi.sourceforge.io/>. [Accessed: 31-Aug-2020].
- [12] Unión Internacional de Comunicaciones, *Atenuación debida a los gases atmosféricos*, vol. 10. 2001.
- [13] “Dirección de Monitoreo Atmosférico.” [Online]. Available: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBhml=%27&opcion=bg==>. [Accessed: 18-Nov-2021].
- [14] “Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia.” [Online]. Available: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>. [Accessed: 18-Nov-2021].
- [15] ITU-R, “Atmósferas normalizadas de referencia Serie P,” vol. 5, 2012.

Capítulo 4: Análisis de interferencias entre las mega constelaciones satelitales de órbita baja.

4.1 Introducción

En este capítulo se analizarán los efectos interferentes de los diversos enlaces de las mega constelaciones estudiadas en el capítulo anterior, se investigará que efectos tendrán sus transmisiones contra la calidad de la comunicación de los otros sistemas, en especial se analizarán los efectos que provoquen en cuanto a interferencia en estaciones terrenas ubicadas en la Ciudad de México, como caso de ejemplo. Para ello se realizarán diversos estudios por computadora de los enlaces de comunicaciones. Para alcanzar esta meta se utilizará *software* especializado SaVi [1] y se desarrollaran diversos algoritmos en el ambiente de Matlab.

4.2 Comparación de interferencias entre las mega constelaciones satelitales

Debido a la gran cantidad de satélites que se plantean poner en órbita por las diferentes mega constelaciones satelitales, además de la compartición del espectro electromagnético entre ellas, resulta de suma importancia realizar el análisis de los niveles de oscilaciones potencialmente interferentes debido a que las estaciones terrenas de los diferentes sistemas pueden tener altas probabilidades de experimentar interferencia.

4.2.1 Propuesta de antena a utilizar para la simulación y análisis de interferencias

Como se destacó en el capítulo anterior, las antenas que utilizarán las diferentes mega constelaciones en sus diversas estaciones terrenas ya sean de usuario o interconexión, serán parabólicas. Por tal motivo en esta sección se describirá el proceso que se realizó para diseñar y simular una antena parabólica, lo más parecido posible a las características que describe cada compañía en sus reportes técnicos, la cual servirá para realizar el análisis de la compatibilidad electromagnética entre las diferentes mega constelaciones satelitales.

Se debe resaltar que el diseño de una antena es un proceso complejo, además, debido a que el presente trabajo no se centra en esta tarea, y con la finalidad de facilitar el proceso, se utilizó un programa especializado en el diseño de antenas llamado Antenna Magus [2].

El proceso del diseño y simulación de la antena parabólica se dividió en dos etapas, esto debido a que por restricciones de la versión para estudiantes del *software* de Antenna Magus no era posible realizar el diseño directo de una antena parabólica con las características requeridas.

La primera etapa consistió en hacer el diseño de una antena de tipo corneta piramidal, la cual serviría como el alimentador de la antena parabólica, para esto se utilizó el programa Antenna Magus para la simulación de la antena. Se estableció una frecuencia de portadora de operación de 20 GHz y una ganancia deseada de 25 dBi. Con esos datos el programa arrojó las dimensiones que debería tener la antena para cumplir con los parámetros deseados. En la Tabla 4.1 a continuación se muestran los resultados obtenidos.

Parámetro	Dimensión
Wg	11.77 mm
Hg	5.883 mm
Lg	14.99 mm
Wa	48.41 mm
Ha	40.16 mm
Lf	60.35 mm

Tabla 4. 1 Dimensiones de la antena de tipo corneta.

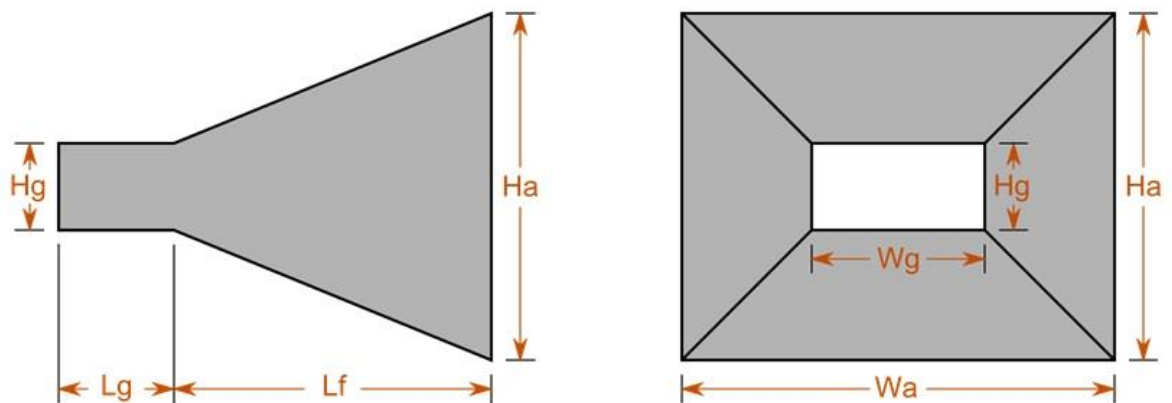


Figura 4. 1 Diagrama de la antena de tipo corneta

Posteriormente se exportó el diseño obtenido para poder realizar la simulación de las características de la antena en el programa CST Studio Suite. A continuación, se muestra el patrón de radiación obtenido de la simulación de la antena de corneta en la Figura 4.2.

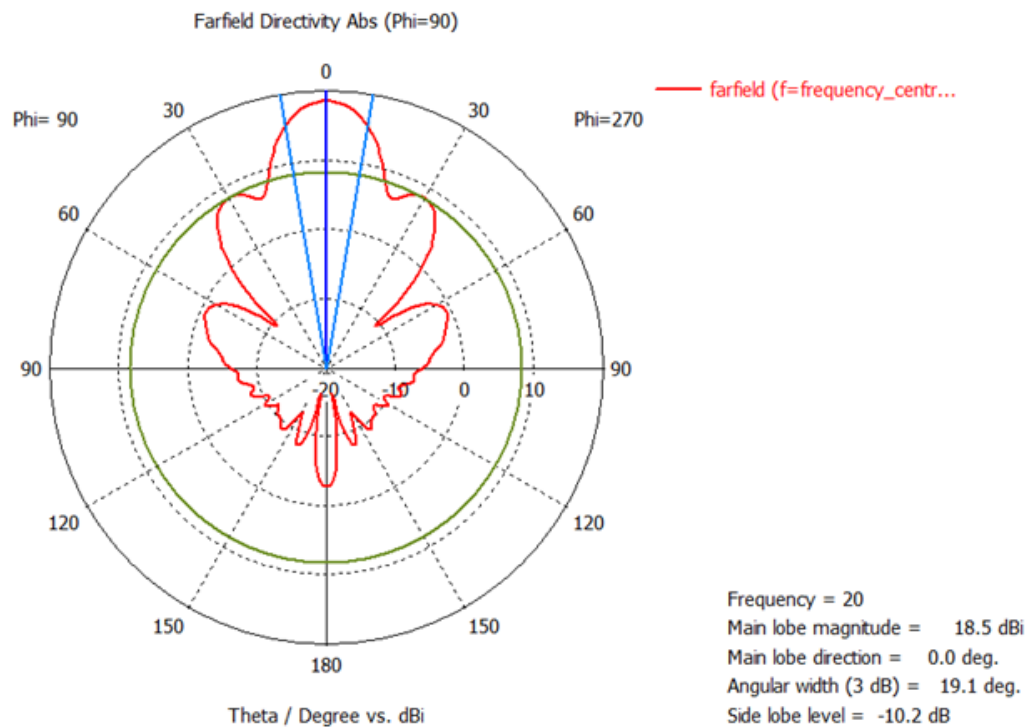


Figura 4. 2 Patrón de radiación de la antena de tipo corneta.

Como se puede observar, la ganancia que se obtiene de simular la antena propuesta por el *software* Antenna Magus es mucho menor que la que se esperaba obtener, pero nuevamente, debido a las limitantes que presenta la versión para estudiantes no se pudo diseñar una antena con una mayor ganancia para compensar las pérdidas que se manifestaron al realizar la simulación en CST Studio Suite.

Ahora, teniendo la simulación del alimentador se guardaron los datos de su patrón de radiación para proseguir con la simulación de la antena parabólica. Considerando las diferentes dimensiones que se utilizarán en las antenas para las estaciones terrenas de las diversas mega constelaciones, además de comparar con diferentes datos técnicos de antenas comerciales de usos similares [3]–[6], se decidió hacer la simulación de una antena parabólica con un diámetro de 75 cm, la cual tendría su foco a una distancia de 37.5 cm de su

vértice, punto donde se colocaría el alimentador, diseñado previamente. El patrón de radiación resultado de esta simulación se muestra en la Figura 4.3.

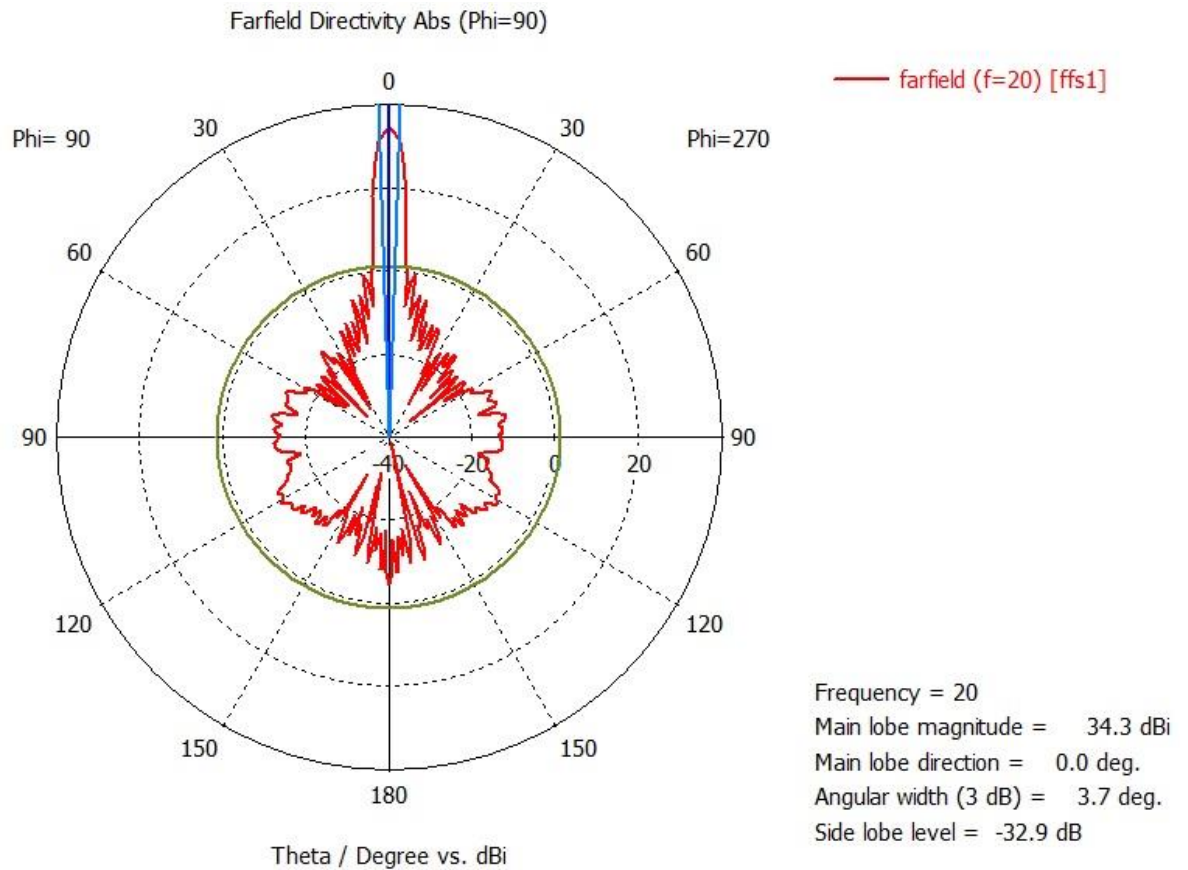


Figura 4. 3 Patrón de radiación de la antena parabólica.

Se puede notar que la ganancia de la antena parabólica llega a los 34.3 dBi, valor que se asemeja a las ganancias que utilizan las antenas de las mega constelaciones, contando también con un ancho de haz de 3.7 grados, valor que se aproxima a datos de antenas comerciales [3]–[6]. Se debe considerar que cada sistema satelital implementará diferentes tecnologías en sus antenas, pero se espera que en todos los sistemas se cuente en sus estaciones terrenas con antenas de una ganancia y directividad similar a la propuesta en este trabajo, por lo que se decidió utilizar esta antena para hacer el estudio de la

compatibilidad electromagnética, tema principal de este capítulo y que se presentarán en apartados posteriores. En la Figura 4.4 se muestra la representación del patrón de radiación en 3D con la estructura de la antena parabólica.

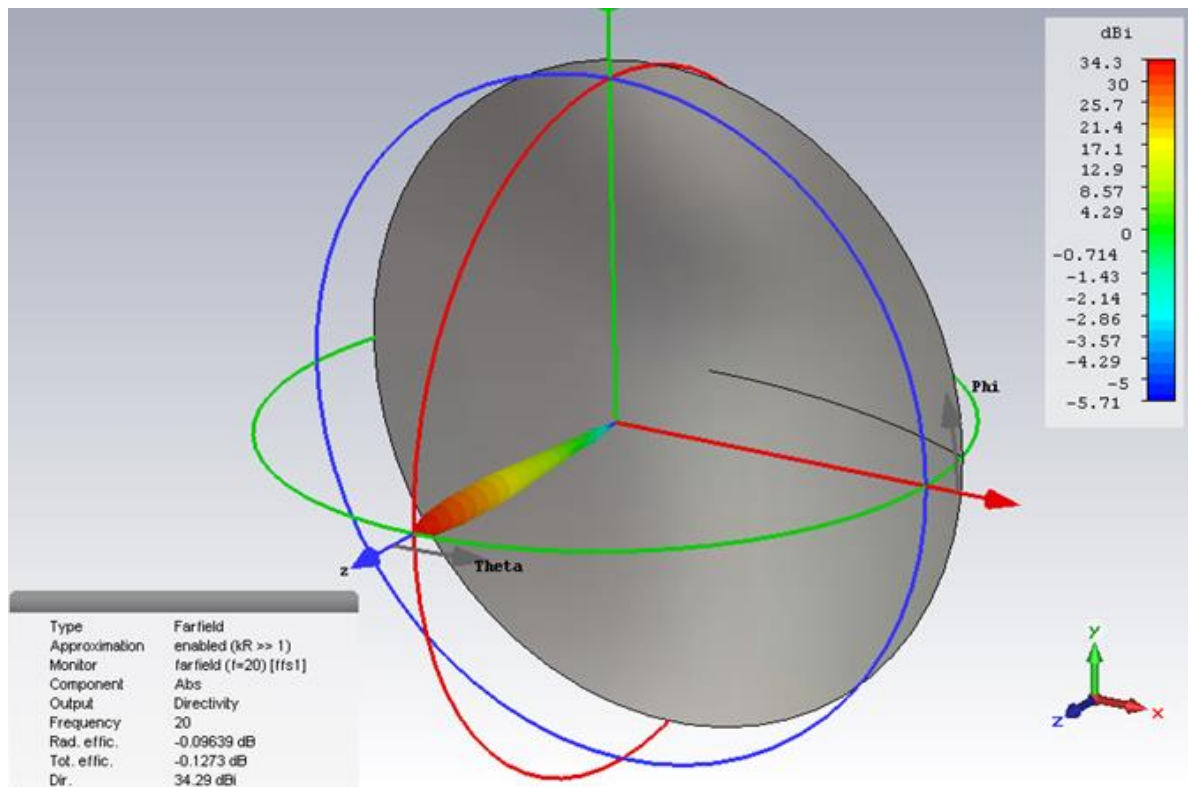


Figura 4. 4 Representación de la antena parabólica con su patrón de radiación.

4.2.2 Análisis de interferencias para Starlink

4.2.2.1 Starlink vs Kuiper

Para comenzar el análisis de las posibles condiciones de falta de compatibilidad electromagnética que tendría la mega constelación satelital Kuiper, de Amazon, se llevó a cabo la determinación de cuántos satélites del sistema Kuiper serían

visibles desde una estación terrena de Starlink con ayuda de la simulación de las constelaciones.

Se estableció que la ubicación de la estación terrena se encontraría en la Ciudad de México, específicamente en las coordenadas 19°29' Norte, 99°7' Oeste, además, se tomó en cuenta el ángulo mínimo de elevación desde el cual la estación terrena comienza a recibir señales.

Se obtuvieron los resultados plasmados en la Tabla 4.2 sobre la cantidad de satélites pertenecientes a la constelación Kuiper que serán captados por la estación terrena de Starlink.

Máximo	Media	Mínimo
28	24	19

Tabla 4. 2 Satélites de Kuiper en línea de vista de una estación terrena de Starlink.

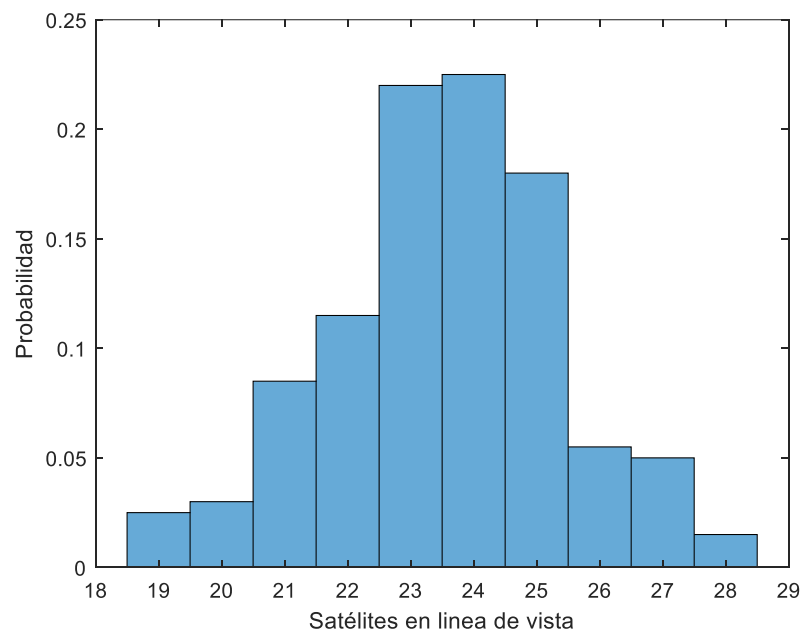


Figura 4. 5 Distribución de satélites de Kuiper en línea de vista para una estación terrena de Starlink.

Este resultado consistió en la toma de 200 muestras, lo que representa un tiempo correspondiente a 200 minutos de la constelación Kuiper orbitando la Tierra.

Luego, al tener esos datos obtenidos por la simulación de la constelación, se desarrolló un programa en Matlab, el cual permite calcular la densidad de flujo de potencia equivalente que representaría la potencial condición de interferencia en la recepción de una estación terrena de otro sistema satelital, en este caso la interferencia recibida por una estación terrena de Starlink, utilizando para ello la fórmula (2.30). Este programa se puede encontrar en el Apéndice A.

Dado que dicha fórmula no considera un cambio en la cantidad de transmisores interferentes, se decidió incrementar el número de muestras en diferentes intervalos de tiempo para mitigar esta limitación. En el estudio por computadora se tomaron 2000 muestras, donde cada una de ellas corresponde a un instante de tiempo en el que la estación terrena ve una determinada cantidad de transmisores interferentes, pues al ser constelaciones de órbita baja, la cantidad de satélites en línea de vista por las estaciones terrenas cambia constantemente. En cada una de esas muestras el programa genera una cantidad de satélites de manera aleatoria, que cumpliera con la distribución que se pudo observar en la simulación de las constelaciones, luego de esto, a cada una de estas representaciones de los satélites se les asigna una posición, con la cual, el programa podía interpretar la distancia a la que se encontrarían de la estación terrena así como su elevación, y a su vez establecer la ganancia de la antena receptora en esa dirección, para lo cual se utilizaron los resultados de la antena propuesta en la sección 4.2.1.

Los resultados de este análisis de interferencia se presentan en la Tabla 4.3, donde se muestran los niveles máximos, mínimos y promedio recibidos por la

estación terrena. En la Figura 4.6 se ilustra de manera grafica los niveles de densidad de flujo de potencia recibidos por la estación terrena planteada en el intervalo de las 2000 muestras. De la tabla 4.3 se encuentra que el intervalo de variación del epfd tiene -155.36 y -180.55 dB(W/m²).

epfd máxima	epfd media	epfd mínima
-155.36 dB(W/m ²)	-163.35 dB(W/m ²)	-180.55 dB(W/m ²)

Tabla 4. 3 epfd recibida por una estación terrena de Starlink debida a interferentes de Kuiper.

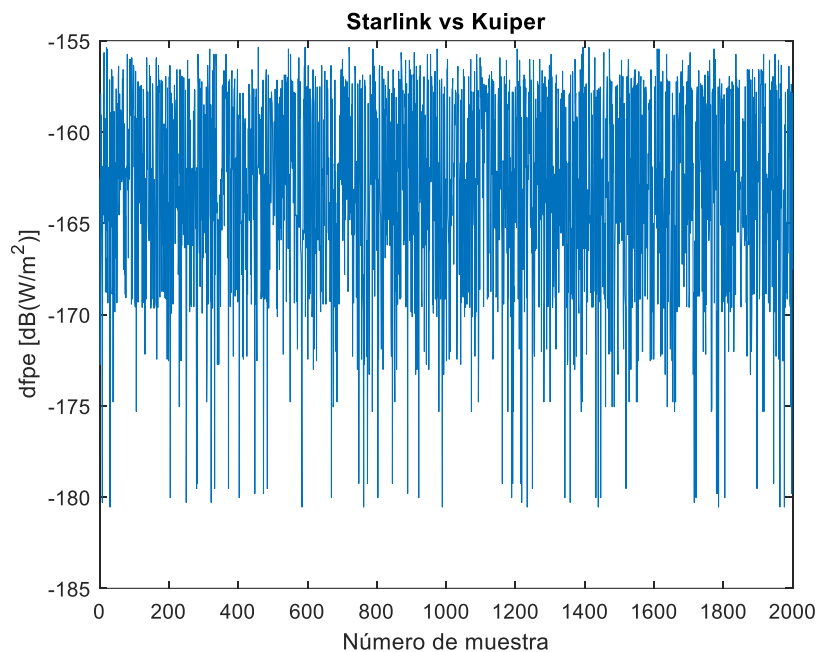


Figura 4. 6 epfd recibida por una estación terrena de Starlink debida a interferentes de Kuiper.

4.2.2.2 Starlink vs OneWeb

Comenzando con el análisis de las posibles condiciones de interferencia que se presentarían en el sistema Starlink debido a la operación simultánea de la mega constelación de OneWeb, primero se determinó el número de satélites de dicha

constelación que estarían en línea de vista para una estación terrena de Starlink situada en la Ciudad de México con coordenadas 19°29' Norte, 99°7' Oeste.

Para este estudio se tomaron en cuenta los ángulos mínimos de elevación de las estaciones de Starlink, tomando una muestra por minuto en un periodo de 200 minutos. Se obtuvieron los resultados plasmados en la Tabla 4.4. Mientras que en la Figura 4.7 se muestra la gráfica de la probabilidad de que un satélite de OneWeb esté en línea de vista de una estación terrena de Starlink.

Máximo	Media	Mínimo
27	23	22

Tabla 4. 4 Satélites de OneWeb en línea de vista de una estación terrena de Starlink.

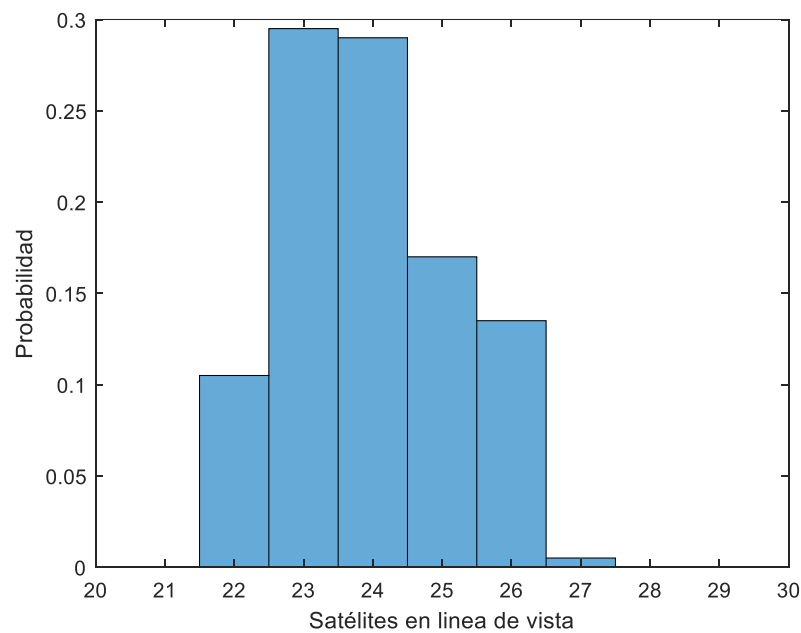


Figura 4. 7 Satélites de OneWeb en línea de vista de una estación terrena de Starlink.

De forma similar al apartado anterior, para el análisis de la *epfd* recibida por la estación terrena propuesta, se utilizó el programa ya mencionado, modificando

únicamente los parámetros correspondientes a la cantidad de satélites en línea de vista por la estación terrena, así como las ganancias y potencias de transmisión de las antenas transmisoras interferentes.

En este caso los resultados obtenidos de la *epfd* recibida por una estación terrena de Starlink debida a las transmisiones potencialmente interferentes de OneWeb se muestran en la Tabla 4.5 así como en la Figura 4.8. En este caso la *epfd* tiene como límites $-168.37 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ y $-192.37 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$. Aquí es importante notar que también se tomaron 2000 muestras debido a que el número de satélites que ve la estación terrena bajo estudio cambia con el tiempo.

epfd máxima	epfd media	epfd mínima
$-168.37 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$	$-175.96 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$	$-192.37 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$

Tabla 4. 5 EPFD recibida por una estación terrena de Starlink debida a interferentes de OneWeb.

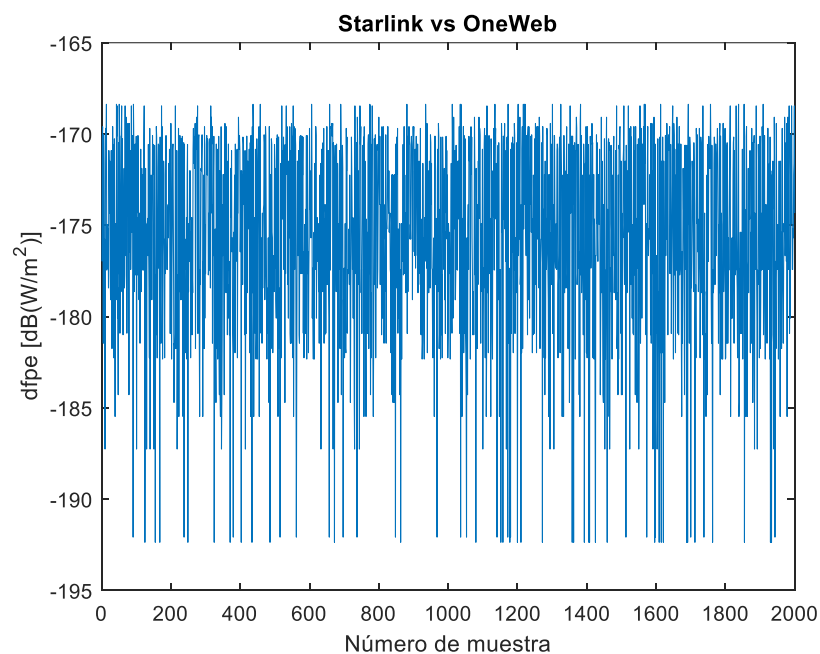


Figura 4. 8 EPFD recibida por una estación terrena de Starlink debida a interferentes de OneWeb.

4.2.2.3 Starlink vs Telesat

Para analizar la potencial condición de interferencia que se presentarían en el sistema Starlink debido a la operación simultánea de la mega constelación de Telesat.

Se tomó como caso de estudio una estación terrena situada en Ciudad de México, situada en las coordenadas 19°29' Norte, 99°7' Oeste. Primero, con ayuda del programa SaVi se determinó la cantidad de satélites de Telesat que se encontrarían en línea de vista para la estación terrena.

Para este estudio se tomaron en cuenta los ángulos mínimos de elevación de la estación terrena, se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 4.6, los que corresponden a 200 muestras en lo que equivale a un periodo de observación de 200 minutos. La Figura 4.9 ilustra la distribución de probabilidad de tener en línea de vista cierta cantidad de satélites del sistema de Telesat para una estación terrena de Starlink.

Máximo	Moda	Mínimo
7	5	3

Tabla 4. 6 Satélites de Telesat en línea de vista de una estación terrena de Starlink.

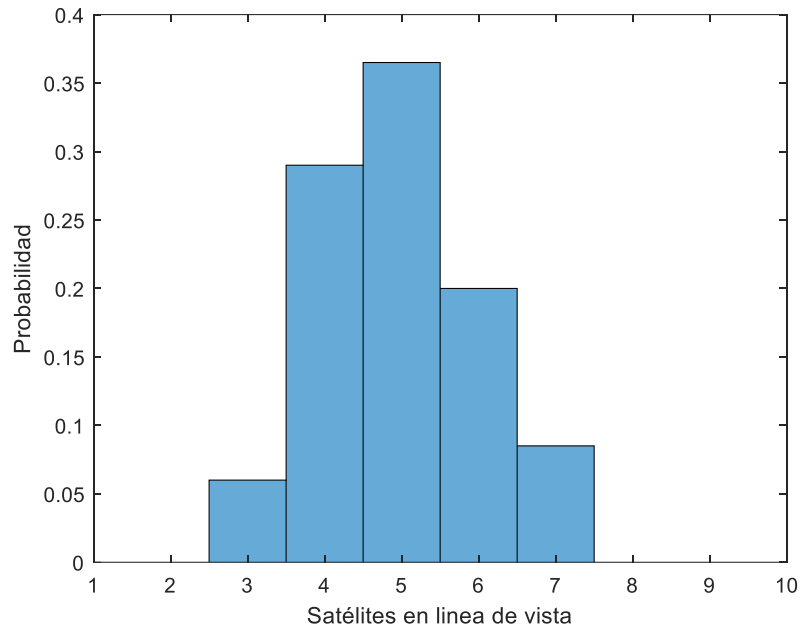


Figura 4. 9 Satélites de Telesat en línea de vista de una estación terrena de Starlink.

Los resultados obtenidos con ayuda del programa para la *epfd* recibida por una estación terrena de Starlink debida a los satélites de la constelación de Telesat se presentan a continuación en la Tabla 4.7 y en la Figura 4.10. Para estos resultados se consideró para los transmisores potencialmente interferentes una potencia de 2.14 Watts y una ganancia de la antena transmisora de 27.3 dBi.

epfd máxima	epfd media	epfd mínima
-159.37 dB(W/m ²)	-167.88 dB(W/m ²)	-185.57 dB(W/m ²)

Tabla 4. 7 EPFD recibida por una estación terrena de Starlink debida a interferentes de Telesat.

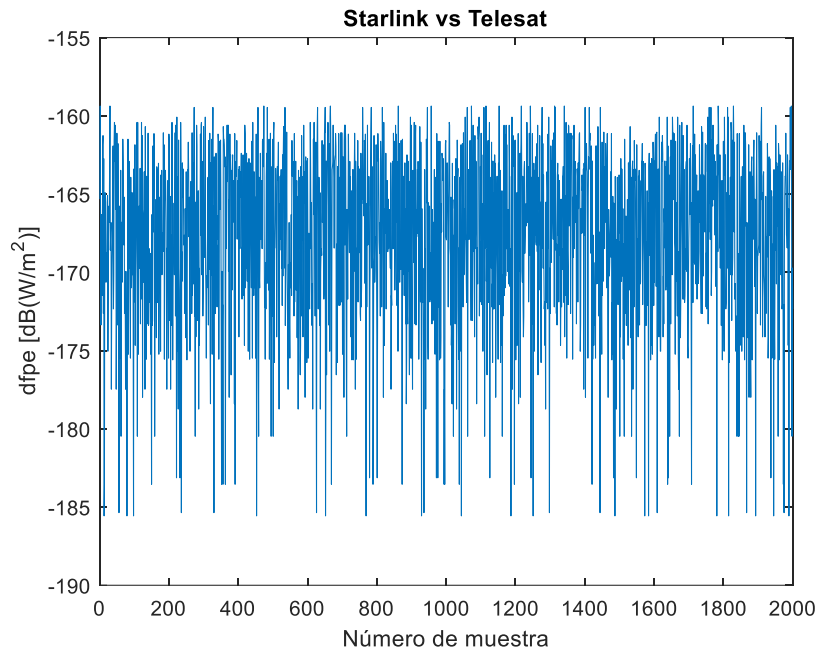


Figura 4. 10 EPFD recibida por una estación terrena de Starlink debida a interferentes de Telesat.

De la tabla 4.7 y Figura 4.10 se encuentra que con niveles de potencia y ganancias de la antena transmisora típicos para el sistema masivo de LEO's se obtiene que la epfd se encuentra entre los límites de $-159.37 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ y $-185.57 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$.

4.2.3 Análisis de interferencias para OneWeb

4.2.3.1 OneWeb vs Kuiper

Para analizar los efectos que podría producir la constelación Kuiper, de Amazon, en una estación terrena de OneWeb, primero, se determinó, con ayuda del programa SaVi, el número de satélites que serían visibles para una estación terrena en Ciudad de México, situada en las coordenadas $19^{\circ}29'$ Norte, $99^{\circ}7'$ Oeste. Los resultados de dicha simulación se muestran en la Tabla 4.8. En la Figura 4.11 se presenta la distribución de probabilidad del número de satélites en línea de vista para dicha estación terrena.

Máximo	Moda	Mínimo
6	3	1

Tabla 4. 8 Satélites de Kuiper en línea de vista de una estación terrena de OneWeb.

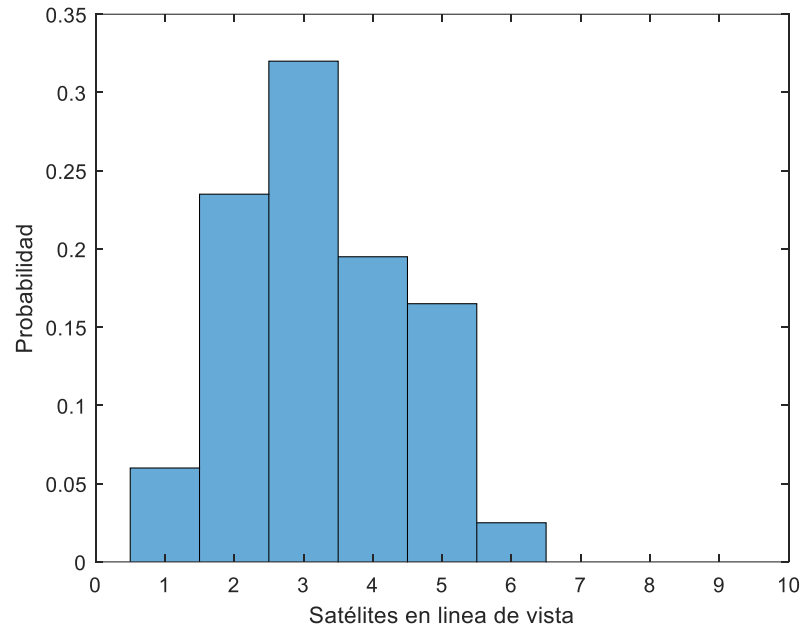


Figura 4. 11 Satélites de Kuiper en línea de vista de una estación terrena de OneWeb.

Para obtener estos datos se simuló un periodo de tiempo de 200 minutos, donde las constelaciones se encontraban orbitando, tomando una muestra por minuto. Utilizando el algoritmo diseñado para calcular la *epfd* recibida por la estación terrena perteneciente a OneWeb debida a la constelación satelital Kuiper, se obtuvieron los resultados plasmados en la Tabla 4.9 y en la Figura 4.12. Para esto se consideró que los transmisores interferentes contarían con una potencia de 1.44 Watts y una ganancia de 34.4 dBi.

epfd máxima	epfd media	epfd mínima
-155.36 dB(W/m ²)	-159.68 dB(W/m ²)	-169.93 dB(W/m ²)

Tabla 4. 9 EPFD recibida por una estación terrena de OneWeb debida a interferentes de Kuiper.

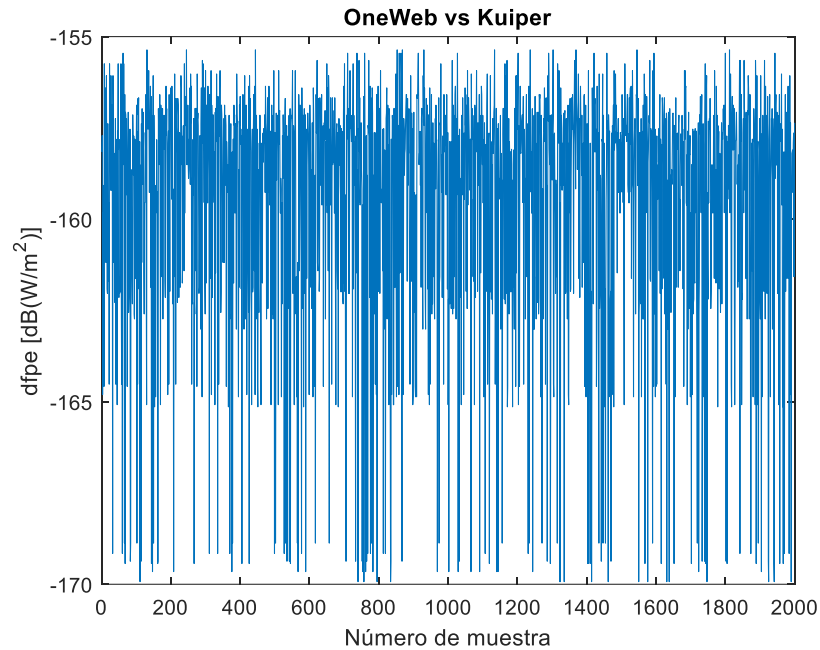


Figura 4. 12 EPFD recibida por una estación terrena de OneWeb debida a interferentes de Kuiper.

4.2.3.2 OneWeb vs Starlink

En esta sección se realizó la simulación de la cantidad de satélites de la mega constelación Starlink, de SpaceX, que serán visibles para una estación terrena de OneWeb situada en Ciudad de México, en las coordenadas 19°29' Norte, 99°7' Oeste. Esto con el objetivo de poder analizar posteriormente los efectos adversos en cuanto interferencias que se podrían producir debido a los satélites ajenos al sistema que pudieran ser captados por la estación terrena. Los resultados se muestran en la Tabla 4.10 y en la Figura 4.13.

Máximo	Moda	Mínimo
2	1	0

Tabla 4. 10 Satélites de Starlink en línea de vista de una estación terrena de OneWeb.

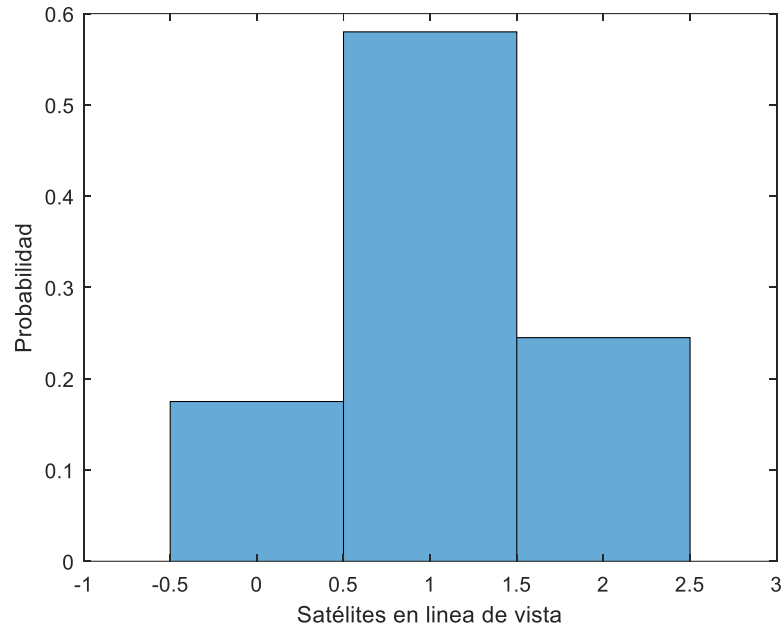


Figura 4. 13 Satélites de Starlink en línea de vista de una estación terrena de OneWeb.

Estos resultados se obtuvieron después de simular un periodo de 200 minutos de la constelación, tomando una muestra por minuto.

Simulando los niveles de interferencia que se recibirían en la estación terrena de OneWeb debidos a los satélites de la constelación de Starlink se obtuvieron los resultados de la Tabla 4.11 y de la Figura 4.14. Se utilizaron valores para los transmisores interferentes de 0.7 Watts de potencia de transmisión y 41 dBi de ganancia.

epfd máxima	epfd media	epfd mínima
-157.12 dB(W/m ²)	-161.09dB(W/m ²)	-171.14 dB(W/m ²)

Tabla 4. 11 EPFD recibida por una estación terrena de OneWeb debido a interferentes de Starlink.

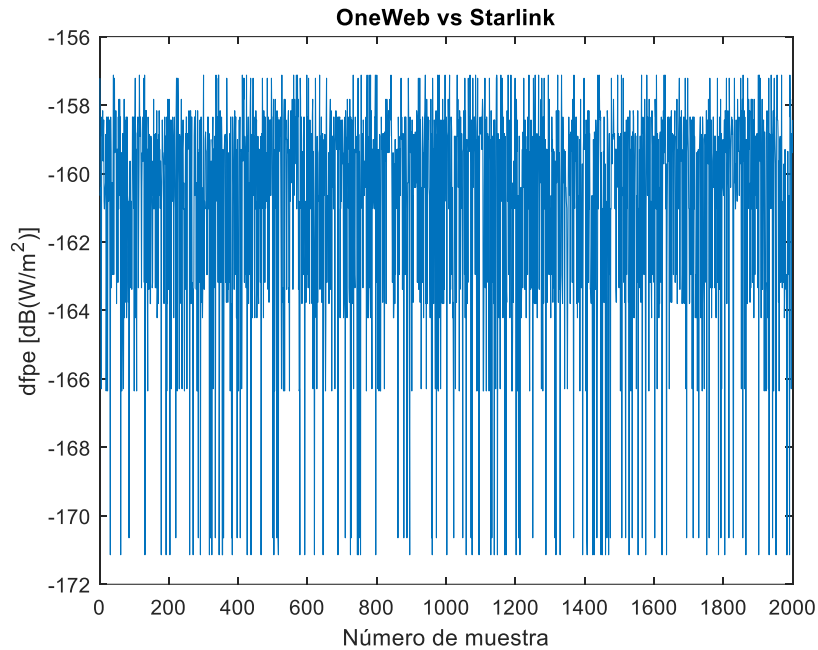


Figura 4. 14 EPFD recibida por una estación terrena de OneWeb debido a interferentes de Starlink.

4.2.3.3 OneWeb vs Telesat

Para analizar los efectos adversos que se podrían producir debido a los satélites de la mega constelación de Telesat, vistos por una estación terrena de OneWeb situada en Ciudad de México, se realizó la simulación de las constelaciones, tomando en cuenta un periodo de 200 minutos, para visualizar la cantidad de satélites ajenos al sistema que se encontrarían en línea de vista. Los resultados se muestran en la Tabla 4.12 y en la Figura 4.15.

Máximo	Promedio	Mínimo
3	0.83	0

Tabla 4. 12 Satélites de Telesat en línea de vista de una estación terrena de OneWeb.

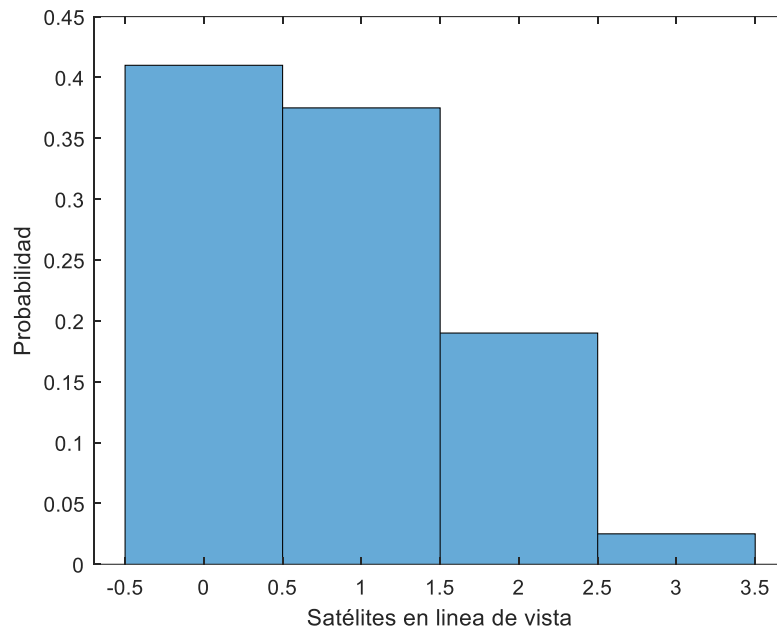


Figura 4. 15 Satélites de Telesat en línea de vista de una estación terrena de OneWeb.

Esta es la cantidad mínima de satélites ajenos a un sistema captados por una estación terrena, lo que se debe en gran medida al ángulo de elevación mínimo requerido por las estaciones terrenas del sistema satelital de OneWeb, además de la cantidad de satélites que se desplegarán por parte de Telesat.

Utilizando el programa para calcular los niveles de interferencia recibidos por la estación terrena propuesta para este sistema debidos a las transmisiones por parte de la constelación de Telesat se obtuvieron los resultados de la Tabla 4.13 y la Figura 4.16 a continuación. Estos resultados reflejan los niveles de *epfd* recibidas tomando en cuenta una potencia de 2.13 W y una ganancia de 27.3 dBi de los transmisores satelitales de Telesat.

epfd máxima	epfd media	epfd mínima
-159.37 dB(W/m ²)	-164.46 dB(W/m ²)	-175.55 dB(W/m ²)

Tabla 4. 13 EPFD recibida por una estación terrena de OneWeb debida a interferentes de Telesat.

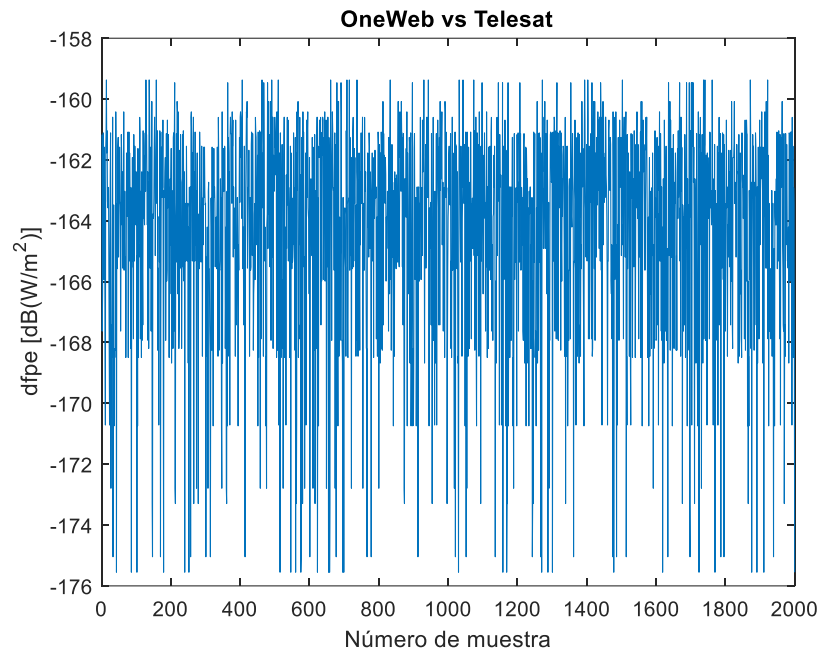


Figura 4. 16 EPFD recibida por una estación terrena de OneWeb debida a interferentes de Telesat.

4.2.4 Análisis de interferencias para Telesat

4.2.4.1 Telesat vs Kuiper

Para analizar los efectos que pudiera producir la mega constelación Kuiper de Amazon, en la mega constelación de Telesat, se realizó la simulación de la cantidad de satélites del sistema Kuiper que se encontrarían en línea de vista para una estación terrena del sistema Telesat ubicada en la Ciudad de México, en las coordenadas 19°29' Norte, 99°7' Oeste. En la Tabla 4.14 se muestran los

resultados. La Figura 4.17 ilustra la cantidad de satélites interferentes en línea de vista para este sistema.

Máximo	Moda	Mínimo
38	34	29

Tabla 4. 14 Satélites de Kuiper en línea de vista de una estación terrena de Telesat.

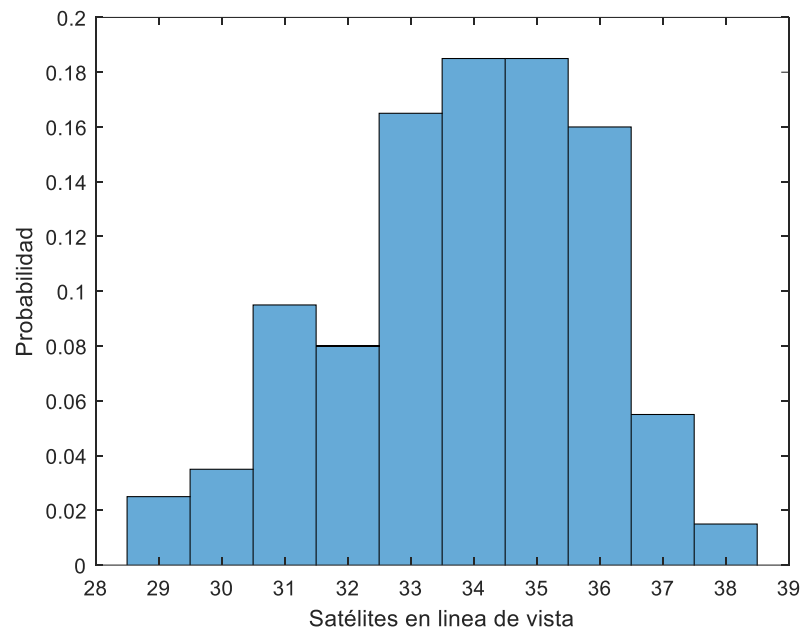


Figura 4. 17 Satélites de Kuiper en línea de vista de una estación terrena de Telesat.

Para esta simulación se tomó en cuenta un tiempo de 200 minutos, tomando una muestra de los satélites interferentes en línea de vista cada minuto.

Continuando con el análisis de la *epfd* interferente recibida por la estación terrena propuesta perteneciente al sistema de Telesat debida a las transmisiones de la constelación satelital Kuiper se obtuvieron los resultados plasmados en la Tabla 4.15, así mismo se pueden apreciar estos resultados en la Figura 4.18.

Para los transmisores interferentes se consideró una potencia de 1.44 W y una ganancia de 34.4 dBi.

epfd máxima	epfd media	epfd mínima
-155.36 dB(W/m ²)	-163.71 dB(W/m ²)	-180.55 dB(W/m ²)

Tabla 4. 15 EPFD recibida por una estación terrena de Telesat debida a interferentes de Kuiper.

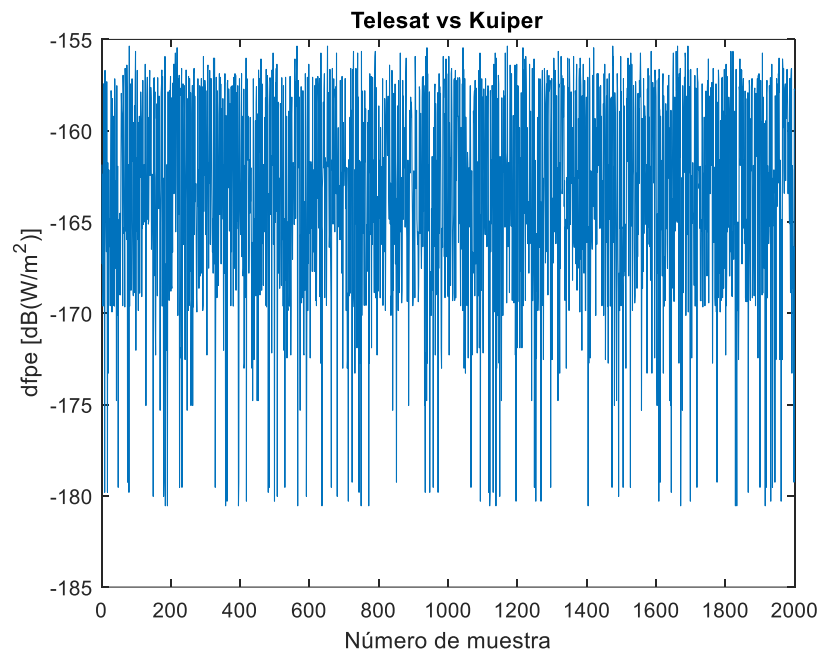


Figura 4. 18 EPFD recibida por una estación terrena de Telesat debida a interferentes de Kuiper.

4.2.4.2 Telesat vs OneWeb

Comenzando con el análisis de los posibles efectos adversos que se pudieran provocar en el sistema de Telesat, se realizó la simulación de la cantidad de satélites pertenecientes a la mega constelación de OneWeb que serían visibles para una estación terrena situada en las coordenadas 19°29' Norte, 99°7' Oeste, en Ciudad de México. Para esto se tomó en cuenta los ángulos mínimos de elevación de las estaciones terrenas de Telesat, además de simular un periodo

de tiempo de 200 minutos, donde se tomaron muestras cada minuto de la simulación. Se muestran los resultados en la Tabla 4.16 y en la Figura 4.19.

Máximo	Moda	Mínimo
35	33	30

Tabla 4. 16 Satélites de OneWeb en línea de vista de una estación terrena de Telesat.

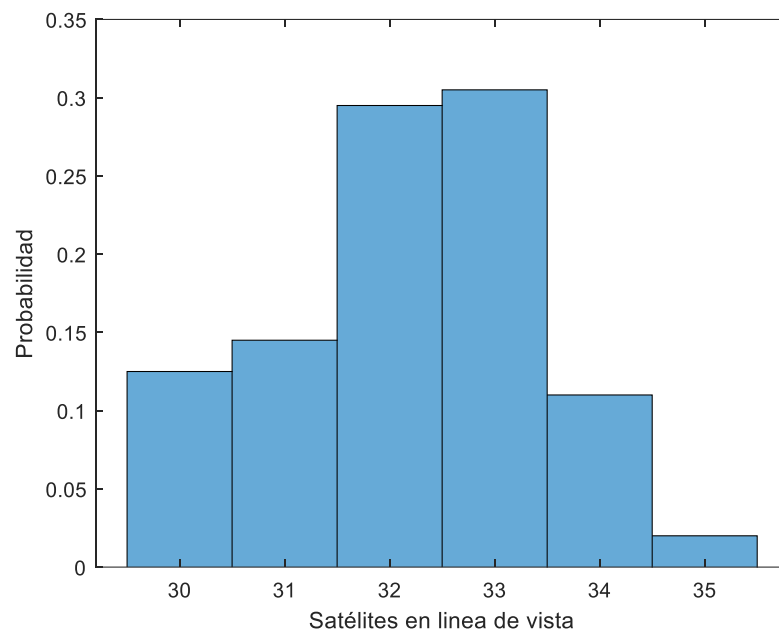


Figura 4. 19 Satélites de OneWeb en línea de vista de una estación terrena de Telesat.

Para este análisis de interferencias se consideró una potencia de 0.31 W y una ganancia de 33 dBi para los transmisores de la constelación de OneWeb. Los resultados de los niveles de *epfd* se pueden observar en la Tabla 4.17 y la Figura 4.20 a continuación.

epfd máxima	epfd media	epfd mínima
-168.37 dB(W/m ²)	-175.90 dB(W/m ²)	-192.37 dB(W/m ²)

Tabla 4. 17 EPFD recibida por una estación terrena de Telesat debida a interferentes de OneWeb.

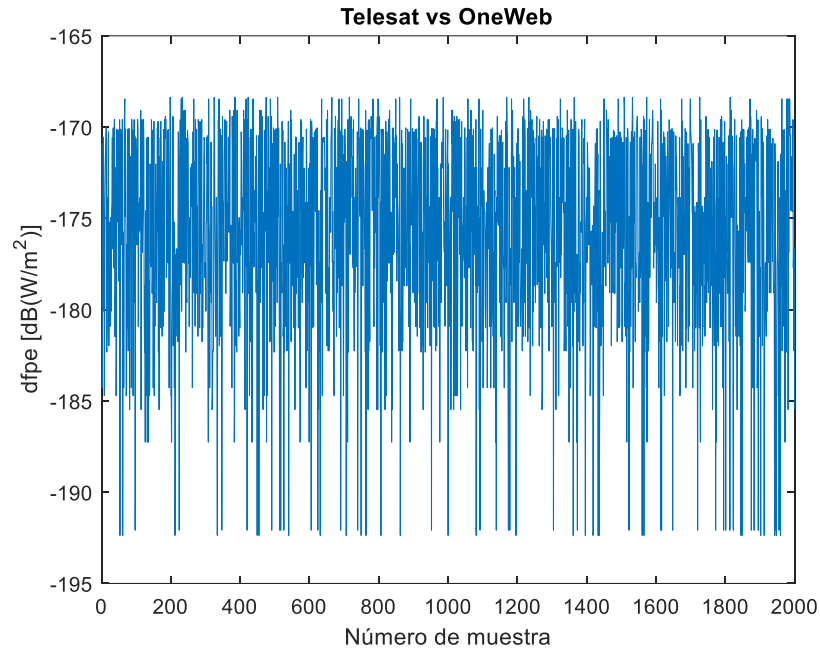


Figura 4. 20 EPFD recibida por una estación terrena de Telesat debida a interferentes de OneWeb.

4.2.4.3 Telesat vs Starlink

Para analizar los posibles efectos de interferencia que sufriría la constelación de Telesat debido a los satélites de Starlink, se realizó la simulación de la cantidad de satélites de Starlink que estarían en línea de vista para una estación terrena de Telesat situada en Ciudad de México, en un periodo de tiempo de 200 minutos. En la Tabla 4.18 se presentan los resultados obtenidos y en la Figura 4.21 se muestra la distribución de probabilidad de los resultados.

Máximo	Moda	Mínimo
13	12	8

Tabla 4. 18 Satélites de Starlink en línea de vista de una estación terrena de Telesat.

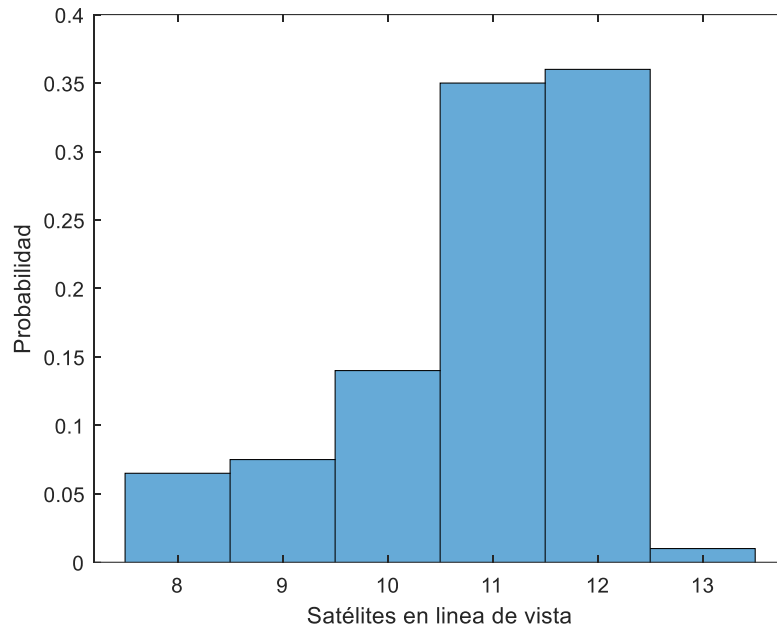


Figura 4. 21 Satélites de Starlink en línea de vista de una estación terrena de Telesat.

Utilizando el programa para calcular los niveles de *epfd* recibidas por la estación terrena de Telesat debido a las transmisiones de la constelación de Starlink se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 4.19 y la Figura 4.22 a continuación. Se tomó en cuenta una potencia de transmisión de los satélites de Starlink de 0.7 Watts con una ganancia de 41 dBi.

epfd máxima	epfd media	epfd mínima
-152.29 dB(W/m ²)	-160.18 dB(W/m ²)	-177.01 dB(W/m ²)

Tabla 4. 19 EPFD recibida por una estación terrena de Telesat debida a interferentes de Starlink.

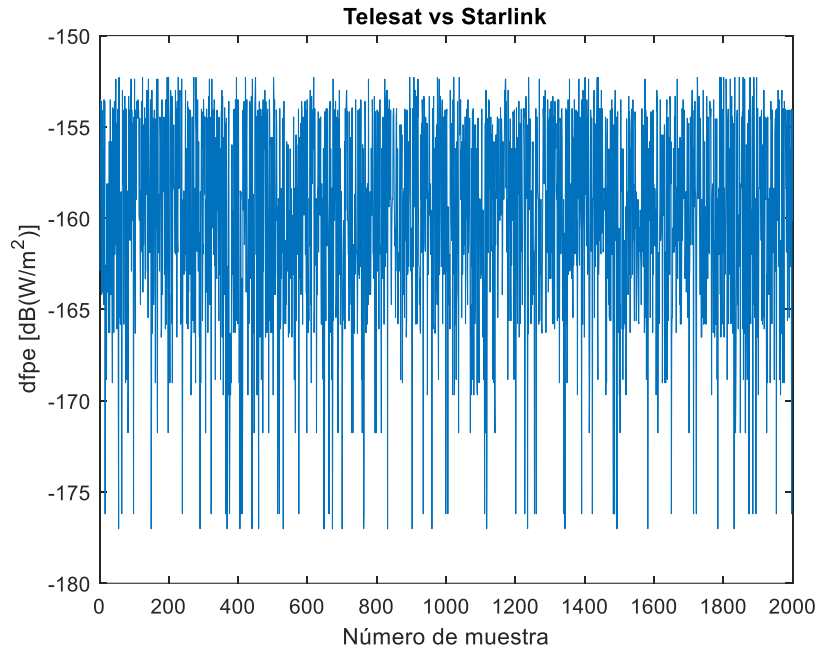


Figura 4. 22 EPFD recibida por una estación terrena de Telesat debida a interferentes de Starlink.

4.2.5 Análisis de interferencias para Kuiper

4.2.5.1 Kuiper vs OneWeb

Comenzando con el análisis de interferencias ocasionadas por los satélites de OneWeb en una estación terrena del sistema Kuiper, se realizó una simulación donde se contempló un periodo de tiempo de 200 minutos, en el cual se observó cada minuto la cantidad de satélites ajenos al sistema que se encontraban en línea de vista de una estación terrena situada en Ciudad de México. Los resultados de esta simulación se muestran en la Tabla 4.20 y en la Figura 4.23.

Máximo	Moda	Mínimo
16	14	12

Tabla 4. 20 Satélites de OneWeb en línea de vista de una estación terrena de Kuiper.

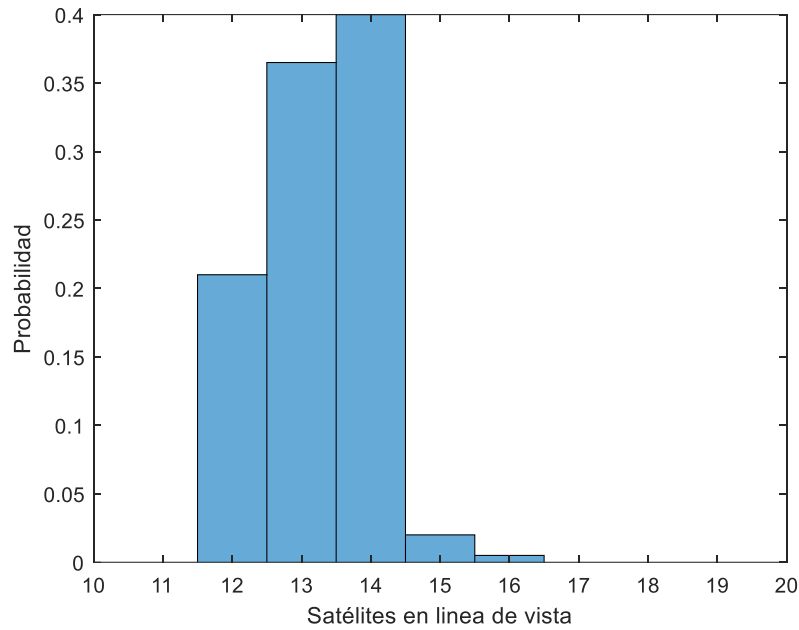


Figura 4. 23 Satélites de OneWeb en línea de vista de una estación terrena de Kuiper.

Analizando los niveles de *epfd* que representan las transmisiones interferentes provocadas por la constelación OneWeb en la estación terrena propuesta para el sistema Kuiper se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 4.21 y la Figura 4.24. Se consideró una potencia de 0.31 W y una ganancia de 33 dBi para los transmisores pertenecientes a OneWeb.

epfd máxima	epfd media	epfd mínima
-168.37 dB(W/m ²)	-174.90 dB(W/m ²)	-192.08 dB(W/m ²)

Tabla 4. 21 EPFD recibida por una estación terrena de Kuiper debida a interferentes de OneWeb.

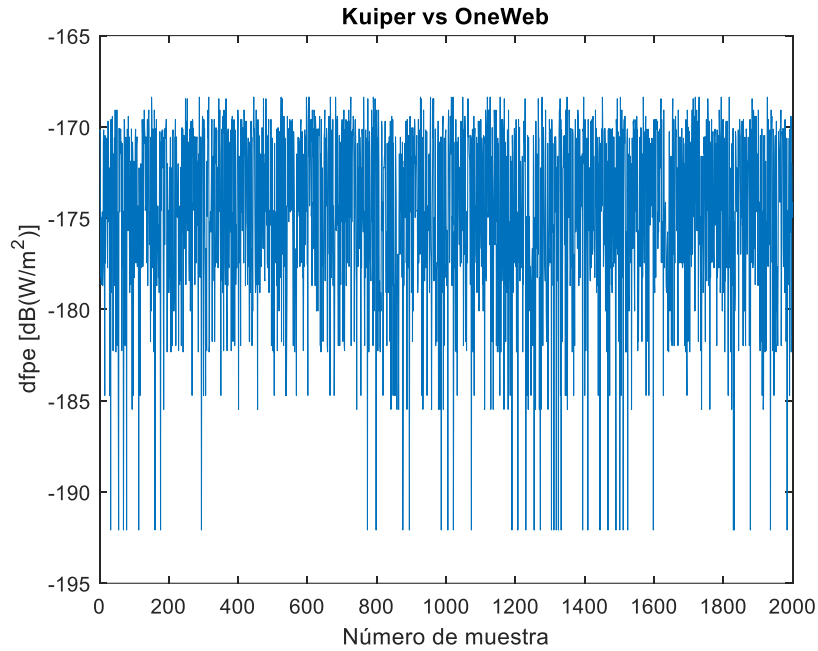


Figura 4. 24 EPFD recibida por una estación terrena de Kuiper debida a interferentes de OneWeb.

4.2.5.2 Kuiper vs Starlink

Comenzando con el análisis de los posibles efectos de interferencia que pudiera causar la constelación de Starlink en el sistema Kuiper, se llevó a cabo una simulación para poder observar la cantidad de satélites ajenos al sistema que se encontrarían en línea de vista de una estación terrena de Kuiper situada en Ciudad de México. Se consideraron los ángulos mínimos de elevación de la estación terrena, además de un periodo de tiempo de 200 minutos, donde cada minuto se tomaba una muestra. Los resultados se muestran en la Tabla 4.22 y en la Figura 4.25 se puede apreciar su distribución de probabilidad.

Máximo	Moda	Mínimo
6	4	2

Tabla 4. 22 Satélites de Starlink en línea de vista de una estación terrena de Kuiper.

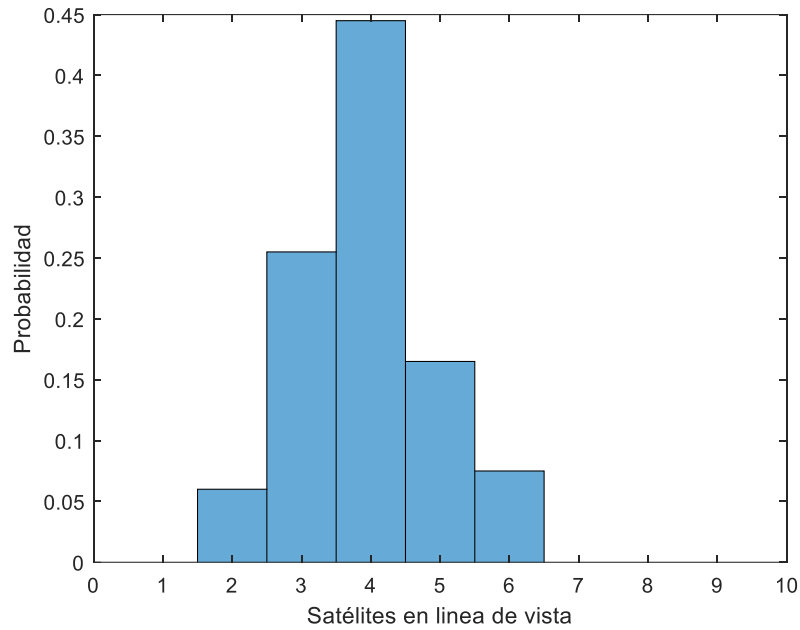


Figura 4. 25 Satélites de Starlink en línea de vista de una estación terrena de Kuiper.

Realizando el análisis de interferencias recibidas por la estación terrena propuesta para Kuiper debidas a los satélites pertenecientes a la constelación de Starlink se obtuvieron los datos de la Tabla 4.23 y la Figura 4.26. Se consideraron una potencia de 0.7 W y una ganancia de 41 dBi para los transmisores interferentes.

epfd máxima	epfd media	epfd mínima
-157.12 dB(W/m ²)	-163.79 dB(W/m ²)	-181.03 dB(W/m ²)

Tabla 4. 23 EPFD recibida por una estación terrena de Kuiper debida a interferentes de Starlink.

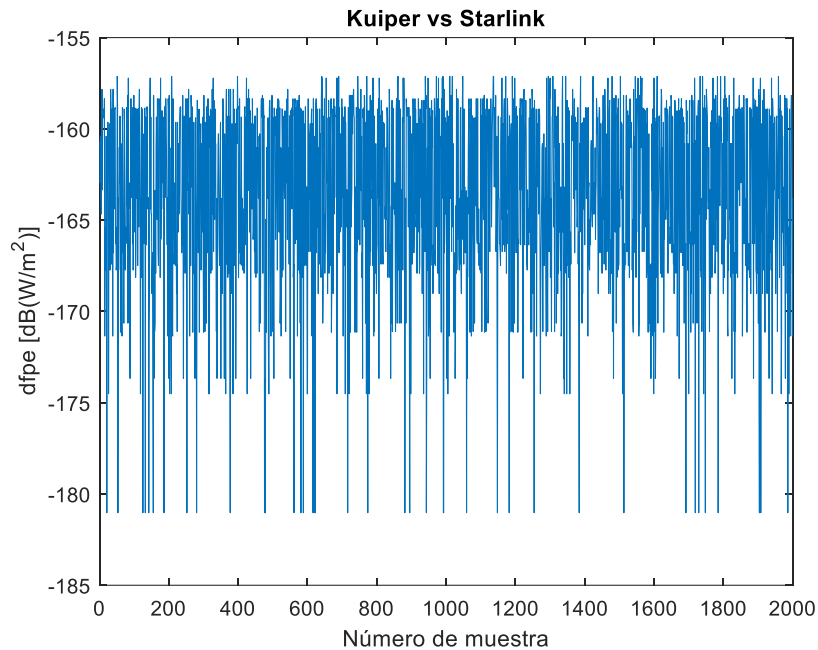


Figura 4. 26 EPFD recibida por una estación terrena de Kuiper debida a interferentes de Starlink.

4.2.5.3 Kuiper vs Telesat

En esta sección se realizó una simulación para poder observar la cantidad de satélites del sistema Telesat que se encontrarían en línea de vista de una estación terrena del sistema Kuiper, con el objetivo de comenzar con el análisis de los posibles efectos de interferencia que se presentarían causados por los satélites ajenos al sistema.

Para la simulación se consideró una estación terrena del sistema Kuiper ubicada en la Ciudad de México, un periodo de tiempo de 200 minutos y los ángulos mínimos de elevación de la estación terrena. Los resultados se muestran en la Tabla 4.24 así como en la Figura 4.27.

Máximo	Moda	Mínimo
5	3	1

Tabla 4. 24 Satélites de Telesat en línea de vista de una estación terrena de Kuiper.

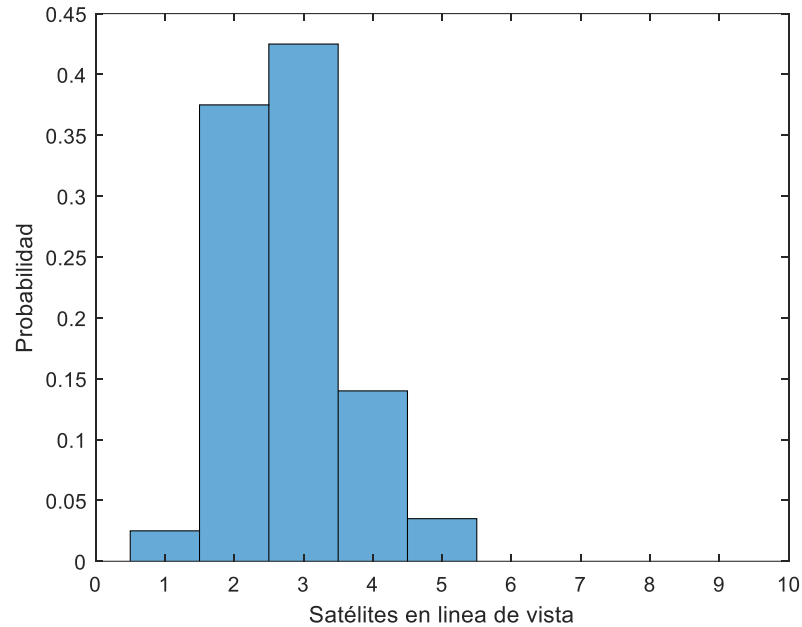


Figura 4. 27 Satélites de Telesat en línea de vista de una estación terrena de Kuiper.

Utilizando el programa para calcular la interferencia recibida por la estación terrena propuesta para el sistema Kuiper debida a la interacción con las estaciones espaciales pertenecientes a Telesat se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 4.25 y en la Figura 4.28 a continuación.

epfd máxima	epfd media	epfd mínima
-161.07 dB(W/m ²)	-168.51 dB(W/m ²)	-187.06 dB(W/m ²)

Tabla 4. 25 EPFD recibida por una estación terrena de Kuiper debida a interferentes de Telesat.

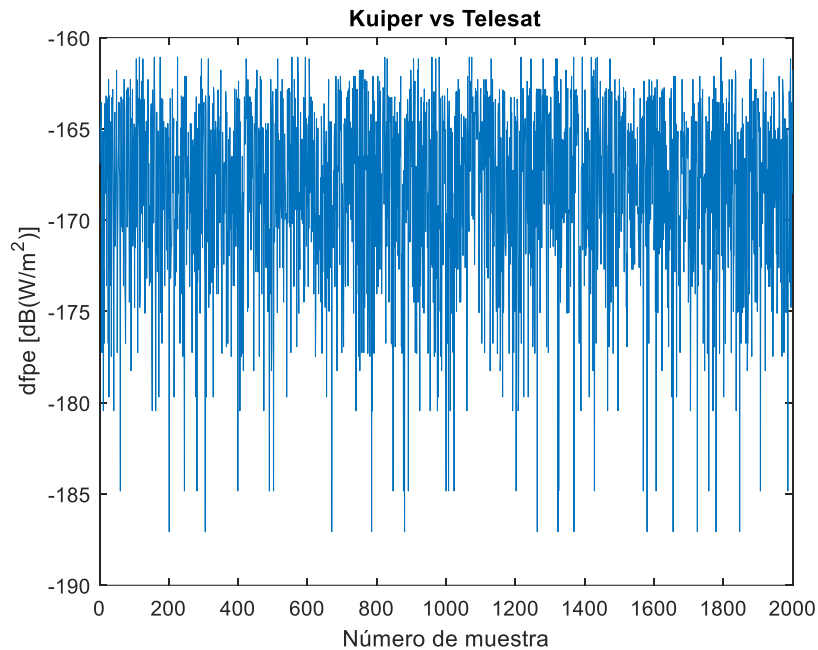


Figura 4. 28 EPFD recibida por una estación terrena de Kuiper debida a interferentes de Telesat.

4.3 Análisis de interferencia entre las mega constelaciones y los radio enlaces terrestres de línea de vista directa.

Las transmisiones de los sistemas satelitales podrían causar interferencia en la recepción de una estación de comunicaciones terrestres debido a la compartición de frecuencias entre ambos sistemas. En esta sección se realizará el análisis de la *epfd* interferente emitida por los enlaces de las mega constelaciones satelitales, que es recibida por los sistemas terrestres de comunicación que utilizan enlaces de línea de vista directa.

Para el presente estudio se puso principal atención en las frecuencias de banda K para realizar dicho análisis, dado que en esta banda es donde mayor compartición de frecuencias se tendrá entre estos sistemas.

De acuerdo con la recomendación ITU-R SF.1483 [7] la máxima cantidad de *epfd* recibida en tierra originada por las transmisiones de sistemas satelitales en órbita baja, se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$-115 - X \left[\text{dB} \left(\frac{W}{\text{m}^2} \right) \right] \quad \text{Para } \theta \leq 5^\circ \quad (4.1)$$

$$-115 - X + \left(\frac{10 + X}{20} \right) (\theta - 5) \left[\text{dB} \left(\frac{W}{\text{m}^2} \right) \right] \quad \text{Para } 5^\circ < \theta \leq 25^\circ \quad (4.2)$$

$$-105 \left[\text{dB} \left(\frac{W}{\text{m}^2} \right) \right] \quad \text{Para } 25^\circ < \theta \leq 90^\circ \quad (4.3)$$

Donde:

θ = Ángulo de llegada por encima del plano horizontal.

X = Función del número de satélites n , en la constelación, calculándose de la siguiente forma:

$$X = 0 \text{ [dB]} \quad \text{Para } n \leq 50 \quad (4.4)$$

$$X = \frac{5}{119} (n - 50) \text{ [dB]} \quad \text{Para } 50 < n \leq 288 \quad (4.5)$$

$$X = \frac{1}{69} (n + 402) \text{ [dB]} \quad \text{Para } n > 288 \quad (4.6)$$

Dado que las mega constelaciones bajo estudio en este trabajo cuentan como mínimo con 298 satélites en sus respectivas constelaciones, se utilizó la expresión (4.6) para calcular el factor correspondiente para cada mega constelación.

En la Figura 4.29 se muestran los resultados obtenidos de los límites máximos de *epfd* que podrían ser captados por enlaces terrestres sin afectar en su operación recomendados por la ITU, para cada mega constelación [7].

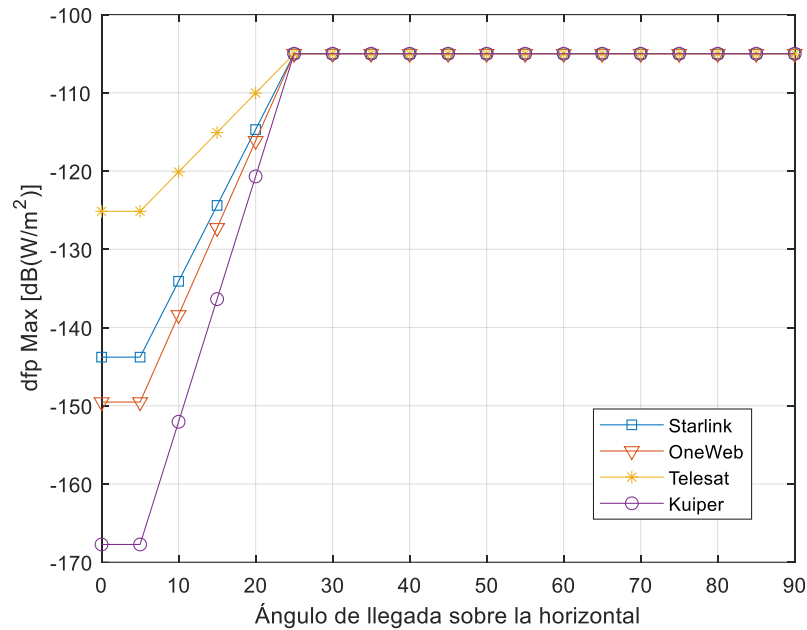


Figura 4. 29 Límites máximos de epfd sugeridos para las mega constelaciones por la ITU-R SF.1483

Como se puede apreciar en la figura anterior, la cantidad máxima de epfd admisible se reduce dependiendo de la cantidad de satélites que se tenga en la constelación. Además, tienen mayor relevancia los ángulos de llegada sobre la horizontal desde los 5° hasta los 25°, pues es donde mayor afectación podrían provocar las señales interferentes en los sistemas de comunicaciones terrestres que utilicen línea de vista directa que compartan frecuencias con las mega constelaciones satelitales.

Con base en estos resultados se realizó un estudio similar al efectuado para analizar la coexistencia entre constelaciones, teniendo en esta ocasión como receptor interferido a uno que formaría parte de un sistema de comunicaciones terrestres.

Por simplicidad, se utilizó el mismo patrón de radiación calculado para una estación terrena utilizado en apartados anteriores, ya que este tipo de antena es

utilizado en los enlaces de microondas terrestres, por lo que se puede emplear para la antena parabólica para el sistema de comunicación terrestre.

Con esta meta, se realizó un estudio por computadora similar a los presentados en apartados anteriores, tomando en cuenta la cantidad de satélites presentes de cada mega constelación en línea de vista para la estación de comunicaciones terrestres. Para este análisis se consideró un intervalo de ángulos de elevación comprendido entre 5° y 25°. En la Tabla 4.26 se muestran el resultado obtenido con respecto al número promedio de satélites que se encontrarían en línea de vista en ese rango de elevaciones para la estación de comunicaciones terrestres.

Mega constelación satelital	Cantidad de satélites promedio en línea de vista
Kuiper	11
OneWeb	7
Starlink	4
Telesat	2

Tabla 4. 26 Satélites en línea de vista de un receptor de comunicaciones terrestres de línea de vista directa.

Después de haber obtenido la cantidad de satélites en línea de vista, se procedió a realizar un estudio por computadora de la suma de epfd, potencialmente interferente, provocada por las mega constelaciones satelitales en la estación de comunicaciones terrestres bajo análisis. Con este fin se simularon un millón de escenarios, generando aleatoriamente una cantidad de satélites interferentes en línea de vista, una distancia entre receptor y transmisor interferente, así como un ángulo de llegada de la señal interferente. Los resultados del estudio se muestran en la Tabla 4.27.

Constelación	epfd máxima dB(W/m ²)	epfd promedio dB(W/m ²)	epfd mínima dB(W/m ²)
Kuiper	-170.18	-171.74	-174.10
OneWeb	-183.1	-184.87	-188.04
Starlink	-180.07	-182.1287	-186.2088
Telesat	-169.98	-171.62	-173.64

Tabla 4. 27 DFPE interferente recibida por una estación de comunicaciones terrestres de línea de vista directa provocada por las mega constelaciones satelitales.

De los resultados anteriores se puede concluir que para este caso de estudio y las condiciones propuestas ninguna de las mega constelaciones analizadas en este trabajo supera la cantidad máxima de *epfd* recomendada por la ITU, dentro del rango de 5° a 25° como en ángulos mayores. En la Figura 4.28 se muestra la distribución de probabilidad de la potencia con la que serían recibidas las señales interferentes en los sistemas terrestres de comunicación de línea de vista directa para cada una de las mega constelaciones analizadas en este trabajo.

En dicha figura se puede apreciar como la interferencia recibida presenta el comportamiento de una distribución normal centrado en diferentes niveles de densidad de flujo de potencia equivalente, pero nunca supera los valores máximos sugeridos por la ITU. Por tal motivo se puede esperar que estas mega constelaciones satelitales de órbita baja puedan coexistir sin mayor inconveniente con las comunicaciones terrestres de línea de vista directa.

Aun así, se debe tener en cuenta que este análisis se realizó para las primeras etapas de los despliegues de dichas constelaciones, por lo que los resultados podrían variar una vez que todas ellas se encuentren en completo

funcionamiento, similarmente, no se consideran los efectos acumulativos causados por otras fuentes potenciales de oscilaciones interferentes, tema que no entra dentro de los objetivos del presente trabajo.

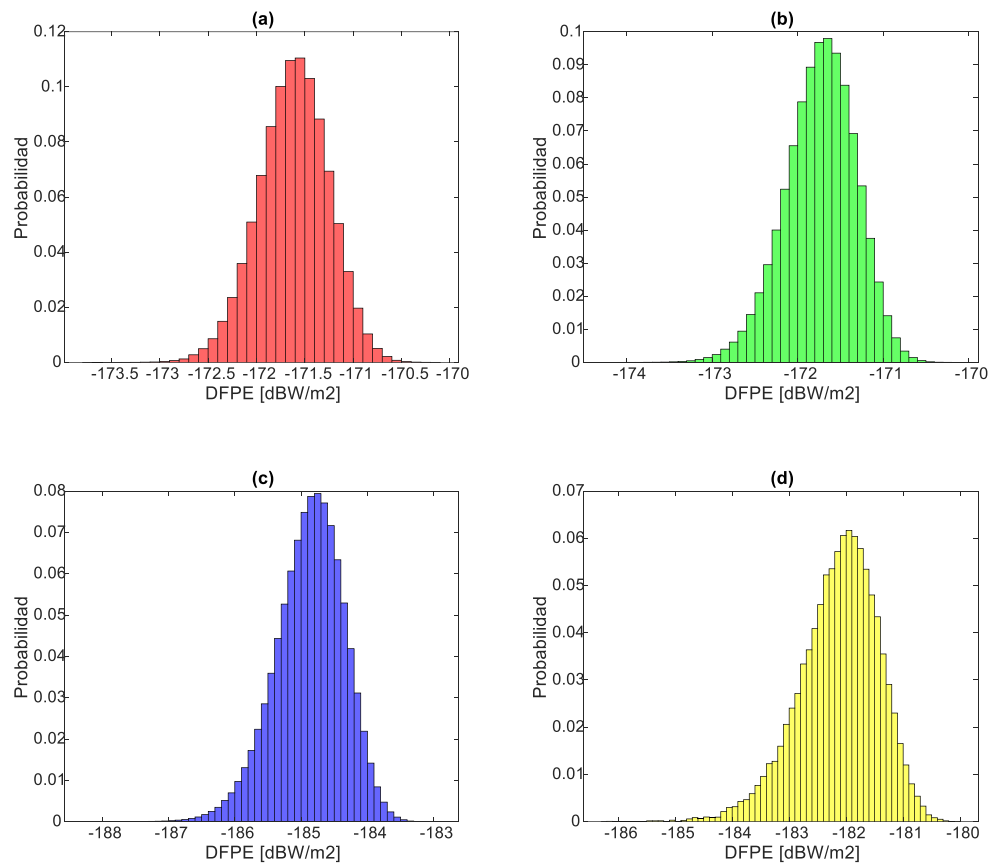


Figura 4. 30 Distribución de probabilidad de recepción de EPFD interferente originada por las mega constelaciones satelitales. (a) Telesat (b) Kuiper (c) OneWeb (d) Starlink

4.4 Conclusiones

Después de haber realizado este análisis se pudo notar que, si bien los resultados obtenidos muestran en ciertos casos que se rebasan los niveles permitidos de interferencias, se debe tener en cuenta también que para esta tesis se supusieron ciertas condiciones de estudio para la obtención de los resultados

reportados en este capítulo. Lo anterior está modulado por el hecho a que las recomendaciones actuales no consideran tal cantidad de satélites en un sistema de comunicaciones. Sin embargo, estos resultados reflejan en gran parte el comportamiento que se puede esperar de esos sistemas de comunicación en cuanto al comportamiento que se apreciará en sus niveles de interferencias.

4.5 Referencias

- [1] “SaVi - Satellite constellation Visualization.” [Online]. Available: <https://savi.sourceforge.io/>. [Accessed: 31-Aug-2020].
- [2] “Antenna Magus | Software de diseño de antenas - SIMULIA de Dassault Systèmes®.” [Online]. Available: <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/antenna-magus/>. [Accessed: 20-Mar-2021].
- [3] “K/Ka band Power Amplifier and Antenna LE-K1330308 17.5-20GHz.” [Online]. Available: <https://www.arralis.com/app/uploads/2020/07/Ka-Band-HPA-Antenna2-brochure.pdf>. [Accessed: 26-Mar-2021].
- [4] “K-band Data Downlink Antennas.” [Online]. Available: https://www.ruag.com/system/files/media_document/2019-09/K-band Data Downlink Antennas_ May 2019.pdf. [Accessed: 26-Mar-2021].
- [5] “ESP2 (60 CM) SERIES Parabolic Antenna.” [Online]. Available: <https://www.radiowaves.com/getmedia/c45fad23-7ba6-45c7-a1bb-2b50dfc1e5d2/ESP-2-Family-Datasheet.pdf.aspx>. [Accessed: 26-Mar-2021].
- [6] “Type 123 Class II / 1.2m KU-Band Offset Antenna.” [Online]. Available: <https://tsat.net/wp-content/uploads/2015/11/1.2m-Type-123-Ku-Offset-RT-Class-II-Spec-2.pdf>. [Accessed: 26-Mar-2021].

- [7] ITU-R, “Obtención de los límites de dfp aplicables a las estaciones espaciales del SFS no OSG en la banda 17 , 7-19 , 3 GHz,” pp. 1–4, 2017.

Capítulo 5: Conclusiones, principales contribuciones y trabajo futuro.

En el primer capítulo de este trabajo de tesis se describieron las principales características de los sistemas satelitales de comunicaciones, además, se abordó de una manera general las ventajas y limitaciones de dichos sistemas, así como de su relevancia como complemento para los sistemas de comunicaciones terrestres en la actualidad.

En el segundo capítulo se presentaron las mega constelaciones satelitales de órbita baja objeto de estudio de este trabajo, se mencionaron las características con las que cuentan dichas constelaciones y se describió de manera general las particularidades presentes en los radioenlaces de las comunicaciones satelitales.

En el tercer capítulo se realizó un estudio por computadora donde se modelaron las cuatro mega constelaciones satelitales para determinar sus áreas de cobertura y se hizo una comparación de sus enlaces. Para esto se utilizó una simulación en SaVi para plasmar las zonas de cobertura y con ayuda de Matlab se realizó un programa que estimó el corrimiento Doppler y pérdidas por propagación para cada una de ellas. Adicionalmente se analizó que efecto tendría la atmosfera en la propagación de los enlaces de estas constelaciones, principalmente en la Ciudad de México.

En el cuarto capítulo se profundizó en el análisis de las posibles interferencias cocanal que sufrirán estas mega constelaciones ocasionadas por la compartición de frecuencias. Para esto se diseñó una antena de características similares a las utilizadas por las mega constelaciones, luego, se estructuró un programa en

Matlab que realiza la estimación de las potencias interferentes recibidas por las estaciones terrenas de estos sistemas.

Con la realización de este trabajo de tesis se consiguió describir de manera satisfactoria cuales son los elementos que conforman las nuevas mega constelaciones satelitales de órbita baja.

Se pudo resaltar que la incorporación de estas en los sistemas actuales de comunicación supondrá una ventana de oportunidad para poder satisfacer la creciente demanda de servicios de comunicación, además de que podrán servir como complemento a la evolución de las comunicaciones móviles celulares como lo es la red 5G.

Adicionalmente, se pudo constatar que la mayoría de estas constelaciones contarán con una cobertura casi global, incluso en sus primeras etapas de operación, por lo que es de esperar que la cobertura de estos sistemas sufra mejoras significativas en el futuro, en sus fases finales de despliegue

Sin embargo, debido a que estas constelaciones serán cada vez más grandes, y al tener otras compañías planes para desplegar constelaciones similares en el futuro, resulta necesario replantear las recomendaciones actuales para que se puedan considerar de una manera más eficaz sus efectos acumulativos en comunicaciones terrestres y espaciales.

Como se pudo notar en diversos apartados de esta tesis, los resultados obtenidos de niveles de potencia interferente recibidos por varias estaciones terrenas en ocasiones rebasaban los límites recomendados por la ITU. Si bien dichos resultados reflejan un posible problema para la coexistencia de estos sistemas de comunicación con los utilizados actualmente, no se puede descartar la posibilidad de que los niveles de interferencia en la realidad sean menores,

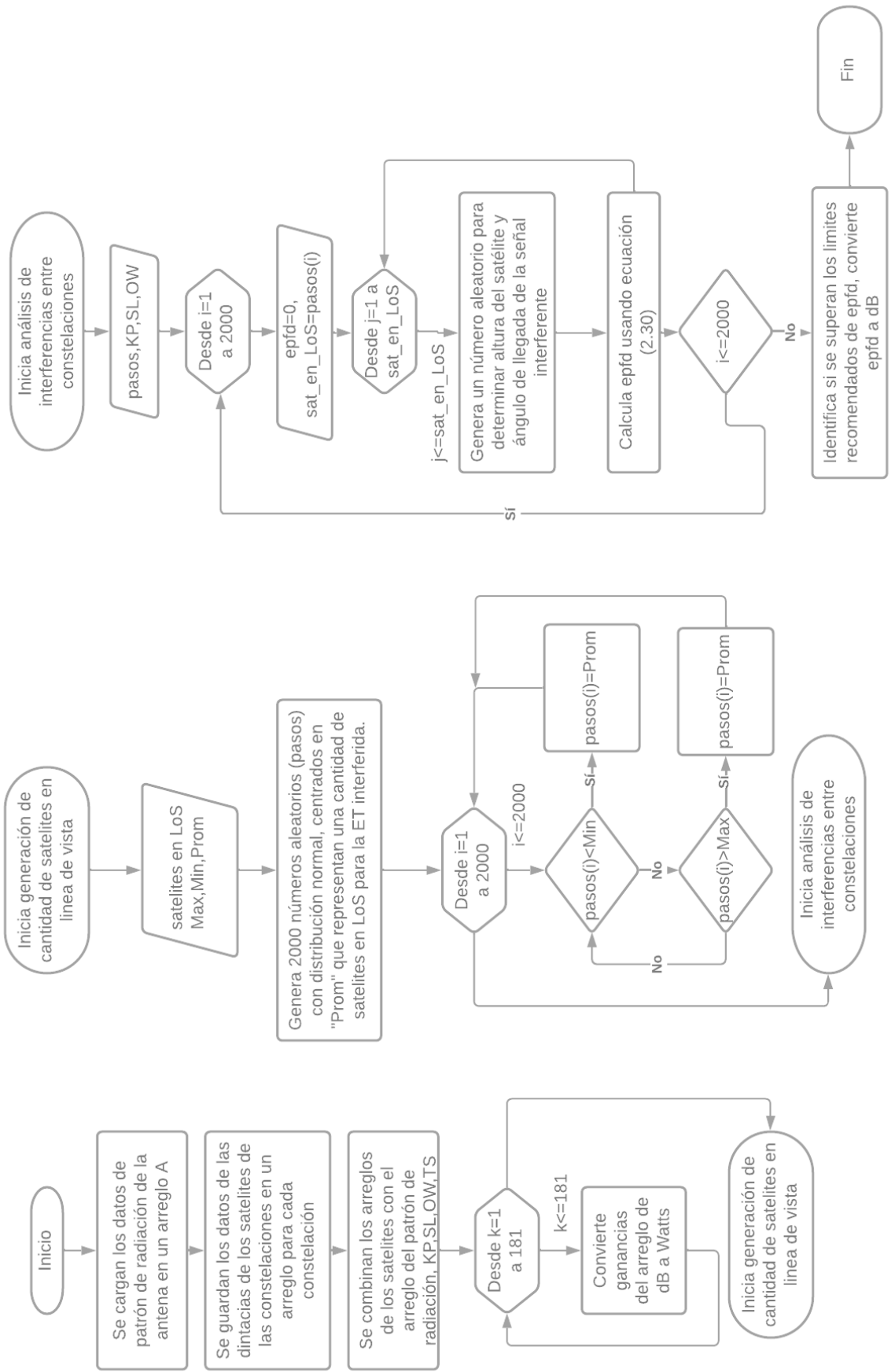
gracias a las tecnologías de formación de haz que utilizan la mayoría de estos sistemas. Esto debido a que, si bien se planteó estimar el patrón de radiación de un enlace como un objetivo del trabajo, sólo se pudo conseguir de manera parcial al simular el patrón de radiación de una única antena sin formación de haz. Por lo que en trabajos posteriores se podría realizar un análisis en profundidad considerando los efectos que tendría en los enlaces y condiciones potenciales de interferencia la formación de haz activa en el cálculo de las interferencias, o bien, centrarse en los efectos que estas constelaciones tendrán sobre otros sistemas satelitales que puedan estar en órbitas diferentes.

También, teniendo en cuenta que las interferencias pueden llegar a ser un problema mayor, en trabajos futuros se podrían abordar diversas y novedosas técnicas de compartición de frecuencia y reuso de recursos para poder minimizar estos efectos en comunicaciones terrestres y espaciales.

Apéndice A: Programa para el análisis de interferencias

Para realizar la simulación de las interferencias recibidas por una estación terrena ajena a las mega constelaciones, se realizó el siguiente programa en Matlab. Para esto se tomó en cuenta los ángulos de llegada de los transmisores interferentes, las distancias de los satélites a la estación terrena y las ganancias de las antenas de la estación terrestre y el satélite interferente.

En la siguiente página se muestra el diagrama de flujo de dicho programa, y en paginas posteriores se puede apreciar el código del mismo.




```

EPDF_KPVSL(i)=epfd+(Pt_s*((Gt_s)/(4*pi*(SL(deg+1,alt)^2)))*((Kp(91-
phi,G_col))/(Gr_max)));
    end
end
EPDF_KPVSL1=10*log10(EPDF_KPVSL);
figure(1)
subplot(224),plot(EPDF_KPVSL1,'o'),title('Kuiper'),ylabel('dB
(W/m2)'),legend('Telesat','OneWeb','Starlink')
hold on
figure(2)
plot(EPDF_KPVSL1),title("Kuiper vs Starlink"),xlabel("Número de
muestra"),ylabel("epfd [dB(W/m^2)]")
c=0;
for i=1:length(EPDF_KPVSL1)
    if EPDF_KPVSL1(i)>-154
        c=c+1;
    end
end
end
Rebasa=c*100/length(pasos)
Max_kpvSL=max(EPDF_KPVSL1)
MEDIA=mean(EPDF_KPVSL1)
Min_kpvsl=min(EPDF_KPVSL1)

```

Apéndice B: Datos del patrón de radiación de la antena propuesta

Ángulo	Ganancia [dBi]	Ángulo	Ganancia [dBi]	Ángulo	Ganancia [dBi]
0	-13.27904602	61	-31.00822872	122	-19.48147708
1	-13.49714292	62	-19.40332958	123	-31.67774636
2	-13.34411845	63	-22.5870247	124	-18.53417581
3	-12.91716766	64	-19.13128665	125	-16.44035335
4	-12.63861587	65	-11.81607629	126	-17.87339634
5	-12.80909597	66	-11.24804339	127	-16.55012421
6	-13.36257306	67	-16.70295457	128	-13.94851479
7	-13.7290585	68	-14.26680316	129	-13.93162757
8	-13.24711262	69	-11.07162476	130	-16.88578708
9	-12.22458932	70	-16.63198064	131	-20.74241483
10	-11.49485165	71	-17.8507691	132	-18.82232012
11	-11.56055722	72	-10.71620197	133	-17.87536984
12	-12.66647668	73	-15.62428445	134	-20.81109071
13	-14.92947295	74	-12.639357	135	-32.74560076
14	-17.63697614	75	-5.936787533	136	-24.4163402
15	-17.55568175	76	-8.207825098	137	-19.07385349
16	-15.19655526	77	-16.01533319	138	-18.06154561
17	-13.52864441	78	-5.004239882	139	-19.84229159
18	-12.99894873	79	-7.123628084	140	-25.02753568
19	-13.39941746	80	-11.00872336	141	-27.71487215
20	-14.26916865	81	-0.271672396	142	-21.38763515
21	-14.75685396	82	-1.964081976	143	-18.63161796
22	-14.29706398	83	-8.357138468	144	-18.58231237
23	-13.47068265	84	1.391340409	145	-21.27483901
24	-13.06028319	85	0.847222658	146	-27.28386295
25	-13.43231903	86	18.20646534	147	-23.76665393
26	-14.68258427	87	26.21679533	148	-18.7408395
27	-16.53125605	88	30.91062846	149	-16.69979195
28	-17.72252104	89	33.46708354	150	-16.52106715
29	-17.23509284	90	34.28623444	151	-17.37816623
30	-16.5386422	91	33.47366162	152	-17.71739393
31	-17.03941099	92	30.92463008	153	-16.38292106
32	-19.48316073	93	26.2404044	154	-14.63223639
33	-24.24647031	94	18.24417453	155	-13.48957884
34	-23.66116247	95	0.773058428	156	-13.08727667
35	-19.27821312	96	1.34728242	157	-13.2628924

36	-17.49521883	97	-8.228265353	158	-13.7221988
37	-18.10560045	98	-2.124901919	159	-14.07228943
38	-21.6479754	99	-0.362335418	160	-14.04136607
39	-33.55024759	100	-11.14508261	161	-13.77649742
40	-26.08173836	101	-7.161034289	162	-13.71199007
41	-19.7083664	102	-5.134649596	163	-14.23808501
42	-17.83524868	103	-17.00318514	164	-15.53200451
43	-18.7866068	104	-7.921617369	165	-17.09986189
44	-23.28670914	105	-5.693158622	166	-16.95428996
45	-26.32288785	106	-12.31764513	167	-14.79642629
46	-19.81267053	107	-16.10626694	168	-12.76463319
47	-17.59276739	108	-10.80978132	169	-11.66041596
48	-19.13430523	109	-18.08512828	170	-11.52322207
49	-22.35662215	110	-16.40827759	171	-12.20494195
50	-17.89626849	111	-10.81032804	172	-13.28814369
51	-14.77766605	112	-14.0737476	173	-13.89732969
52	-15.18580496	113	-18.65685212	174	-13.49370909
53	-18.54552731	114	-11.98579339	175	-12.74990656
54	-17.9585318	115	-12.31880782	176	-12.40993436
55	-15.2560115	116	-19.72847093	177	-12.66599015
56	-16.76784438	117	-21.71096685	178	-13.29248105
57	-26.53033643	118	-18.74783479	179	-13.747556
58	-20.03141786	119	-29.27908185	180	-13.6084529
59	-16.38712351	120	-20.95413729		
60	-20.26452324	121	-16.44907855		


```

f=19000;          %Frecuencia en MHz
%Distancias de Kuiper
dk1=sqrt(((Re+k1)^2)-(Re^2)+((Re.*cos(t+a)).^2)+(Re.*cos(t+a)));
dk2=sqrt(((Re+k2)^2)-(Re^2)+((Re.*cos(t+a)).^2)+(Re.*cos(t+a)));
dk3=sqrt(((Re+k3)^2)-(Re^2)+((Re.*cos(t+a)).^2)+(Re.*cos(t+a)));
%Distancias de Oneweb
dow=sqrt(((Re+ow)^2)-(Re^2)+((Re.*cos(t+a)).^2)+(Re.*cos(t+a)));
%Distancias de SpaceX
dsl=sqrt(((Re+sl)^2)-(Re^2)+((Re.*cos(t+a)).^2)+(Re.*cos(t+a)));
%Distancias de Telesat
dt1=sqrt(((Re+t1)^2)-(Re^2)+((Re.*cos(t+a)).^2)+(Re.*cos(t+a)));
dt2=sqrt(((Re+t2)^2)-(Re^2)+((Re.*cos(t+a)).^2)+(Re.*cos(t+a)));
%Creación del archivo distancias para Kuiper
A=dk1.';
B=dk2.';
C=dk3.';
KuiperDistances=[A B C].*1000;
writematrix(KuiperDistances,'KuiperDistances.txt');
%Creación del archivo distancias para OneWeb
OneWebDistances=(dow.').*1000;
writematrix(OneWebDistances,'OneWebDistances.txt');
%Creación del archivo distancias de Starlink
StarlinkDistances=(dsl.').*1000;
writematrix(StarlinkDistances,'StarlinkDistances.txt');
%Creación del archivo distancias de Telesat
A=dt1.';
B=dt2.';
TelesatDistances=[A B].*1000;
writematrix(TelesatDistances,'TelesatDistances_5_12_21.txt');

```


Apéndice E: Atenuación debida a los gases atmosféricos en la Ciudad de México

Utilizando la ecuación 40 de la recomendación ITU-R P. 676-12 se realizó el cálculo de la atenuación debida a los gases atmosféricos

$$A = \frac{A_o + A_w}{\sin \varphi} \quad [\text{dB}]$$

Donde:

A_o = Atenuación debida al oxígeno.

A_w = Atenuación debida al vapor de agua.

φ = Angulo de inclinación, de entre 5° a 90°.

$$A_o = \gamma_o + h_o$$

$$A_w = \gamma_w + h_w$$

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0.182f(N''_{\text{oxigeno}}(f) + N''_{\text{vapor de agua}}(f)) \quad [\text{db/km}]$$

Donde:

γ = Atenuación específica causada por los gases.

γ_o = Atenuación específica causada por el oxígeno.

γ_w = Atenuación específica causada por el vapor de agua.

h_o = Altura equivalente debida al componente de oxígeno de atenuación gaseosa.

h_w = Altura equivalente debida al componente de vapor de agua de atenuación gaseosa.

f = Frecuencia en GHz.

$N''_{\text{oxigeno}}(f)$ = Parte imaginaria del valor complejo de las refractividades para el oxígeno.

$N''_{\text{vapor de agua}}(f)$ = Parte imaginaria del valor complejo de las refractividades para el vapor de agua.

$$N''_{\text{oxigeno}}(f) = \sum_{i(\text{oxigeno})} S_i F_i + N''_D(f)$$

$$N''_{vapor\ de\ agua}(f) = \sum_{i(vapor\ de\ agua)} S_i F_i$$

$$S_i = a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1 - \theta)] \quad \text{Para el oxígeno}$$

$$S_i = b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3.5} \exp[b_2(1 - \theta)] \quad \text{Para el vapor de agua}$$

Donde:

p = presión del aire seco [hPa]

e = presión parcial del vapor de agua

$\theta = 300/T$ siendo T la temperatura en K

$$e = \frac{\rho T}{216.7}$$

El factor de forma de raya viene dado por:

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right]$$

Donde f_i es la frecuencia de raya de oxígeno y el vapor de agua y Δf es la anchura de la raya:

$$\Delta f = a_3 \times 10^{-4} (p \theta^{(0.8-a_4)} + 1.1e\theta) \quad \text{Para el oxígeno}$$

$$\Delta f = b_3 \times 10^{-4} (p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6}) \quad \text{Para el vapor de agua}$$

La anchura de la raya Δf se modifica para tener en cuenta la separación de Zeeman de las rayas del oxígeno y el ensanchamiento debido al efecto Doppler de las rayas del vapor de agua:

$$\Delta f = \sqrt{\Delta f^2 + 2.25 \times 10^{-6}} \quad \text{Para el oxígeno}$$

$$\Delta f = 0.535 \Delta f$$

$$+ \sqrt{0.217 \Delta f^2 + \frac{2.1316 \times 10^{-12} f_i^2}{\theta}} \quad \text{Para el vapor de agua}$$

δ es un factor de corrección que se introduce para tener en cuenta los efectos de interferencia en las rayas del oxígeno:

$$\delta = (a_5 + a_6 \theta) \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8} \quad \text{Para el oxígeno}$$

$$\Delta f = 0$$

Para el vapor de
agua

El contenido espectral de aire seco proviene del espectro de oxígeno no resonante de Debye, por debajo de 10 GHz, y de la atenuación del nitrógeno inducida por presión, por encima de 100 GHz.

$$N_D''(f) = fp\theta^2 \left[\frac{6.14 \times 10^{-5}}{d[1 + (f/d)^2]} + \frac{1.4 \times 10^{-12} p \theta^{1.5}}{1 + 1.9 \times 10^{-5} f^{1.5}} \right]$$

Donde d es el parámetro de anchura de banda del espectro de Dabye:

$$d = 5.6 \times 10^{-4} - (p + e)\theta^{0.8}$$

f_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
50.474214	0.975	9.651	6.69	0	2.566	6.85
50.987745	2.529	8.653	7.17	0	2.246	6.8
51.50336	6.193	7.709	7.64	0	1.947	6.729
52.021429	14.32	6.819	8.11	0	1.667	6.64
52.542418	31.24	5.983	8.58	0	1.388	6.526
53.066934	64.29	5.201	9.06	0	1.349	6.206
53.595775	124.6	4.474	9.55	0	2.227	5.085
54.130025	227.3	3.8	9.96	0	3.17	3.75
54.67118	389.7	3.182	10.37	0	3.558	2.654
55.221384	627.1	2.618	10.89	0	2.56	2.952
55.783815	945.3	2.109	11.34	0	-1.172	6.135
56.264774	543.4	0.014	17.03	0	3.525	-0.978
56.363399	1331.8	1.654	11.89	0	-2.378	6.547
56.968211	1746.6	1.255	12.23	0	-3.545	6.451
57.612486	2120.1	0.91	12.62	0	-5.416	6.056
58.323877	2363.7	0.621	12.95	0	-1.932	0.436
58.446588	1442.1	0.083	14.91	0	6.768	-1.273
59.164204	2379.9	0.387	13.53	0	-6.561	2.309
59.590983	2090.7	0.207	14.08	0	6.957	-0.776
60.306056	2103.4	0.207	14.15	0	-6.395	0.699
60.434778	2438	0.386	13.39	0	6.342	-2.825
61.150562	2479.5	0.621	12.92	0	1.014	-0.584
61.800158	2275.9	0.91	12.63	0	5.014	-6.619
62.41122	1915.4	1.255	12.17	0	3.029	-6.759
62.486253	1503	0.083	15.13	0	-4.499	0.844
62.997984	1490.2	1.654	11.74	0	1.856	-6.675
63.568526	1078	2.108	11.34	0	0.658	-6.139
64.127775	728.7	2.617	10.88	0	-3.036	-2.895
64.67891	461.3	3.181	10.38	0	-3.968	-2.59
65.224078	274	3.8	9.96	0	-3.528	-3.68

65.764779	153	4.473	9.55	0	-2.548	-5.002
66.302096	80.4	5.2	9.06	0	-1.66	-6.091
66.836834	39.8	5.982	8.58	0	-1.68	-6.393
67.369601	18.56	6.818	8.11	0	-1.956	-6.475
67.900868	8.172	7.708	7.64	0	-2.216	-6.545
68.431006	3.397	8.652	7.17	0	-2.492	-6.6
68.960312	1.334	9.65	6.69	0	-2.773	-6.65
118.75033 4	940.3	0.01	16.64	0	-0.439	0.079
368.49824 6	67.4	0.048	16.4	0	0	0
424.76302	637.7	0.044	16.4	0	0	0
487.24927 3	237.4	0.049	16	0	0	0
715.39290 2	98.1	0.145	16	0	0	0
773.83949	572.3	0.141	16.2	0	0	0
834.14554 6	183.1	0.145	14.7	0	0	0

Datos espectroscópicos para la atenuación del oxígeno.

f₀	b₁	b₂	b₃	b₄	b₅	b₆
22.23508	0.1079	2.144	26.38	0.76	5.087	1
67.80396	0.0011	8.732	28.58	0.69	4.93	0.82
119.99594	0.0007	8.353	29.48	0.7	4.78	0.79
183.31008 7	2.273	0.668	29.06	0.77	5.022	0.85
321.22563	0.047	6.179	24.04	0.67	4.398	0.54
325.15288 8	1.514	1.541	28.23	0.64	4.893	0.74
336.22776 4	0.001	9.825	26.93	0.69	4.74	0.61
380.19735 3	11.67	1.048	28.11	0.54	5.063	0.89
390.13450 8	0.0045	7.347	21.52	0.63	4.81	0.55
437.34666 7	0.0632	5.048	18.45	0.6	4.23	0.48
439.15080 7	0.9098	3.595	20.07	0.63	4.483	0.52
443.01834 3	0.192	5.048	15.55	0.6	5.083	0.5
448.00108 5	10.41	1.405	25.64	0.66	5.028	0.67
470.88899 9	0.3254	3.597	21.34	0.66	4.506	0.65

474.68909 2	1.26	2.379	23.2	0.65	4.804	0.64
488.49010 8	0.2529	2.852	25.86	0.69	5.201	0.72
503.56853 2	0.0372	6.731	16.12	0.61	3.98	0.43
504.48269 2	0.0124	6.731	16.12	0.61	4.01	0.45
547.67644	0.9785	0.158	26	0.7	4.5	1
552.02096	0.184	0.158	26	0.7	4.5	1
556.93598 5	497	0.159	30.86	0.69	4.552	1
620.70080 7	5.015	2.391	24.38	0.71	4.856	0.68
645.76608 5	0.0067	8.633	18	0.6	4	0.5
658.00528	0.2732	7.816	32.1	0.69	4.14	1
752.03311 3	243.4	0.396	30.86	0.68	4.352	0.84
841.05173 2	0.0134	8.177	15.9	0.33	5.76	0.45
859.96569 8	0.1325	8.055	30.6	0.68	4.09	0.84
899.30317 5	0.0547	7.914	29.85	0.68	4.53	0.9
902.61108 5	0.0386	8.429	28.65	0.7	5.1	0.95
906.20595 7	0.1836	5.11	24.08	0.7	4.7	0.53
916.17158 2	8.4	1.441	26.73	0.7	5.15	0.78
923.11269 2	0.0079	10.293	29	0.7	5	0.8
970.31502 2	9.009	1.919	25.5	0.64	4.94	0.67
987.92676 4	134.6	0.257	29.85	0.68	4.55	0.9
1780	17506	0.952	196.3	2	24.15	5

Datos espectroscópicos para la atenuación del vapor de agua.

Se realizó el siguiente programa en Matlab para calcular las atenuaciones debidas a los gases basándose en las expresiones previamente destacadas en este apéndice:

```
%CINVESTAV - Zacatenco
%Carlos Silva García
%Atenuaciones debidas a los gases atmosféricos - ITU R P 676-12
clc
clear all
```

```

close all
%Ecuación 40  $A=(A_o+A_w)/\sin(\phi)$  ###  $A_o$ =hoyo  $A_w$ =hwyw  $\phi$  entre 5 y 90°
%indica que para frecuencias menores a 70 GHz  $h_o=((10.7)*(r_p^{0.3}))$  ///
Ec
%35.a
f=30; %Frecuencia en GHz será variable a definir <-----
%para los valores de presión y temp ver ITU-R-p 835-6
T=15+273; % [k] atmosfera normalizada /// Temperatura
rho=7.5; % [g/m3] atmosfera normalizada /// Densidad de vapor de agua
p=1013.25; % [hPa] atmosfera normalizada /// p= presión seca
e=(rho*T)/216.7;% [hPa] /// rho= es la densidad de vapor de agua en la
superficie [g/m3]/// T=temp en la superficie de la Tierra en K
theta=300/T;
phi=5*pi/180:pi/180:90*pi/180; %inclinación del trayecto entre 5 y 90
o

rp=(p+e)/1013.25;
C1=table2array(readtable('C1UIT676ok.txt')); %cuadro 1 itu 676-12
C2=table2array(readtable('C2UIT676ok.txt')); %cuadro 2 itu 676-12
C4=table2array(readtable('C4UIT676ok.txt')); %cuadro 4 itu 676-12
a1=C1(:,2); b1=C2(:,2); ai=C4(:,2);
a2=C1(:,3); b2=C2(:,3); bi=C4(:,3);
a3=C1(:,4); b3=C2(:,4);
a4=C1(:,5); b4=C2(:,5);
a5=C1(:,6); b5=C2(:,6);
a6=C1(:,7); b6=C2(:,7);
fi_ox=C1(:,1);
fi_va=C2(:,1);
fi_c4=C4(:,1);
%=====
%Cálculo de ND(f) para ec 2a y 40 ITU R P 676-12
d=(5.6e-4)*(p+e)*(theta^0.8);
a=f*p*(theta^2); %EC(8)
b1=6.14e-5; %EC(8)
b2=d*(1+(f/d)^2); %EC(8)
c1=(1.4e-12)*p*(theta^1.5); %EC(8)
c2=1+(1.9e-5)*(f^1.5); %EC(8)
ND=a*((b1/b2)+(c1/c2)); %EC(8) ND(f)
%=====
%Cálculo de Si - valor de la raya
Si_ox=a1*(10^-7).*p.*(theta^3).*exp(a2*(1-theta)); %ec (3)
Si_va=C2(:,2)*(10^-1).*e.*(theta^3.5).*exp(C2(:,3)*(1-theta)); %ec (3)
%=====
%Cálculo de Fi - factor de forma de raya - EC (5)
%fi es la frecuencia de raya del oxígeno y vapor de agua
deltaf_ox1=(a3*(10^-4)).*(p.*(theta.^(0.8-a4))+(1.1*e*theta)); %ec 6a
deltaf_val1=(b3*(10^-4)).*(p.*(theta.^(b4))+(b5.*(e*theta.^b6))); %ec 6a
%deltaf es la anchura de la raya
deltaf_ox=sqrt((deltaf_ox1.^2)+(2.25e-6)); %ec 6b
deltaf_va=(0.535*deltaf_val1)+sqrt((0.217*(deltaf_val1.^2))+((2.1316e-
12)*(fi_va.^2))/(theta))); %ec 6b
delta_ox=(C1(:,6)+(C1(:,7)*theta))*(10^-4).* (p+e).*(theta^-0.8); % ec
(7)
delta_va=0; % ec (7)
e5_1_ox=deltaf_ox-(delta_ox.*(fi_ox-f));
e5_2_ox=deltaf_ox-(delta_ox.*(fi_ox+f)
e5_3_ox=((fi_ox-f).^2)+(deltaf_ox.^2
e5_4_ox=((fi_ox-f).^2)+(deltaf_ox.^2);
e5_1_va=deltaf_va-(delta_va.*(fi_va-f)
e5_2_va=deltaf_va-(delta_va.*(fi_va+f));
e5_3_va=((fi_va-f).^2)+(deltaf_va.^2);

```



```

e5_4_va=((fi_va-f).^2)+(deltaf_va.^2);
Fi_ox=(f./fi_ox).*(e5_1_ox./e5_3_ox)+(e5_2_ox./e5_4_ox);% ec 5
Fi_va=(f./fi_va).*(e5_1_va./e5_3_va)+(e5_2_va./e5_4_va);% ec 5
%=====
Nox=sum((Si_ox.*Fi_ox)+ND); % Ec 2a /// Sumatoria de (Si*Fi)+ND
Nva=sum(Si_va.*Fi_va); % Ec 2b /// Sumatoria de (Si*Fi)
%yo=0.1820f(Nox''(f)) ///EC (1) ITU R P 676-12
yo=0.182*f*Nox;
%yw=0.1820f(Nva''(f)) ///EC (1) ITU R P 676-12
yw=0.182*f*Nva;
%ho=Altura equivalente debida al componente de oxígeno de atenuación
%gasesosa /// EC 35a
ho=(10.7)*(rp^0.3);
gamma_w=1.013/(1+exp(-8.6*(rp-0.57)));
A=1.9298-(0.04166*(T-273.15))+(0.0517*rho);
B=1.1674-(0.00622*(T-273.15))+(0.0063*rho);
hw=(A+B)*sum((ai*gamma_w)./(((f-fi_c4).^2)+(bi*gamma_w)));%ec 35b
%=====
Ao=yo+ho;
Aw=yw+hw;
%=====
% %Calculo de A Ec 40 y 41 ITU R P 676-12
A40= (Ao+Aw)./sin(phi);
ATM_Norm=mean(A40)
ATM_Norm_Min=min(A40)
ATM_Norm_Max=max(A40)
plot(phi*180/pi,A40),xlabel("Angulo de
inclinación"),ylabel("Atenuación dB")
hold on
grid on
%
% CDMX
%indica que para frecuencias menores a 70 GHz ho=((10.7)*(rp^0.3)) ///
T=18.29+273.15% temperatura promedio en CDMX de 2018 a la fecha
rho=mean(mean(read_vd(48,67))); % [g/m3] atmosfera normalizada ///
Densidad de vapor de agua
p=608.67;%hpa presión promedio en la cdmx en 2021
e=(rho*T)/216.7;%[hPa] /// rho= es la densidad de vapor de agua en la
superficie [g/m3]/// T=temp en la superficie de la Tierra en K
theta=300/T;
phi=5*pi/180:pi/180:90*pi/180; %Este dato es variable, es la
inclinación del trayecto entre 5 y 90 °
rp=(p+e)/1013.25;
C1=table2array(readtable('C1UIT676ok.txt')); %cuadro 1 itu 676-12
C2=table2array(readtable('C2UIT676ok.txt')); %cuadro 2 itu 676-12
C4=table2array(readtable('C4UIT676ok.txt')); %cuadro 4 itu 676-12
a1=C1(:,2); b1=C2(:,2); ai=C4(:,2);
a2=C1(:,3); b2=C2(:,3); bi=C4(:,3);
a3=C1(:,4); b3=C2(:,4);
a4=C1(:,5); b4=C2(:,5);
a5=C1(:,6); b5=C2(:,6);
a6=C1(:,7); b6=C2(:,7);
fi_ox=C1(:,1);
fi_va=C2(:,1);
fi_c4=C4(:,1);
%=====
===
%Cálculo de ND(f) para ec 2a y 40 ITU R P 676-12
d=(5.6e-4)*(p+e)*(theta^0.8);
a=f*p*(theta^2); %EC(8)
b1=6.14e-5; %EC(8)

```

```

b2=d*(1+(f/d)^2); %EC(8)
c1=(1.4e-12)*p*(theta^1.5); %EC(8)
c2=1+(1.9e-5)*(f^1.5); %EC(8)
ND=a*((b1/b2)+(c1/c2)); %EC(8) ND(f)
%=====
%Cálculo de Si - valor de la raya
Si_ox=a1*(10^-7).*p.*(theta^3).*exp(a2*(1-theta)); %ec (3)
Si_va=C2(:,2)*(10^-1).*e.*(theta^3.5).*exp(C2(:,3)*(1-theta)); %ec (3)
%=====
%Cálculo de Fi - factor de forma de raya - EC (5)
%fi es la frecuencia de raya del oxígeno y vapor de agua
deltaf_ox1=(a3*(10^-4)).*(p.*(theta.^(0.8-a4))+(1.1*e*theta)); %ec 6a
deltaf_val=(b3*(10^-4)).*(p.*(theta.^(b4))+(b5.*(e*theta.^b6))); %ec 6a
%deltaf es la anchura de la raya
deltaf_ox=sqrt((deltaf_ox1.^2)+(2.25e-6)); %ec 6b
deltaf_va=(0.535*deltaf_val)+sqrt((0.217*(deltaf_val.^2))+((2.1316e-12)*(fi_va.^2))/(theta)); %ec 6b
delta_ox=(C1(:,6)+(C1(:,7)*theta))*(10^-4).*(p+e).*(theta^-0.8); % ec (7)
delta_va=0; % ec (7)
e5_1_ox=deltaf_ox-(delta_ox.*(fi_ox-f));
e5_2_ox=deltaf_ox-(delta_ox.*(fi_ox+f));
e5_3_ox=((fi_ox-f).^2)+(deltaf_ox.^2);
e5_4_ox=((fi_ox-f).^2)+(deltaf_ox.^2);
e5_1_va=deltaf_va-(delta_va.*(fi_va-f));
e5_2_va=deltaf_va-(delta_va.*(fi_va+f));
e5_3_va=((fi_va-f).^2)+(deltaf_va.^2);
e5_4_va=((fi_va-f).^2)+(deltaf_va.^2);
Fi_ox=(f./fi_ox).*(e5_1_ox./e5_3_ox)+(e5_2_ox./e5_4_ox); % ec 5
Fi_va=(f./fi_va).*(e5_1_va./e5_3_va)+(e5_2_va./e5_4_va); % ec 5
%=====
Nox=sum((Si_ox.*Fi_ox)+ND); % Ec 2a /// Sumatoria de (Si*Fi)+ND
Nva=sum(Si_va.*Fi_va); % Ec 2b /// Sumatoria de (Si*Fi)
%yo=0.1820f(Nox''(f)) ///EC (1)
yo=0.182*f*Nox;
%yw=0.1820f(Nva''(f)) ///EC (1)
yw=0.182*f*Nva;
%ho=Altura equivalente debida al componente de oxígeno de atenuación
%gaseosa /// EC 35a
ho=(10.7)*(rp^0.3);

gamma_w=1.013/(1+exp(-8.6*(rp-0.57)));
A=1.9298-(0.04166*(T-273.15))+(0.0517*rho);
B=1.1674-(0.00622*(T-273.15))+(0.0063*rho);
hw=(A+B)*sum((ai*gamma_w)./(((f-fi_c4).^2)+(bi*gamma_w))); %ec 35b
%=====
Ao=yo+ho;
Aw=yw+hw;
%=====
%Cálculo de A Ec 40 y 41 ITU R P 676-12
A40=(Ao+Aw)./sin(phi);
CDMX_M=mean(A40)
CDMX_Min=min(A40)
CDMX_Max=max(A40)
plot(phi*180/pi,A40,'-r'),xlabel("Ángulo de inclinación"),ylabel("Atenuación dB"),legend('Atm normalizada','CDMX'),yticks([0 20 40 60 80 100 120 140])
hold on
grid on

```