



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

**ANÁLISIS PARA EL USO DE SATÉLITES EN LA
BANDA Ka EN MÉXICO**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

PRESENTA:

MIGUEL FERNANDO CENTENO RAMÍREZ

DIRECTOR:

Dr. SALVADOR LANDEROS AYALA

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL 2016.



Índice General

OBJETIVO	4
INTRODUCCIÓN	5
1.- ANTECEDENTES	6
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SATÉLITES ARTIFICIALES	6
1.1.1 Clasificación de los satélites artificiales	6
1.1.2 Sistema espacial y subsistemas del satélite.	8
1.2 ASPECTOS ORBITALES	11
1.2.1 Formas de clasificar órbitas	14
1.2.2 Mecánica orbital: ecuación, velocidad y periodo orbital.	17
1.2.3 Órbitas Útiles	21
1.3 SERVICIOS OFRECIDOS Y PRINCIPALES BANDAS DE FRECUENCIAS	23
1.3.1 Servicios fijos satelitales (FSS-Fixed Satellite Service)	24
1.3.2 Servicios móviles satelitales (MSS-Mobile Satellite Service)	25
1.3.3 Servicios de radiodifusión satelitales (BSS-Broadcasting Satellite Service)	26
1.3.4 Sistemas de radiodeterminación satelital (RDSS-Radiodetermination Satellite System)	27
1.3.5 Servicios Inter-satelitales (ISS- Inter-Satellite Services)	27
2.- COMPARACIÓN ENTRE SATÉLITES EN BANDAS KU Y KA.	28
2.1 VENTAJAS DE LA BANDA KA	29
2.1.1 Espectro radioeléctrico libre	29
2.1.2 Ancho de banda del canal	30
2.1.3 Ancho del haz	30
2.1.4 Menor interferencia inter-satelital	32
2.1.5 Menor costo del ancho de banda	33
2.2 DESVENTAJAS DE LA BANDA KA	34
2.2.1 Compromiso entre desempeño del enlace y cobertura	34
2.2.2 Cobertura	35
2.2.3 Carencia de sistemas de respaldo	35
2.2.4 Costos de equipo y conversión	37
2.2.5 Atenuación ocasionada por la lluvia y otros aspectos atmosféricos.	38
3.- CONFIGURACIÓN DE UN SATÉLITE EN LA BANDA KA	41
3.1 SEGMENTO ESPACIAL	41
3.1.1 Carga útil	41
3.1.2 Plataforma	52
3.2 SEGMENTO TERRESTRE	56
3.2.1 Arquitectura del sistema	56
3.2.2 Arquitectura del Gateway	56
4.- EFECTOS DE ATENUACIÓN	59
4.1 PROBLEMAS ASOCIADOS CON LA ATENUACIÓN	59
4.2 ATENUACIÓN POR LLUVIA	60
4.2.1 Tipos de Lluvia que pueden afectar	61
4.2.2 Atenuación específica	61
4.2.3 Modelos de Atenuación	67

Índice General

4.2.4 Cálculo de la atenuación por lluvia de acuerdo a la recomendación	69
ITU-R P.618-12	69
4.2.5 Modelo de atenuación para México	72
4.3 ATENUACIÓN POR NUBES Y NIEBLA	73
4.3.1 Cálculo de la atenuación con el modelo de la ITU	74
4.4 ATENUACIÓN POR GASES ATMOSFÉRICOS	75
5.- CÁLCULO DE ENLACE	78
5.1 CONFIGURACIÓN BÁSICA DEL ENLACE SATELITAL	78
5.2 ELEMENTOS DE PROPAGACIÓN	79
5.2.1 Ganancia de la antena y patrón de radiación	79
5.2.2 Potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE)	81
5.2.3 Densidad de flujo de potencia	81
5.2.4 Pérdidas por propagación en el espacio libre	81
5.2.5 Pérdidas adicionales	82
5.3 RUIDO DEL SISTEMA	83
5.3.1 Ruido térmico y su densidad espectral de potencia	83
5.3.2 Figura de ruido	84
5.3.3 Temperatura de ruido equivalente	84
5.3.4 Figura de mérito	86
5.4 Desempeño del enlace	86
5.4.1 Relación portadora a ruido	87
5.4.2 Relación portadora a densidad de ruido	87
5.4.3 Relación Energía del bit a densidad de ruido	87
5.5 DESEMPEÑO TOTAL DEL SISTEMA	88
5.5.1 Satélite transparente	88
5.5.2 Satélite regenerativo	89
5.6 Simulación de un enlace México-Monterrey	92
5.6.1 Consideraciones generales	92
5.6.2 Datos de la simulación	93
5.6.3 Variables de Entrada del Programa	94
5.6.4 Resultados	95
6.- SATÉLITES DE BANDA KA EN EL MUNDO	100
6.1 SATÉLITES EN NORTEAMÉRICA	100
6.1.1 México	101
6.2 SATÉLITES EN EUROPA	104
6.3 SATÉLITES EN AMÉRICA LATINA	105
6.4 SATÉLITES EN EL RESTO DEL MUNDO	105
6.5 OTROS SISTEMAS	107
6.6 PROPUESTA PARA MÉXICO	107
CONCLUSIONES	108
REFERENCIAS	112
ANEXO	118

OBJETIVO

El propósito de este trabajo de tesis es elaborar un análisis sobre los requerimientos y parámetros más importantes en la implementación de un sistema de comunicaciones satelitales en la banda Ka para la región de México.

Se revisarán los problemas asociados a la atenuación (ya la lluvia afecta en mayor medida el desempeño del enlace) y se harán simulaciones con esquemas digitales para repetidores transparentes y regenerativos.

Lo anterior con la finalidad de que se tenga una referencia de que es posible utilizar esas tecnologías sacando el mayor provecho de las ventajas en favor de la población del país.

INTRODUCCIÓN

El siguiente documento, llamado “Análisis para el uso de satélites en banda Ka en México”, es un trabajo de tesis para la obtención del grado de Ingeniero en Telecomunicaciones que está dedicado al estudio de características comunes en los sistemas satelitales en la banda Ka, así como las condiciones específicas del país y la posibilidad de implementar un sistema para la cobertura del mismo.

El capítulo uno abarca antecedentes a las comunicaciones satelitales en general, como lo son la clasificación de los satélites, el tipo de órbitas usadas en las comunicaciones y los servicios disponibles de acuerdo a la regulación internacional.

El capítulo dos se enfoca en una comparación entre las ventajas y desventajas que se producen cuando se trabaja con un sistema de banda Ka con respecto a otras bandas inferiores de frecuencias. En específico, se hace una comparación directa con sistemas satelitales que utilizan la banda Ku.

El capítulo tres consiste en la configuración de estos satélites; de manera general se cubren los diferentes subsistemas y las principales tecnologías usadas en ellos. La carga útil es cubierta de manera más extensa, mientras que para los demás subsistemas se hace una revisión de algunas de las plataformas más usadas en los satélites que operan en esa banda.

El capítulo cuatro habla sobre los efectos de atenuación relacionados con el clima y condiciones atmosféricas que se pueden presentar al trabajar en la banda Ka y que pueden tener un mayor impacto, como son la lluvia, las nubes y la absorción atmosférica.

El capítulo cinco se compone del cálculo de enlace; desde la descripción de los elementos involucrados, como son aquellos referentes a la propagación, el ruido en el sistema y las relaciones de desempeño, hasta las simulaciones y los resultados obtenidos para un enlace entre la Ciudad de México y Monterrey con diferentes tipos de esquemas de modulación comparando los resultados obtenidos al usar tanto un repetidor transparente como uno regenerativo.

El capítulo seis, por último, hace una breve recopilación de la situación de los sistemas de banda Ka para comunicaciones en el mundo, lo que incluye a la situación del país y la cobertura que posee en la banda. Asimismo, se presenta una propuesta para la implementación de un sistema en la banda propietario del país en base a la información recolectada.

1.- ANTECEDENTES

1.1 Descripción General de los Satélites Artificiales

Un satélite se considera como cualquier objeto que gira alrededor de otro de masa preponderante donde a este último se le denomina objeto principal.

Los satélites se clasifican en dos grupos: los satélites naturales y los satélites artificiales.

Un satélite artificial es aquel fabricado por el hombre y lanzado al espacio para girar, en forma, útil, alrededor de la Tierra o de algún otro cuerpo celeste [2].

1.1.1 Clasificación de los satélites artificiales

Es posible dividir los satélites artificiales de acuerdo a su tipo de misión, ya que éstos son utilizados para diversas actividades de interés humano además de las comunicaciones [1].

Telecomunicaciones. Es una de las mayores aplicaciones de los satélites artificiales; actualmente, el estar ampliamente comunicados a través de diferentes plataformas es un aspecto de uso diario en la sociedad, por ende, millones de personas utilizan este tipo de servicios, lo que los hace uno de los más rentables.

En su gran mayoría se usan para la transmisión de voz, datos y contenidos de televisión.

Observación de la Tierra. Por medio de estos satélites se obtiene información relevante con respecto a la atmósfera terrestre y otro tipo de elementos de la superficie, pudiendo, así, ser capaces de utilizar los datos para analizar fenómenos como desastres naturales (con su respectiva evaluación y prevención), el cambio climático, el control de las fronteras, contaminación en los mares, predicción de cosechas y otros más.

Navegación. Son sistemas desarrollados, como muchos otros inventos, con propósitos militares y que, con el paso del tiempo, han encontrado aplicaciones en la vida cotidiana. En la actualidad sirven como sistemas de posicionamiento global (tal es el caso de los sistemas GPS, Galileo y GLONASS) para localización de sitios en la Tierra.

Este tipo de aplicaciones funcionan a través de una “triangulación” entre los satélites y una unidad receptora (actualmente pueden usarse varios satélites para llevar a cabo este proceso, por lo que el término triangulación quizá no sería el más correcto), permitiendo así ubicar el lugar donde ésta se encuentra y obtener las coordenadas geográficas.

Científicos. Son satélites cuyo objetivo principal es el estudio de los planetas y el universo. Permiten mejorar conocimiento a través de la obtención de datos más precisos e imágenes de muy buena resolución.

Algunas de las principales aplicaciones son las estaciones espaciales y la astronomía.

Tecnológicos. Este tipo satélites tienen varias aplicaciones, por ejemplo, pueden ser usados para probar algún tipo de nueva tecnología en el espacio, es decir, son las pruebas iniciales de tecnologías emergentes y su desempeño determina si serán utilizados más adelante simplemente como una alternativa o se convertirán en la tecnología de nueva generación; también son usados para probar componentes comerciales en el espacio; en la utilización de cargas útiles científicas de observación, teledetección y telecomunicaciones; para mediciones de experimentos de radiación; medir y observar actividad solar; aplicaciones meteorológicas; y análisis de la atmósfera.

También es posible hacer una distinción basada en el tamaño de los satélites; satélites grandes, medianos y pequeños, éstos últimos, a su vez, se dividen en minisatélites, microsateélites, nanosatélites y picosatélites. Dependiendo de las aplicaciones serán las dimensiones del satélite.

En la Fig. 1-1 se muestra un esquema con la división entre los tipos de satélites basados en estas características.

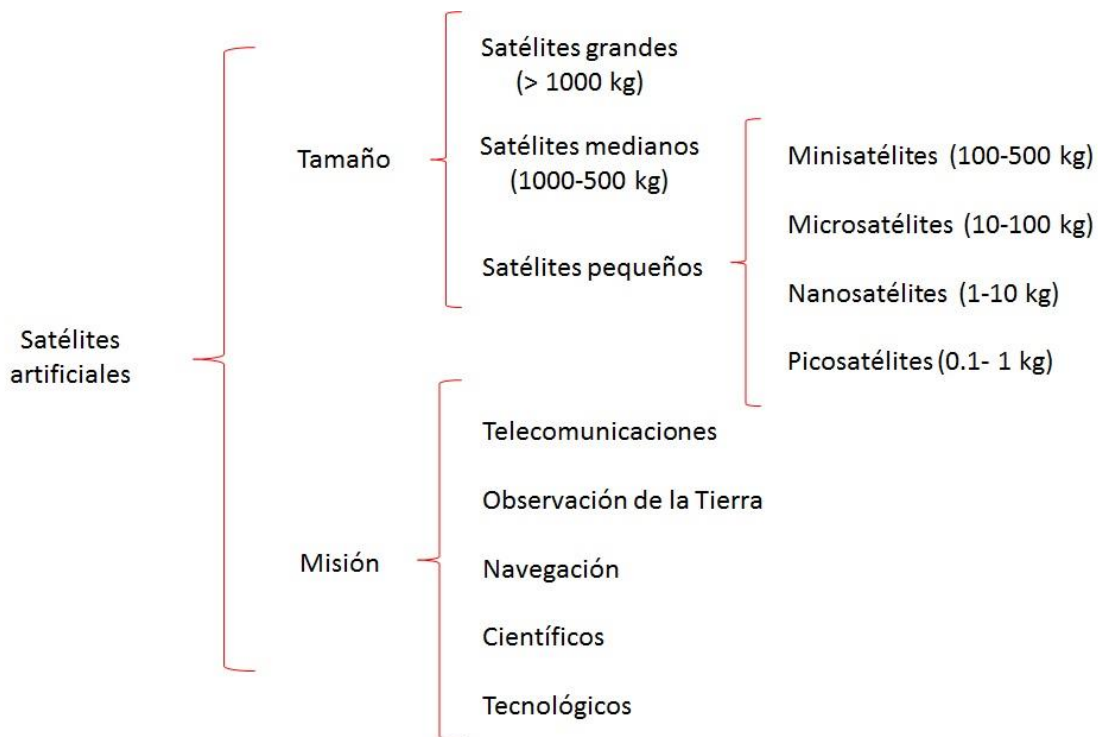


Fig. 1-1 Clasificación de los satélites artificiales por su misión y tamaño.

1.1.2 Sistema espacial y subsistemas del satélite.

Un satélite forma parte de un sistema espacial; éste es el conjunto de elementos que constituyen todo el proyecto.

Un sistema espacial está conformado por el segmento espacial y el segmento terrestre. El segmento espacial se compone por el satélite, el lanzador y el centro de control, mientras que el segmento terrestre está constituido por las estaciones terrenas utilizadas para establecer y mantener los enlaces de comunicación.

El centro de control se considera parte del segmento espacial ya que es el responsable de mantener contacto con el satélite [2].

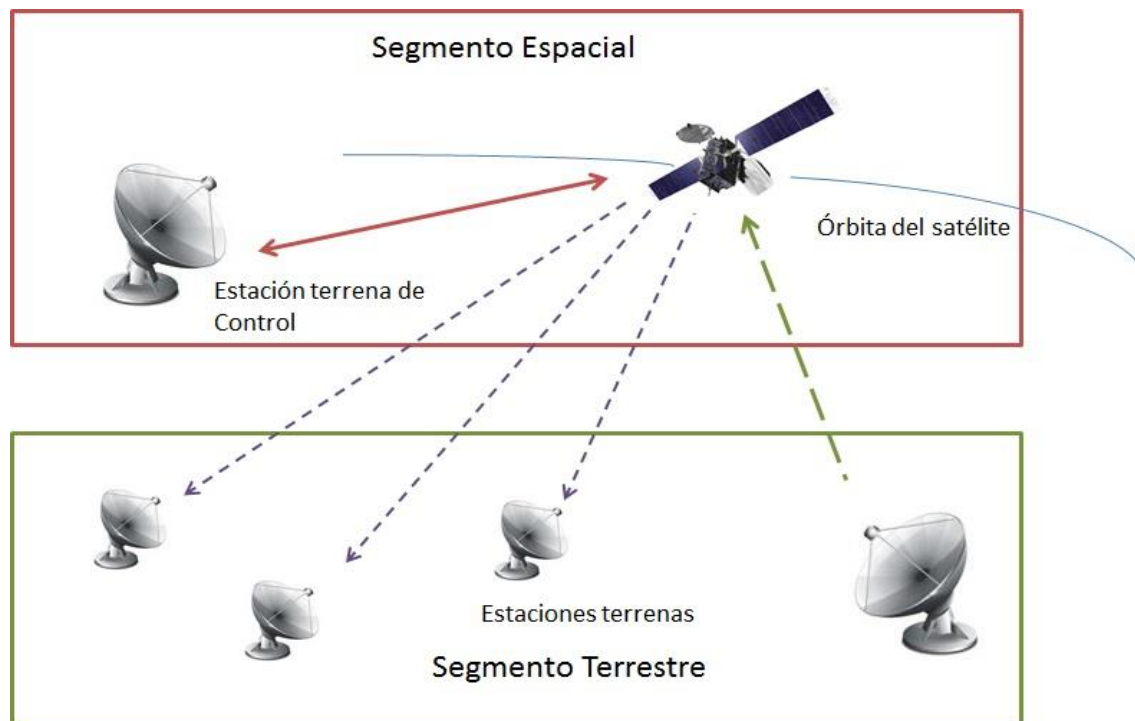


Fig. 1-2 Representación de los segmentos terrestre y espacial.

En el diseño de los satélites existen elementos, llamados subsistemas, que juegan un papel muy importante. El proceso de diseño se basa en mucho en cómo estos subsistemas son, a su vez, diseñados e integrados para producir un sistema total capaz de alcanzar los objetivos de la misión y sobrevivir a las condiciones adversas del espacio.

La carga útil es la parte más importante del satélite, ya que sin ella los objetivos planteados no se pueden alcanzar. Se entiende como el conjunto de elementos dedicados directamente a realizar la misión del satélite.

Los subsistemas, entonces, son un soporte para la carga útil durante su operación. El diseño de cada uno está guiado por la idea de lo que necesita hacer y los recursos que debe proveer para asegurarse que la carga útil realice su trabajo de forma efectiva [4].

Los subsistemas del satélite se complementan uno al otro y en algunos casos están diseñados para otro subsistema, por ejemplo, la estructura se encarga de mantener los diferentes equipos en su lugar, al mismo tiempo que lleva la carga y asegura que el calor sea conducido hacia las superficies frías.

Los problemas ocurren cuando los requerimientos de un subsistema se contraponen con los requerimientos de otro y en ese caso uno de ellos no trabajará de manera óptima; se antepone la armonía del sistema en general a la de los subsistemas.

El número de variaciones y combinaciones de subsistemas usadas en un satélite son demasiadas, lo que hace imposible un análisis que cubra todo, así que sólo los subsistemas más importantes se analizarán a continuación [3].

En la Fig. 1-3 se muestra un diagrama de bloques que muestra cómo interactúan los subsistemas principales.

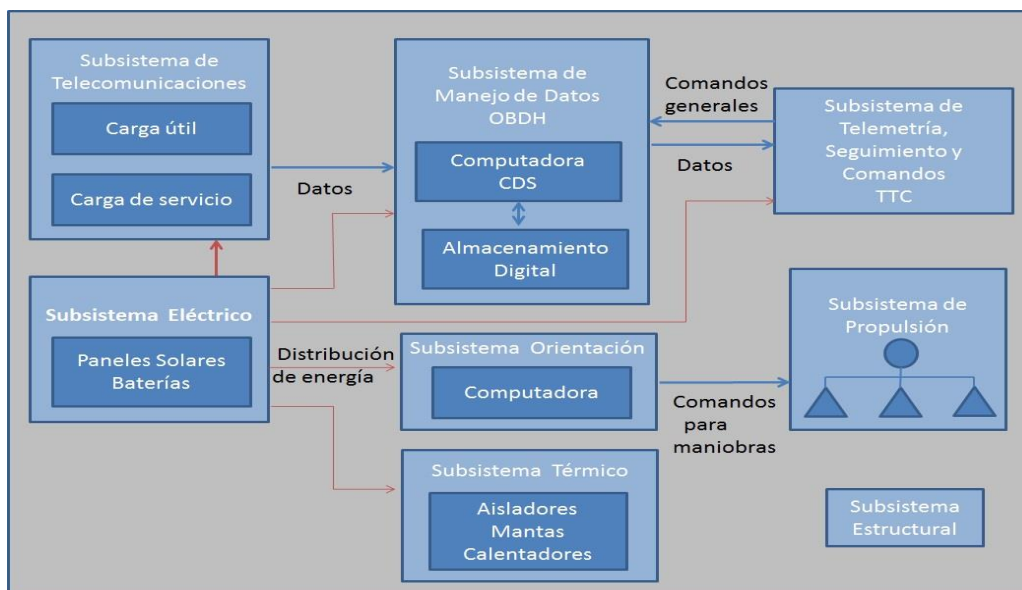


Fig. 1-3 Principales subsistemas y su interacción. Basado en [36].

Subsistema Estructural

El subsistema de estructura provee integridad mecánica al satélite. Debe asegurarse de que todos los componentes estén bien sujetos y puedan soportar el movimiento durante el manejo y transporte del satélite, así como el vuelo en caída libre y durante la operación de los propulsores [35].

El cuerpo del satélite es el elemento principal del subsistema estructural, ya que permite acoplar elementos de manera interna y externa, además de alojar a componentes delicados que requieren protección de elementos tales como la radiación solar o cambios bruscos de temperatura. También es usado como base para colocar tarjetas de circuitos eléctricos y elementos mecánicos.

La forma del mismo cuerpo del satélite también determina su geometría básica, así como los lugares en donde serán colocadas otras piezas de los subsistemas.

Subsistema eléctrico

Es el subsistema que se encarga de generar y distribuir energía eléctrica al satélite, asegurando así que la carga útil y los demás subsistemas puedan operar normalmente [4].

Incluye los arreglos de paneles solares, baterías, controles para los paneles solares, convertidores de potencia, control de carga de baterías, entre otros.

Subsistema de telemetría, seguimiento y comandos (TTC) y manejo de datos (OBDH)

El subsistema de telemetría, seguimiento y comandos establece el enlace de comunicación en Tierra; se descarga telemetría e información de la carga útil y se envían comandos de control para el satélite.

El subsistema de manejo de información a bordo procesa información, entre otras, de la carga útil y le da almacenamiento; también permite el intercambio de información entre subsistemas.

El equipo incluye transmisores, receptores, antenas, grabadoras y diferentes sensores de monitoreo.

Subsistema de orientación

Es usado para monitorear y controlar la velocidad y la orientación del satélite, alcanzando así el punto de misión del satélite.

Los componentes típicos del subsistema incluyen sensores solares, para la Tierra, para estrellas (en caso de requerir mucha precisión), ruedas de reacción o momentum, unidades de referencia inercial, unidades de medida inercial y la electrónica para controlar dichos elementos [36].

Subsistema de propulsión

Este subsistema otorga la capacidad de mover al satélite entre órbitas, así como controlar la órbita de la misión y la orientación del satélite mediante el uso de sistemas de cohetes en el mismo.

Los cohetes pueden ser de combustible sólido o líquido e incluso se usan propulsores de gas presurizado para dicha tarea. Los cohetes de combustible sólido son usados, generalmente, para colocar el satélite en su órbita final después de la separación con el vehículo de lanzamiento; los combustibles líquidos pueden ser usados para los ajustes de orientación y de órbita, aunque también pueden ser usados en la colocación del satélite en la órbita final.

Subsistema de control de temperatura

Es el encargado de generar un ambiente térmico adecuado para los diferentes subsistemas dentro del satélite asegurando su buen funcionamiento, en especial, la carga útil [4].

Lo anterior se logra mediante el uso de mantas aislantes, calentadores, refrigerantes e incluso con el acabado de en las superficies del satélite.

Subsistema de Telecomunicaciones (Carga útil).

La carga útil es el equipo del satélite destinado para cumplir los objetivos de la misión, por ejemplo, un telescopio, equipo de comunicación, cámaras etc.

Cuando la carga útil es para comunicaciones podemos hablar entonces del subsistema de Telecomunicaciones.

El subsistema de telecomunicaciones está constituido por transpondedores, así como por diferentes antenas, dependiendo de la banda de frecuencias en la que trabaje, moduladores y demoduladores, amplificadores, entre otros.

Este subsistema se encarga, principalmente, de brindar servicios de transmisión de voz, datos y contenidos de televisión.

Es importante hacer una distinción con respecto al subsistema de telemetría, ya que al ser el subsistema que mantiene comunicación con la estación de control a veces se le llama subsistema de comunicaciones.

1.2 Aspectos orbitales

La trayectoria que siguen los satélites artificiales alrededor de la Tierra sigue la misma dinámica que los planetas alrededor del Sol.

Estos movimientos han sido estudiados desde la antigüedad, siendo Johannes Kepler, a principios del siglo XVII, quien, a partir de observaciones astronómicas de Tycho Brahe, formuló los enunciados conocidas como leyes de Kepler para el movimiento planetario [2].

Posteriormente Newton estableció una formulación matemática para estas leyes a partir de sus leyes de gravitación y mecánica.

Estas leyes se enuncian a continuación para el caso de los satélites:

1. La órbita que describe el satélite alrededor del planeta es principalmente una elipse; además, el planeta ocupa uno de los focos de la misma.
2. El radio vector que une el satélite con el planeta barre, en el plano orbital, áreas iguales en tiempos iguales.
Otra forma de ver esto es que el satélite se mueve más rápido cuando se encuentra más cercano al foco que cuando está apartado de él.

3. El cuadrado del periodo de traslación (periodo orbital) es proporcional al cubo de la distancia media entre el satélite y el planeta (foco de la elipse), es decir, al semieje mayor de la elipse.

$$\frac{T^2}{r_m^3} = k$$

T es el periodo orbital
r_m es la distancia media (semieje mayor de la órbita)

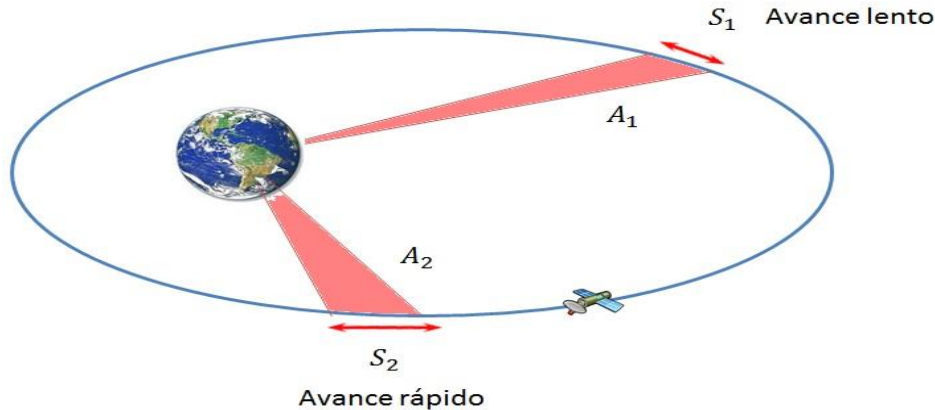


Fig. 1-4 Representación de la 2da ley de Kepler.

Como se ha discutido, la trayectoria que sigue un satélite artificial es elíptica, así que es conveniente mencionar algunos de los elementos, líneas y puntos asociados a ella.

En la tabla 1.1 se presentan elementos de la órbita, mientras que en la tabla 1.2 se encuentran los puntos y líneas de ella.

En la Fig. 1-5 se aprecian las líneas y puntos principales de la órbita.

Tabla 1.1 Elementos clásicos en una órbita.

Elemento	Símbolo	Descripción
Semieje mayor	a	Determina el tamaño de la órbita
Excentricidad	e	Determina la forma de la órbita
Inclinación	i	Orientan el plano de la órbita en el espacio
Ascensión recta del nodo ascendente	Ω	Orientan el plano de la órbita en el espacio
Argumento del perigeo	ω	Orientan el plano de la órbita en el espacio
Tiempo del perigeo o anomalía media en el tiempo inicial	τ, M_0	Definen el calendario con el cual el satélite sigue la órbita en una época específica

Tabla 1.2 Líneas y puntos de la órbita.

Término	Descripción
Apogeo	Es el punto de la órbita en el que el satélite se encuentra más alejado del planeta.
Perigeo	Es el punto de la órbita en el que el satélite se encuentra más cerca del planeta.
Línea de áspides	Es la línea imaginaria que une al perigeo y el apogeo pasando por el centro del planeta.
Plano ecuatorial	Es el plano imaginario que pasa por el Ecuador, perpendicular al eje de rotación del planeta y equidistante de ambos polos.
Nodo ascendente	Es el punto en el que la órbita cruza el plano ecuatorial de sur a norte.
Nodo descendente	Es el punto en que la órbita cruza el plano ecuatorial de norte a sur.
Línea de nodos	Es la línea imaginaria que une ambos nodos, pasando por el centro del planeta.

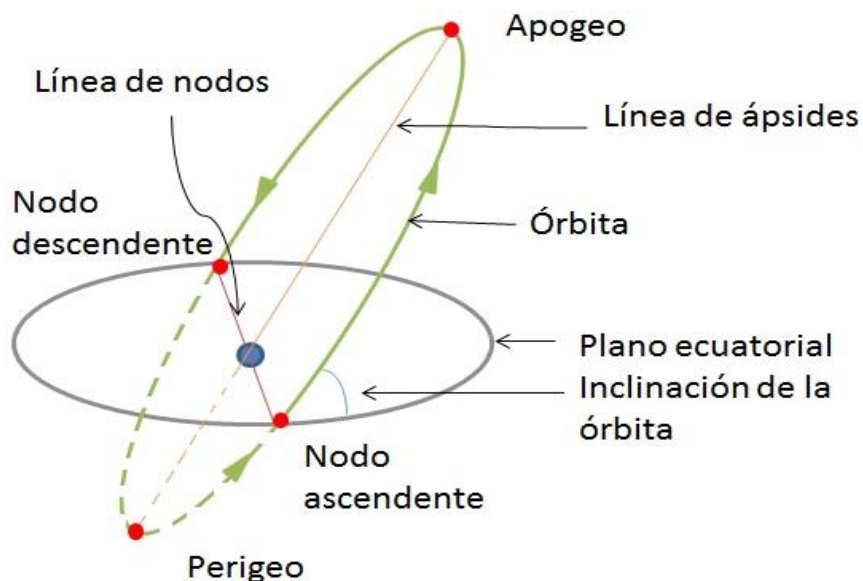


Fig. 1-5 Líneas y puntos en la órbita.

1.2.1 Formas de clasificar órbitas

Las órbitas satelitales pueden ser clasificadas de acuerdo a distintos parámetros a considerar sin que estos lleguen a ser excluyentes, es decir, una misma órbita puede entrar en diferentes categorías.

Usualmente las órbitas de los satélites artificiales se clasifican con respecto a los siguientes parámetros [2]:

- a) Sentido del giro
- b) Excentricidad
- c) Inclinación
- d) Periodo orbital
- e) Altitud

a) Sentido del giro

Esta forma se refiere a la dirección de movimiento del satélite y se dividen en órbitas prógradas y retrógradas.

Una órbita prógrada es aquella en la que el satélite se mueve en la misma dirección que el movimiento de rotación de la Tierra, es decir, de oeste a este; mientras que una órbita retrógrada es aquella en la que el satélite se mueve en la dirección opuesta, es decir, de este a oeste.

b) Excentricidad

La excentricidad es un valor asociado a las elipses, cuyo cálculo es derivado de la relación entre la distancia a uno de los focos de la misma y su semieje mayor.

Dependiendo del valor de la excentricidad es que cambia la forma de la órbita; cuando su valor es cero tenemos una órbita circular, mientras que si se encuentra entre los valores de 0 y 1 entonces la órbita es elíptica.

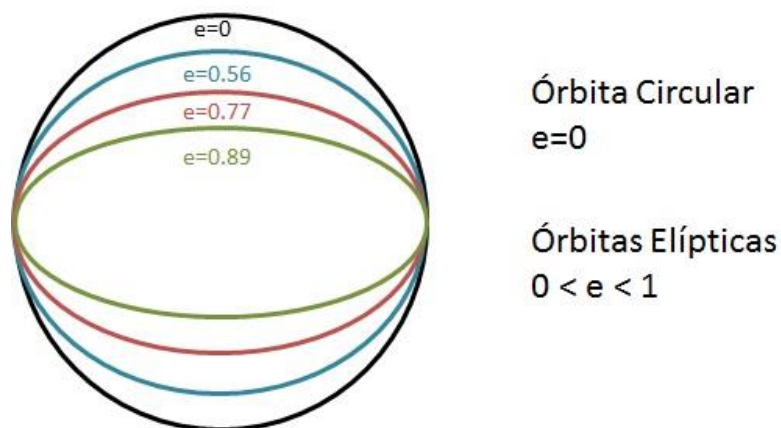


Fig. 1-6 Tipos de órbitas de acuerdo a su excentricidad.

c) Inclinación

Esta clasificación se refiere a la inclinación de la órbita con respecto al plano ecuatorial.

Si la órbita se encuentra en el mismo plano que el ecuador entonces se conoce como órbita ecuatorial y su ángulo de inclinación es de $i=0^\circ$; por otro lado, si la órbita tiene un ángulo de inclinación cercano a los 90° a la órbita se le conoce como órbita polar.

Las órbitas inclinadas son aquellas en las que el ángulo de inclinación se encuentra entre 0° y 90° o entre 90° y 180° .

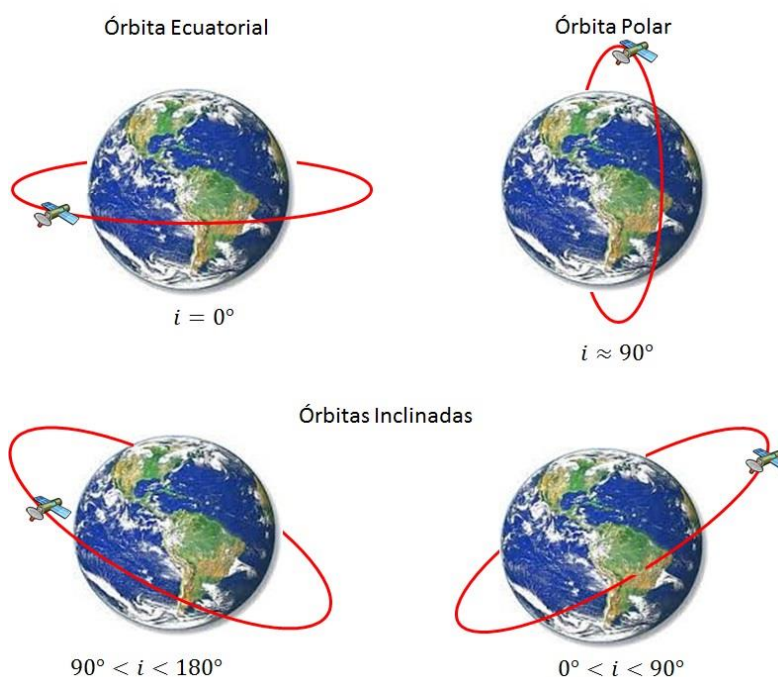


Fig. 1-7 Tipos de órbitas de acuerdo a su inclinación.

d) Periodo Orbital

Se refiere a la cantidad de tiempo que el satélite tarda en recorrer toda su órbita. De acuerdo a este lapso de tiempo, una órbita se considera subsíncrona, geosíncrona o supersíncrona.

Una órbita subsíncrona (o subsincrónica) es aquella cuyo periodo orbital es menor que el periodo de rotación del planeta, es decir, 24 horas.

Un caso especial es la órbita semisíncrona (o semisincrónica), cuyo periodo es de la mitad de un día terrestre o 12 horas (11 horas 58 minutos y 2.045 s).

Una órbita geosíncrona (o geosincrónica) es aquella cuyo periodo es de un día o 24 horas.

Por último, una órbita supersíncrona (o supersincrónica) es aquella cuyo periodo orbital excede las 24 horas.

e) Altitud

De acuerdo a la altitud con respecto a la superficie de la Tierra podemos clasificar las órbitas de la siguiente manera.

Órbita baja o LEO (Low Earth Orbit): son órbitas que se encuentran entre los 300 y los 800 km de altitud, por debajo del cinturón de Van Allen interno.

Órbita media o MEO (Medium Earth Orbit): órbitas que se encuentran entre los 5000 y los 15000 km y entre los 19000km y menos de los 35786 km; principalmente están entre el los cinturones interno y externo de Van Allen pero también, aunque en menor medida, a las afueras del cinturón externo.

Órbita alta o HEO (High Earth Orbit): son órbitas de altitud variable, ya que pueden ir desde los 600 km (en el perigeo) hasta los 40000 km (en el apogeo).

Órbitas geosíncronas o GSO y órbitas geoestacionarias o GEO: órbitas cuya altitud está a los 3600 km.

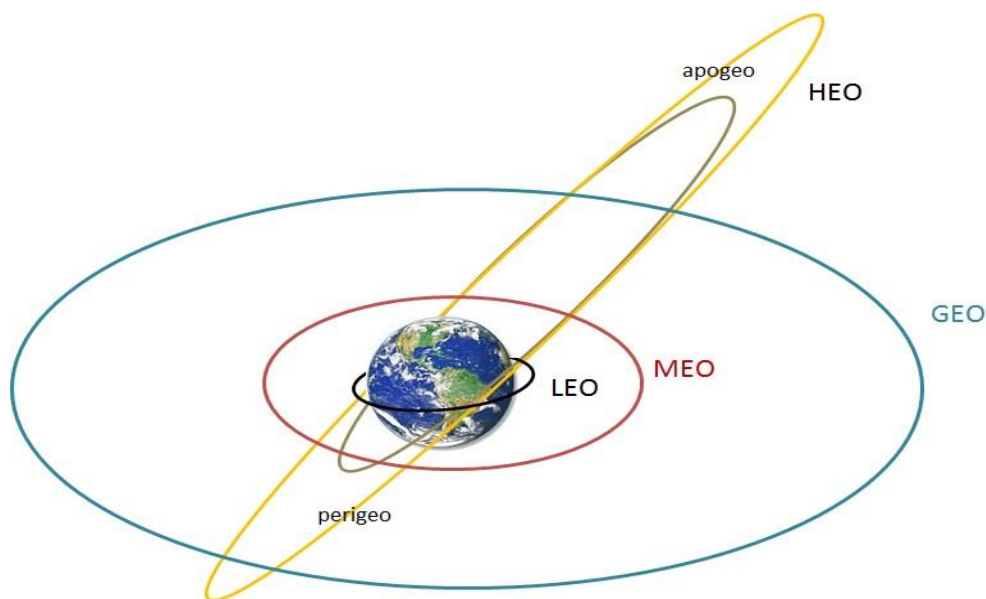


Fig. 1-8 Tipo de órbitas de acuerdo a su altitud.

Tanto la altitud como el periodo orbital están relacionados, ya que dependiendo de la altura a la que se encuentre la órbita su periodo orbital será diferente; a mayor

altitud le corresponde un mayor periodo orbital, mientras que a menor altitud el tiempo necesario para completar el recorrido disminuye.

En la Fig. 1-9 se presenta un esquema que ilustra la relación entre altura y periodo orbital. Se puede observar que el periodo de la órbita está relacionado con la altitud de la misma; las órbitas bajas y algunas órbitas medias tienen un periodo menor de un día, mientras que más elevadas pueden tener un periodo de medio día o incluso de un día entero, como es el caso de la órbita geoestacionaria.

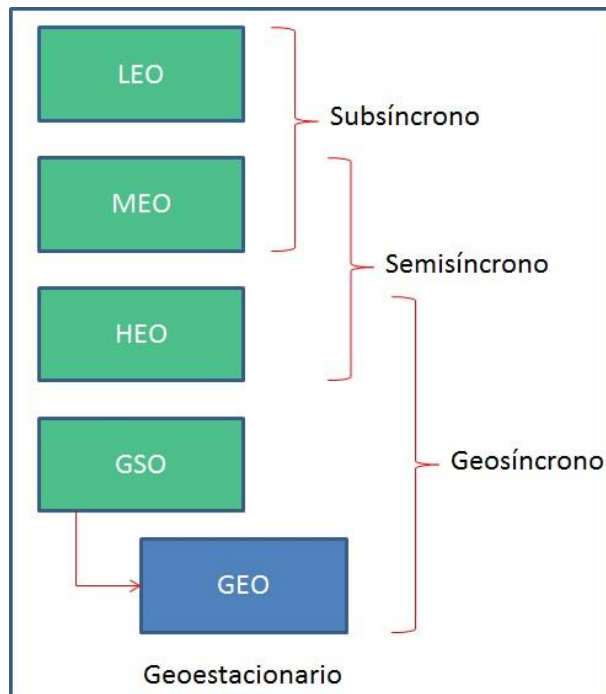


Fig. 1-9 Relación Altitud-Periodo.

1.2.2 Mecánica orbital: ecuación, velocidad y periodo orbital.

Para determinar la ecuación, el periodo y la velocidad orbital tenemos que remontarnos a la ley de atracción gravitacional y la segunda de movimiento de Newton, pues son la base en la que se sustenta la teoría de la mecánica orbital.

La ley de atracción establece que la fuerza de atracción entre dos cuerpos depende del producto de sus masas, así como de la distancia que los separa; con M como la masa del cuerpo de mayor tamaño, m la masa del cuerpo de menor tamaño, G es la constante de gravitación de la Tierra y r es la distancia lineal que une los centros de ambos cuerpos.

$$\vec{F} = -\frac{GMm\vec{r}}{r^2 r} \quad eq(1.2)$$

Por otro lado, la ley del movimiento determina que la aceleración sobre un cuerpo es proporcional a la fuerza aplicada e inversamente proporcional a su masa.

En este caso m es la masa del cuerpo, a es la aceleración y v es la velocidad del cuerpo.

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad eq(1.3)$$

Con las ecuaciones anteriores en mente podemos discutir el problema de los dos cuerpos, como se le conoce comúnmente, con el que se pueden encontrar resultados relacionados con satélites artificiales [5].

Definiendo un sistema de referencia (X,Y,Z) podemos ubicar dos cuerpos, uno de masa mayor que el otro, en donde cada uno actúa en el otro de acuerdo con las ecuaciones (1.2) y (1.3). En la Fig. 1-10 se observa el marco de referencia.

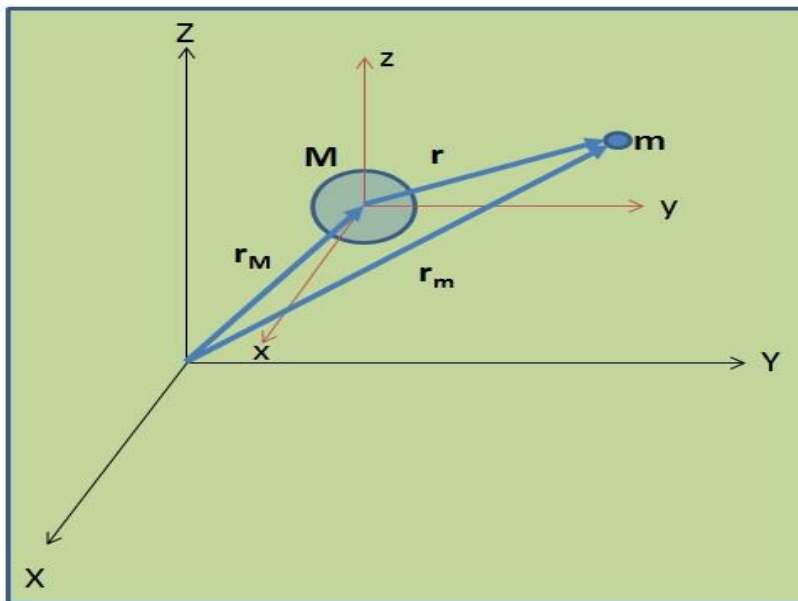


Fig. 1-10 Marco de referencia para dos cuerpos.

Si igualamos las ecuaciones (1.2) y (1.3) tenemos lo siguiente

$$m\vec{a} = -\frac{GMm}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad eq(1.4)$$

Con el conocimiento sobre la relación entre la posición y la aceleración (la aceleración como segunda derivada de la posición con respecto al tiempo), entonces podemos reescribir la igualdad anterior como:

$$m\ddot{\vec{r}} = -\frac{GMm}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad eq(1.5)$$

Escribiendo la ecuación (1.5) para cada cuerpo tenemos las siguientes igualdades

$$M\ddot{\bar{r}}_M = + \frac{GMm\bar{r}}{r^2 r} \quad eq(1.5 - a)$$

Y

$$m\ddot{\bar{r}}_m = - \frac{GMm\bar{r}}{r^2 r} \quad eq(1.5 - b)$$

De acuerdo al álgebra vectorial es posible identificar el vector que une ambos cuerpos como una suma de los vectores de cada cuerpo con respecto al sistema de referencia, es decir:

$$\bar{r} = \bar{r}_m - \bar{r}_M \quad eq(1.6)$$

A partir de la ecuación (1.6) podemos escribir una relación vectorial de las aceleraciones de ambos cuerpos al derivar dos veces ya que este operador es lineal. Tenemos entonces lo siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\frac{d}{dt} (\bar{r} = \bar{r}_m - \bar{r}_M) \right] \\ \frac{d^2 \bar{r}}{dt^2} = \frac{d^2 \bar{r}_m}{dt^2} - \frac{d^2 \bar{r}_M}{dt^2} \\ \ddot{\bar{r}} = \ddot{\bar{r}}_m - \ddot{\bar{r}}_M \quad eq(1.7) \end{aligned}$$

Usando las ecuaciones (1.5-a) y (1.5-b) podemos escribir la ecuación (1.7) en términos de las masas de ambos cuerpos.

$$\begin{aligned} \frac{m}{m} \ddot{\bar{r}}_m - \frac{M}{M} \ddot{\bar{r}}_M &= - \frac{GMm\bar{r}}{mr^2 r} - \left(+ \frac{GMm\bar{r}}{Mr^2 r} \right) \\ \ddot{\bar{r}}_m - \ddot{\bar{r}}_M &= - \frac{GM\bar{r}}{r^2 r} - \left(+ \frac{Gm\bar{r}}{r^2 r} \right) \\ \ddot{\bar{r}} = \ddot{\bar{r}}_m - \ddot{\bar{r}}_M &= - \frac{G(M+m)\bar{r}}{r^2 r} \\ \ddot{\bar{r}} &= - \frac{G(M+m)\bar{r}}{r^2 r} \\ \ddot{\bar{r}} &= - \frac{G(M+m)}{r^3} \bar{r} \quad eq(1.8) \end{aligned}$$

Donde:

M es la masa del cuerpo de mayor tamaño \bar{r} es el vector de aceleración entre ambos

m es la masa del cuerpo de menor tamaño G es la constante de gravitación

\bar{r} es el vector de posición entre ambos

La ecuación (1.8) es la ecuación vectorial diferencial para el problema de los dos cuerpos que relaciona la aceleración del cuerpo de masa menor con respecto al cuerpo de masa mayor, convirtiéndolo en un problema de un sólo cuerpo [5].

Esta consideración permite tratar el problema en un nuevo sistema de coordenadas con centro de referencia en el cuerpo de masa mayor.

En el caso de los satélites artificiales la parte de la ecuación $G(M + m)$ es aproximadamente igual a GM , pues la masa del satélite es mucho menor que la masa del planeta, lo que permite rescribir la ecuación (1.8) como

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GM}{r^2} \bar{\mathbf{e}}_r$$

El factor GM es conocido como μ y para la Tierra tiene un valor de $398,600.5 \text{ km}^3/\text{s}^2$. El término $\bar{\mathbf{e}}_r$ es el vector normalizado en dirección de $\bar{\mathbf{r}}$.

La ecuación (1.8) finalmente queda escrita como sigue

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mu}{r^2} \bar{\mathbf{e}}_r \quad eq(1.9)$$

La ecuación (1.9) es la ecuación diferencial fundamental usada en el estudio de satélites artificiales y a partir de ella se puede encontrar la ecuación de la órbita, que, haciendo las consideraciones pertinentes, se escribe de la siguiente manera

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos(\beta)} \quad eq(1.10)$$

A continuación se presentan las expresiones usadas para calcular la velocidad y el periodo orbital.

Para llegar a la ecuación de la velocidad se usa la relación de la conservación de la energía, mientras que para la ecuación del periodo su desarrollo se basa en la segunda ley de Kepler y el barrido de áreas iguales en tiempos iguales.

$$v = \sqrt{\mu \left(\frac{1}{r} - \frac{2}{a} \right)} \quad eq(1.11)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \quad eq(1.12)$$

En general, las ecuaciones (1.10), (1.11) y (1.12) se usan con cualquier órbita, siendo un caso especial las órbitas circulares en las que se simplifican un poco

debido a que el círculo es un caso específico de la elipse cuando la excentricidad es cero.

La deducción de las ecuaciones de posición, velocidad y periodo de la órbita requiere una serie de cálculos simples pero un poco extensos, por lo que, para fines de este escrito, no se describirá dicho desarrollo¹.

1.2.3 Órbitas Útiles

En la sección 1.2.1 ya se ha discutido acerca de las diferentes formas que existen para clasificar órbitas, por lo que aquí se presentarán brevemente las características y aplicaciones de las más utilizadas.

Órbitas bajas

Su geometría es casi circular, con un ángulo de inclinación, con respecto al plano ecuatorial, variable.

Su periodo oscila entre los 90 y los 100 minutos.

Las órbitas bajas son usadas para colocar diferentes tipos de satélites, por ejemplo, de reconocimiento, científicos, para observaciones astronómicas y de comunicaciones móviles.

En estas órbitas también se colocan los orbitadores y las estaciones espaciales.

Una de las ventajas de este tipo de satélites es que puede sobrevolar diferentes áreas geográficas del planeta mientras éste efectúa su movimiento de rotación, sin embargo, por cuestiones de la baja altitud y la inclinación de la órbita, no puede cubrir regiones que se encuentren en grandes latitudes norte y sur.

Órbitas Polares

Son órbitas de geometría circular con características muy similares a las órbitas bajas; su periodo de translación y altura son similares pero el ángulo de inclinación es 90° con el plano ecuatorial.

Entre sus aplicaciones más comunes están la colocación de satélites de percepción remota, meteorológicos y de comunicaciones móviles.

Este tipo de órbita tiene una gran ventaja con respecto a las órbitas bajas, pues debido a la inclinación con que cuenta le es posible sobrevolar cualquier región del planeta mientras éste efectúa su movimiento de rotación.

¹ Para una descripción de todo el desarrollo es conveniente revisar la referencia bibliográfica [5] en las páginas 34-39 del capítulo 2.

Órbitas intermedias

Estas órbitas también tienen una geometría circular y su ángulo de inclinación con respecto al plano ecuatorial es variable, por lo que comparten ese rasgo con las órbitas bajas, sin embargo, la altitud es mayor, por lo que el periodo aumenta de manera inherente.

En estas órbitas se colocan sistemas de satélites para comunicaciones móviles y también los sistemas de navegación; los sistemas GPS, GLONASS y Galileo operan en este tipo de órbitas.

Las órbitas medias presentan una gran ventaja con respecto a las órbitas bajas, pues al tener una altitud mayor pueden cubrir cualquier región del planeta cuando éste efectúa su movimiento de rotación.

También presenta una ventaja con respecto a las órbitas polares porque puede la huella de cobertura de un satélites en esa órbita es mayor que la huella de las otras órbitas, por lo que se necesitaría un menor número de satélites para cubrir todo el planeta.

Órbitas Geoestacionarias

Es una órbita circular, con un ángulo de inclinación de 0° , por lo que se encuentra en el plano ecuatorial, y su periodo es de 24 horas, al igual que el periodo de rotación de la Tierra.

Las aplicaciones principales para este tipo de órbitas son satélites de comunicaciones y satélites meteorológicos.

Los satélites que se encuentran en esta órbita tienen la ventaja de que parecen permanecer fijos en el cielo con respecto a los observadores en la Tierra, esto porque el satélite se mueve con la misma velocidad a la que la Tierra completa su movimiento de rotación.

Al parecer un punto fijo esto permite que las antenas en Tierra no necesiten una orientación constante para apuntar al satélite.

Estos satélites en esta órbita también tienen una huella de cobertura mayor, por lo que con sólo 3 de ellos se puede ofrecer una cobertura a nivel mundial [1].

A pesar de todas las ventajas que pueda presentar la órbita también tiene ciertas desventajas, por ejemplo, al tener una altitud mucho mayor se crea un retraso en la señal que comienza a ser perceptible, sobre todo en las comunicaciones móviles, además, debido que se encuentra en el plano ecuatorial, los satélites en esta órbita no cubren regiones que se encuentran a una latitud muy al norte o al sur, generalmente a un ángulo de inclinación mayor a 70° [2].

Órbitas elípticas muy altas

Estas órbitas, a diferencia de las órbitas anteriores, no tienen una geometría circular, sino una geometría elíptica con una gran excentricidad; su ángulo de

elevación con respecto al plano ecuatorial es muy elevado aunque no llega al de una órbita polar; y su periodo de traslación es de alrededor de 12 horas.

La altitud de estas órbitas cambia en el apogeo y el perigeo, siendo muy grande en el primero y muy pequeña en el segundo.

En órbitas de este tipo se colocan satélites científicos, así como satélites de comunicaciones que sirven a regiones en latitudes muy al norte o al sur.

Para compensar el hecho de que una órbita geoestacionaria no tiene cobertura en regiones de gran latitud se ideó este tipo de órbitas, sin embargo, un solo satélite no parece estar fijo, por lo que se requiere de tres satélites para que la comunicación no se interrumpa y así la antena no necesita reorientarse. Cada satélite parece geoestacionario en la región por un periodo de ocho horas, después, en el lapso siguiente un satélite sale de posición mientras que un relevo toma su lugar.

En Rusia se utilizan este tipo de sistema Molniya para comunicaciones [2].

1.3 Servicios ofrecidos y principales bandas de frecuencias

Los servicios ofrecidos vía satélite son servicios de radiocomunicaciones; un servicio de radiocomunicación está caracterizado por la manera en que las estaciones operan el servicio y no por la información o mensaje transmitidos entre estaciones [2].

En la Fig. 1-11 se muestra un esquema con los principales servicios de radiocomunicación por satélite.

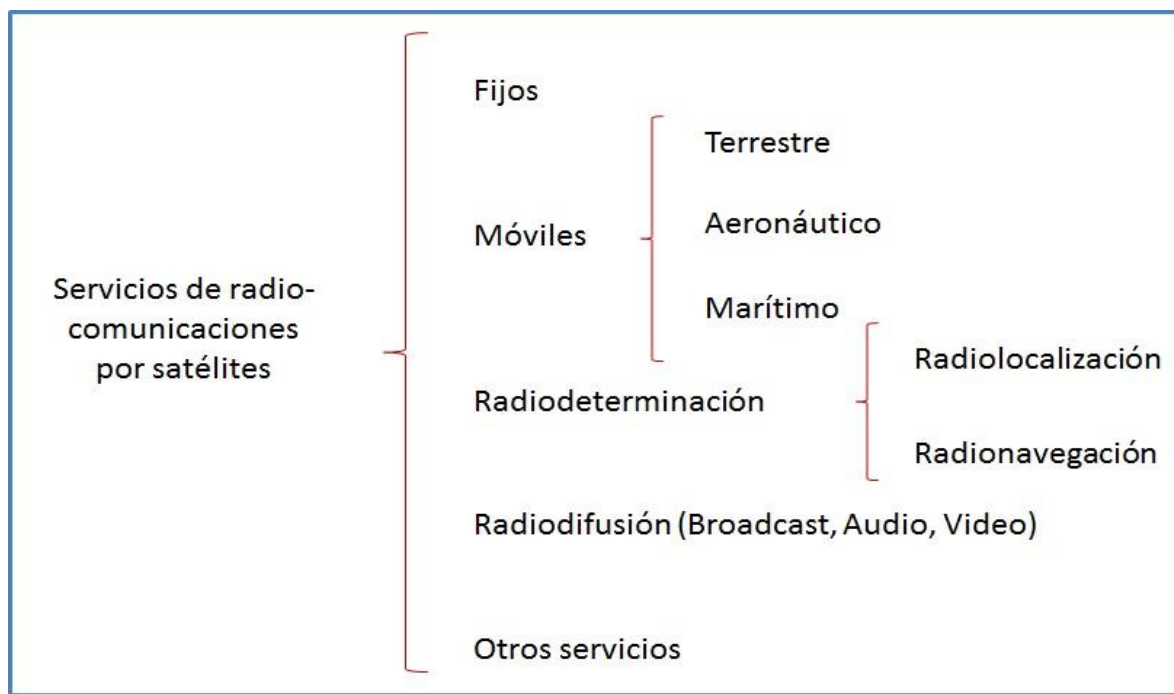


Fig. 1-11 Servicios de radiocomunicación por satélite.

1.3.1 Servicios fijos satelitales (FSS-Fixed Satellite Service)

Los servicios fijos son servicios de radiocomunicación entre dos o más posiciones dadas en la superficie de la Tierra usando al menos un satélite.

Las estaciones terrestres pueden estar en una posición determinada o pueden estar en cualquier posición de un área determinada [6].

El término fijo no significa necesariamente que la estación terrena no se mueva, sino que no lo hace cuando está en uso [7].

En la Fig. 1-12 se muestra el servicio fijo de satélite en forma genérica.

Los servicios fijos también incluyen los enlaces de alimentación/fuente de una estación localizada en un lugar determinado hacia una estación espacial o viceversa, llevando información para servicios de radiocomunicación diferentes a los servicios fijos; por ejemplo, los enlaces de subida para servicio de radiodifusión, y los enlaces, de subida y bajada, entre las estaciones terrenas y los satélites de servicios móviles.

Estos tipos de servicios soportan diferentes tipos de aplicaciones, ya sea telefonía, mensajes de fax, datos, televisión o programas de audio.

El mayor uso de frecuencias para este servicio está en las bandas C y Ku, aunque también es usada la banda X, con propósitos militares y gubernamentales.



Fig. 1-12 Servicio fijo satelital.

1.3.2 Servicios móviles satelitales (MSS-Mobile Satellite Service)

Los servicios móviles satelitales son servicios de radiocomunicaciones entre estaciones terrenas móviles y al menos una estación espacial, o entre estaciones terrenas móviles a través de una o más estaciones espaciales.

Estos servicios incluyen comunicaciones marítimas, aeronáuticas y terrestres.

La Fig. 1-13 ilustra este tipo de servicios.

En su mayoría están destinados para llamadas telefónicas, aunque también, en ocasiones, llevan datos de baja velocidad.

Actualmente las estaciones terrenas pueden ser muy pequeñas, e incluso ser equipos de mano, como los teléfonos satelitales [6].

Los sistemas satelitales móviles operan a frecuencias menores que otro tipo de servicios, esto debido a que los usuarios se encuentran en constante movimiento y pueden localizarse bajo cualquier tipo de condición climática, por lo que las frecuencias bajas resultan atractivas debido a que son menos afectadas por la atmósfera.

Los sistemas LEO que transportan solamente datos (Little LEO) usan frecuencias en las bandas UHF y VHF, mientras que los sistemas LEO de telefonía y datos (Big LEO) usan frecuencias en las bandas L y S [7].

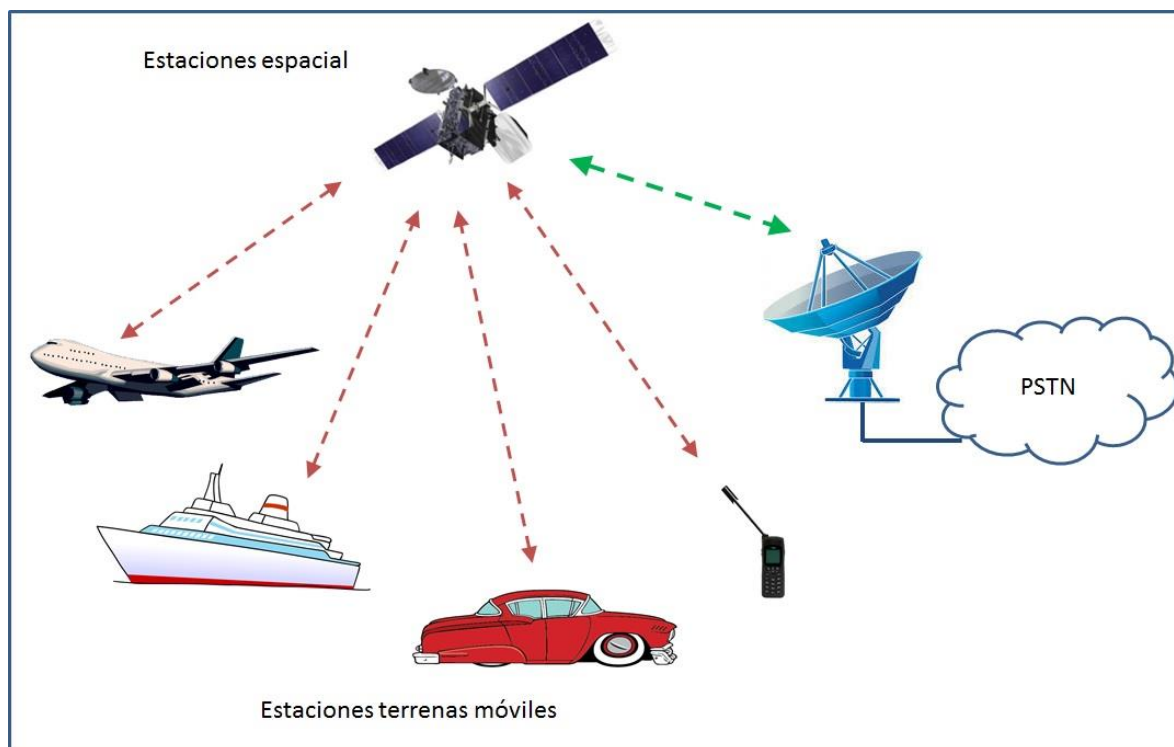


Fig. 1-13 Servicios móviles satelitales.

1.3.3 Servicios de radiodifusión satelitales (BSS-Broadcasting Satellite Service)

Los servicios de radiodifusión por satélite son servicios en las que las señales transmitidas a través de las estaciones espaciales son destinadas para que el público en general las reciba de forma directa a través de antenas muy pequeñas (actualmente las antenas para recepción de televisión satelital son muy pequeñas comparadas con las usadas hace 15 años, ya que la banda de frecuencia usada ha cambiado, e incluso pueden ser aún más pequeñas con el uso de satélites en banda Ka).

La recepción directa engloba tanto la recepción individual (DTH-Direct to home TV) como la recepción comunitaria (CATV-Cable television network y SMATV-Satellite master antenna TV) [6].

En la Fig. 1-14 se ilustra el servicio de radiodifusión.

Las frecuencias que tienen un mayor uso en este tipo de servicio se localizan en las bandas C y Ku, aunque también existe un pequeño espacio en la banda Ka. La banda C utiliza los rangos de 3.4-4.2 GHz y 5.9-6.4 GHz en los enlaces descendente y ascendente respectivamente [70], mientras que la banda Ku usa los espacios de 14.5-14.8 GHz en el enlace ascendente y 11.7-12.2 GHz en el enlace descendente, con un espacio alternativo para el enlace ascendente en el rango de 17.3-18.1 GHz [8]. Finalmente la banda Ka tiene un espacio designado en las frecuencias de 21.4-22 GHz y 24.65-25.25 GHz para los enlaces descendentes y ascendentes respectivamente [29].

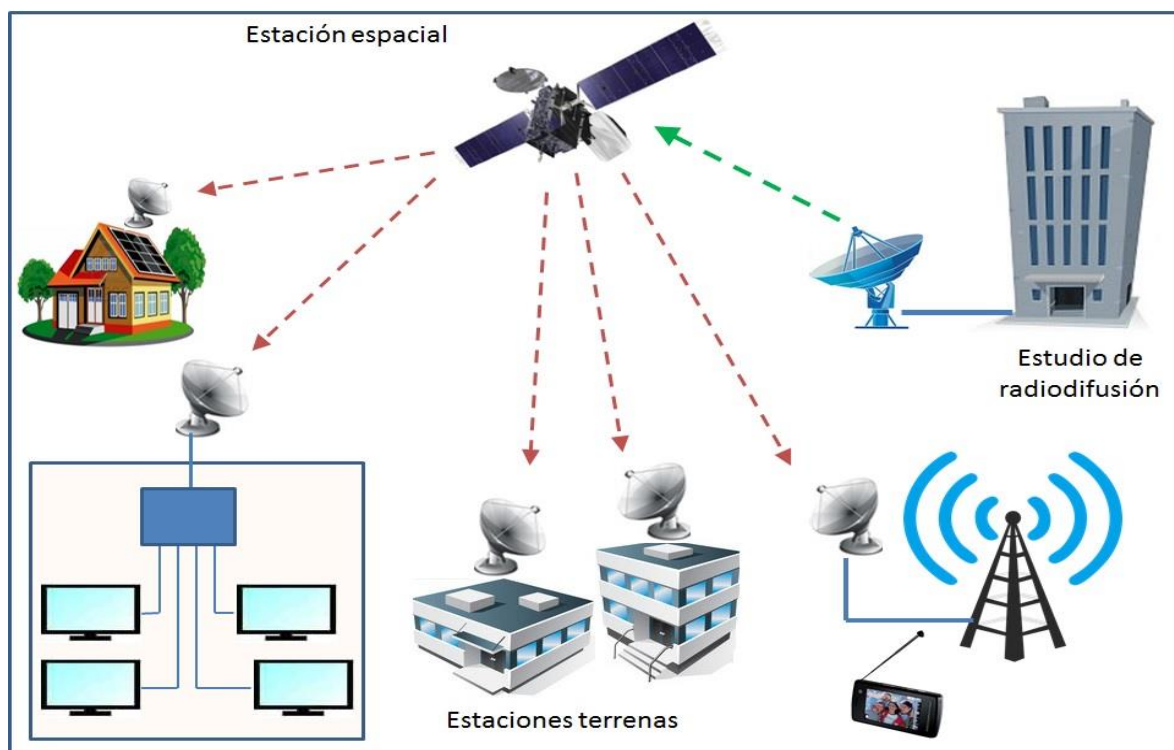


Fig. 1-14 Servicio de radiodifusión satelital.

1.3.4 Sistemas de radiodeterminación satelital (RDSS-Radiodetermination Satellite System)

Los servicios de radiodeterminación pueden dividirse en dos; servicios de radiolocalización y servicios de radionavegación.

El servicio de radiolocalización es diseñado para que los usuarios tengan la habilidad de conocer y reportar su posición.

En algunos casos el sistema puede utilizar servicios de radionavegación terrestre convencionales para encontrar la posición, mientras que en otros usa en enlace de navegación que es parte del sistema.

Una vez que se tiene la información sobre la posición ésta es enviada a través del satélite hacia la oficina central que procesa la información.

El servicio de navegación es usado exclusivamente para navegación y es muy poco usado actualmente.

Los servicios de radiodeterminación, en específico la radiolocalización, fueron desarrollados en un inicio con propósitos militares y, con el paso del tiempo, se han hecho accesibles a los usuarios civiles, siendo muy populares debido a su precisión y facilidad de uso.

Este tipo de servicio utiliza la banda L para la comunicación entre el usuario móvil y el satélite (en el enlace de subida), la banda S para la navegación (en el enlace de bajada) y el enlace entre el satélite y las instalaciones de control se da en la banda C [7].

1.3.5 Servicios Inter-satelitales (ISS- Inter-Satellite Services)

Este tipo de servicio hace referencia a una radiocomunicación entre satélites, por lo tanto, no es un servicio para usuarios finales, sin embargo, es útil porque es una forma en la que los operadores de los satélites pueden enrutar el tráfico [7].

Los enlaces inter-satélite del servicio pueden ser desplegados para proveer conexión entre estaciones terrestres en el área de servicio de un satélite hacia estaciones terrestres en el área de servicio de otro satélite cuando ninguno de los dos satélites cubre ambas áreas.

Este tipo de servicios está autorizado en la banda Ka.

2.- COMPARACIÓN ENTRE SATÉLITES EN BANDAS Ku Y Ka.

Desde las últimas décadas han surgido nuevas y cada vez más demandantes aplicaciones en los servicios satelitales de comunicación, lo que ha ocasionado que el espectro disponible en las bandas de frecuencias utilizadas tradicionalmente (banda L, banda S y banda C) comenzara a congestionarse.

De manera complementaria, a la situación anterior, el espectro disponible continuará escaseando en tanto que las áreas del mundo con menos desarrollo aumenten su demanda por comunicaciones.

En el desarrollo de mejoras en la industria satelital, ya sea que se trate de las estaciones VSAT (Very Small Aperture Terminal) y USAT (Ultra Small Aperture Terminal), transmisión de contenidos de televisión (Direct-to-Home) mediante los sistemas satelitales de radiodifusión o la extensión de sistemas satelitales de comunicaciones a órbitas diferentes a la geoestacionaria todas estas aplicaciones tienen o tendrán la necesidad de operar en bandas de frecuencias cada vez más altas para poder alcanzar los crecientes requerimientos de cada servicio [17].

Lo anterior ha llevado a la implementación de sistemas en bandas de frecuencias como la Ku y Ka (que son la que interesan a efectos de este capítulo).

Los sistemas en las bandas Ku y Ka son diferentes en muchos aspectos, como el ancho de banda del transpondedor, el tamaño del haz, costos, entre otros, sin embargo, ambos son usados en aplicaciones de diferentes servicios fijos, móviles y de radiodifusión.

Los sistemas que operan en banda Ku han sido desplegados en mayor número y se han colocado de manera extensiva sobre la órbita geoestacionaria aunque el número de sistemas operando en la banda Ka se incrementa rápidamente.

Hace más de 10 años que las redes satelitales para servicios móviles han utilizado, de manera cada vez más importante, la banda Ku y, a su vez, la atención que se le da a la banda Ka para implementar estos y otros servicios también aumenta [16].

Estos sistemas, si bien son de relativa reciente implementación, fueron concebidos mucho antes de poder ser puestos en marcha debido, en parte, a las limitaciones técnicas de su generación, así como a la poca conveniencia de desplegar sistemas tan costosos, en ese momento, cuando aún se tenían sistemas trabajando en otras bandas de frecuencia que cubrían muy bien las necesidades de la época.

Es necesario mencionar que el surgimiento de un sistema en una banda de frecuencia más alta no significa la desaparición de los sistemas que hacen uso de frecuencias más bajas, en realidad, depende mucho de la aplicación para la que se tengan considerados y de la forma en la que sean utilizados; incluso puede combinarse el uso de más de una banda de frecuencia para lograr cierto desempeño o mitigar algunos problemas.

En este capítulo se exploraran algunas de las ventajas y desventajas que se presentarán al hacer uso de un sistema satelital en la banda Ka con respecto a un

sistema en la banda Ku. Al final del capítulo se muestra una tabla comparativa a forma de resumen.

2.1 Ventajas de la banda Ka

2.1.1 Espectro radioeléctrico libre

Una de las ventajas que ofrece la banda Ka es el lugar que ocupa en espacio radioeléctrico y, por consiguiente, la banda de frecuencia que cuenta a su disposición. Al combinar lo anterior con el hecho de que los servicios en la banda no se encuentran altamente congestionados, esto incrementa su atractivo para implementar un sistema satelital.

Si comparamos la banda Ka con las bandas de comunicaciones más antiguas, como las bandas L, S y C, podemos notar que el espacio disponible para la transmisión es sustancialmente mayor, incluso, si consideramos la banda Ku en la comparación, la banda Ka aún es capaz de sobrepasar el rango de frecuencia disponible.

Mientras que la banda L tiene un espacio designado de alrededor de 1 GHz para los enlaces de subida y bajada, la banda S cuenta con un espacio de 2 GHz y la banda C tiene un espacio de 4 GHz disponibles. Las tres bandas combinadas tienen un rango casi igual al de la banda Ku, que es de 6 GHz, sin embargo, la banda Ka, en términos brutos, es capaz de albergar todas las bandas anteriores dentro de su rango de frecuencias.

Si consideramos que existe un espacio reservado en la banda de frecuencia para su uso gubernamental, esto reduce la cantidad total de espacio disponible, sin embargo, aún se dispone de una amplia gama de frecuencias para su uso.

En la Fig. 2-1 se puede apreciar la división de las bandas de frecuencias, de acuerdo con la UIT y la IEEE, así como su tamaño relativo en comparación.

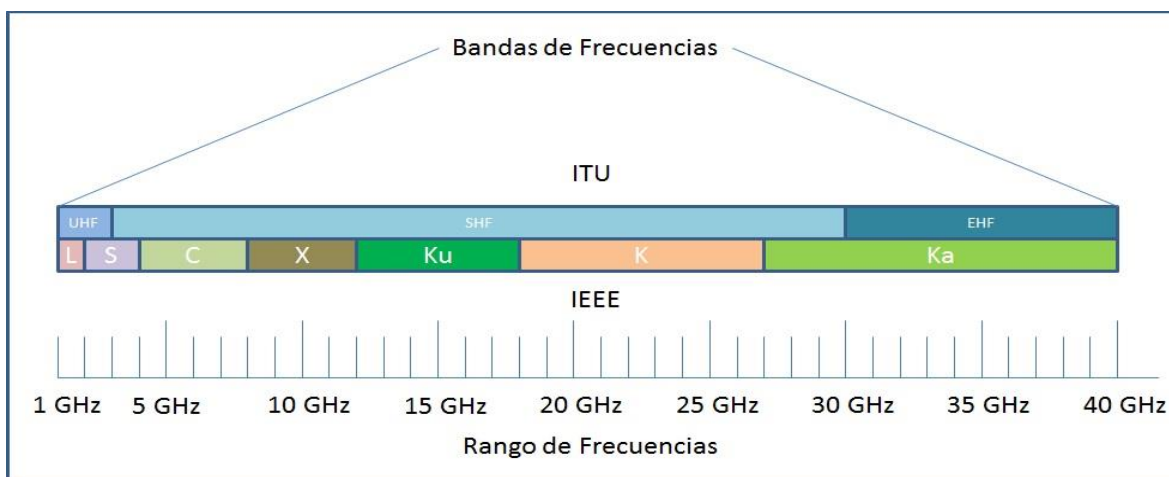


Fig. 2-1 Rangos de frecuencias asignados para cada banda.

2.1.2 Ancho de banda del canal

Como se mencionó en el apartado anterior, el bloque de frecuencia que se dispone en la banda es mucho mayor, lo que impacta también en el ancho de banda del canal para el servicio en cuestión, esto es, si se trata de un servicio fijo, móvil o de radiodifusión.

Al considerar un enlace satelital de servicio fijo, nos encontramos con que los satélites de banda Ka tienen una ventaja con respecto a satélites en las bandas inferiores, como C o Ku, pues éstos tienen un ancho de banda de 500 MHz para cada enlace (ascendente y descendente), mientras que en la banda Ka el ancho de banda es de 3500 MHz, es decir, se tiene un ancho de banda siete veces superior.

Cabe mencionar que la banda Ku tiene otro bloque de 500 MHz asignado, lo que le daría un total de 1000 MHz, aunque está designado para el servicio de radiodifusión [8].

En la tabla 2.1 se muestran los bloques de frecuencias asignados para los servicios fijos y de radiodifusión con satélites geoestacionarios en el continente americano para las bandas C, Ku y Ka.

Tabla 2.1 Bloques de frecuencias de servicios, fijo y de radiodifusión, para satélites geoestacionarios en el continente americano en las bandas C, Ku y Ka.

Banda	Enlace ascendente [GHz]	Enlace descendente [GHz]	Servicio
C (6/4 GHz)	5.925-6.425	3.700-4.200	Fijo
Ku (14/12 GHz)	14.0-14.5	11.7-12.2	Fijo
	17.3-17.8	12.2-12.7	Radiodifusión
Ka (30/20 GHz)	27.5-31.0	17.7-21.4	Fijo

2.1.3 Ancho del haz

Una de las características que siempre se menciona en los sistemas que operan en la banda Ka es el ancho del haz.

Históricamente, la tendencia, en este sentido, es que mientras más alta es la frecuencia de operación menor es el ancho de haz.

Lo anterior es debido a que el ancho del haz tiene que ver directamente con la longitud de onda de la señal (que involucra a la frecuencia de operación) y el diámetro de la antena [1].

$$\theta_{-3dB} = 70 \frac{\lambda}{D} [^\circ] \quad eq (2.1)$$

De acuerdo a la ecuación (2.1), el ancho del haz está delimitado por la región en la que la potencia cae a la mitad (3 dB) y es proporcional a la relación entre la longitud de onda y el diámetro de la antenna.

La frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de onda, por lo que mientras que la frecuencia aumenta en la banda Ka la longitud de onda es cada vez menor y así el ángulo que ocupa el ancho del haz también decrece.

El hecho de que el ancho del haz sea menor es importante ya que esto permite crear antenas más directivas, es decir, la potencia se concentra en un área más pequeña, por lo que no se requiere de grandes antenas en la recepción.

También, gracias a los haces más directivos, es posible de la técnica de reuso de frecuencia

En la Fig. 2-2 se aprecia el ancho del haz y su relación con el diámetro de la antenna.

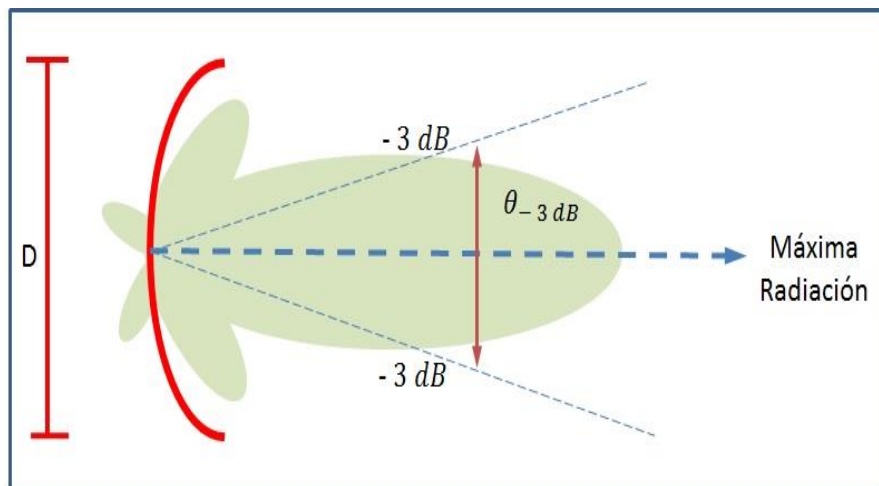


Fig. 2-2 Ancho de haz de la señal

Por otra parte, a pesar de la gran cantidad de espacio en frecuencia que se tiene, la banda no se puede usar de manera arbitraria.

Dependiendo del tipo de servicio que va a ofrecerse y de la cantidad de datos que se transmitirán, es decir, si son sistemas de alta o baja tasa de transferencia.

Con una cantidad determinada de frecuencias para usar, el hecho de que el ancho del haz sea más pequeño es favorable, ya que se puede utilizar la técnica de reuso de frecuencia para lograr una capacidad de envío mayor.

La situación guarda alguna similitud a la que se presenta dentro de los sistemas de comunicación móvil vía celular; una cierta cantidad de ancho de banda se asigna para que transmita la información de un determinado número de usuarios en la zona a través de las frecuencias asignadas para la transmisión y recepción, mientras que en las zonas adyacentes se usan diferentes frecuencias para evitar que exista algún tipo de interferencia. En zonas más alejadas se utilizan de nuevo las mismas frecuencias, ya que a una distancia prudente no existirá interferencia y

no se requerirá el uso de más espectro para transmitir, aprovechando de una mejor manera los recursos disponibles.

En el caso de los satélites esto funciona de manera similar, aunque la transmisión se efectúa de manera directa (apuntando hacia una zona en específico).

En una determinada zona geográfica a cubrir se pueden apuntar varios haces sin que haya interferencia entre ellos porque cada uno utilizará una frecuencia (de subida y bajada) diferente, habrá un ligero traslape en las regiones de transición para asegurar que no se interrumpa la comunicación pero esto no afectará la transmisión.

En la Fig. 2-3 se ilustra el reuso de frecuencia usado tanto en los sistemas satelitales y su comparación con los sistemas celulares.

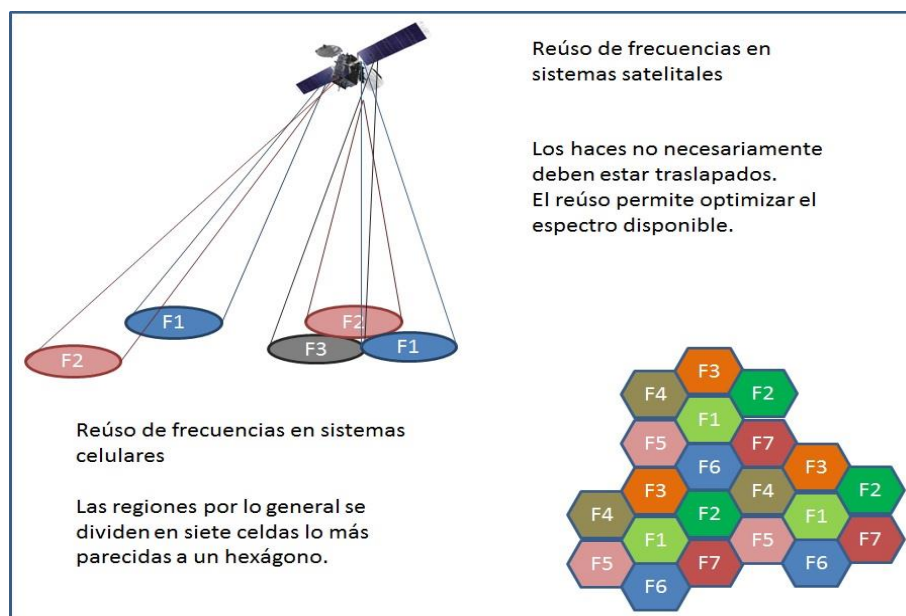


Fig. 2-3 Reúso de frecuencia en sistemas celulares y satelitales.

Un inconveniente menor es que se requieren un mayor número de antenas para cubrir la zona o al menos una pequeña cantidad de antenas reconfigurables para cubrir las diferentes posiciones.

2.1.4 Menor interferencia inter-satelital

Cuando se trata de interferencia ocasionada por los satélites adyacentes, los satélites en la banda Ka tienen una situación favorable con respecto a los sistemas en la banda Ku.

Por ejemplo, hablando de la órbita geoestacionaria (órbita de mayor interés para colocar un sistema satelital de nueva generación) los satélites colocados en ella deben tener un espaciamiento de un par de grados para no producir una interferencia entre sí debido a que las antenas ocupan un mayor volumen y deben ser diseñadas para que no transmitan hacia otros satélites sin querer [37].

Actualmente la órbita comienza a llenarse con satélites en esa banda por lo que, a un futuro cercano, sería difícil seguir colocando este tipo de sistemas ya que el espaciamiento entre ellos no sería el adecuado.

Por otro lado, los sistemas que trabajan en la banda Ka no tendrían ese problema, ya que, en primer lugar, no hay tantos sistemas desplegados, lo que evita el congestionamiento de la órbita y, en segundo lugar, los satélites no ocupan tanto espacio debido al hecho de utilizar antenas más pequeñas para transmitir.

Todo lo anterior permite que los satélites de banda Ka sean colocados a una distancia más alejada para asegurarse de disminuir la interferencia (con el espaciado adecuado puede disminuir a la mitad) e incluso, si la órbita comienza a saturarse, los nuevos satélites pueden colocarse un poco más cerca sin que esto cause un problema mayor.

2.1.5 Menor costo del ancho de banda

El hecho de usar frecuencias más altas también brinda un elemento más conveniente para los usuarios: la cantidad de ancho de banda disponible aumenta drásticamente comparado con otros sistemas.

Considerando a los satélites ACTS (Advanced Communications Technology Satellite), los transpondedores cuentan con una capacidad de 900 MHz², si comparamos esto con los transpondedores comunes con un ancho de banda de 36 MHz tenemos una capacidad 25 veces mayor, lo que hace evidente la cantidad de recursos superiores.

Aún si no tomamos los transpondedores con mayor ancho de banda, por ejemplo, considerando un valor de 128 MHz, al compararlo con transpondedor en la banda Ku de 54MHz, al menos podemos obtener un ancho de banda del doble.

Es posible, gracias a los transpondedores, transferir cantidades de información totales muy elevadas en la banda Ka con respecto a los sistemas en banda C y Ku: para México, así como para los Estados Unidos, los satélites ofrecen una tasa de 10 Gb en total, mientras que los satélites Intelsat son capaces de proporcionar 28 Gb; en cambio, los sistemas satelitales como Jupiter, Viasat y Kasat pueden fácilmente proporcionar 100 Gb, es decir, sobrepasan diez veces las capacidades de los satélites en México y Estados Unidos, y, al menos, triplican lo que pueden hacer los sistemas Intelsat [1].

Hasta ahora se ha visto como estos sistemas proporcionan una ventaja en cuanto a ancho de banda y transferencia de información, pero también se debe analizar cómo influye en el costo del servicio para los usuarios; de nada sirve que la capacidad de los sistemas sea tan grande si el costo se incrementará a niveles que lo hagan poco atractivo.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, los sistemas en la banda Ka permiten explotar un mayor ancho de banda en los transpondedores, sin embargo, los servicios que se ofrecen no requieren de una mayor cantidad de bits debido al aumento en la frecuencia, por lo que el servicio puede ser ofrecido a una mayor

² Valor tomado de la referencia [15] en la página 136.

cantidad de usuarios y, a su vez, disminuir el costo del servicio debido al número de suscriptores que se tienen ocupando ese bloque de frecuencia, es decir, mientras más usuarios el costo del servicio disminuye porque se divide entre un número mayor. Además, con el reuso de frecuencia, ese mismo bloque puede ser explotado en más de una ocasión, lo que permite aumentar el número de suscriptores y seguir disminuyendo el costo.

Uno de los argumentos que existen en oposición de este punto de vista es que el costo disminuirá siempre y cuando exista en la región un gran número de suscriptores, sin embargo, si el número de usuarios no es tan amplio, entonces el costo del servicio tendrá que ser dividido entre un número menor, lo que ocasionará el repunte en el precio al suscriptor [37]. Esto sucede, por ejemplo, en una región que se encuentre en el mar, donde el número de usuarios es relativamente poco (ya sea que se encuentren en un barco o un avión con servicio satelital); entonces la relación costo-suscriptor no resulta tan eficiente, pues el operador tiene que proveer el servicio a un número bajo de usuarios pero esto no será una razón para que el costo sea menor.

Una posible forma de mitigar este problema sería el uso de antenas reconfigurables, es decir, antenas que pueden cambiar la forma del patrón de radiación para adaptarse a cierto tipo de circunstancias, y así modificar la cobertura del haz para evitar, tanto como sea posible, que se cubra una zona que no transmitirá o recibirá información.

Ciertamente el uso de estas antenas requiere de un análisis exhaustivo, tanto en el diseño de dichas antenas como en la decisión de implementar el sistema; dependiendo de estos análisis se determinará si es conveniente implementar todo eso para proveer el servicio o si es más conveniente buscar una opción más rentable en una banda de frecuencia diferente.

En el caso particular de este trabajo se analiza la forma de implementar un sistema para cobertura del país, por lo que la situación de la baja densidad de usuarios no debería crear un problema mayor.

2.2 Desventajas de la banda Ka

Es evidente que el utilizar un sistema en una banda de frecuencia mayor no puede tener ventajas sin que se presenten algunos inconvenientes, ya sea que estén asociados a la misma naturaleza de las señales o que otro tipo de factores externos contribuyan en detrimento de su funcionalidad.

2.2.1 Compromiso entre desempeño del enlace y cobertura

Se ha mencionado en líneas anteriores que la capacidad de usar los haces tan angostos como lo permiten las antenas y el reuso de frecuencia es beneficioso al alcanzar una mayor tasa de transmisión total, además de disminuir el costo del servicio, sin embargo, esto no ocurre en todos los casos, ya que a veces existe

una necesidad por cubrir un territorio de mayor tamaño y no es posible aprovechar las características del sistema.

En los últimos años, sectores en la industria de los satélites han batallado por emular características que fueron pensadas para los satélites de la banda Ka y aplicarlos a los sistemas en la banda Ku, de tal forma que se han concebido sistemas cuyos haces son más directivos a la vez que han incorporado transpondedores con mayor ancho de banda.

Por el contrario, en los sistemas en banda Ka también se han adaptado para poder ofrecer servicios en áreas que eran acaparadas por los sistemas Ku, principalmente en servicios de comunicación global en el mar, por lo que se implementaron haces con una mayor cobertura.

Al poder cubrir un territorio mayor se compromete el desempeño del enlace; lo mismo sucede en ambos sistemas, aunque cuando se hace un análisis del desempeño con una disponibilidad fija, en términos del ancho del haz los sistemas en banda Ku tienen un costo por bit por segundo más favorable que los sistemas en la banda Ka.

2.2.2 Cobertura

La mayoría de los satélites de banda Ka en operación son sistemas regionales y sólo cubren continentes específicos o regiones particulares de ellos, por lo que muchas veces se dice que uno de los problemas asociados a esta banda es su poca cobertura comparada con sistemas en otras bandas de frecuencia.

Los haces tan angostos tienen, por naturaleza, una cobertura limitada y cada uno puede alcanzar un área de algunos kilómetros cuadrados.

Para contrarrestar estos problemas, muchos sistemas utilizan varios haces para poder ofrecer una cobertura más amplia y así superar a aquellos operadores cuya cobertura es inferior.

En este sentido, tanto los satélites en banda Ku como los satélites en banda Ka utilizan haces que no son tan angostos (con los problemas que conlleva utilizarlos) y son mucho más atractivos a los haces angostos utilizados por satélites Ka que cubren regiones de entre el 10% y 15% en comparación [19].

En este caso, la cuestión de la cobertura puede ser solventada por los propios satélites en la banda (Ka), sin embargo, cuando se le combina la situación del bajo desempeño con la cobertura entonces los satélites Ku parecerían ser más atractivos.

2.2.3 Carencia de sistemas de respaldo

A diferencia de los sistemas en banda Ku, los satélites en banda Ka carecen de un respaldo significativo ante un problema con la comunicación entre la estación terrena y el satélite [37], es decir, si por alguna razón el satélite no pudiese desempeñar sus funciones de forma normal sería muy complicado que otro satélite pudiese reemplazarlo temporalmente debido a la poca cantidad de sistemas de banda Ka que están operando.

Por ejemplo, si la cobertura del satélite Amazonas en Sudamérica se interrumpiese sería imposible que otro satélite atendiera esa región debido a que no existen otros satélites de banda Ka que proporcionen servicio a esa región del continente.

En el medio de los sistemas Ku existen múltiples operadores, por lo que si se presenta un problema de comunicación es posible utilizar un satélite de respaldo sin mayor problema; si por alguna razón un problema en el satélite ocasiona la pérdida de uno de los haces, es posible disminuir los efectos al acomodar a los usuarios afectados en el área de cobertura de otro satélite.

En cambio, debido a que la mayoría de los servicios en la banda Ka están ofrecidos en redes cerradas, si un problema de este tipo se presenta es difícil sobrellevarlo porque estos sistemas pueden requerir algún tipo de módem específico o configuraciones que no están disponibles con otros proveedores.

En la Fig. 2-4 se ilustra la forma en que un satélite de respaldo entra en acción cuando la falla causa una pérdida de uno de los haces.

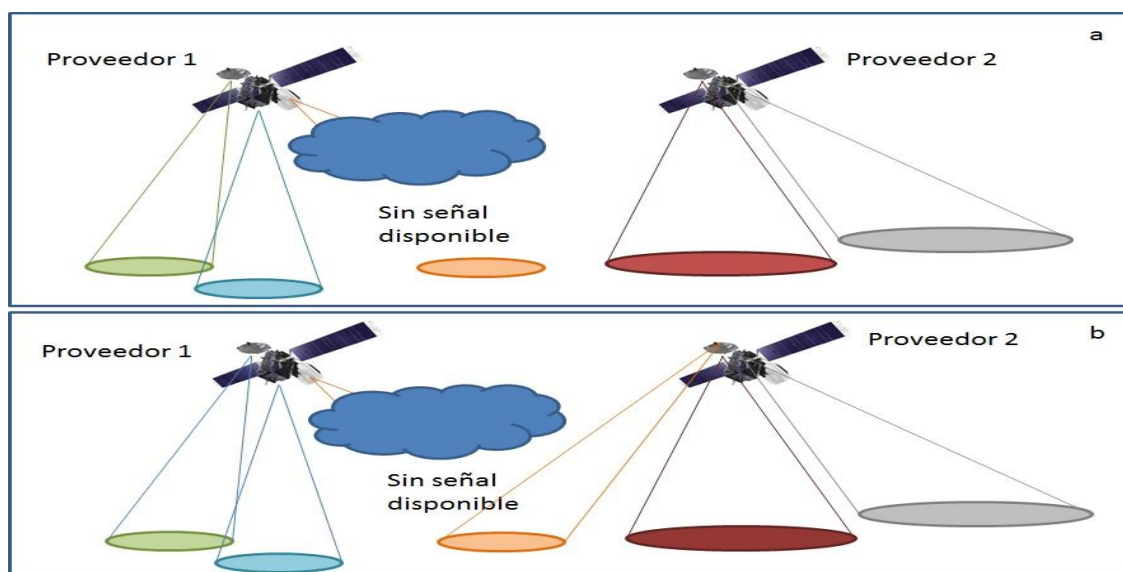


Fig.2-4 En la parte superior (a) se muestra la pérdida de comunicación; en la parte inferior (b) entra en acción el satélite de respaldo.

La falta de disponibilidad causada por estos motivos puede ser combatida si se tiene algún satélite de repuesto para que trabaje en el momento que se requiera el servicio, o también si se respaldan las comunicaciones en sistemas alojados en otras bandas de frecuencias, aunque esta situación requeriría de más equipo en Tierra, el uso de hardware especial y aceptar la disminución significativa del desempeño del enlace [19].

2.2.4 Costos de equipo y conversión

Cuando se trata de implementar cualquier cambio en la infraestructura de un proyecto el costo de realizarlo es uno de los elementos que tendrá un peso fundamental en la decisión; la relación costo-beneficio siempre está presente, pues algo que no genera una ganancia a un determinado plazo no es una idea atractiva de inversión.

El caso de la implementación de un sistema de banda Ka no es la excepción; si bien es innegable el hecho de los beneficios que se presentan, también se tiene que considerar si éstos compensan el costo que conlleva su despliegue.

En general, los satélites de la banda Ka tienden a ser más costosos que los satélites en la banda Ku, mucho debido a la cantidad de tiempo y extensión en el mercado que tienen los segundos.

Mientras que los satélites de la banda Ka son relativamente nuevos, los satélites de banda Ku tienen ya varios años en el mercado, es natural entonces asumir que el proceso de producción es masivo, lo que, como sucede con la manufacturación de cualquier producto, hace que los costos de los elementos disminuyan progresivamente [37].

Cuando los satélites de banda Ku comenzaron a ser contemplados como un sustituto de los satélites en la banda C (cabe resaltar que los satélites en banda C aún son utilizados y coexisten con los satélites de la banda Ku brindando servicios de forma complementaria) también tuvieron que lidiar con los inconvenientes de los costos elevados de producción y poco a poco, conforme se convirtieron en sistemas más comunes, los elementos abarataron sus costos.

En contraste con lo que sucede con el mercado para los sistemas de transmisión de contenidos de televisión directamente a los hogares, en donde los costos son mucho menores, en ambientes industriales estos sistemas baratos no se pueden aprovechar debido a las condiciones en las que deben trabajar, es decir, se compromete el desempeño con la durabilidad de los materiales y el equipo.

En este sentido, debido a la propagación de las señales de RF, en ambientes industriales se requieren antenas de un diámetro mayor; las antenas con un diámetro menor a los 90 cm no son adecuados para cumplir y garantizar una confiabilidad mínima requerida, por lo tanto es necesario utilizar antenas con un diámetro de más de un metro, las que no son muy comunes para el uso en banda Ka, a diferencia de lo que puede suceder con la banda Ku, así que el precio de estos equipos será más alto.

En la Tabla 2.2 se observa una comparación en precios entre algunos elementos usados en sistemas de comunicación de banda Ka y banda Ku. Se puede comprobar como el precio es relativamente mayor entre una tecnología y otra³.

³ La información es obtenida de la referencia [19], en donde se hace un análisis de los costos basado en información de satcomresources.com durante 2012.

Tabla 2.2 Comparación en precio de algunos elementos usados en sistemas de banda Ka y Ku.

Componente	Precio en la banda Ku	Precio en la banda Ka
Bloque de bajo ruido PLL-LNB	\$200-\$250 USD	\$1300 USD
Bloque convertidor de frecuencias de subida BUC	\$4000 USD (8 Watt)	\$6000 USD (4 Watt) \$12500 USD (10 watt)
Estación Terrena	\$600,000 USD	\$1,300,000 USD

Para una compañía con un número considerable de VSAT's, hacer una transición hacia la banda Ka representaría un gasto considerable en la inversión del equipo necesario, pues el equipo actual no sería compatible con la banda de frecuencia, en cambio, si se trata de un cambio en la misma banda lo único que se tiene que hacer es reposicionar las antenas hacia el nuevo haz del satélite que se encargará de proveer el servicio [19].

2.2.5 Atenuación ocasionada por la lluvia y otros aspectos atmosféricos.

Este punto es, sin duda, el mayor problema relacionado con el cambio hacia una banda de frecuencia más alta.

En general, mientras más alta es la frecuencia de operación la longitud de onda de la señal es mucho más pequeña, por lo que a frecuencias de varios GHz el tamaño es comparable con gotas de agua y demás factores atmosféricos.

Cabe destacar que este problema no es exclusivo de la banda Ka, ya que en la banda Ku también se presentan estas dificultades; por ejemplo, en la recepción de contenidos de televisión, cuando se presenta una gran cantidad de lluvia la señal se ve interrumpida y es necesario que transcurra un tiempo antes de que pueda recuperarse.

No obstante, los efectos que acompañan al uso de una frecuencia mayor son más severos debido a los niveles de absorción, interferencia y dispersión que se generan [18].

En zonas donde la lluvia se presenta de manera continua y en grandes cantidades el desempeño mejorado, a causa de los haces directivos, de la banda Ka se ve comprometido y la confiabilidad del enlace puede resultar menor que la de uno en la banda Ku.

Para obtener la misma disponibilidad de enlace, bajo condiciones de lluvia, se requiere de una mayor cantidad de potencia del transpondedor.

Lo anterior hace que se haga muy difícil proveer un enlace confiable con alta disponibilidad en este tipo de regiones.

A diferencia de las otras desventajas, ésta en particular supone un gran reto para el despliegue de un sistema de banda Ka en México, ya que las regiones en los trópicos presentan una gran cantidad de lluvia y, al cruzar el trópico de cáncer por el centro del país, se garantiza una presencia continua de precipitación.

Por lo anterior, cuando la atenuación en el trayecto supera a los márgenes de potencia disponibles, se tienen que aplicar métodos de mitigación para garantizar un desempeño aceptable.

En los servicios fijos las técnicas de mitigación pueden ser divididas en dos categorías: restauración de potencia y restauración a través de modificación de la señal (o técnicas adaptativas) [14].

Las técnicas de restauración de potencia no cambian el formato de la señal, sino que cambian los niveles de potencia que se reciben o seleccionan la señal, en un camino redundante, que presente menores degradaciones.

Entre las técnicas de este tipo se encuentran diversidad del haz, control de potencia, diversidad de sitio y diversidad de órbita.

- a) Diversidad del haz: aquí se escoge un haz más directivo para enviar una mayor cantidad de potencia durante situaciones climatológicas adversas.
- b) Control de potencia: consiste en variar la cantidad de potencia que se transmite en el enlace durante la presencia de la atenuación, manteniendo, así, el nivel de potencia deseado en el equipo receptor; puede realizarse tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente.
- c) Diversidad de sitio: en este caso la señal es enviada a dos, o más sitios, separados de tal forma que las condiciones de atenuación no sean las mismas, por lo que la probabilidad de que el nivel de atenuación sea excedido es menor en ambos sitios (o más sitios, dependiendo del nivel de redundancia) que en uno solo.
- d) Diversidad de órbita: se refiere al uso de dos satélites, en la misma órbita, separados lo suficiente para proveer de dos caminos hacia una sola estación terrena, usando el camino con las menores condiciones de atenuación.

Las técnicas de modificación de la señal, a diferencia de la restauración de potencia, conllevan una modificación en la señal para alcanzar un mejor desempeño durante las condiciones de lluvia.

Estas técnicas incluyen diversidad de frecuencia, reducción del ancho de banda, diversidad de tiempo (o transmisión retrasada) y modulación y corrección de errores adaptativos.

- a) Diversidad de frecuencia: en esta técnica se hace un cambio en la frecuencia de operación de una banda alta a una banda inferior (de la banda Ka a la banda C, por ejemplo) cuando las condiciones de lluvia son altas, sin embargo, tanto los satélites como las estaciones terrenas deben estar equipadas para trabajar de forma dual.

- b) Reducción del ancho de banda: se reduce el ancho de banda de la señal para incrementar la relación de portadora a ruido.
- c) Diversidad de tiempo: esta técnica involucra el almacenamiento de la información durante los periodos de lluvia para ser enviada después, cuando el clima ha mejorado. Esta forma de mitigación sólo es posible cuando no se necesita una operación en tiempo real.
- d) Modulación y corrección de errores adaptativos. En este caso, para la corrección de errores, se utiliza un FEC adaptativo, en el que una parte de la capacidad del enlace se reserva y es utilizada de acuerdo a como es necesitada para codificación adicional en los enlaces que experimentan atenuación por lluvia; la modulación adaptativa, por otro lado, utiliza diferentes esquemas de modulación en función a la relación de energía del bit a densidad de ruido requerida en las condiciones del clima; por ejemplo, para condiciones de cielo despejado se usan esquemas muy eficientes como 16 PSK, 64-PSK o 256 QAM, mientras que en condiciones de lluvia pueden utilizar esquemas más robustos, como BPSK o QPSK.

Tabla 2.3 Resumen de las ventajas y desventajas de la banda Ka con respecto a bandas de frecuencias más bajas, en especial la banda Ku.

Ventajas de la banda Ka	Desventajas de la banda Ka
Mayor espacio radioeléctrico libre	Compromiso desempeño vs cobertura; mayor cobertura menor desempeño
Mayor ancho de banda del canal (hasta 7 veces más que en bandas C y Ku)	Cobertura menor, con antenas de similares que características, en otras bandas.
Haces más directivos; mayor potencia y reúso de frecuencia son posibles.	Poco respaldo en satélites de otros operadores ante fallas de comunicación.
Menor interferencia inter-satelital; lóbulos secundarios más pequeños.	Equipos más costosos que en otras bandas. Costo extra por cambiar el equipo de usuarios de una banda a otra.
Menor costo del ancho de banda por usuario	Mayor afectación por condiciones de lluvia.

3.- CONFIGURACIÓN DE UN SATÉLITE EN LA BANDA KA

Es necesario conocer la configuración general del sistema en la banda Ka, ya que el estar familiarizado con los componentes de éste es importante ante la justificación de cualquier proyecto.

Debido a la enorme cantidad de variantes en la conformación de un satélite, es imposible describir de forma detallada cada componente, por lo que en esta sección se describe, de manera general, los componentes y configuraciones en que se basan los sistemas.

Tanto el segmento espacial como el segmento terrestre serán discutidos en esta sección, aunque se pondrá mayor atención a la carga útil.

3.1 Segmento Espacial

Como ya se ha mencionado en el primer capítulo de este trabajo, el segmento espacial es el satélite en sí mismo, compuesto por cada subsistema y la carga útil.

3.1.1 Carga útil

Todo satélite, dependiendo de su misión, contará con diferente tipo de carga útil; sea que se trate de un satélite meteorológico, de navegación, científico o de comunicaciones, contará con dispositivos específicos que le permitirán realizar con éxito los objetivos impuestos.

En el caso de los satélites de comunicaciones la carga útil puede separarse, de forma general, en dos secciones

- a) Las antenas
- b) El repetidor

La señal se recibe y es transmitida a través de la antena, mientras que el repetidor se encarga de procesarla.

El repetidor puede ser regenerativo o transparente, aunque en la mayoría de los casos los satélites comerciales usan repetidores transparentes, en tanto que los repetidores regenerativos se usan más comúnmente en satélites militares [9].

Las antenas de recepción y de transmisión pueden ser la misma o pueden ser dos unidades diferentes, esto dependiendo de factores, tales como la interferencia generada por la estructura del satélite y los otros componentes a bordo, que pueden crear interferencia por señales espurias, así como alterar el patrón de radiación; la disponibilidad del enlace y la necesidad de evitar cambiar de frecuencia optando por operar con múltiples antenas con diferente polarización, entre otros.

Las antenas que se usen para la transmisión y recepción en la banda Ka no serán iguales a las que se usen en otras bandas; por otro lado, los requerimientos del sistema, con los servicios y usuarios, significan que los transpondedores usados deben tener mayor capacidad.

Durante la planeación de la misión, las zonas de servicio, también llamadas regiones de cobertura o polígonos de cobertura, y el desempeño de los diferentes parámetros son decididos. Los principales parámetros a considerar son las frecuencias de operación, la polarización de la antena, la potencia isotrópica radiada equivalente, PIRE (EIRP por sus siglas en inglés), la figura de mérito y la discriminación por polarización cruzada, XPD (por sus siglas en inglés). Cada zona de servicio puede tener diferente desempeño de los parámetros anteriores, que depende de las necesidades, el mercado al que va dirigido el servicio, el uso del transpondedor, los costos de los equipos para los usuarios y la generación de ingresos.

El valor de los parámetros anteriores incide en el diseño y selección de los elementos de la carga útil [9].

La PIRE determina la ganancia de los transpondedores, así como la de la antena; de la misma forma la potencia de los transpondedores es determinada por el tipo de tecnología usada en cuanto a los amplificadores de alta potencia, ya sean TWTA o SSPA. En general, los sistemas que utilizan mayor potencia tienen un mayor riesgo de presentar fallas, así que para conservar la misión simple y confiable siempre se intenta mantener la potencia de los transpondedores al mínimo y la alta ganancia se alcanza usando antenas más grandes que puedan cumplir con las especificaciones.

La figura de mérito tiene que ver con la zona hacia donde apunta la antena del satélite, si apunta hacia una región oceánica la temperatura será menor que si apunta a una zona de alta temperatura lo que afecta el valor de ese parámetro.

De la misma forma es necesario considerar la temperatura de ruido del sistema y una vez que se tiene esa información entonces la atención se puede centrar en la ganancia de la antena, así como el diámetro de la misma.

Por otro lado, para recibir señales de una forma íntegra y confiable se requiere de altos valores de discriminación por polarización cruzada, mismos que pueden ser difíciles de alcanzar para amplias zonas de cobertura, lo que puede orillar a hacer cambios en la configuración de la antena.

En el caso de los satélites de banda Ka, debido a que los haces son más directivos y cubren regiones más pequeñas, el problema pareciera no ser tan determinante.

3.1.1.1 Antenas

Como se ha mencionado antes, el uso de los satélites de banda Ka presenta una de sus mayores fortalezas al utilizar haces muy directivos en áreas de cobertura relativamente pequeñas, pues permite alcanzar altas tasas de transmisiones; sin embargo, al tratar de proporcionar un servicio a la mayor cantidad de usuarios es

necesario poder cubrir regiones más amplias, ya que no tendría sentido tener todo un satélite con una antena que sólo pueda cubrir una pequeña región del área de servicio.

Aunque los satélites de banda Ka con haces puntuales son los que predominan entre los satélites en el mercado, también es posible encontrar casos en los que se usan haces regionales que pueden cubrir fácilmente una mayor cantidad de área, aunque estos son más comunes cuando se habla de redes empresariales o de gobierno.

Los haces regionales presentan sus mayores ventajas en tres puntos sencillos: la complejidad de la antena es mucho menor comparada con los haces puntuales debido a que sólo un haz tiene que ser radiado; las pérdidas por desapuntamiento son mucho menores, pues el ancho del haz es muy grande, lo que reduce la necesidad de un apuntamiento preciso para recibir la señal; y, por último, son más baratas de construir.

Por el contrario, las desventajas que tienen este tipo de haces es que requieren de un mayor ancho de banda para poder operar con la misma tasa de transmisión; el patrón de radiación no tiene un diseño rápido, pues al cubrir regiones más largas debe poder producir formas específicas; y se necesita una mayor potencia en el satélite debido a lo poco directivas que son las antenas.

En el caso de los haces puntuales, o angostos, éstos permiten el reúso de frecuencia, como se ha explicado anteriormente; sus haces son independientes uno del otro; y la complejidad de las terminales es menor, por ejemplo, el tamaño, que con la potencia que se envía permite el diseño de antenas más pequeñas para un desempeño adecuado.

En contraste, esta independencia eleva los costos de diseño, así como la complejidad de las antenas para producir los diferentes haces y que tengan cierta estabilidad.

De acuerdo al tipo de servicio que se esté buscando puede ser más o menos conveniente el uso de un haz regional o uno angosto.

La diferencia entre proveer capacidad de banda ancha al consumidor y al mercado empresarial está en la forma en la que el servicio es entregado: megabit contra megahertz, o en otras palabras, un servicio administrado contra capacidad total.

Esta capacidad "total" permite a la empresa una libre implementación en su red sin tener que estar limitado a cumplir los requerimientos predefinidos del proveedor de servicios [38].

La mayoría de sistemas implementados o en planeación, sin embargo, están pensada para servicios administrados de alta transferencia de datos, ofreciendo banda ancha hacia los consumidores finales, por lo que los haces puntuales siguen siendo una alternativa mejor, pues el uso de haces regionales bajo estas circunstancias no permitiría satisfacer las necesidades de los usuarios finales.

Siendo los haces puntuales en la banda Ka una mejor alternativa para las exigencias del mercado, aún es necesario considerar la cobertura de grandes

terrenos para dar un servicio eficiente, es decir, sin tener que comprometer la potencia o las tasas de transferencias. Se vuelve entonces necesario recurrir a tecnologías que permitan solventar esta situación. En este caso, el uso de antenas multihaz es una buena para obtener una alta ganancia y amplia cobertura.

Las antenas multihaz permiten generar varios haces que cubren, cada uno, una pequeña región, produciendo, en conjunto, una amplia región de cobertura; esto es posible a través del uso de diferentes polarizaciones y el reuso de frecuencias. En general, existen dos clases de este tipo de antenas, aquellas cuyos haces son fijos, FMBA por sus siglas en inglés (Fixed Multispot-Beam Antenna), es decir, la señal siempre llega al mismo punto; y aquellas que son orientables, SMBA (Steerable Multispot-Beam Antenna), y que pueden ser dirigidas a distintas regiones [10].

La configuración de una antena fija con múltiples haces puede ser a partir de varias cornetas alimentadoras y un reflector, en donde cada corneta produce un haz que cubre una región específica. Esta configuración es muy simple y muy usada, aunque para una cobertura más amplia, es necesario un mayor número de alimentadores y reflectores, por lo que se utiliza mayormente en sistemas regionales o domésticos.

Las antenas orientables pueden ser de dos tipos, mecánicamente orientables o electrónicamente orientables.

Las antenas mecánicamente orientables son construidas agregando un cardán a la antena, lo que las hace fácil de construir, pero están limitadas por la velocidad del mecanismo para cambiar su orientación y, por ende, la región a cubrir.

Las antenas electrónicamente orientables requieren de alimentadores en arreglo de fase. Este tipo de antenas puede cambiar mucho más rápido la posición del haz, ya que no depende de ningún movimiento mecánico y, además, tienen una mayor zona de barrido, lo que les permite cubrir regiones más amplias.

El uso de un tipo de antena u otro no es excluyente, ya que un satélite puede ocupar ambos de acuerdo a las necesidades que se necesiten cumplir.

En la figura 3-1 se aprecia la coexistencia de ambas antenas, para el satélite japonés WINDS, donde tres diferentes zonas tienen cierto nivel de cobertura. La zona de Japón y su vecindad se encuentra cubierta por 12 haces fijos pertenecientes a la primera antena fija, mientras que la zona al sur de Asia tiene cobertura por 7 haces pertenecientes a una segunda antena fija [30].

La antena orientable tiene una cobertura limitada de dos haces al mismo tiempo, aunque de mayor tamaño.

En cuanto a la generación de los haces múltiples se tienen dos configuraciones posibles: el uso de un alimentador único por cada haz y el uso de múltiples alimentadores por cada haz.

En las figuras 3-2 y 3-3 se muestra, de la forma más básica, el funcionamiento de cada configuración.

El alimentador único por haz (Single feed per beam-SFB) usa un alimentador de corneta por cada haz, lo que conlleva ventajas en la simplicidad de los elementos usados y un desempeño eléctrico ligeramente mejor, pero a su vez requiere de

varias aperturas para poder alcanzar el reúso de haces requerido, que generalmente es cuatro [20].

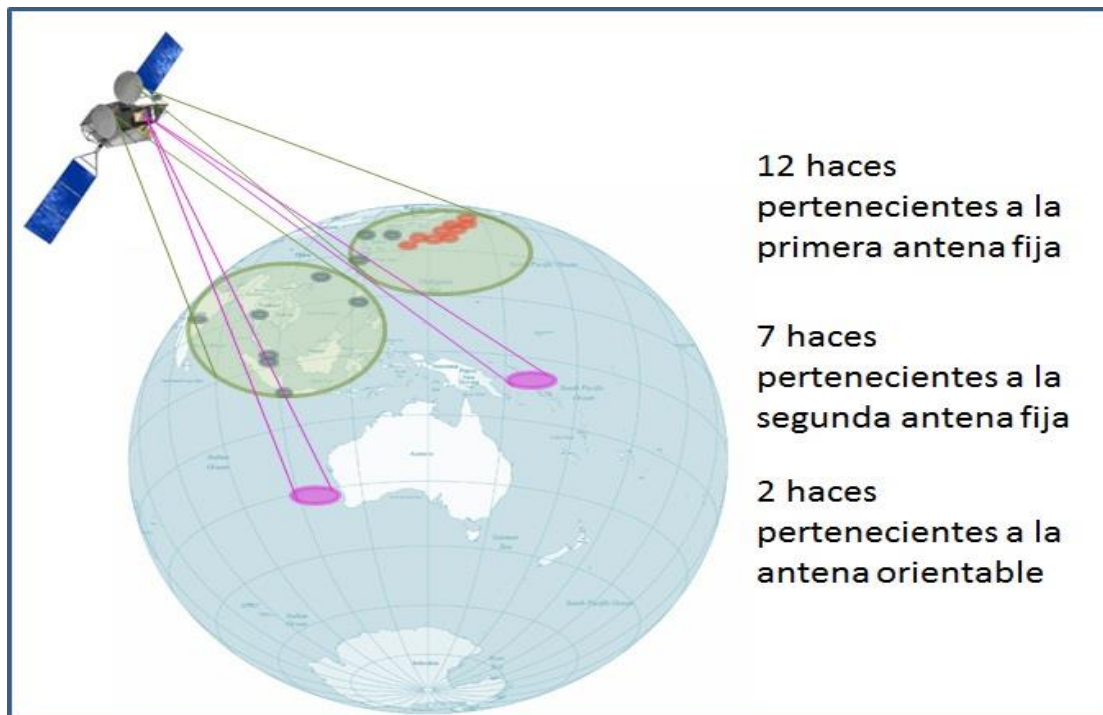


Fig. 3-1 Uso de antenas multihaz fijas y orientables en el satélite japonés WINDS, así como sus zonas de cobertura.

Para evitar que existan zonas sin cobertura es necesario que los haces de las señales se traslapen, lo que puede ser logrado de diferentes formas, como con el uso de un reflector conformado muy grande, el uso de lentes activas o pasivas, o el más popular, el uso de cuatro diferentes antenas reflectoras.

En el caso de los cuatro reflectores las antenas son apuntadas de forma que al final se logre obtener un patrón de haces traslapados sobre la zona de cobertura.

Estrictamente se requerirían ocho reflectores, cuatro para la transmisión y cuatro para la recepción, sin embargo, a través del uso de cadenas de alimentación para transmisión y recepción, esto es evitado. Dichas cadenas de alimentación son complejas, por lo que el diseño de éstas es muy importante para alcanzar un desempeño óptimo.

Las antenas de múltiples alimentadores por haz (Múltiple feed per beam-MFB) usan, en su diseño, pequeños sub-arreglos para generar cada haz y comparten elementos con los haces adyacentes. Debido al traslape físico de la apertura de los alimentadores, es posible generar los haces traslapados directamente con un solo reflector, a diferencia de los SFB, donde el traslape es generado a partir de cuatro reflectores y del apunte de la antena (en el caso más usado).

La reducción en cuanto a tamaño y masa en estas antenas se traduce en un ahorro en costos, además de espacio extra para acomodar otros elementos del

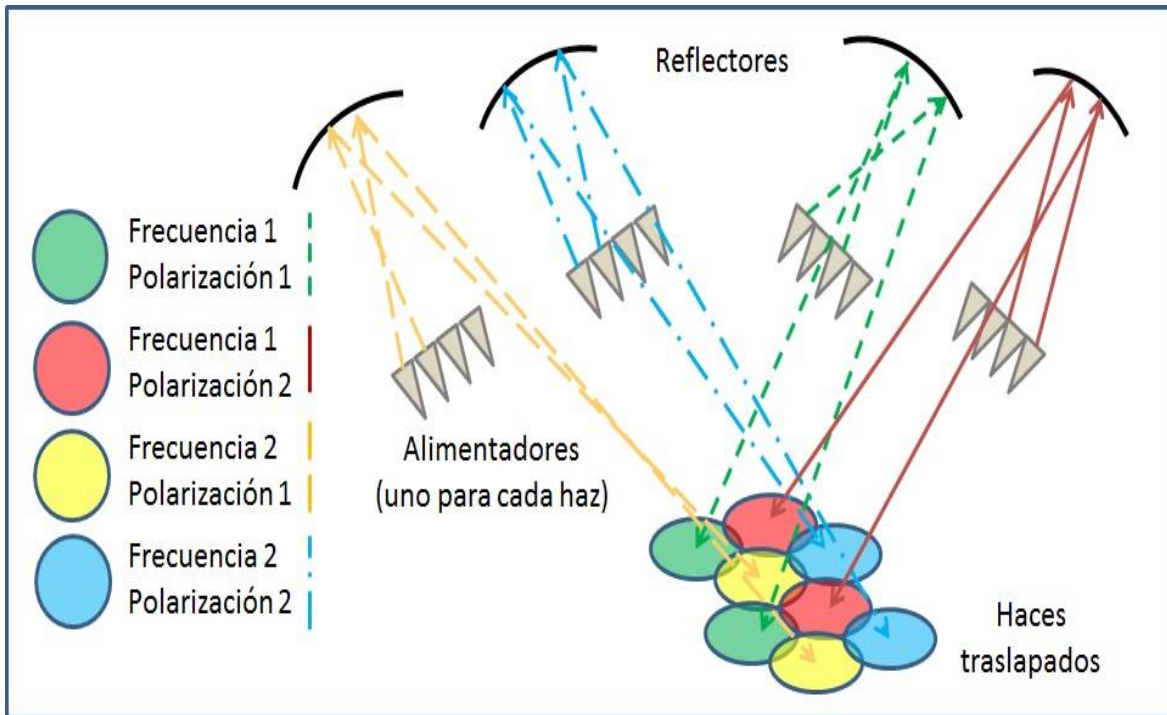


Fig. 3-2 Configuración básica de una antena SFB con el uso de alimentadores de corneta y cuatro reflectores para lograr un reúso de cuatro colores.

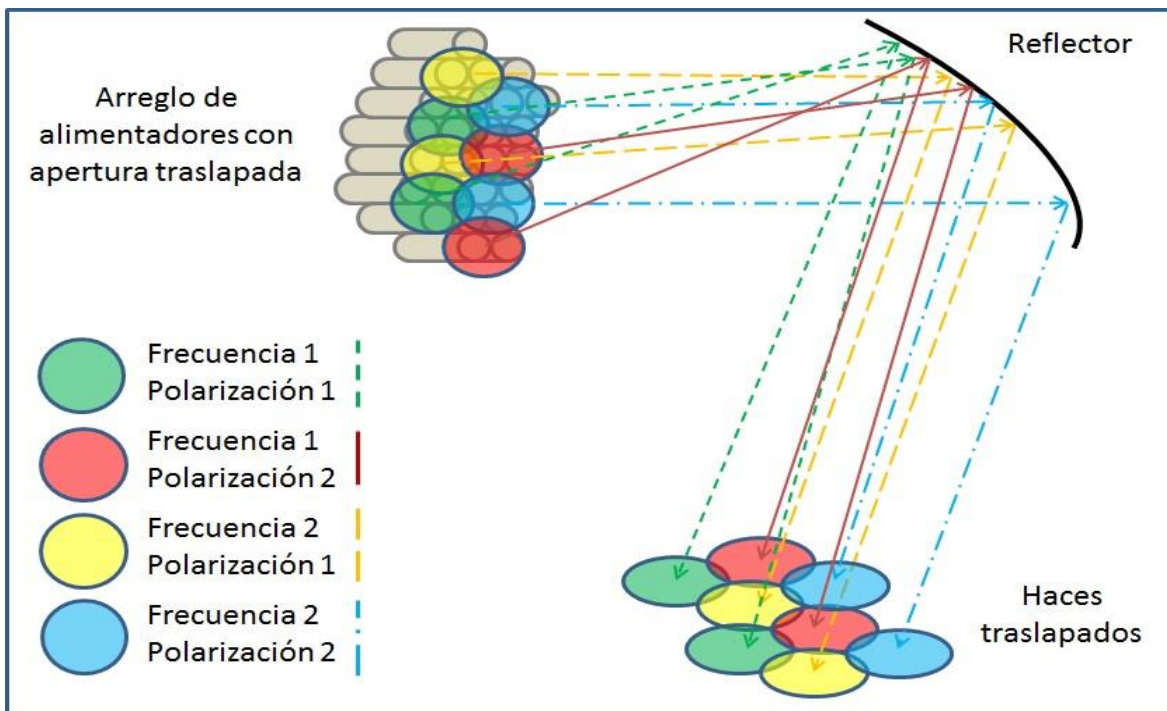


Fig. 3-3 Configuración básica de una antena MFB usando un arreglo de alimentadores y un solo reflector para lograr los haces traslapados con un reúso de cuatro colores.

satélite, sin embargo, estas ventajas implican el uso de una complicada red formadora de haces [20].

Ningún enfoque puede ser considerado exclusivo para ciertas situaciones, ya que depende del escenario sobre el que se esté trabajando para poder determinar la mejor solución a utilizar.

Las antenas SFB, como se mencionó antes, tienen un desempeño ligeramente mejor que las antenas MFB, por lo que para escenarios de cobertura continental o en satélites de gran tamaño, estas antenas son ventajosas, sin embargo, para escenarios con mayor cobertura, las pérdidas asociadas a la naturaleza del sistema pueden ser significativas y en este caso podría ser una mejor opción reemplazar las antenas SFB por antenas MFB, en donde las pérdidas del sistema serían significativamente menores, mientras que el costo y tamaño permanecerían casi igual.

Las antenas MFB pueden resultar más atractivas en el caso de que se usen satélites pequeños, ya que es más fácil acomodarlas y la energía disponible sólo es suficiente para un determinado número de haces.

En los satélites de mayor tamaño se cuenta con el espacio y la potencia para que las antenas SFB puedan trabajar, aunque puede ser una buena idea colocar antenas MFB en uno de los paneles del satélite y en el otro panel colocar antenas de otra banda para tener un sistema más flexible [20].

De manera general, la configuración de la antena en un sistema de banda Ka será una combinación entre la forma en que son generados los haces y la movilidad que debe tener.

3.1.1.2 Repetidor

La función del repetidor o transpondedor, como es llamado en los satélites de comunicaciones, es la de recibir las señales del enlace de subida y hacer el cambio hacia las frecuencia para el enlace de bajada, así como la asignación de potencia necesaria para dar el servicio en el área de cobertura.

En general, dos tipos de arquitecturas dentro de la configuración del satélite pueden ser descritas; el repetidor transparente y el repetidor regenerativo.

Los satélites con repetidores transparentes han sido la forma más común de configurar el sistema, sin embargo, con los avances de tecnológicos y los nuevos paradigmas en cuanto a las necesidades de comunicación, los sistemas regenerativos se vuelven cada vez más atractivos.

En la figura 3-4 se presenta un esquema básico de cada repetidor.

Los repetidores transparentes realizan un de procesamiento muy sencillo de la información y, básicamente, sólo se encargan de redirigir las señales de un lugar a otro (de ahí que en inglés sean conocidos como “bent pipe”).

En estos sistemas la señales recibidas por la antena son llevadas a los transpondedores y cada uno realiza los procesos de amplificación de la señal, selección de una o varias señales través de filtros, traslación de frecuencias a una

nueva banda y la amplificación de ellas hacia un nuevo nivel de potencia para su retransmisión [12].

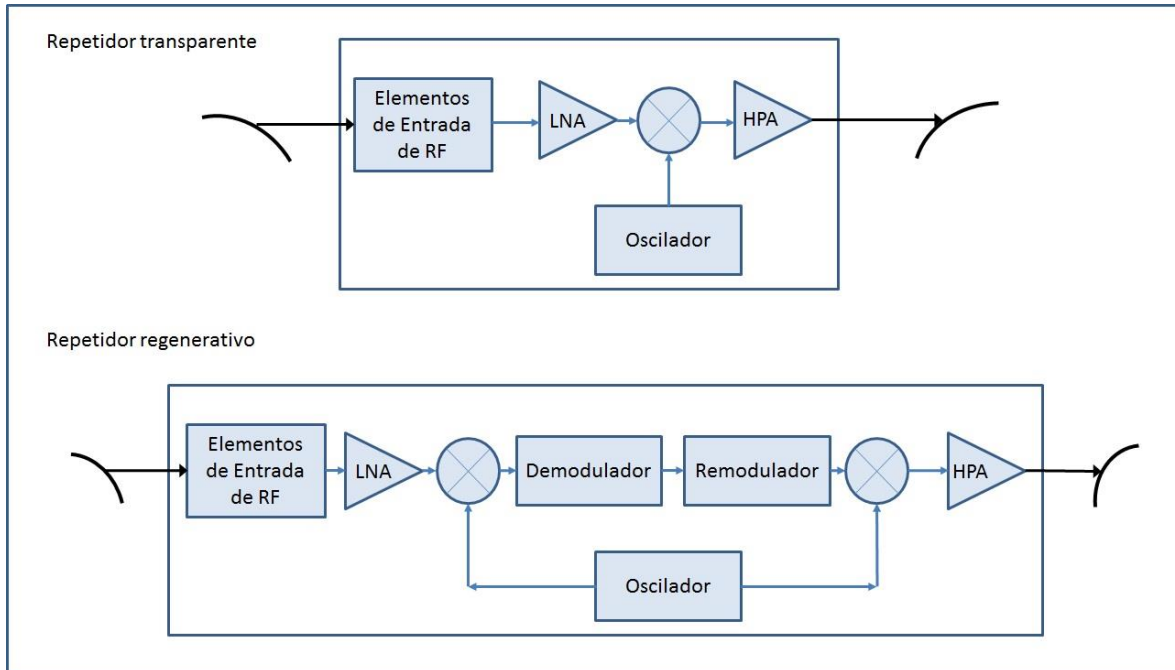


Fig. 3-4 Configuración básica de transpondedores transparente y regenerativo.

Existen tres esquemas básicos de procesamiento de señal en estos repetidores y en ellos la señal no es demodulada por completo en el satélite. Los esquemas son de traslación RF-RF, traslación RF-IF-RF y remodulación IF.

La traslación RF-RF lleva la señal de la frecuencia de subida a la frecuencia de bajada de forma directa con el uso de un mezclador y un oscilador; por otro lado, en la traslación RF-IF-RF, como su nombre lo indica, la frecuencia de la señal no es llevada directamente a la frecuencia de bajada, sino que pasa por una frecuencia intermedia para obtener una ganancia máxima y una vez que esto se logra entonces continúa el proceso de traslado a la frecuencia de bajada y su amplificación; finalmente, en la remodulación IF la señal original es llevada a una frecuencia intermedia y esa señal es modulada con la frecuencia de bajada, esto con el fin de que el ruido del enlace de subida se convierta en parte de la señal en banda base y así su espectro no es transmitido directamente en el enlace descendente sino que es modulado junto con la señal deseada, lo que mejora la relación señal a ruido cuando se recibe la señal.

Como puede notarse, los dos primeros esquemas son muy parecidos, aunque en el caso de la traslación RF-IF-RF la extracción del mensaje es mucho más sencilla; y, a su vez, la extracción es más sencilla con la remodulación IF, aunque conlleva un mayor procesamiento y tiene la desventaja de que sólo puede usarse si el ancho de banda de la señal IF es mucho menor que el ancho de banda de la señal RF, ya que el primero se expande en el segundo debido a la modulación [12]. En la figura 3-5 se presentan estos esquemas de procesamiento transparente.

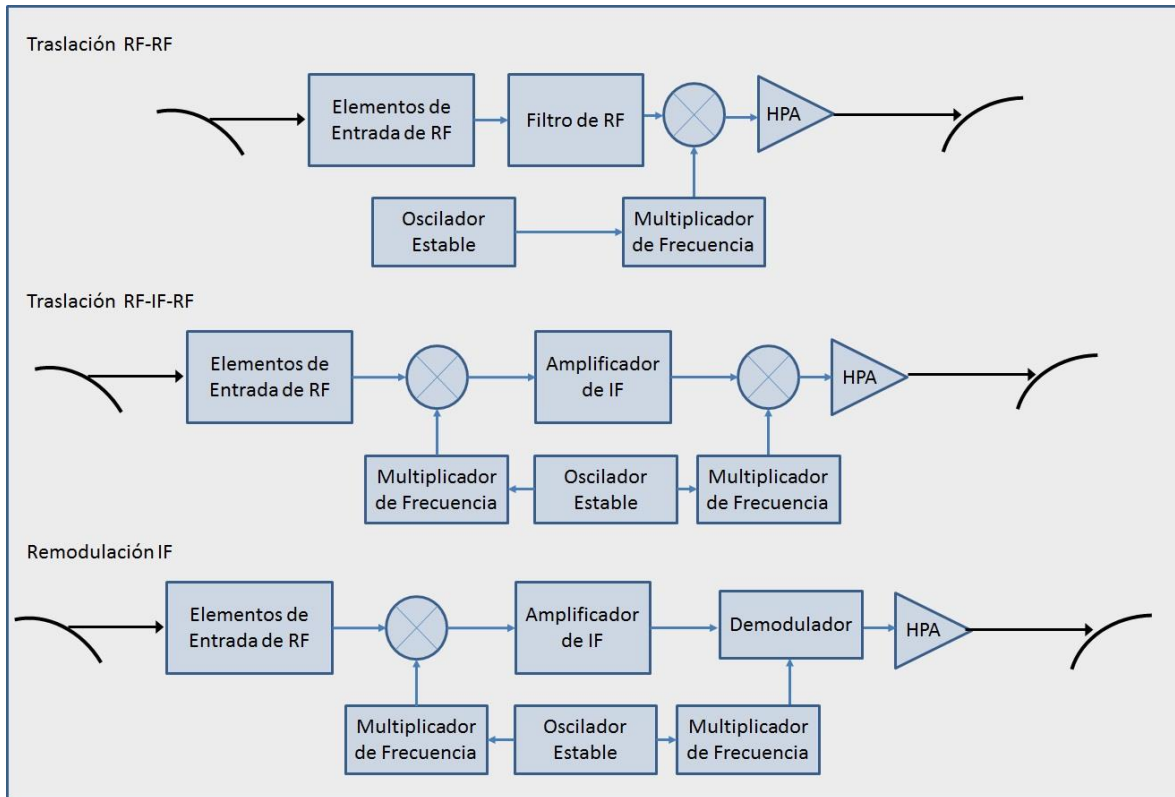


Fig. 3-5 Esquemas de procesamiento de señal en un repetidor transparente: a) Traslación RF-RF, b) Traslación RF-IF-RF y c) Remodulación IF.

En contraste con un repetidor transparente, un repetidor regenerativo realiza tanto tareas de procesamiento sencillo como tareas de procesamiento más avanzado, es decir, además de poder llevar a cabo funciones de traslación, amplificación y modulación también se encarga de demodulación, conmutación y ruteo entre transpondedores y haces, codificación y corrección de errores, reformatear la información, reducción de interferencia, compensación para la atenuación por lluvia, conmutación de paquetes, entre otras [11].

Los repetidores con procesamiento a bordo, como son llamados también, no están constituidos solamente por un amplificador de potencia y un convertidor de frecuencia, sino que utilizan un modulador y un demodulador para recuperar la información y realizar un procesamiento completo, o un procesamiento parcial si lo que se recuperan son símbolos, y después remodular, amplificar y enviar en el enlace descendente. En estos sistemas el canal transporta dos señales punto a punto en lugar de una, como sucede en una configuración transparente, con pérdidas considerables y ruido acumulado.

El diseño de estos transpondedores es más complicado pero presenta grandes ventajas en el desempeño cuando se compara con los sistemas no regenerativos. Con un repetidor transparente el ruido recibido en la estación es el resultado de la acumulación del ruido durante el enlace ascendente, el repetidor y el enlace descendente, por lo que la potencia de la señal debe ser tal que supere a la potencia del ruido en cualquier punto del enlace y así la tasa de error sea

aceptable en la estación receptora; en contraste, con un repetidor regenerativo la potencia requerida en el transmisor sólo debe ser suficiente para superar la potencia de ruido en el enlace ascendente, ya que el efecto del ruido es removido durante el procesamiento a bordo, y así se requiere una potencia menor para alcanzar una misma tasa de error [11]. En general se requiere menor potencia, ya sea en el enlace ascendente o descendente, y con técnicas de espectro disperso se mejora la protección contra interferencias.

Uno de los puntos fuertes del procesamiento a bordo es la capacidad de hacer conmutación y ruteo en el satélite, lo que es muy eficiente, pues elimina la necesidad de que ese proceso sea realizado en las estaciones en tierra y, a su vez, conlleva a que el envío de información se pueda hacer en forma directa por medio de un solo salto entre las estaciones terrenas [2].

El procesamiento a bordo favorece el trabajo con señales en banda base, lo que hace más sencillo la conmutación, ruteo y multiplexación.

Cabe destacar que también es posible realizar conmutación con las portadoras en el satélite a través de una matriz de conmutación de microondas, aunque el procesamiento aquí es nulo, por lo cual pueden ser incluidas en las arquitecturas de "bent pipe".

En la figura 3-6 se muestra un ejemplo de conmutación en banda base con procesamiento a bordo, en la parte superior, y conmutación en el satélite, en la parte inferior, para el uso de TDMA. En el primer caso un flujo de información de diferentes estaciones es enviado de una estación terrena al satélite y éste, gracias al preámbulo, es capaz de dividir los paquetes y almacenarlos, de manera temporal, hasta crear tramas con paquetes que corresponden a estaciones terrenas en particular a las que les envía su flujo de información correspondientes; en el segundo caso, el satélite recibe flujos de información de diferentes estaciones terrenas bien diferenciados y lo único que realiza es el respectivo redireccionamiento.

Finalmente, con el procesamiento a bordo es posible hacer un cambio en las velocidades de tasas de transmisión en los enlaces ascendente y descendente, lo que permite que dos estaciones puedan estar interconectadas independientemente de la velocidad de sus portadoras, lo que no sucede en los repetidores transparentes, donde no es posible cambiar la velocidad de la tasa de transmisión y dos estaciones con diferentes tasa de transmisión sólo pueden interconectarse a través de un enlace terrestre [13].

Con respecto a los satélites de banda Ka cabe mencionar que ambas arquitecturas son utilizadas, ya que al ser una tecnología emergente⁴ es menos riesgoso utilizar elementos ya probados y configuraciones más simples que apostar por configuraciones más complicadas en las que se tienen que desarrollar elementos específicos que serán más costosos. Por supuesto también influyen las necesidades de la misión y el costo que implica utilizar una u otra.

Como ejemplo de cada una de estas configuraciones se pueden mencionar los satélites Jupiter 1, actualmente EchoStar 17, que fue puesto en órbita en el año

⁴ Es emergente en el sentido de que los satélites comerciales en esa banda no son tan abundantes como en bandas inferiores.

2012 y utiliza una configuración transparente, mientras que el satélite Spaceway 3, lanzado en 2007, tiene una arquitectura regenerativa, con procesamiento a bordo de banda base y ruteo dinámico.

Un caso especial son los satélites Spaceway 1 y 2, cuyo diseño original con repetidores regenerativos fue modificado para funcionar como uno transparente.

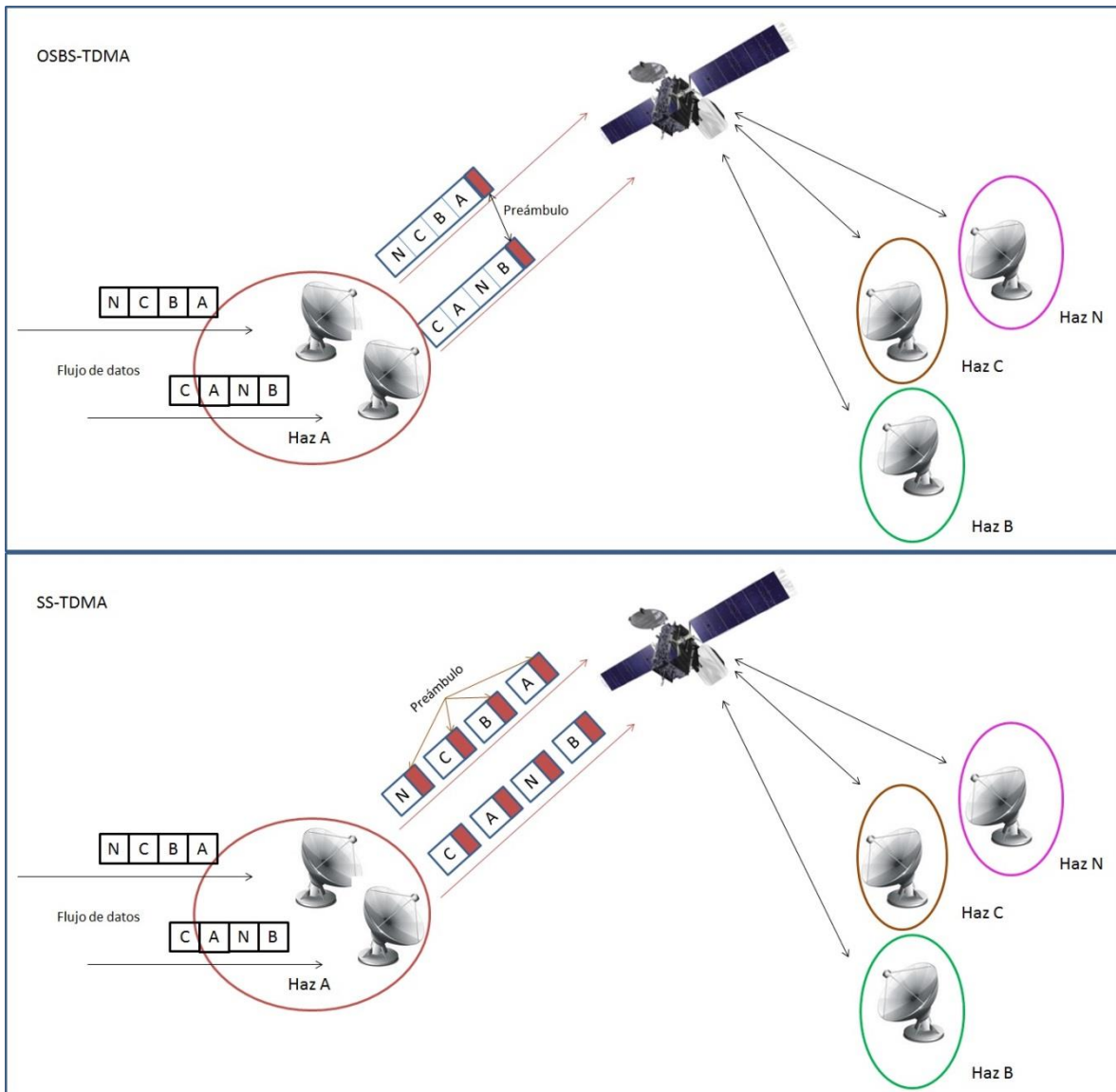


Fig. 3-6 Ejemplos de conmutación usados en el satélite para TDMA. Arriba se observa el uso de conmutación en banda base con procesamiento a bordo y abajo la conmutación en satélite sin procesamiento.

3.1.2 Plataforma

La plataforma comprende a todos los demás subsistemas del satélite que no tienen que ver con la carga útil y, dependiendo de los objetivos y requerimientos de la misión, su configuración varía para adecuarse de forma eficiente.

En los satélites de banda Ka, como en cualquier otro satélite, no hay un estándar fijo para establecer la configuración de los subsistemas, así que es posible realizar un diseño desde cero que se ajuste a las necesidades y gustos de cliente, sin embargo, el diseño y construcción de nuevas y diferentes configuraciones requiere de más etapas de estudio, además de ser costoso y conllevar un riesgo inherente a que algo pueda fallar.

Debido a lo anterior, es práctica común que se utilicen plataformas que ya han probado su efectividad en otros satélites en órbita y a las que se les realizan ligeros ajustes y modificaciones.

A continuación se describen, de forma breve, tres de las plataformas más populares en los satélites de comunicaciones y que han sido usados en la banda Ka; éstas son las plataformas 1300 de Space System Loral, E3000 Eurostar de Airbus Defense & Space y 702 de Boeing.

a) SSL 1300

La plataforma 1300 de Space Systems Loreal fue introducida por primera vez a mediados de los años ochenta y desde entonces ha evolucionado para convertirse en una de las plataformas más usadas a nivel mundial [39].

En la figura 3-7 se observa el diseño modular de la plataforma, cortesía de SSL, donde resaltan los elementos de cada subsistema.

La plataforma puede suministrar al sistema una potencia total entre los 5 y los 25 kW, dependiendo del tamaño, de manera continua durante la vida útil del satélite. Tiene espacio y capacidad para llevar a bordo desde unos pocos transpondedores activos hasta 150 [39].

El sistema eléctrico está alimentado por batería y paneles solares. Las baterías usadas actualmente son baterías de ion-litio, que sustituyeron a las de níquel-hidrógeno; por otro lado, dependiendo del tamaño del satélite, en la fabricación se pueden usar configuraciones de 3-4, 4-5, 5-6 y 6-8 paneles en los arreglos solares.

En lo que se refiere al control térmico se usan mantas de aislación multicapa para evitar que el satélite pierda calor debido a la radiación térmica, además utiliza reflectores ópticos solares para evitar un sobrecalentamiento, al mejorar la capacidad de rechazo de calor por parte de radiadores externos, así como reducir la absorción de flujos solares externos. También usan conductos para transportar líquidos evaporados y condensados, permitiendo, así, enfriar o calentar diferentes segmentos del satélite.

El control de orientación y de estabilización se basa en las ruedas de momento, así como el uso de sensores para percibir y corregir las perturbaciones.

Para la propulsión es posible identificar tres tipos de configuraciones: totalmente eléctrico, totalmente bipropelente o híbrido. En este aspecto sólo los satélites más pequeños (masa seca de hasta 2500kg) pueden contar con una propulsión totalmente eléctrica, mientras que satélites más grandes usan una configuración híbrida o totalmente bipropelente [40].

En cuanto al cuerpo o bus, éste puede variar en tamaño, siendo los más pequeños de 102 pulgadas y los más grandes de hasta 240 pulgadas.

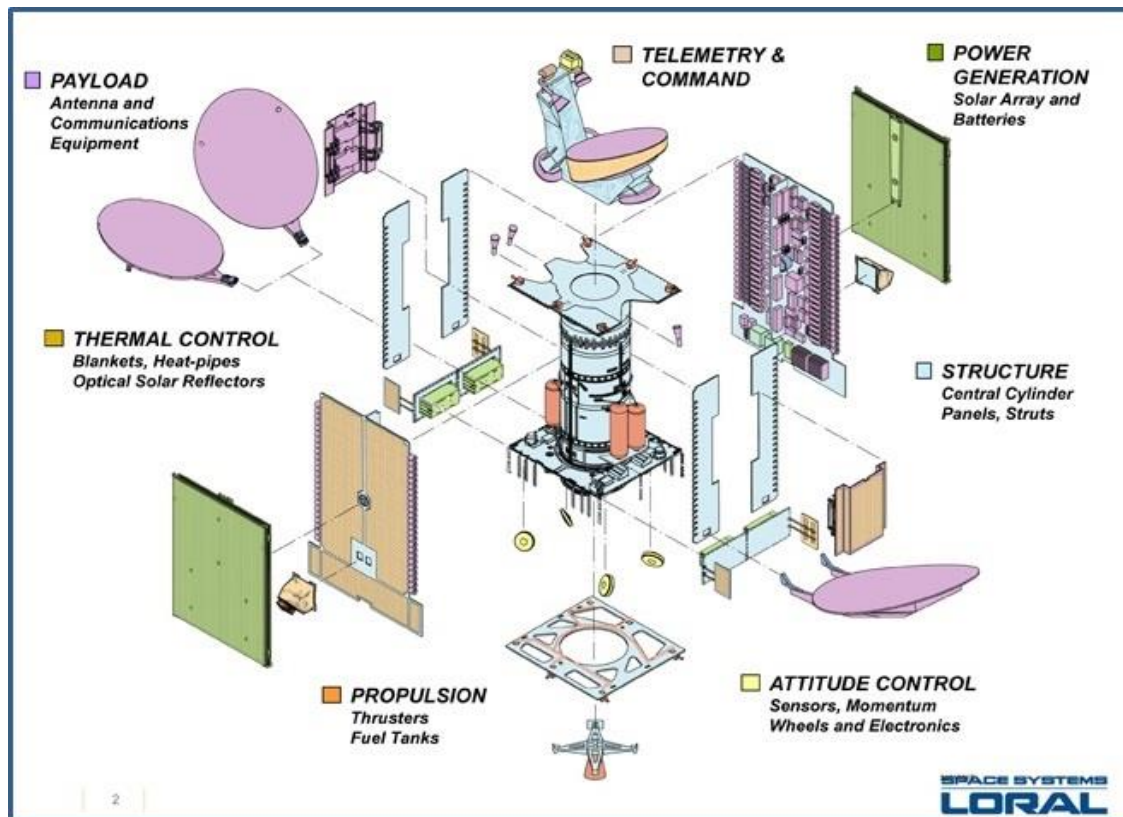


Fig. 3-7 Diseño modular de la plataforma 1300 de Space Systems Loral en donde se distinguen por separado los elementos de cada subsistema.

b) Eurostar E3000

La serie Eurostar fue introducida en 1990 y, desde entonces, todos los satélites pertenecientes a esa línea han sido desarrollados con la misma arquitectura modular que permite modificar el diseño fácilmente para que se adapte a necesidades específicas del cliente.

Desde entonces la línea ha tenido constantes actualizaciones, permitiendo realizar satélites más grandes, con mayor potencia y más eficientes.

Las modificaciones más recientes están en las variaciones L y LX, que aumentan la capacidad de la masa de lanzamiento y modifican el subsistema de propulsión [42].

En la figura 3-8 se observa, de forma general, la disposición modular de la plataforma.

La plataforma E3000 es capaz de suministrar una potencia de entre 4 y 14 kW a la carga útil, dependiendo del tamaño del satélite, y puede llevar hasta 100 transpondedores en operación [41].

El sistema usa baterías de iones de litio (al igual que la plataforma 1300 de Loral) y paneles solares de arseniuro de galio. Los paneles están distribuidos en dos secciones y pueden utilizar un mínimo de 6 o un máximo de 10, con una potencia suministrada al satélite de más de 20 kW.

El control de orientación hace uso de sensores para activar actuadores y realizar las correcciones necesarias, mientras que la estabilización es triaxial por medio de ruedas de momentos.

En el diseño de la plataforma se usan de mantas de aislación térmica para evitar la pérdida de calor.

La propulsión del satélite es, mayormente, bipropelente y es usada para la puesta en órbita y en maniobras para mantener el satélite en posición; además de usar propulsión bipropelente, también pueden incluir propulsión eléctrica para maniobras de mantenimiento de la posición, norte-sur principalmente [43].

El modelo E3000 L introdujo la combinación de ambos tipos de propulsión, por lo que puede llamarse un sistema híbrido; mientras que el modelo LX aumentó la capacidad del tanque de bipropelente.



Fig. 3-8 Diseño modular de la plataforma E3000 Eurostar de Airbus Defense & Space; se observa una disposición similar a la plataforma SSL 1300.

c) Hughes HS-702/Boeing BSS-702

La plataforma 702 fue introducida inicialmente por Hughes en octubre de 1995, siendo después renombrada como BSS 702 cuando la compañía fue adquirida por Boeing.

Era capaz de llevar más de 100 transpondedores de alta potencia, 94 activos y 24 de repuesto [45].

La carga útil y los demás subsistemas están en módulos independientes, por lo que se puede trabajar en ellos de forma separada y montar fácilmente después.

La potencia con la que se cuenta en la plataforma sobre pasa los 12 kW para la variante HP [44].

Utiliza paneles solares de arseniuro de galio de doble y triple unión, con cuatro o cinco paneles en cada ala y baterías de iones de litio.

El ambiente térmico de la carga útil y de los demás subsistemas se encuentra separado, además usa grandes radiadores para lograr un ambiente más estable.

También se usan conductos de flujo de calor para regular la temperatura y mantas de aislación para evitar la pérdida de calor [46].

La estabilización se logra a través de un sistema triaxial, mientras que la orientación es a través de las ruedas de momento.

La propulsión de esta plataforma incluye el uso de un sistema de xenón-ion, que es más eficiente que los combustibles líquidos, así como un sistema bipropelente.

En 2009 se introdujo una variación de la plataforma para sistemas de potencia media y a partir de marzo de 2010 Boeing comenzó a anunciar su plataforma bajo dos nombres: Boeing 702 HP para la versión de alta potencia y Boeing 702 MP para la versión de potencia media.

En 2012 se introdujo una nueva variante, la Boeing 702 SP (Small Platform).

La variante MP tiene un tamaño similar a la original HP, sin embargo la potencia que maneja oscila entre los 6 y los 12 kW; por otro lado, la potencia de la variante SP va de los 3.5 a los 7.5 kW.

En la figura 3-9 se muestran las variantes descritas de la plataforma 702.

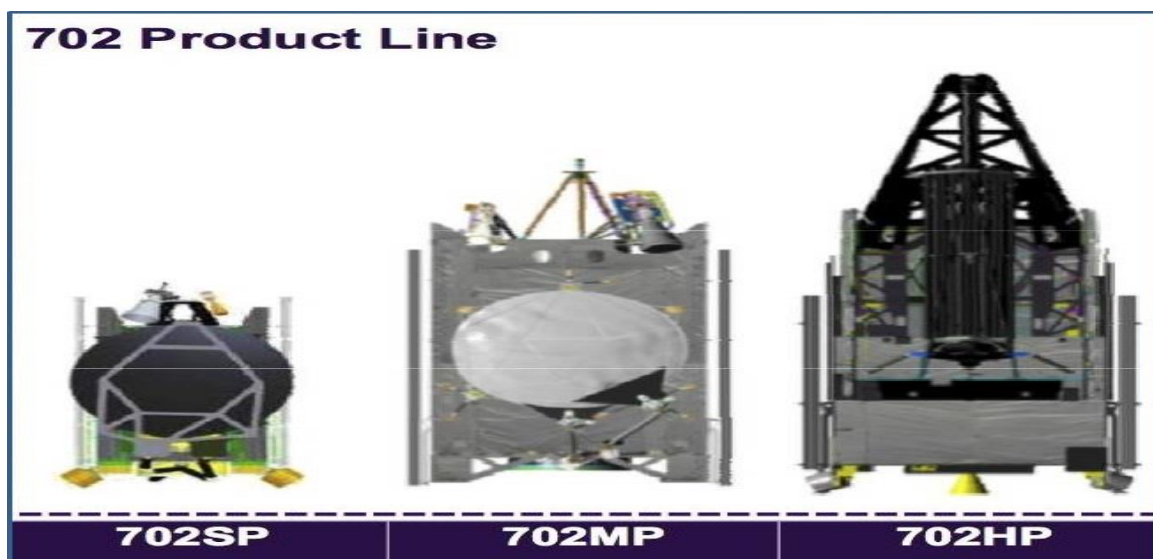


Fig. 3-9 Variantes principales de la plataforma 702, cortesía de Boeing.

3.2 Segmento Terrestre

Los sistemas de banda Ka se caracterizan por el reuso de frecuencia y por utilizar múltiples haces pequeños para cubrir un área determinada y, como consecuencia, las arquitecturas y capacidades del segmento terrestre se han adaptado para poder cubrir las necesidades de estos servicios.

3.2.1 Arquitectura del sistema

Los sistemas de banda Ka más modernos utilizan una arquitectura de conectividad “hub and spoke” entre gateways (puertas de enlace) y los usuarios terminales.

Los gateways consisten en estaciones terrenas de gran tamaño y con gran capacidad que tienen conexión a las redes de telecomunicaciones terrestres y al satélite, mientras que los usuarios terminales están conectados a través de VSAT (antenas de apertura muy pequeña). La información del usuario pasa de la VSAT al Gateway para llegar a la red de telecomunicaciones terrestre y viceversa.

Para poder usar al máximo el espectro disponible en el área de cobertura debe existir un mismo espectro disponible en los gateways que atienden esa área, por lo que, en un sistema típico, por cada cuatro haces para VSATs se aparta un haz dedicado para el gateway que haga uso del mismo espectro. Por lo anterior, se traslapan haces en zonas de servicio densas, con el espectro designado para las VSATs, mientras que los haces para gateways se encuentran en zonas geográficas separadas, en áreas de servicio menos densas [21].

La localización de cada Gateway debe cumplir con tener un acceso a internet por fibra óptica adecuado, fuentes de poder confiables y preferentemente en zonas de poca lluvia para facilitar la disponibilidad del enlace.

3.2.2 Arquitectura del Gateway

Los elementos del Gateway se dividen en dos, dependiendo de su localización:

- a) Equipo de banda base protegido dentro de instalaciones
- b) Antena y equipo de RF fuera de instalaciones

En la figura 3-10 se presenta un diagrama de bloques con los elementos que conforman el Gateway en el segmento terrestre para un satélite HTS.

- a) Equipo de banda base

El equipo de banda base incluye equipos para modular y demodular, sistemas de sincronización, distribución de IF, conmutación, servidores para el gateway e interfaces que conecten a la infraestructura de red terrestre.

El modulador se encarga de generar las portadoras que serán transmitidas en el haz hacia el satélite, mientras que el demodulador recibe el tráfico proveniente de

las VSATs. El sistema de sincronización distribuye información al modulador y demodulador para que las terminales se mantengan sincronizadas y transmitan su información en el momento adecuado.

Los servidores pueden realizar procesamiento de IP y de aceleración web. El primero se encarga de direccionar la información hacia la terminal específica, mientras que el segundo compensa un poco el retraso ocasionado por el viaje de ida y vuelta de la información hacia el satélite. La conexión hacia la red terrestre se realiza por medio de fibra óptica.

Todo el material debe tener su redundancia para asegurar que el servicio no se interrumpa debido a fallas en el equipo.

b) Equipo de RF

La mayoría de los elementos de RF e IF se encuentran en la antena del hub (elemento que concentra la información en el esquema hub-and-spoke), lo que permite reducir el tamaño de guías de onda y cables coaxiales, alcanzando así un desempeño y mantenimiento conveniente de los sistemas.

El convertidor ascendente (BUC) se localiza cerca del amplificador de alta potencia (HPA) y se conectan a través de guía de onda. El amplificador de bajo ruido (LNA) se coloca cerca del alimentador de la antena para maximizar la figura de en la recepción.

Los sistemas de RF deben contar con un esquema redundante de trayectos para garantizar una alta disponibilidad. Es común tener esquemas de redundancia 1:2 en ambos enlaces, enlace y descendente, aunque otros esquemas pueden aplicarse.

La mayor parte de los elementos de la antena también se encuentran fuera y estos pueden incluir, de acuerdo a las necesidades, reflectores, motores de azimut y elevación, sistema de desviación de lluvia en el alimentador, entre otros.

Es la mejor práctica que los elementos de RF se coloquen lo más cerca del alimentador de la antena para reducir al mínimo las pérdidas asociadas a la banda y la longitud de la guía de onda.

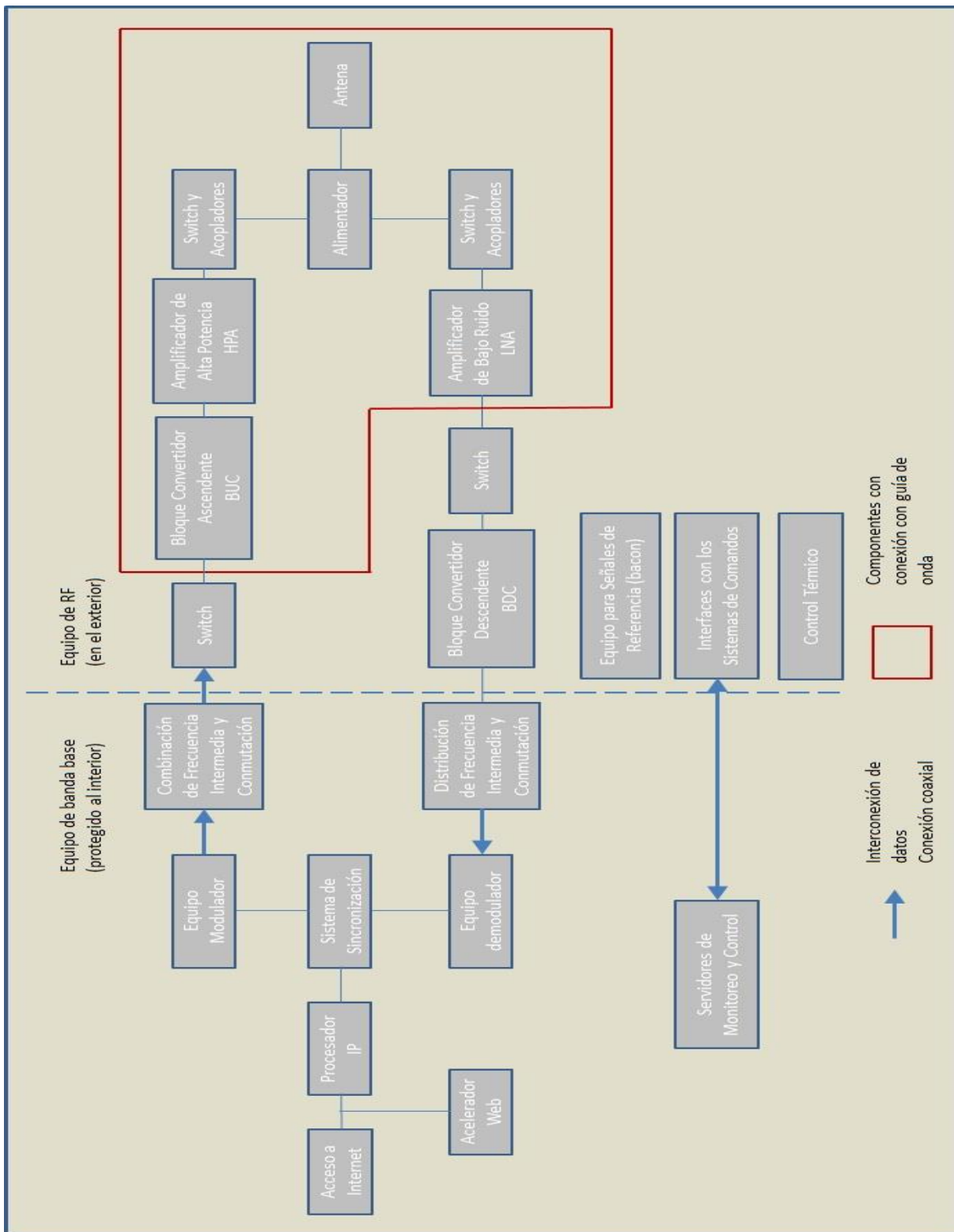


Fig. 3-10 Diagrama de bloques de la configuración del Gateway del segmento terrestre para comunicaciones en satélites de banda Ka HTS (High Throughput Satellite) [21].

4.- EFECTOS DE ATENUACIÓN

La atenuación es un problema recurrente en los sistemas de comunicaciones, sin importar que se traten de medios cableados, como la telefonía fija o servicios de internet con fibra óptica, o inalámbricos, como la telefonía celular y los enlaces satelitales; en cualquier sistema se presenta una degradación en la potencia de la señal, lo que acarrea un problema al recibirla y procesarla.

Dependiendo del tipo de sistema la atenuación puede ser más o menos problemática y generalmente es más fácil lidiar con ella en los sistemas que utilizan un medio físico, ya que, al tener un espacio dedicado para la transmisión, la mayor causa de la atenuación es por la distancia que tiene que recorrer la señal, sin embargo, esto puede ser solventado al agregar algún amplificador o un repetidor de la señal cada cierto tramo.

En los sistemas inalámbricos, en contraste, la señal se transmite a través del aire y tiene que lidiar con interferencias ocasionadas por otro tipo de señales así como las mismas condiciones del clima.

En general, dependiendo de la frecuencia, las señales también presentan otro tipo de dificultades para su propagación a través de la atmósfera; para el caso de los enlaces satelitales los problemas de propagación se generan debido a la ionosfera y la troposfera, con frecuencias de operación por debajo y arriba de los 3 GHz respectivamente [2].

4.1 Problemas asociados con la atenuación

En la troposfera ocurren los siguientes fenómenos: atenuación por absorción atmosférica, atenuación por lluvia, atenuación por las nubes, la niebla, el granizo y la nieve; despolarización por la lluvia y por cristales de hielo en la atmósfera; y cambios de amplitud, fase y ángulo de llegada causados por centelleo troposférico.

En general, la atenuación a través del granizo, nubes, niebla y nieve son despreciables a “bajas” frecuencias (banda L, C y Ku), pero contribuyen más significativamente en las bandas Ka y EHF. Aun en la ausencia de lluvia, se ha comprobado que la suma de las atenuaciones producidas por absorción atmosférica, nubes y centelleo puede alcanzar hasta unos 5 dB en la banda Ka en ciertas circunstancias. Por lo tanto, al diseñar sistemas que funcionen en esta última banda es deseable considerar tales pérdidas en el margen de operación. En cuanto a la despolarización causada por los cristales de hielo, afortunadamente es muy pequeña.

El centelleo consiste en fluctuaciones rápidas de la amplitud, la fase y el ángulo de llegada de las microondas. Es producido por los cambios que hay en el índice de refracción a nivel pequeña escala en la troposfera. Este fenómeno también ocurre, por las mismas razones, en la ionosfera, y el resultado final es que las ondas llegan al receptor desde diferentes trayectorias. Por tal razón, a veces al centelleo

se le refiere como multitrayectoria atmosférica. Su efecto aumenta o disminuye de una manera muy compleja, ya que no solo depende de la frecuencia y polarización de la señal, sino también de la humedad, la velocidad del viento, los cambios de temperatura, el tamaño y ángulo de elevación de las antenas terrestres, clima local, estación del año, etc. Es más importante en la banda Ka que en las otras bandas inferiores.

En lo que se refiere a la ionosfera, los principales fenómenos que produce sobre las ondas satelitales son la rotación de Faraday y, una vez más, centelleo. Sin embargo, el centelleo ionosférico disminuye con el cuadrado de la frecuencia (a diferencia del aumento con la frecuencia en la troposfera); sólo puede ser importante a frecuencias menores a las de la banda C, de modo que hay que añadir algún margen de operación, de varios decibeles, en sistemas que trabajen por debajo de los 4 GHz para evitar desvanecimientos. Sin embargo, para las estaciones situadas cerca del ecuador geomagnético, puede haber fluctuaciones hasta de 6 dB a 6 GHz, después de la puesta del Sol y con mayor frecuencia cerca de las fechas de los equinoccios.

Es importante notar que mientras la atenuación puede ser compensada con un margen de operación, este no ayuda para nada en lo que se refiere a los daños por despolarización. Una opción que puede servir como remedio en este último caso es emplear diversidad, como estaciones separadas entre sí una cierta distancia, pero resulta caro. La otra es usar una técnica de compensación de despolarización adaptiva. En cuanto a la alta atenuación que se produce en la banda Ka cuando llueve, los resultados experimentales de la NASA con su satélite ACTS, usado en los años 90, indican que es necesario usar técnicas de compensación de atenuación por lluvia para poder explotar comercialmente dicha banda con equipos de bajo costo [15].

4.2 Atenuación por Lluvia

La lluvia es el elemento climático que tiene un mayor impacto en lo que se refiere a los enlaces satelitales para frecuencias que operan a más de 3 GHz; en específico, para los sistemas que operan en frecuencias mayores de 10 GHz es especialmente problemática, pues las gotas de lluvia absorben y dispersan energía de la onda que viaja, lo que ocasiona una pérdida de la potencia que llega hacia el receptor y, por lo tanto, puede comprometer el desempeño y la confiabilidad del sistema.

Los efectos de atenuación asociados con la troposfera están determinados por características macroscópicas y microscópicas de los sistemas de lluvia, es decir, factores que tienen que ver con las características del fenómeno de precipitación, como son el tamaño, movimiento y distribución de las zonas de lluvia, etc., y factores propios de las gotas y cristales de hielo, como su densidad, distribución y forma [14].

Los efectos combinados de ambas características generan efectos acumulados de atenuación con respecto al tiempo y la frecuencia.

4.2.1 Tipos de Lluvia que pueden afectar

De acuerdo a la naturaleza de la lluvia, existen dos tipos de estructuras de lluvia que son de especial interés en el caso de los enlaces satelitales y la atenuación: la lluvia estratiforme y la lluvia convectiva.

La lluvia estratiforme se da en regiones de latitud media, principalmente, y, de acuerdo a su naturaleza, se extiende en regiones de cientos de kilómetros; además, tiene duración de más de una hora y su intensidad está por debajo de los 25 mm/h; alcanza alturas de entre 4 y 6 km. En el caso de las comunicaciones estas condiciones implican una consideración de un margen de lluvia superior a los 25 mm/h para asegurar la disponibilidad del enlace pero tiene la ventaja de ser uniforme dentro del área geográfica que ocupa y la intensidad esperada para dos estaciones terrenas separadas por varios kilómetros se considera igual.

Por otro lado, la lluvia convectiva se genera por los flujos verticales de aire en la atmósfera; pueden ser aisladas u ocurrir dentro de una región tormenta eléctrica combinada con el paso de un frente climático.

Este tipo de lluvia se extiende en regiones horizontales de varios kilómetros y alcanza alturas mayores a las capas en donde ocurre la congelación; la intensidad de lluvia es alta aunque dura sólo unos minutos.

Cuando se lidia con este tipo de hidrometeoro se tiene la inconveniencia de que su distribución no es uniforme y la intensidad de lluvia percibida difiere entre estaciones terrenas en la misma zona de tormenta.

4.2.2 Atenuación específica

La atenuación específica por lluvia puede ser abordada desde dos perspectivas; la primera trata de considerar las características de la lluvia así como la propagación de la onda para hacer los cálculos de una manera más exacta, mientras que la segunda se basa en una aproximación resultante de los datos obtenidos de la intensidad de lluvia y la atenuación percibida.

a) Cálculo clásico

El cálculo de la atenuación en esta forma no está considerado en las recomendaciones de la ITU, pero puede encontrarse en [14], donde se considera la propagación de la onda en un medio. Está basado en tres suposiciones relacionadas con la propagación de la onda y la naturaleza de la lluvia.

- I. La intensidad de la onda decae de forma exponencial conforme se aleja del punto de origen y se acerca al punto de recepción.
- II. Se considera que la forma de las gotas es esférica, así como que absorben y dispersan energía de la onda incidente.
- III. El análisis para cada gota es aditivo e independiente de las otras gotas. Cada gota absorbe y dispersa energía, pero la energía dispersada no se vuelve a dispersar al entrar en contacto con otra gota.

En principio, la atenuación total de una onda que se propaga por un volumen de agua, de extensión L, es el resultado de integrar la atenuación específica γ , expresada en dB/km, en dirección de la propagación.

$$A = \int_0^L \gamma dx [dB] \quad eq(4.1)$$

Por otro lado, a partir de la suposición de que la potencia de una onda decae de forma exponencial conforme pasa por el cuerpo de lluvia la potencia recibida se puede escribir como

$$P_{Rx} = P_{Tx} e^{-kL} [W] \quad eq(4.2)$$

Donde k es el coeficiente de atenuación, que en este caso es producido por su paso en el volumen de agua y L es la distancia que recorre en dirección de la propagación.

De la relación anterior se puede obtener la atenuación, en dB, de la onda como

$$A = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{Rx}}{P_{Tx}} \right) = 10 \log_{10} (e^{-kL}) [dB]$$

$$A = -kL 10 \log_{10} (e) = -4.343 kL [dB] \quad eq(4.3)$$

A su vez, el coeficiente de atenuación está definido por la relación

$$k = \rho Q_T \left[\frac{dB}{m} \right] \quad eq(4.4)$$

Donde ρ es la cantidad de gotas por unidad de volumen y Q_T es la atenuación de la sección transversal, que a su vez está compuesta por la absorción y la dispersión de energía que se produce en la sección transversal. Cabe destacar que la atenuación de la sección transversal es dependiente del radio de la gota, de la longitud de onda y del índice de refracción complejo, por lo que para obtener el valor del coeficiente de atenuación se debe integrar con respecto a alguna de estas variables.

$$Q_T = Q_a + Q_d = Q_T(r, \lambda, m) \left[\frac{dBm^2}{gota} \right] \quad eq(4.5)$$

Como la cantidad de gotas por unidad de volumen no es una cantidad constante se debe recurrir a una distribución de tamaño de gotas que, a su vez, son dependientes del radio, ya que éste oscila, y que es visto como el número de gotas en una unidad de volumen con un radio que cambia un pequeño valor, es decir, un diferencial.

Con lo anterior, es posible notar que la variable con respecto a la que se integrará es el radio de las gotas, por lo tanto, el coeficiente de atenuación se escribe como

$$k = \int Q_T(r, \lambda, m) \eta(r) dr \left[\frac{dB}{m} \right] \quad eq(4.6)$$

Anteriormente se estableció la atenuación como una expresión dependiente del coeficiente de atenuación y la longitud recorrida por la onda, así que al sustituir los resultados anteriores en esa expresión es posible escribir la atenuación específica como

$$\gamma = 4.343 \int Q_T(r, \lambda, m) \eta(r) dr \left[\frac{dB}{m} \right] \quad eq(4.7)$$

Para poder encontrar el valor de la atenuación específica se necesita escribir también la atenuación de la sección transversal solamente en términos del radio de las gotas, así como definir la distribución del tamaño de las gotas como una función dependiente del radio.

A partir del análisis de investigadores dicha distribución se ha estudiado y escrito como una función exponencial que es dependiente, entre otras constantes empíricas, de la intensidad de lluvia; también es posible encontrar la expresión de la atenuación de la sección transversal por medio de la teoría de dispersión de Mie para una onda plana radiando una esfera absorbente.

La atenuación específica se puede escribir como

$$\gamma = 4.343 N_0 \int Q_T(r, \lambda, m) e^{-\Lambda r} dr \left[\frac{dB}{m} \right] \quad eq(4.8)$$

Para obtener la atenuación total se tiene que integrar sobre la extensión de la lluvia en dirección de la propagación de la onda pero tanto la atenuación de la sección transversal como la distribución de las gotas cambian durante el trayecto, lo que hace que se deban ajustar esas expresiones para distintos tramos del trayecto, lo que puede ser bastante complicado e incluso esas variaciones deben ser aproximadas de manera estadística para un buen uso con modelos de predicción de atenuación de lluvia.

b) Uso de la intensidad de lluvia

Como se mencionó anteriormente, al hacer las mediciones de la atenuación percibida desde el segmento terrestre y compararlas con la intensidad de lluvia percibida en el trayecto, la atenuación específica pudo ser aproximada por medio de la expresión

$$\gamma \cong aR^b \left[\frac{dB}{km} \right] \quad eq(4.9)$$

Donde a y b son constantes que están relacionados con el comportamiento complejo de la expresión utilizada en la aproximación clásica y R es la intensidad de lluvia en mm/h.

Esta expresión es una relación muy simple si se compara con la aproximación clásica, lo que hace que sea la expresión usada en la mayoría de los análisis realizados para hacer cálculos de predicción de atenuación e, incluso, cuando la obtención de las constantes también requiere algunos cálculos, éstos no son tan complejos.

De acuerdo con la Unión internacional de Telecomunicaciones (ITU por sus siglas en inglés) es necesario calcular la atenuación específica a través de valores conocidos de intensidad de lluvia a través de la ecuación (4.9), aunque en la recomendación UIT-R P.838-3, [24], los valores a y b son cambiados por las constantes k y α .

$$\gamma = kR^\alpha \left[\frac{dB}{km} \right] \quad eq(4.10)$$

En esta recomendación los valores de las constantes se obtienen a partir de las expresiones

$$k = \frac{k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta\cos 2\tau}{2} \quad eq(4.11)$$

$$\alpha = \frac{k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta\cos 2\tau}{2k} \quad eq(4.12)$$

Donde θ es el ángulo de elevación del trayecto y τ es el ángulo de inclinación de la polarización con respecto a la horizontal.

Los coeficientes k_H , k_V , α_H y α_V se obtienen a partir del uso de ecuaciones derivadas del ajuste de curvas a coeficientes de la ley potencial derivados de cálculos de dispersión.

Para obtener dichos valores se usan cálculos recursivos, además de constantes con valores específicos para cada coeficiente, tanto en polarización horizontal como vertical.

En la tabla 4.1 se presenta la serie de valores de los coeficientes k y α para frecuencias en la zona de la banda Ka.

Para la consideración de la intensidad de lluvia, el organismo internacional recomienda que, de ser posible, se utilicen las mediciones de intensidad de lluvia a largo plazo con tiempo de integración de un minuto; si se cuenta con mediciones con tiempos de integración más largos entonces que se utilicen dichas medidas y se conviertan a valores con tiempo de integración de un minuto; y, por último, que las mediciones sean de un tiempo de al menos tres años para proporcionar una estabilidad a las estadística.

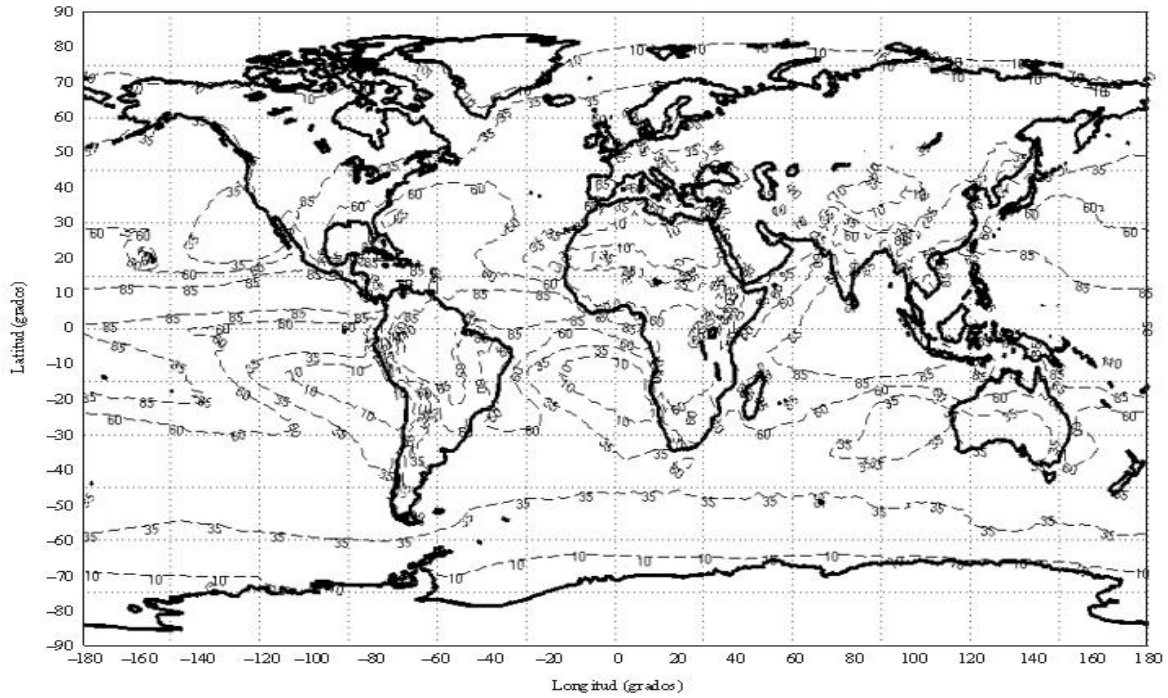
De otra forma, si no se cuenta con la información de intensidad de lluvia se puede calcular a partir de una base de datos del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio (CEPMPM) a través del modelo descrito en la recomendación UIT-R P.837-6 para obtener la intensidad de lluvia sobrepasada durante cualquier porcentaje del año medio y en cualquier lugar con tiempos de integración de un minuto.

También, como una referencia fácil, se puede recurrir a los mapas digitales para seleccionar la intensidad de lluvia sobrepasada durante el 0.01% del año.

En las figuras 4-1 y 4-2 se muestran dos mapas digitales de intensidad de lluvia [25], el primero global y el segundo para la región de Norteamérica.

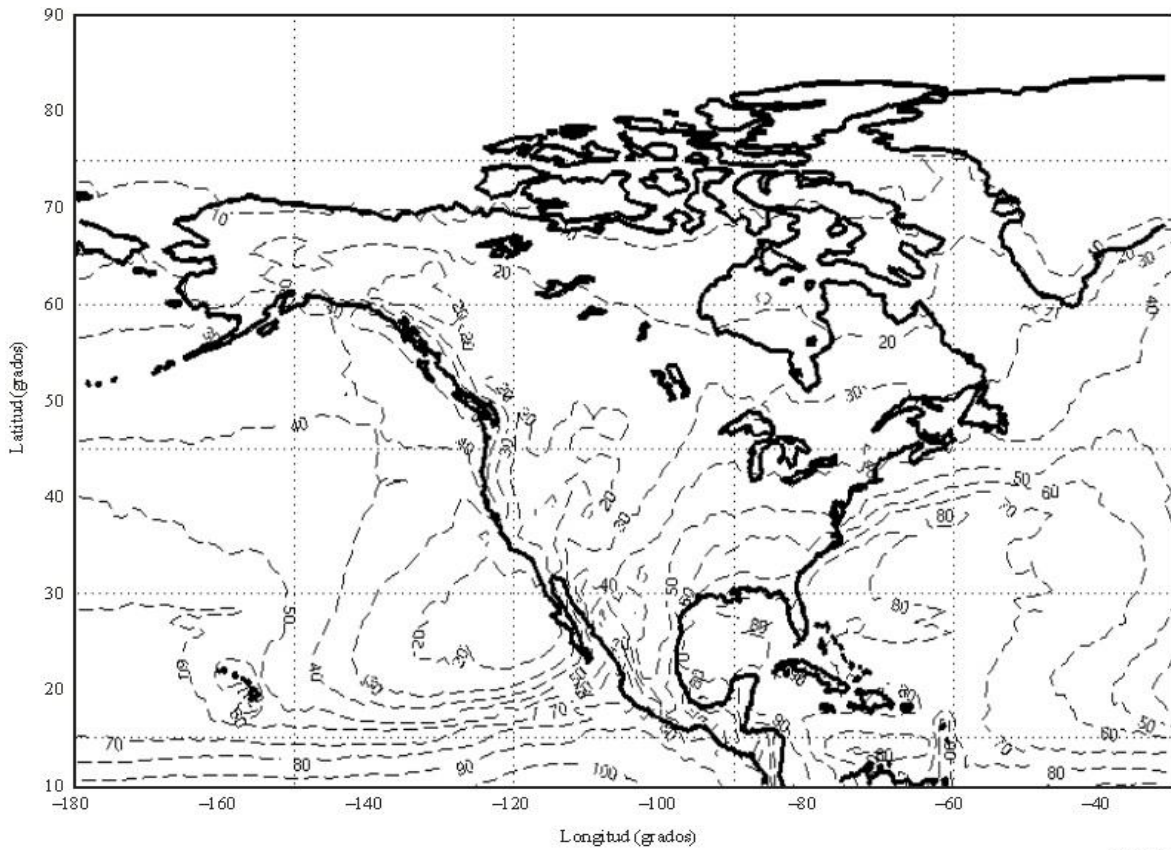
Tabla 4.1 Valores de los coeficientes, en polarización horizontal y vertical, para determinar la atenuación específica para el rango de 20 a 40 GHz.

Frecuencia GHz	k_H	α_H	k_V	α_V
20	0.09164	1.0568	0.09611	0.9847
21	0.1032	1.0447	0.1063	0.9771
22	0.1155	1.0329	0.1170	0.9700
23	0.1286	1.0214	0.1284	0.9630
24	0.1425	1.0101	0.1404	0.9561
25	0.1571	0.9991	0.1533	0.9491
26	0.1724	0.9884	0.1669	0.9421
27	0.1884	0.9780	0.1813	0.9349
28	0.2051	0.9679	0.1964	0.9277
29	0.2224	0.9580	0.2124	0.9203
30	0.2403	0.9485	0.2291	0.9129
31	0.2588	0.9392	0.2465	0.9055
32	0.2778	0.9302	0.2646	0.8981
33	0.2972	0.9214	0.2833	0.8907
34	0.3171	0.9129	0.3026	0.8834
35	0.3374	0.9047	0.3224	0.8761
36	0.3580	0.8967	0.3427	0.8690
37	0.3789	0.8890	0.3633	0.8621
38	0.4001	0.8816	0.3844	0.8552
39	0.4215	0.8743	0.4058	0.8486
40	0.4431	0.8673	0.4274	0.8421



P0837-01

Fig. 4-1 Intensidad de lluvia sobrepasada durante 0.01% del año en el mundo (ITU-R P.837-6).



P0837-02

Fig. 4-2 Intensidad de lluvia sobrepasada durante 0.01% del año en la región de Norteamérica (ITU-R P.837-6)

4.2.3 Modelos de Atenuación

Para obtener el valor total de la atenuación por lluvia se requiere hacer uso de modelos de predicción. Estos modelos pueden ser agrupados en dos categorías, los modelos físicos y los modelos empíricos (o semi-empíricos).

Los modelos físicos están basados en un análisis teórico que intenta reproducir las características del fenómeno de atenuación por lluvia. Mientras que este enfoque es más confiable, debido a que los resultados son generados a partir de situaciones donde se reproducen condiciones reales, su gran problemática es el proceso de llevarlos a cabo, pues requiere de la preparación de laboratorio, personal experimentado para realizarlo y, además, son muy costosos.

Los modelos empíricos, por su parte, están basados en información acumulada de estaciones localizadas en diferentes zonas climáticas; su mayor ventaja es que la atenuación es resultado de expresiones y cálculos relativamente fáciles, aunque no involucran ningún análisis teórico, como en el caso de los modelos físicos, además, dependen de la información específica de la zona en cuestión o de los bancos de datos disponibles los cuales necesitan ser actualizados para que los cálculos puedan ser confiables [23].

A continuación se describen las características generales de algunos de los modelos utilizados en la historia reciente. Cabe destacar que estos modelos no están exentos de mejoras y actualizaciones, ya que se trata de un trabajo continuo para ayudar con el diseño de sistemas de comunicaciones.

a) Modelo de la UIT

El modelo para el cálculo de la atenuación de la UIT es uno de los modelos de atenuación por lluvia más aceptados alrededor del mundo para sistemas de comunicaciones. Desde 1982 se aprobó por primera vez a través de la CCIR y desde entonces ha continuado actualizándose conforme el fenómeno de atenuación por lluvia y su modelado son cada vez mejor entendidos, además del hecho de contar con más información de diferentes fuentes globales.

A partir de 1990 el modelo ITU se ha basado en el modelo DAH (por las iniciales de sus autores Dissanayake, Allnutt y Haidara).

El método, en general, describe la forma de encontrar la distancia efectiva recorrida a través de la lluvia (dado que puede haber trayectos del enlace en donde no esté lloviendo), para lo cual se necesitan los valores de la altura de la lluvia, la proyección horizontal del trayecto, un ajuste vertical, un factor de reducción, entre otros. Al final la atenuación es el resultado de multiplicar dicha distancia efectiva por atenuación específica que ya se ha descrito antes [14].

De acuerdo con la el organismo, el modelo permite estimar la atenuación de forma correcta en cualquier emplazamiento dado para sistemas que operen hasta 55 GHz [26].

Al final de esta sección se describirán los pasos necesarios para calcular la atenuación total basada en la recomendación ITU-R P.618-12.

b) Modelo Global de Crane

En 1980 R. K. Crane presentó el primer modelo que contenía, en sí mismo, un procedimiento para calcular la atenuación por lluvia.

Este primer modelo es conocido como el *Modelo Global de Crane* y depende de observaciones geofísicas de las estadísticas de la intensidad de lluvia, la estructura horizontal de la lluvia y la estructura de la temperatura vertical de la atmósfera [14].

Para este modelo se emplea un sistema de mapas para asignar una intensidad de lluvia a diferentes regiones del planeta, como lo hacen los mapas digitales de la ITU, aunque en este caso el uso de los mapas es mandatorio.

En términos generales, la idea de este modelo es similar al modelo de la ITU, pero difiere en la forma de calcular la atenuación específica así como en el cálculo y procedimiento para obtener la distancia efectiva.

c) Modelo de Crane de dos componentes

Dos años después de que surgiese el modelo global, Crane presentó un modelo conocido como *Modelo de las dos componentes de Crane*; éste es una extensión del modelo global, aunque incorpora información estadística del movimiento y tamaño de las celdas que mejoran la estimación.

Una de las principales características de este modelo es que visualiza el fenómeno de la lluvia en dos partes y después suma sus contribuciones de manera separada; por un lado están las regiones en donde la lluvia es más intensa, las celdas de volumen, y, por otro lado, están las zonas de mayor tamaño, que rodean a las celdas, donde la lluvia es más ligera y que reciben el nombre de “debris” [14].

El modelo asume que en el trayecto sólo se presentará una celda, un “debris” o ambos. Está diseñado para calcular la probabilidad de que una atenuación dada sea rebasada; una de las dos componentes puede generar la atenuación y el modelo calcula la probabilidad asociada con cada fenómeno y después suma los valores independientes para obtener la probabilidad de atenuación estimada.

d) Modelo Australiano

Este modelo es propuesto para el cálculo de la atenuación por lluvia para enlaces que operan a frecuencias de entre 5 y 60 GHz para servicio fijo. Es válido para ángulos de elevación entre 5 y 90 grados con una intensidad de lluvia rebasada entre 0.001% y 1% del año.

Dos características importantes del modelo es el uso de la intensidad de lluvia para cada estación, así como su dependencia a un factor de reducción del trayecto vertical. Esta última consideración toma en cuenta la no uniformidad de la intensidad lluvia durante el trayecto, lo que representa una situación de lluvia en caso real [32].

e) Modelo Brasileño

En la década pasada, en 2008, Brasil presentó un nuevo modelo de atenuación por lluvia a la ITU. Este método mantiene el concepto de la celda de lluvia equivalente del modelo de la ITU, optimizándolo para una alta probabilidad de lluvia y baja disponibilidad, siendo el más utilizado en las zonas ecuatorial y tropical.

El modelo presenta un comportamiento errático para distancia menores de 1 km, por lo que no se recomienda su uso en distancias comprendidas en ese rango [33].

f) Modelo Bryant

Este modelo también usa el concepto de celda de lluvia equivalente, además de una altura de lluvia variable y el ángulo de elevación de la estación [33].

Al usar una celda de lluvia equivalente la intensidad de lluvia se considera constante en todo su volumen y los parámetros asociados a ésta, como son el diámetro, la cantidad de celdas y la altura de lluvia también dependen de la intensidad de lluvia.

Se elaboró a partir de la comparación de medidas experimentales de atenuación en 12 GHz en zonas tropicales y registros de pluviómetros. Al compararse con los registros de información de la ITU se ha registrado un buen funcionamiento para frecuencias de hasta 50 GHz [32].

g) Otros modelos

En la literatura pueden encontrarse otros modelos, como son el modelo mejorado de Assis-Einloft, el modelo Excell, el modelo de García-López, el modelo de Karasawa, el modelo de Leitao-Watson, el modelo Matricciani, el modelo Misme-Waldteufel, el modelo Svjatojor y el modelo de atenuación simplificado (SAM por sus siglas en inglés), entre otros.

Todos estos modelos presentan alguna característica distintiva que puede hacerlos más efectivos bajo determinadas circunstancias, no obstante, no se puede decir de manera tajante que alguno sea mejor o peor.

Ya que no es trabajo de este escrito desglosar de manera minuciosa cada uno de ellos, para una mejor referencia sobre los modelos y, para la descripción del proceso de cálculo involucrado, se recomienda revisar la referencia [22].

4.2.4 Cálculo de la atenuación por lluvia de acuerdo a la recomendación ITU-R P.618-12 [26]

El procedimiento para obtener la atenuación por lluvia de la recomendación funciona de manera adecuada para frecuencias de hasta 55 GHz y proporciona valores estimados a largo plazo.

En la figura 4-3 se ejemplifica la geometría del trayecto junto con los parámetros de entrada del método.

Para efectuar el cálculo es necesario contar con seis parámetros de entrada:

$R_{0.01}$: intensidad de lluvia sobrepasada en 0.01% de un año promedio en mm/h

h_s : altura sobre el nivel del mar de la estación terrena en km

θ : ángulo de elevación

φ : latitud de la estación terrena

f : frecuencia de operación del enlace, ya sea de subida o bajada, en GHz

R_e : radio equivalente de la Tierra, es decir, 8500 km

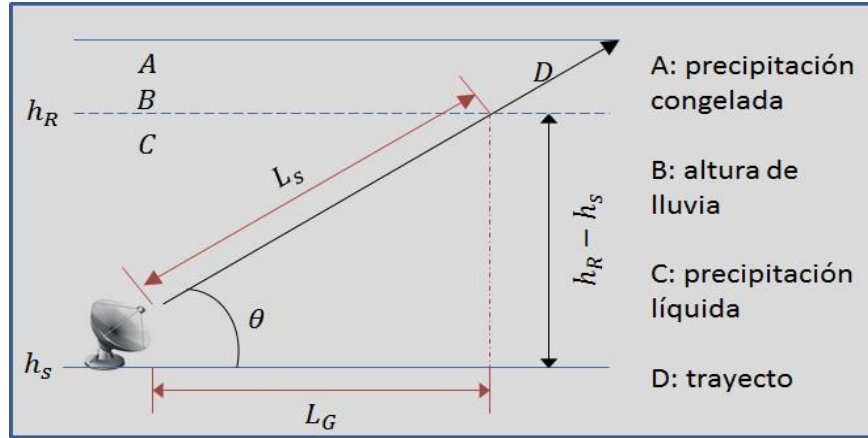


Fig. 4-3 Representación esquemática de la geometría del trayecto.

Primero. Se determina la altura de la lluvia de acuerdo con la recomendación ITU-R P. 839-4 [27], donde a partir de la altura isoterma a 0°C promedio anual sobre el nivel del mar de la localización de la estación terrena se obtiene la altura de lluvia anual promedio sobre el nivel del mar a través de la ecuación (4.12).

$$h_R = h_0 + 0.36 [km] \quad eq(4.13)$$

Para áreas en donde no se tiene información específica la altura isoterma se puede en forma de mapa digital en uno de los archivos pertenecientes a la recomendación.

Los valores que son proporcionados van de 0° a 360° en longitud y de -90° a 90° en latitud.

Segundo. Se calcula la longitud del trayecto de línea de vista hacia el satélite que, dependiendo del ángulo de elevación, utiliza dos diferentes expresiones. Posteriormente también se calcula la proyección horizontal del trayecto.

$$L_S = \begin{cases} \frac{h_R - h_s}{\sin\theta} & \text{para } \theta \geq 5^\circ \\ \frac{2(h_R - h_s)}{\sqrt{\sin^2\theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e}} + \sin\theta} & \text{para } \theta < 5^\circ [km] \end{cases} \quad eq(4.14)$$

$$L_G = L_S \cos \theta \text{ [km]} \quad eq(4.15)$$

Si la diferencia entre la altura de la lluvia y la altura de la estación terrena es cero o menor que cero entonces la atenuación por lluvia esperada es nula.

Tercero. Se calcula la atenuación específica a partir del valor de la intensidad de lluvia sobrepasada durante 0.01% del año y los coeficientes k y α , cuya obtención se discutió en la sección 4.2.2.

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha \left[\frac{dB}{km} \right] \quad eq(4.16)$$

Cuarto. Se calcula el factor de reducción horizontal para el 0.01% del tiempo.

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})} \quad eq(4.17)$$

Quinto. Se calcula el factor de ajuste vertical para el 0.01% del tiempo.

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 \left(1 - e^{-\left(\frac{\theta}{1+\chi}\right)} \right) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2}} - 0.45 \right)} \quad eq(4.18)$$

Con

$$L_R = \begin{cases} \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} & \text{para } \zeta > \theta \\ \frac{h_R - h_S}{\sin \theta} & \text{para } \zeta \leq \theta \end{cases} \text{ [km]} \quad eq(4.19)$$

$$\chi = \begin{cases} 36 - |\varphi| & \text{para } |\varphi| < 36 \\ 0 & \text{para } |\varphi| \geq 36 \end{cases} [^\circ] \quad eq(4.20)$$

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0.01}} \right) [^\circ] \quad eq(4.21)$$

Sexto. Se calcula el trayecto efectivo.

$$L_E = L_R v_{0.01} \text{ [km]} \quad eq(4.22)$$

Séptimo. Finalmente se obtiene la atenuación excedida durante 0.01% del año en el trayecto.

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \text{ [dB]} \quad eq(4.23)$$

La atenuación, A_p , excedida para otros porcentajes, p , durante el año, donde p oscila desde 0.001% hasta 5%, puede ser estimada con la expresión

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655+0.033 \ln(p)-0.045 \ln(A_{0.01})-\beta(1-p) \sin \theta)} \text{ [dB]} \quad eq(4.24)$$

Donde

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{Si } p \geq 1\% \text{ ó } |\varphi| \geq 36^\circ \\ -0.005(|\varphi| - 36^\circ) & \text{Si } p < 1\% \text{ y } |\varphi| < 36^\circ \text{ y } \theta \geq 25^\circ \\ -0.005(|\varphi| - 36^\circ) + 1.8 - 4.25 \sin \theta & \text{Otro caso} \end{cases} \quad eq(4.25)$$

Si se posee de información a largo plazo confiable sobre la atenuación en una localización determinada que fue medida con un ángulo de elevación y frecuencia distinta a los que se necesitan es preferible, en la mayoría de los casos, escalar esos datos hacia el ángulo de elevación y frecuencia deseados en vez de utilizar el modelo, esto debido a que los datos de las estadísticas de lluvia varían mucho año con año, lo que ocasionará una diferencia entre los valores predichos y los valores medidos.

4.2.5 Modelo de atenuación para México

Para un mejor análisis sobre la atenuación por lluvia dentro del país es necesario contar con información más especializada sobre las características de lluvia para diferentes regiones del territorio.

Es importante resaltar la diversidad de zonas climáticas presentes en el país y, por lo tanto, las condiciones de lluvia varían mucho de una zona a otra; por ejemplo, no es la misma intensidad de lluvia en la zona del golfo que hacia el bajío. Se requiere, entonces, de un análisis de estas condiciones con información actualizada sobre la cantidad de lluvia en el país, al menos de unos treinta años hacia atrás, para poder brindar información confiable, pues las recomendaciones de la ITU utilizan información que no representa de forma precisa las condiciones particulares del país y, por lo tanto, los resultados obtenidos tendrán un margen de error mayor.

Anteriormente ya había sido conducido un estudio sobre los efectos por hidrometeoros en los enlaces satelitales por el ingeniero Jorge López Shunia, en el que el país podía dividirse en siete zonas con diferentes características de lluvia, sin embargo, es precisa una actualización de éste también [1].

4.3 Atenuación por nubes y niebla

A pesar de que la lluvia es el fenómeno climático de mayor peso a considerar dentro del análisis del enlace, las nubes también están presentes y deben ser consideradas.

En enlaces que operan a frecuencias mayores a 10 GHz o en enlaces con una disponibilidad muy baja, la atenuación debida a las nubes puede ser un factor importante.

Para sistemas de alto margen la lluvia se convierte en el principal obstáculo, mientras que para sistemas que operan con un margen más bajo y utilizan frecuencias altas las nubes son un gran problema, esto porque la lluvia está presente menos del 8% del tiempo a diferencia de las nubes, que están presentes, en promedio, la mitad del tiempo [14].

A partir de los 20 GHz, la atenuación producida por las nubes se vuelve significativamente importante; aumenta conforme lo hace la frecuencia y disminuye conforme incrementa el ángulo de elevación.

Para poder modelar los efectos de atenuación es necesario conocer las características de las nubes presentes en el trayecto del enlace, siendo las de mayor importancia las características de las gotas de agua dentro de ellas, pues son las principales responsables de la atenuación por efectos de absorción. A pesar de que las nubes también contengan otros elementos, como lo son partículas de hielo, éstas no producen un efecto de atenuación significativo y son despreciados.

Los modelos utilizados para predecir este tipo de atenuación hacen uso de la aproximación de Rayleigh, ya que funciona para frecuencias por debajo de los 300 GHz (200 GHz para la ITU) y con partículas del tamaño límite de 100 μm (0.01 cm ó 0.1 mm) [28].

Tanto las nubes como la niebla consisten en pequeñas gotas de agua de un diámetro inferior a 0.1mm, a diferencia de las gotas de lluvia, cuyo tamaño varía de 0.1 a 10 mm.

Como se mencionó antes, la atenuación es generada, en su mayoría, por los efectos de absorción de las pequeñas gotas de agua, por lo que es posible ver las características de atenuación en base al contenido de agua líquida total en vez del tamaño de cada gota.

La densidad de agua dentro de las nubes varía, desde 0.5 a 2 g/m^3 , de manera general, aunque se han visto grandes concentraciones de agua dentro de las nubes de tormentas, del orden de 5 g/m^3 . En promedio, los valores máximos están alrededor de 1 g/m^3 para nubes bajo condiciones normales [14].

A diferencia de las nubes, la atenuación debida a la neblina es muy poca para frecuencias que operan por debajo de los 100 GHz; la cantidad de agua contenida

dentro de la niebla no es suficiente para generar grandes efectos de atenuación, incluso cuando ésta sea espesa.

El trayecto que la señal recorre a través de la niebla es muy corto, aun cuando se trate de ángulos de elevación muy pequeños, y la distancia total es de apenas unos cientos de metros, por lo que la atenuación total debida a la neblina se considera despreciable en el cálculo de enlace para frecuencias operando a menos de 100 GHz [14], como es el caso de análisis de para la banda Ka.

4.3.1 Cálculo de la atenuación con el modelo de la ITU

La ITU, en su recomendación ITU-R P.840-6 [28], presenta un método para calcular la atenuación por nubes y niebla.

A continuación se describe, de forma general, la manera en la que se realiza el cálculo, para lo que se requieren cuatro parámetros de entrada.

f : frecuencia de operación (GHz)

θ : ángulo de elevación (°)

T : temperatura de superficie (Kelvin)

L_{red} : contenido total de la columna de agua líquida reducida (kg/m²)

Primero. Se calcula la constante inversa de la temperatura y a partir de ella se obtienen las frecuencias de relajación principal y secundaria del modelo Debye doble para la permitividad dieléctrica compleja del agua.

En el caso de las nubes T se asume igual a 273.15 K, mientras que para la niebla T es la temperatura de la superficie.

$$\phi = \frac{300}{T} \left[\frac{1}{K} \right] \quad eq(4.26)$$

$$f_p = 20.20 - 146(\phi - 1) + 316(\phi - 1)^2 [GHz] \quad eq(4.27)$$

$$f_s = 39.8 f_p [GHz] \quad eq(4.28)$$

Segundo. Se calculan las componentes real e imaginaria de la permitividad dieléctrica del agua.

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p \left[1 + \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s \left[1 + \left(\frac{f}{f_s} \right)^2 \right]} \quad eq(4.29)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_s} \right)^2 \right]} + \varepsilon_2 \quad eq(4.30)$$

Con

$$\varepsilon_0 = 77.6 + 103.3(\phi - 1)$$

$$\varepsilon_1 = 0.0671\varepsilon_0$$

$$\varepsilon_2 = 3.52$$

Tercero. Se calcula el coeficiente de atenuación específica que indica el punto de atenuación con la frecuencia y la concentración de agua determinadas.

$$K_l = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)} \left[\frac{dB}{km} \frac{g}{m^3} \right] \quad eq(4.31)$$

Donde

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''}$$

Cuarto. Para obtener la atenuación total por nubes en el trayecto del enlace para una probabilidad determinada, se requiere de conocer el contenido total de la columna de agua líquida reducida.

En caso de que no se tenga acceso a esa información, en particular para la localización, se puede recurrir a los mapas digitales que forman parte de la recomendación y que contienen datos de valores anuales y mensuales del contenido total de la columna de agua líquida reducida para diferentes probabilidades excedidas en el año y mes respectivamente.

Quinto. Finalmente, con la información anterior se calcula la atenuación total en el trayecto por nubes.

$$A_c = \frac{L_{red}K_l}{\sin \theta} [dB] \quad eq(4.32)$$

Esta relación es válida sólo para ángulos de elevación entre 5° y 90°, ya que a ángulos menores la relación $1/\sin \theta$ asume que la nube tiene una extensión cercana a infinito; por lo tanto, debe existir una limitante en cuanto a la longitud del trayecto y, por consiguiente, el ángulo de elevación.

4.4 Atenuación por gases atmosféricos

Al atravesar por la atmósfera, una señal sufre una disminución en su amplitud debido a los gases que se encuentran presentes en ella y sus efectos de absorción.

Como muchos otros fenómenos, la atenuación por la atmósfera es dependiente de varios factores, siendo los más importantes la frecuencia de operación, la temperatura, la presión atmosférica y la concentración de vapor de agua en ella.

También, la presencia de otros gases genera atenuación y agrega ruido a los enlaces.

En frecuencias menores a los 100 GHz sólo el oxígeno y el vapor de agua tienen un efecto importante en las bandas de comunicaciones, ya que el primero tiene varias líneas de absorción muy cercanas alrededor de los 60 GHz y el segundo la tiene en 22.3 GHz [13].

Gases atmosféricos tales como: Óxido Nitroso (N_2O), Dióxido de Azufre (SO_2), Ozono (O_3), Dióxido de Nitrógeno (NO_2) y Amoníaco (NH_3) muestran también líneas resonantes, sin embargo, debido a que poseen una baja densidad en la atmósfera, para las frecuencias de interés, su efecto sobre la propagación se considera despreciable [2].

En general, los efectos de la atenuación por gases en la atmósfera pueden despreciarse para enlaces que operan por debajo de los 10 GHz.

En la figura 4-4 se observa que la atenuación por gases atmosféricos para condiciones estándar de la atmósfera no rebasa los 3 dB en 22.24 GHz, que es la banda de absorción del vapor de agua y representa, por consiguiente, el mayor punto conflictivo en la banda Ka.

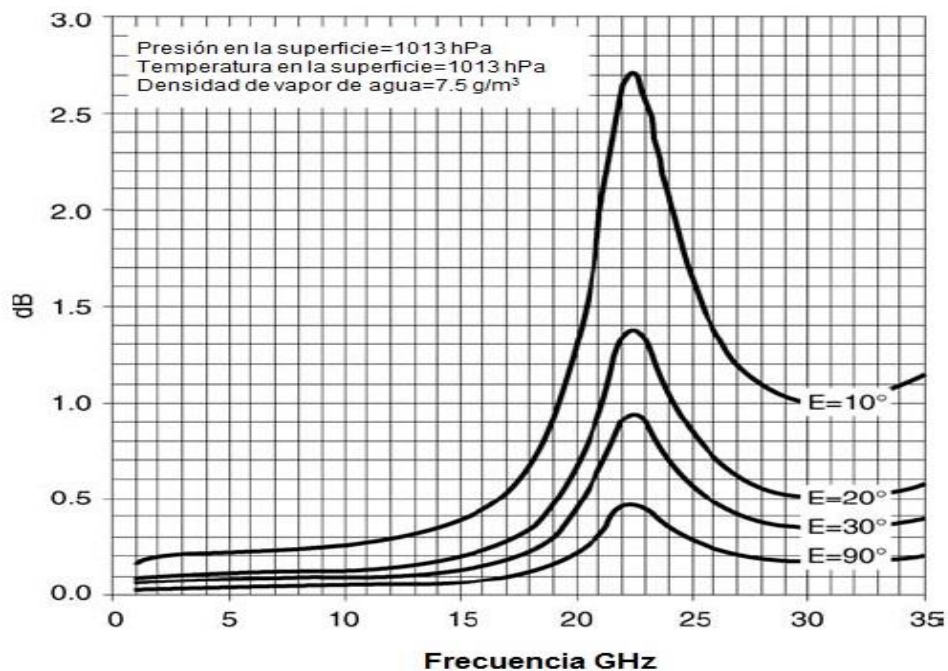


Fig. 4-4 Atenuación debida a gases en la atmósfera como función de la frecuencia y el ángulo de elevación para una atmósfera estándar. Tomada de la referencia [13] en la página 207.

Estrictamente, la atenuación total acumulada depende de la longitud exacta del trayecto de la señal a través de las capas atmosféricas responsables de esta absorción.

Las mejores formas de realizar predicciones de la atenuación debido a la atmósfera son a través del modelo de Refractividad Compleja de Liebe [14] y los procedimientos desarrollados por la ITU.

Tanto el modelo de Liebe como el anexo 1 de la recomendación ITU-R P.676-10 realizan una suma de todas las líneas de absorción del oxígeno y el vapor de agua, mientras que el anexo 2 de la recomendación es una simplificación del método con cálculos más sencillos.

En los métodos de suma de todas las líneas se considera una atmósfera dividida en capas, donde cada una tiene sus propias condiciones de humedad, temperatura y presión barométrica bien diferenciadas.

La atenuación específica es calculada para cada una de las capas y la atenuación total vertical se obtiene al integrar la atenuación específica desde la superficie hasta una distancia de 30 km en dirección del cenit, es decir, con un ángulo de elevación de 90° .

La atenuación debida a los gases en dirección del trayecto del enlace se obtiene al escalar la atenuación del cenit con respecto al ángulo de elevación de la estación terrena con respecto a su horizontal.

El método de aproximación del anexo dos de la recomendación intenta proveer un cálculo simplificado de la atenuación para un rango específico de condiciones meteorológicas y configuraciones geométricas.

Este método tiene tres restricciones principales: el ángulo de elevación debe estar entre el rango de 5° y 90° , la estación terrena no puede estar a una altitud de más de 10 km con respecto al nivel del mar y el rango de frecuencias para las que funciona va de 1 a 350 GHz.

Para casos de estaciones terrenas con una altitud mayor a 10 km, así como para ángulos de elevación pequeños o simplemente para obtener mayor precisión es conveniente usar el método de suma de líneas.

La diferencia entre la precisión del método simplificado y el modelo de líneas va de 0.1 a 0.7 dB/km.

5.- CÁLCULO DE ENLACE

El cálculo de enlace es uno de los puntos más importantes en el análisis de cualquier misión satelital; sin importar el tipo de objetivo que se trate de alcanzar, existen condiciones mínimas de operación que deben de cumplirse para que la comunicación con el satélite pueda realizarse de manera efectiva. En efecto, dependiendo del tipo de misión, estos requerimientos pueden ser más o menos rigurosos, por ejemplo, la disponibilidad que debe tener el enlace de un satélite de observación terrestre no es la misma que la que debe cumplir uno dedicado a las comunicaciones, sin embargo, en todas es imprescindible un análisis cuidadoso.

Durante el estudio previo a la operación de los enlaces es necesario considerar tanto aspectos técnicos como aspectos ambientales y climatológicos, ya que no es lo mismo la operación a cielo despejado que a cielo con lluvia y tampoco lo es la operación en una u otra banda de frecuencia, pues esta simple elección tiene consecuencias tanto en los niveles de potencia a usar como en los márgenes de error y hasta en la severidad en la que fenómenos del clima afectan al enlace.

En este capítulo se abordarán los elementos a considerar dentro del enlace y posteriormente se utilizarán para realizar simulaciones en la banda Ka con diferentes esquemas de modulación para transpondedores transparentes y regenerativos.

5.1 Configuración básica del enlace satelital

En la figura 5-1 se presenta, de forma básica, la configuración de los enlaces, ascendente y descendente, durante la comunicación satelital.

En la estación terrena transmisora los elementos a considerar son el transmisor, más específicamente el amplificador, y la antena, que radia la señal en dirección del receptor. En el satélite, los elementos que intervienen directamente son la antena y el amplificador de bajo ruido, cuyas características también deben ser consideradas. Durante el trayecto la señal sufrirá una serie de pérdidas en la potencia debido a distintas circunstancias, ya sea por la propagación en el espacio libre, los gases atmosféricos, la lluvia, un mal apuntamiento de la antena, entre otros. Uno de los elementos que estará presente al recibir la señal en el satélite es el ruido, que se engloba como un ruido total equivalente. Una vez que se conocen la potencia de la señal portadora y del ruido total equivalente se obtiene una relación entre ambas que sirve para determinar el desempeño del enlace.

En el enlace de bajada se presenta una situación similar y la relación entre la portadora y el ruido se calcula de forma similar.

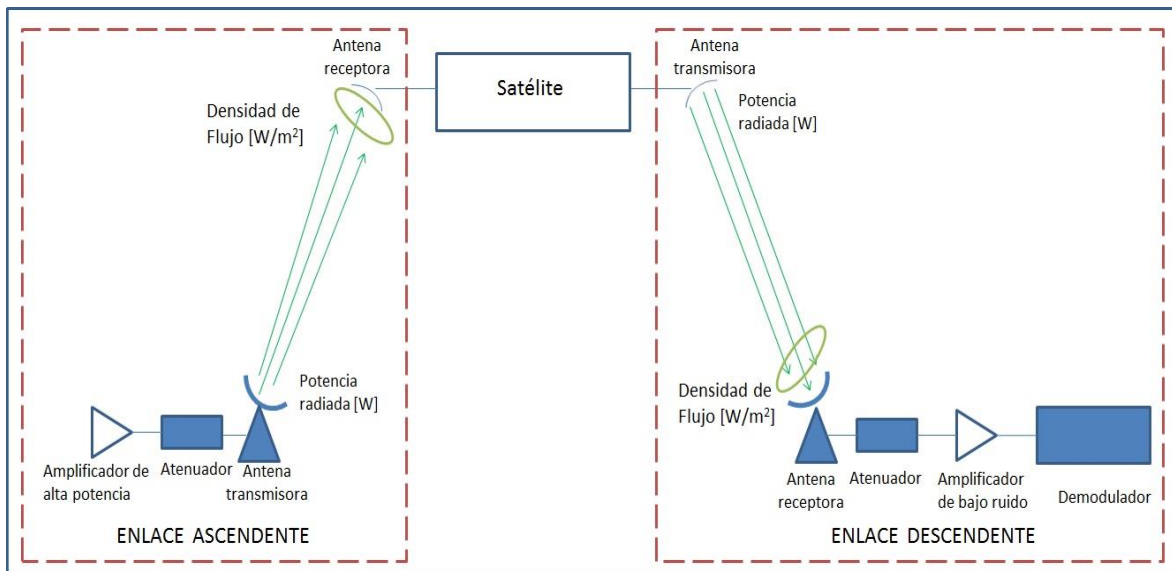


Fig. 5-1. Configuración básica del enlace satelital, en el que se toma en cuenta la parte ascendente y descendente.

5.2 Elementos de propagación

5.2.1 Ganancia de la antena y patrón de radiación

Formalmente, la ganancia de una antena se entiende como la relación entre la potencia, radiada o recibida, por unidad de ángulo sólido de una antena, en una dirección dada, con respecto a la potencia, radiada o recibida, por unidad de ángulo sólido de una antena isotrópica, ambas alimentadas por la misma potencia. Para el caso de los satélites las antenas deben ser directivas para asegurar un nivel de potencia adecuado en la recepción y evitar, tanto como sea posible, algún tipo de interferencia con otros satélites.

La ganancia máxima de la antena ideal, sin pérdidas, está definida por la ecuación (5.1) y depende del área de apertura y la frecuencia de la onda (la longitud de onda); en una antena real, en cambio, la ganancia depende también de la eficiencia de la antena, como se muestra en la ecuación (5.2). El producto del área de apertura y la eficiencia de la antena recibe el nombre de apertura, o área, efectiva.

$$G_{m\acute{a}x_{ideal}} = \frac{4\pi A}{\lambda^2} [1] \quad eq(5.1)$$

$$G_{m\acute{a}x_{real}} = \eta \frac{4\pi A}{\lambda^2} [1] \quad eq(5.1)$$

Por otra parte, el patrón de radiación indica las variaciones en la ganancia de la antena en función de la dirección; para las antenas con apertura circular el patrón es simétrico con respecto a su eje de rotación y puede ser representado tanto en

un plano polar como en un plano cartesiano. En la figura 5-2 se muestra un diagrama típico en ambas coordenadas.

Como se puede apreciar, el lóbulo principal apunta en la dirección de máxima radiación, siendo ahí donde debe concentrarse la mayor cantidad de potencia, mientras que los lóbulos secundarios deben mantenerse al mínimo para evitar algún tipo de interferencia.

El ancho angular del haz es el ángulo que corresponde a cierto nivel de ganancia; la ganancia disminuye conforme se aleja de la dirección de radiación máxima. Un punto de interés particular es el ángulo en donde la potencia decae en 3dB, es decir, a la mitad; éste es proporcional a la relación entre la longitud de onda y el diámetro de la antena, además de un coeficiente que depende de la ley de iluminación, si es uniforme dicho coeficiente tiene un valor de 58.5°, mientras que si es no uniforme el valor comúnmente usado es de 70°, como se vio en el capítulo 2 [1].

$$\theta_{-3dB} = 70 \frac{\lambda}{D} [^\circ] \quad eq (2.1)$$

Una vez que se conoce el ángulo de caída a 3dB se puede calcular la ganancia de la antena en cualquier zona del lóbulo principal comprendida en el ángulo entre la dirección de máxima radiación y la dirección de caída a 3dB por medio de la ecuación (5.3) [13].

$$G_\theta (dBi) = G_{m\acute{a}x} [dBi] - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_{-3dB}} \right)^2 [dBi] \quad eq(5.3)$$

Esto funciona cuando el ángulo se encuentra en el rango de $0^\circ \leq \theta \leq \frac{\theta_{-3dB}}{2}$

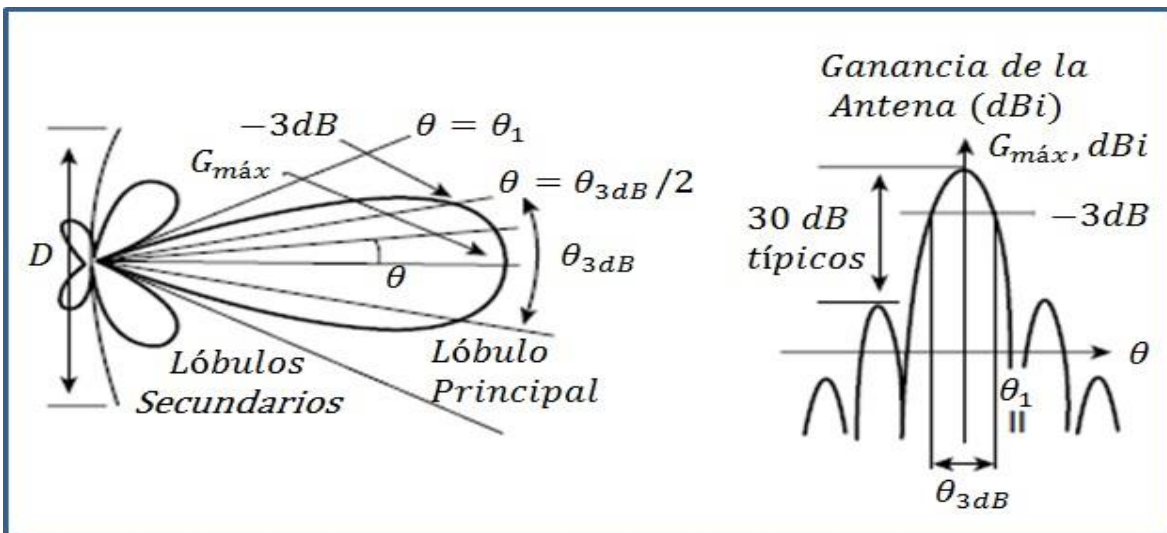


Fig. 5-2 Patrón de radiación típico para una antena de apertura en coordenadas polares y cartesianas.

5.2.2 Potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE)

La potencia isotrópica radiada equivalente o PIRE, como se le conoce comúnmente, hace referencia al producto de la potencia transmitida y la ganancia de la antena.

De acuerdo con [8], para su cálculo se utilizan las ecuaciones (5.4) y (5.5).

$$PIRE = P_t G_t [W] \quad eq(5.4)$$

$$PIRE[dBW] = 10\log P_t + 10\log G_t [dBW] \quad eq(5.5)$$

5.2.3 Densidad de flujo de potencia

La densidad de flujo de potencia se refiere a la densidad de potencia vista desde una distancia r con respecto a la antena directiva con cierta ganancia.

Desde la distancia r , la fuente de radiación pareciera un punto que emite de forma isotrópica, por lo que la potencia transmitida parecería distribuida de manera uniforme sobre un cuerpo esférico, por lo tanto, la densidad de potencia sería el resultado de dividir la potencia transmitida entre el área sobre la que se distribuye, es decir, el área de una esfera de radio r , sin embargo, como la antena es directiva, la densidad de potencia debe considerar también la ganancia de la antena, esto es, en lugar de usar la potencia transmitida se usa la PIRE [8]. Su cálculo se hace a partir de la ecuación (5.6).

$$P_\phi = \frac{PIRE}{4\pi r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad eq(5.6)$$

5.2.4 Pérdidas por propagación en el espacio libre

Para hablar de pérdidas de potencia es necesario, primero, tener una potencia recibida, por lo que se vuelve necesario plantear la situación en la que el flujo de potencia que viaja llega a la antena del receptor; esta antena tiene una ganancia y área efectiva determinadas, como se muestra a continuación.

$$P_r = P_\phi A_{efectiva} = \frac{PIRE G_r \lambda^2}{4\pi r^2 4\pi} [W] \quad eq(5.7)$$

Agrupando la expresión anterior en diferentes términos se puede escribir, finalmente, la potencia recibida como

$$P_r = PIRE G_r \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 r^2} \right] = \frac{PIRE G_r}{L_{e.l.}} [W]$$

La expresión entre corchetes es lo que se conoce como el inverso de las pérdidas de propagación en el espacio libre.

La expresión para denotar de forma directa esta atenuación está dada por la ecuación (5.8) [8]; cabe destacar que estas pérdidas son inherentes al recorrido de la señal entre la estación terrena y el satélite.

$$L_{e.l.} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 [1] \quad eq(5.8)$$

5.2.5 Pérdidas adicionales

Además de las pérdidas por la propagación en el espacio libre, en un enlace también pueden presentarse otro tipo de pérdidas dependiendo de las circunstancias.

Como se mencionó en el capítulo 4, el clima es un factor importante a considerar, ya que tanto gases en la atmosfera, como nubes y, en especial, la lluvia, son fuentes de atenuación, o en este caso pérdidas.

A continuación se presentan las ecuaciones para el cálculo de este tipo de atenuaciones.

Para la lluvia, con un tiempo excedido de 0.01% del año⁵:

$$L_{lluvia} = \gamma_R L_E [dB] \quad eq(4.23)$$

Para las nubes:

$$L_C = \frac{L_{red} K_l}{\sin \theta} [dB] \quad eq(4.32)$$

Donde L_{red} es el contenido total de agua líquida en la nube.

Para los gases atmosféricos se puede recurrir a la siguiente expresión:

$$L_{a.a} = L_{cenit} \operatorname{cosec} \theta [dB] \quad eq(5.9)$$

Esta expresión es útil cuando se conoce la atenuación por gases en la atmósfera en dirección del cenit, aunque también es posible conocer el valor de forma usar las gráficas para diferentes ángulos de elevación [8]. En cualquier caso este tipo de pérdidas no rebasan los 3dB en el rango de frecuencias de interés.

Otro tipo de pérdidas no tienen que ver con factores ambientales, sino con la configuración del sistema.

En esta categoría entran las pérdidas en el alimentador, por conexiones, entre otras, tanto para el transmisor y el receptor, aunque son del orden de 1 dB; también aquí se encuentran las pérdidas por desapuntamiento, en donde las

⁵ Si se desea un tiempo excedido de lluvia diferente es necesario referirse al capítulo 4 de este trabajo.

antenas de la estación terrena y del satélite no quedan perfectamente alineadas, por lo tanto se pierde algo de la ganancia con respecto a la relación idónea [1]. Las pérdidas por desapuntamiento se calculan por medio de las ecuaciones (5.10) y (5.11).

$$L_{Tx} = 12 \left(\frac{\theta_t}{\theta_{-3dB}} \right)^2 [dB] \quad eq(5.10)$$

$$L_{Rx} = 12 \left(\frac{\theta_r}{\theta_{-3dB}} \right)^2 [dB] \quad eq(5.11)$$

5.3 Ruido del sistema

El ruido es una contribución de potencia no deseada a la potencia de la señal que está viajando con información, reduciendo la capacidad de recibir el contenido de forma adecuada.

En un enlace satelital el ruido será generado, principalmente, de dos formas: por fuentes naturales de radiación localizadas en el área de recepción o por los mismos componentes dentro del equipo de recepción [13].

5.3.1 Ruido térmico y su densidad espectral de potencia

La forma de ruido de mayor interés aquí es el ruido térmico, que es causado por el movimiento aleatorio de los electrones dentro de los componentes del receptor. Este tipo de ruido es modelado como una fuente de ruido blanco dentro de un ancho de banda determinado, es decir, la potencia del ruido se distribuye de forma uniforme en el ancho de banda en cuestión [13]. La potencia total de ruido producida por una fuente de ruido térmico se calcula como sigue:

$$N = kT_e B [W] \quad eq(5.12)$$

Donde k es la constante de Boltzmann, con un valor de 1.38×10^{-23} J/K, T_e es la temperatura de ruido equivalente, que se discutirá más adelante, y B es el ancho de banda del ruido.

No todas las fuentes de ruido tienen una distribución uniforme, sin embargo, el modelo es adecuado para las fuentes de ruido dentro de un ancho de banda limitado, además, al ser independiente de la frecuencia, es útil expresar la potencia del ruido como una densidad de potencia de ruido, o densidad espectral de potencia de ruido, de la siguiente forma:

$$N_0 = \frac{N}{B} = kT_e \left[\frac{W}{Hz} \right] \quad eq(5.13)$$

5.3.2 Figura de ruido

La figura de ruido es una forma de cuantificar la contribución del ruido al sistema por un elemento en particular. Se define como la relación entre la potencia de ruido a la entrada del elemento y la potencia de ruido a su salida.

Su expresión está determinada por una temperatura de referencia y la temperatura de ruido equivalente del elemento, como se ve en la ecuación (5.14) [8].

$$N_f = 1 + \frac{T_e}{T_0} [1] \quad eq(5.14)$$

A partir de la ecuación anterior es posible calcular la temperatura de ruido equivalente si se conoce la figura de ruido.

5.3.3 Temperatura de ruido equivalente

La temperatura de ruido equivalente es una temperatura ficticia que representa la temperatura a la que se debería encontrar un elemento pasivo de referencia (como una resistencia) colocado a la entrada de un dispositivo que se asume como libre de ruido para generar la misma potencia de ruido a la salida que el dispositivo real sin el elemento pasivo en la entrada.

Es una medida del ruido generado por componentes internos del dispositivo [13].

De acuerdo al tipo de elemento al que se haga referencia, el valor de la temperatura de ruido se calcula de formas diferentes. Las situaciones más comunes incluyen el cálculo para una serie de amplificadores en cascada, elementos atenuadores (como son las guías de onda, los alimentadores, la lluvia, etc.) y las antenas, tanto en el satélite como en la estación terrena, con condiciones de cielo despejado o con lluvia para esta última [8].

a) Para amplificadores en cascada:

$$T_e = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 G_2} + \dots + \frac{T_n}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} [K] \quad eq(5.15)$$

b) Para un atenuador a la entrada y la salida:

$$T_e (salida) = T_0 \left(1 - \frac{1}{L}\right) [K] \quad eq(5.16)$$

$$T_e (entrada) = T_0(L - 1)[K] \quad eq(5.17)$$

Donde T_0 es la temperatura de referencia, que puede ser la temperatura ambiente, y L son las pérdidas asociadas al atenuador.

c) Para la antena en la estación terrena se tienen dos casos, cuando el cielo está despejado y cuando hay lluvia presente en el enlace.

Para cielo despejado:

$$T_e(\text{antena}) = T_{\text{cielo}} + T_{\text{Tierra}} [K] \quad eq(5.18)$$

Para cielo con lluvia:

$$T_e(\text{antena}) = \frac{T_{\text{cielo}}}{L_{\text{lluvia}}} + T_{\text{lluvia}} \left(1 - \frac{1}{L_{\text{lluvia}}}\right) + T_{\text{Tierra}} [K] \quad eq(5.19)$$

Por lo general, la contribución de la Tierra a la temperatura de ruido equivalente depende del ángulo de elevación, siendo mayor para los ángulos más pequeños. Los valores usados de manera general son los siguientes:

$$T_{\text{Tierra}} = 50 \text{ K para } 0^\circ < \theta \leq 10^\circ \quad eq(5.20)$$

$$T_{\text{Tierra}} = 10 \text{ K para } 10^\circ < \theta \leq 90^\circ \quad eq(5.21)$$

En la figura 5-3 se proporcionan las curvas de la contribución a la temperatura de ruido ocasionadas por el cielo para diferentes ángulos de elevación en función de la frecuencia.

La contribución debido a la lluvia usualmente tiene un valor de 280 K, que es ampliamente usado y da buenos resultados, sin embargo, también puede usarse la siguiente expresión para su cálculo:

$$T_{\text{lluvia}} \cong 1.12T_{\text{ambiente}} - 50 [K] \quad eq(5.22)$$

Donde T_{ambiente} es la temperatura donde se encuentra la estación terrena y se asume, por lo general, como 290 K.

d) La antena conectada al receptor en el satélite.

En este caso la temperatura se calcula en la entrada del receptor y se considera que existe un elemento atenuador (conexiones) entre ambos. Como la antena recibe la radiación térmica de la Tierra se considera que su temperatura es de 290 K.

La temperatura equivalente se calcula como sigue:

$$T = \frac{T_{\text{Antena}}}{L} + T_0 \left(1 - \frac{1}{L}\right) + T_{\text{Rx}} [K] \quad eq(5.23)$$

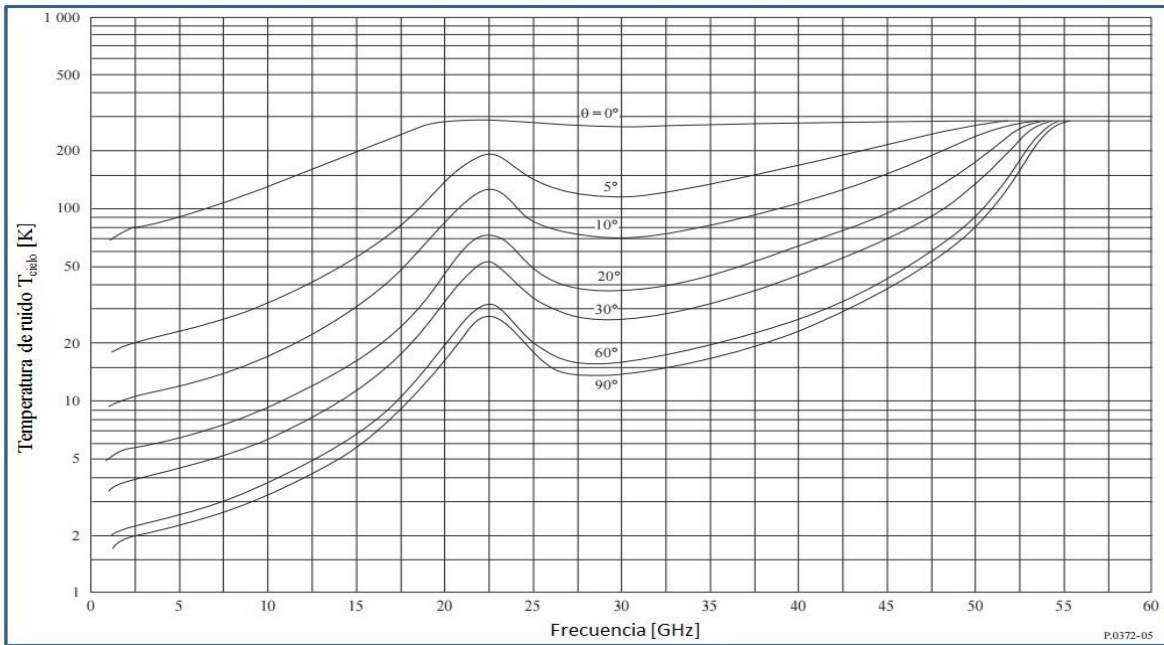


Fig. 5-3 Curvas de la temperatura de cielo para diferentes valores del ángulo de elevación.

5.3.4 Figura de mérito

La figura de mérito es un parámetro que mide la calidad o eficiencia de la parte del receptor en el enlace satelital. Se define como la relación entre la ganancia de la antena de recepción y la temperatura de ruido equivalente del sistema receptor [14].

Por lo anterior es muy importante obtener la temperatura equivalente del sistema, que es, en general, una suma de las temperaturas de los casos vistos en la sección anterior para el receptor destino.

La figura de mérito también se designa con la letra M y es calculado con las ecuaciones (5.24) Y (5.25).

$$M = \frac{G_r}{T_{receptor}} \left[\frac{1}{K} \right] \quad eq(5.24)$$

$$M = G_r - 10 \log T_{receptor} \left[\frac{dB}{K} \right] \quad eq(5.25)$$

5.4 Desempeño del enlace

Hay tres parámetros que son representativos del desempeño del enlace (ya sea ascendente o descendente) cuando se encuentra en presencia de ruido.

5.4.1 Relación portadora a ruido

Es la relación entre la potencia de la portadora y la potencia del ruido, en el mismo ancho de banda. Este parámetro define el desempeño general del sistema, pudiendo ser calculado en cualquier parte del enlace, como a la salida de la antena o en la entrada del demodulador.

Su cálculo depende de parámetros descritos anteriormente y está definido por las ecuaciones (5.26) y (5.27), [14], como se muestra a continuación:

$$\frac{C}{N} = \frac{P_t G_t G_r}{k T_e L_{Totales} B_N} [1] \quad eq(5.26)$$

$$\frac{C}{N} = EIRP + \frac{G_r}{T_e} - L_{totales} - 10 \log k - B_N [dB] \quad eq(5.27)$$

Mientras más grande sea este valor, mejor será el desempeño del enlace; su degradación es producto de la disminución de la potencia portadora o del aumento del nivel de ruido.

5.4.2 Relación portadora a densidad de ruido

La relación de portadora a densidad de ruido es una variación de la relación portadora a ruido en la que en lugar de considerar la potencia total de ruido se considera la densidad de potencia de ruido, es decir, no es considerado el ancho de banda donde el ruido está presente.

Su cálculo parte de la relación portadora a ruido y el ancho de banda [14].

$$\frac{C}{N_0} = \frac{C}{N} B_N [Hz] \quad eq(5.28)$$

$$\frac{C}{N_0} = \frac{C}{N} + B_N [dBHz] \quad eq(5.29)$$

También, mientras mayor sea su valor, el desempeño del sistema será mejor.

5.4.3 Relación Energía del bit a densidad de ruido

En los sistemas de comunicación digitales es más conveniente usar esta relación para describir el desempeño del sistema.

La energía del bit se relaciona directamente con la potencia de la portadora a través de la duración del bit o, inversamente, por medio de la tasa de transmisión.

Su cálculo parte de la relación portadora a densidad de ruido, tal y como se muestra en la ecuación (5.30) [14].

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{R_b} \frac{C}{N_0} [1] \quad eq(5.30)$$

Donde R_b es la tasa de transmisión.

La importancia de esta relación es que permite comparar el desempeño de un enlace con técnicas de modulación análogas y digitales, así como diferentes tasas de transmisión para los mismos parámetros del enlace.

5.5 Desempeño total del sistema

El desempeño completo del sistema toma en consideración tanto el enlace de subida como el enlace de bajada.

Dependiendo de si se trata de un satélite transparente o un sistema regenerativo la forma de abordar el desempeño cambia ligeramente.

5.5.1 Satélite transparente

En el caso de un satélite transparente el desempeño del sistema total se mide a partir de alguna de las relaciones descritas en la sección anterior, sin embargo, la forma en la que contribuyen no es lineal, es decir, no se pueden sumar directamente, sino que debe hacerse a través de sus inversos.

Por ejemplo, para obtener la relación portadora a ruido del sistema, primero se suman los inversos de cada contribución de portadora a ruido y, posteriormente, a esa suma se le saca el inverso para obtener la relación total.

Estrictamente, es necesario considerar, además de las contribuciones el enlace ascendente y el enlace descendente, las contribuciones al ruido producidas por interferencias y productos de intermodulación dentro del satélite, tal como se observa en la ecuación (5.31); sin embargo, para efectos de diseño preliminar, basta con considerar las relaciones de portadora a ruido ascendente, descendente y de intermodulación, como se aprecia en la ecuación (5.32), para estimar los parámetros de los equipos a utilizar [8].

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{Sistema} = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_{Asc}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_{Desc}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_{IM}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_{IAsc}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_{IDesc}}} [1] \quad eq(5.31)$$

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{Sistema} = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_{Asc}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_{Desc}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_{IM}}} [1] \quad eq(5.32)$$

Con $(C/N)_{IM}$ como la relación portadora a ruido de intermodulación, $(C/N)_{IAsc}$ como la relación portadora a ruido de interferencia en el enlace ascendente y $(C/N)_{IDesc}$ como la relación portadora a ruido de interferencia en el enlace descendente.

En el caso de estudio las relaciones de portadora a ruido para interferencias en los enlaces ascendentes y descendentes, éstas no son tomadas en cuenta porque en

la simulación se está considerando un sistema aislado, es decir, se asume que no hay fuentes de interferencia dentro del área de transmisión y recepción.

Por otro lado, en la actualidad los haces de los satélites son lo suficientemente angostos para que no sean afectados por haces vecinos y, de la misma forma, las antenas son diseñadas para que los lóbulos secundarios sean lo más pequeños posible, facilitando descartar estos parámetros.

Las expresiones anteriores son extensivas a la relación portadora a densidad de ruido y la relación de energía de bit a densidad de ruido, por lo que, dependiendo del análisis deseado, puede aplicarse a uno u otro parámetro de desempeño [14].

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{Sistema} = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{Asc}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{Desc}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{IM}}} [Hz] \quad eq(5.33)$$

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{Sistema} = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{Asc}} + \frac{1}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{Desc}} + \frac{1}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{IM}}} [1] \quad eq(5.34)$$

5.5.2 Satélite regenerativo

A diferencia de un satélite transparente, el desempeño del sistema en un satélite regenerativo se mide a partir de la probabilidad de error y del esquema de modulación usado.

La probabilidad de error total dependerá de las probabilidades de error en el enlace ascendente y el enlace descendente y queda determinado por la ecuación (5.35) [14], donde P_{Asc} y P_{Des} son las probabilidades de error en el enlace ascendente y descendente respectivamente.

$$P_E = P_{Asc} + P_{Desc} - 2P_{Asc}P_{Desc} \quad eq(5.35)$$

Es importante señalar que la probabilidad de error total dependerá de los parámetros que afecten la relación de energía de bit a densidad de ruido en cada enlace, ya que, en los esquemas de modulación digital, es dependiente de esa relación.

Por lo anterior, es posible describir la relación de energía de bit a densidad de ruido del sistema en función de su probabilidad de error y ésta, a su vez, en función de los parámetros del enlace que se conocen, como la EIRP, las ganancias y pérdidas, entre otros; o viceversa, la relación de energía de bit a densidad de ruido total a partir de su probabilidad de error total.

Como la probabilidad de error depende del esquema de modulación que se usa no hay una fórmula concreta para todo caso, sin embargo, para efectos de este estudio, se decidió utilizar esquemas muy frecuentes en las comunicaciones

digitales: la modulación de conmutación de fase (PSK), con sus variantes binaria, en cuadratura y octal, y la modulación de cuadratura en amplitud (QAM), en su variante de dieciséis niveles.

Las ecuaciones para el cálculo de probabilidad de error que se presentan a continuación, a excepción de BPSK, son aproximaciones que funcionan correctamente en modulación coherente. Todas son a partir de la relación energía del bit a la densidad de ruido.

Para BPSK la probabilidad de error se define de la manera siguiente:

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad eq(5.36)$$

Para QPSK, debido a que se puede ver como dos constelaciones BPSK en fase y cuadratura, la probabilidad de error se aproxima de tal forma que también se calcula a partir de la ecuación (5.36) [48].

De manera general, para una modulación MPSK, la probabilidad de error se calcula, de forma aproximada, como sigue [48]:

$$P_e(MPSK) = \frac{2}{\log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0} \log_2 M \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{M}\right)}\right) \quad eq(5.37)$$

Que para el caso de interés, 8PSK, la ecuación queda como:

$$P_e(8PSK) = \frac{2}{3} Q\left(\sqrt{\frac{6E_b}{N_0} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{8}\right)}\right) \quad eq(5.38)$$

Estas ecuaciones, sin embargo, resultan precisas cuando se tiene una relación de portadora a ruido muy alta, por lo que, como se verá en los resultados, cuando hay condiciones de lluvia sube considerablemente.

Para el caso de una modulación MQAM [48], la probabilidad de error se aproxima mediante la expresión:

$$P_e(MQAM) = \frac{4}{\log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{3 \frac{E_b}{N_0} \log_2 M}{M-1}}\right) \quad eq(5.39)$$

Se debe resaltar que en este tipo de modulación se utiliza la energía promedio del bit, que tiene que ver con la constelación usada y el promedio de la energía para cada símbolo (relacionados a través de las distancias mínimas), sin embargo, para efectos de la simulación, se utilizará la energía de bit calculada en cada enlace, lo que introduce una pequeña diferencia en la probabilidad de error calculada (es ligeramente mayor, alrededor de un 6%).

Para 16QAM, la ecuación se reduce de la siguiente manera:

$$P_e(16QAM) = Q\left(2\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\sqrt{\frac{1}{5}}\right) \quad eq(5.40)$$

Una vez que se han obtenidos las probabilidades de error correspondientes, lo único que resta es calcular la relación de energía del bit a densidad de ruido total del sistema. Esto es logrado a partir de las expresiones anteriores, ya que con la probabilidad total calculada solo se escribir la relación energía de bit a densidad de ruido de forma explícita.

Para los esquemas de modulación BPSK y QPSK

$$\frac{E_b}{N_{0Total}} (BPSK, QPSK) = \frac{1}{2} [Q^{-1}(P_e(BPSK, QPSK))]^2 \quad eq(5.41)$$

Para el esquema 8PSK

$$\frac{E_b}{N_{0Total}} (8PSK) = \frac{1}{6} \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{8}\right)} Q^{-1}\left(\frac{3}{2} P_e(8PSK)\right) \right)^2 \quad eq(5.42)$$

Para el esquema 16QAM

$$\frac{E_b}{N_{0Total}} = 5 \left(\frac{Q^{-1}(P_e(16QAM))}{2} \right)^2 \quad eq(5.43)$$

Donde Q^{-1} es, para todos los casos, la función inversa de Q.

5.6 Simulación de enlace

A continuación se presenta el desarrollo de la simulación de un enlace satelital entre la Ciudad de México y la ciudad de Monterrey operando en la banda Ka con tres distintos esquemas de modulación digital para comparar el desempeño cuando se utiliza un satélite transparente y un satélite con procesamiento a bordo. Si bien las relaciones de portadora a ruido y portadora a densidad de ruido son un buen parámetro para analizar el desempeño del enlace, al tratarse de señales digitales es necesario utilizar la relación energía de bit a densidad de ruido para poder comparar ambos transpondedores.

La simulación toma en cuenta distintos parámetros para realizar los cálculos aunque no es exhaustivo en cuanto a todas las variables a considerar para realizar un análisis lo más cercano a la realidad.

Por otra parte, los valores, tales como potencias de transmisión y ganancias de las antenas, se tomaron de forma arbitraria, por lo que los resultados finales en cuanto a la probabilidad de error y desempeño no son muy atractivos, sin embargo, éstos son meramente ilustrativos, pues el propósito de la simulación era el proporcionar una comparativa entre el desempeño de cada tipo de transpondedor.

5.6.1 Consideraciones generales

Los cálculos de la atenuación debida a la lluvia y las nubes se hicieron siguiendo las recomendaciones de la ITU mencionadas en el capítulo anterior (P. 618-12 y P.840-6).

El valor de la altura isoterma promedio anual a 0° se determinó bajo el método de interpolación bilineal para tener valores lo más cercanos a la realidad como fuese posible (recomendación P.839-4).

La determinación de la intensidad de lluvia sobrepasada durante 0.01% del año se estimó de los mapas digitales de la recomendación P.837-6.

El contenido total de la columna de agua líquida reducida se tomó de los mapas digitales de la recomendación P.840-6 para un valor excedido de 0.1% anual.

Las frecuencias de operación se tomaron por estar dentro de la banda de interés y la facilidad que implica trabajar con ellas, pues muchos de los valores asociados a ellas ya se conocen (como las pérdidas por propagación en el espacio libre).

La longitud del satélite se eligió porque esa posición orbital está asignada al país y bien podría ponerse ahí un satélite en la banda Ka en un futuro.

Los valores de potencias y ganancias de las antenas son valores estimados a partir de otros ejemplos de enlaces.

Los datos usados dentro de la simulación representan el caso particular de las ciudades de México y Monterrey, sin embargo, dependiendo del escenario de estudio, estos pueden ser modificados para obtener información de diferentes enlaces entre distintos puntos geográficos.

5.6.2 Datos de la simulación

En las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 se presentan los datos de las estaciones de terrenas, México y Monterrey, y el satélite respectivamente.

Tabla 5.1 Datos de la estación terrena en la Ciudad de México

Ciudad de México	
Coordenadas	19°24' latitud norte 99°09' longitud oeste
Altura media sobre el nivel del mar	2.240 km
Altura del isoterma 0°	4.7471 km
Intensidad de lluvia 0.01% al año	70 mm/h
Columna de agua líquida reducida (.1% al año)	4 kg/m ²
Potencia de transmisión	20 W
Ganancia máxima de la antena	35 dBi
Pérdidas entre el amplificador y la antena	1 dB
Frecuencia de operación	30 GHz

Tabla 5.2 Datos de la estación Terrena en Monterrey

Monterrey	
Coordenadas	25°40' latitud norte 100°19' longitud oeste
Altura media sobre el nivel del mar	0.53 km
Altura del isoterma 0°	4.9628 km
Intensidad de lluvia 0.001% al año	50 mm/h
Columna de agua líquida reducida (.1% al año)	3 kg/m ²
Ganancia máxima de la antena	50 dBi
Pérdidas entre la antena y el receptor	1 dB
Figura de ruido del receptor	2.2 dB
Frecuencia de operación	20 GHz

Tabla 5.3 Datos del satélite

Satélite	
Longitud	116.8° oeste
Ganancia máxima de la antena en transmisión	35 dBi
Ganancia máxima de la antena en recepción	54 dBi
Potencia de transmisión	20 W
Figura de ruido (recepción)	2.5 dB
Pérdidas entre la antena y el receptor	1 dB
Pérdidas entre el amplificador y la antena	1 dB
Frecuencia de operación	20 GHz

5.6.3 Variables de Entrada del Programa

El programa general hace el cálculo de los enlaces, ascendente y descendente, y después calcula las probabilidades de error y las relaciones de energía a densidad de ruido totales para cada tipo de modulación.

Las funciones de los cálculos de los enlaces individuales tienen 5 argumentos de entrada; estos argumentos son vectores de distintos tamaños que agrupan variables que se usan en otras funciones que se requieren dentro del cálculo.

Aunque ambas funciones ocupan 5 vectores, éstos no son iguales para cada enlace, es decir, los vectores de entrada del enlace ascendente y los del enlace descendente no necesariamente tienen el mismo tamaño ni agrupan los mismos parámetros.

Por lo anterior, a continuación se describen los vectores que sirven como argumentos para las funciones del programa general.

El script del programa, junto con las demás funciones que lo integran, se encuentra en el anexo.

a) Enlace ascendente

El vector a contiene datos relacionados a la estación terrena y las condiciones de operación y consiste de 6 elementos. El primer elemento es la latitud de la estación terrena; el segundo es su longitud; el tercero es la frecuencia de operación (en GHz); el cuarto es la condición de lluvia en el trayecto, 1 para lluvia presente y 0 para cielo despejado; el quinto es el ancho de banda (en MHz); y el sexto la tasa de transmisión (en Mbps).

El vector b contiene datos de la transmisión y consiste en 4 elementos. El primer elemento es la potencia de transmisión (W); el segundo es la ganancia máxima de la antena (dBi); el tercero son las pérdidas entre el amplificador y la antena (dB); y el cuarto son las pérdidas en el cenit por absorción atmosférica para la frecuencia de operación (dB).

El vector *c* son parámetros en la recepción del satélite y consiste de 3 elementos; la ganancia de recepción (dBi), las pérdidas entre la antena y el receptor (dB) y la figura de ruido (dB).

El vector *d* consiste en 5 elementos y contiene parámetros para el cálculo de la atenuación por nubes y la atenuación específica de lluvia. El primer elemento es la columna de agua líquida reducida excedida en 0.1 anual (en Kg/m²), mientras que los otros 4 son los coeficientes alfa (vertical y horizontal) y *k* (vertical y horizontal) para determinar la atenuación específica.

El vector *e* tiene 3 elementos: la altura de isoterma a 0°, la intensidad de lluvia (mm/h) y la altura sobre el nivel del mar de la estación terrena.

b) Enlace descendente

El vector *a*, *d* y *e* contienen los mismos elementos que sus análogos del enlace ascendente.

El vector *b* contiene datos de la transmisión en el satélite y consiste en 3 elementos. El primer elemento es la potencia de transmisión (*W*), el segundo es la ganancia máxima de la antena (dBi) y el tercero son las pérdidas entre el amplificador y la antena (dB).

El vector *c* son parámetros de la estación terrena y del lugar donde esta se encuentra. Consiste en 6 elementos: la ganancia de la antena (dBi), las pérdidas entre la antena y el receptor (dB), la figura de ruido (dB), las pérdidas en el cenit por absorción atmosférica (dB), la temperatura del cielo (K) y la temperatura del lugar (K).

5.6.4 Resultados

En las tablas siguientes se compara el desempeño entre el transpondedor transparente y el transpondedor con procesamiento a bordo por medio de la probabilidad de error, la relación total de energía de bit a densidad de ruido y la relación total de portadora a densidad de ruido en los tres esquemas de modulación: conmutación de fase en cuadratura (BPSK), conmutación de fase octal (8PSK) y cuadratura de amplitud con dieciséis niveles (16QAM).

La simulación contempla cuatro escenarios: sin lluvia, lluvia solamente en México, lluvia solamente en Monterrey y lluvia en ambos sitios.

En la figura 5-4 se observan los resultados después de haber corrido el programa en condiciones de cielo despejado.

Tabla 5.4 Resultados obtenidos sin lluvia.

Satélite Transparente	
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	2.1902 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	82.982 [dBHz]
Probabilidad de error para QPSK	$3.4394 \cdot 10^{-2}$
Probabilidad de error para 8PSK	$7.5911 \cdot 10^{-2}$
Probabilidad de error para 16QAM	$1.1738 \cdot 10^{-1}$
Satélite Regenerativo	
Probabilidad de error para QPSK	$3.3887 \cdot 10^{-3}$
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	5.6414 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	86.4332 [dBHz]
Probabilidad de error para 8PSK	$2.7731 \cdot 10^{-2}$
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	5.3349 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	86.1267 [dBHz]
Probabilidad de error para 16QAM	$4.7449 \cdot 10^{-2}$
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	5.4240 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	86.2158 [dBHz]

Tabla 5.5 Resultados obtenidos para lluvia solamente en México.

Satélite Transparente	
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	-37.1681 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	43.6237 [dBHz]
Probabilidad de error para QPSK	$4.9218 \cdot 10^{-1}$
Probabilidad de error para 8PSK	$3.2988 \cdot 10^{-1}$
Probabilidad de error para 16QAM	$4.6535 \cdot 10^{-1}$
Satélite Regenerativo	
Probabilidad de error para QPSK	$4.9216 \cdot 10^{-1}$
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	-37.1468 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	43.6450 [dBHz]
Probabilidad de error para 8PSK	$3.3121 \cdot 10^{-1}$
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	-41.3920 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	39.3998 [dBHz]
Probabilidad de error para 16QAM	$4.6587 \cdot 10^{-1}$
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	-20.3761 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	60.4157 [dBHz]

Tabla 5.6 Resultados obtenidos para lluvia solamente en Monterrey.

Satélite Transparente	
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	-18.6998 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	62.0920 [dBHz]
Probabilidad de error para QPSK	$4.3476 \cdot 10^{-1}$
Probabilidad de error para 8PSK	$3.0443 \cdot 10^{-1}$
Probabilidad de error para 16QAM	$4.3111 \cdot 10^{-1}$
Satélite Regenerativo	
Probabilidad de error para QPSK	$4.3310 \cdot 10^{-1}$
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	-18.4791 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	62.3128 [dBHz]
Probabilidad de error para 8PSK	$3.1292 \cdot 10^{-1}$
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	-21.7282 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	59.0637 [dBHz]
Probabilidad de error para 16QAM	$4.3552 \cdot 10^{-1}$
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	-14.8222 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	65.9696 [dBHz]

Tabla 5.6 Resultados obtenidos para lluvia en ambos sitios.

Satélite Transparente	
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	-37.6734 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	43.1184 [dBHz]
Probabilidad de error para QPSK	$4.9263 \cdot 10^{-1}$
Probabilidad de error para 8PSK	$3.3007 \cdot 10^{-1}$
Probabilidad de error para 16QAM	$4.6562 \cdot 10^{-1}$
Satélite Regenerativo	
Probabilidad de error para QPSK	$4.9894 \cdot 10^{-1}$
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	-54.5593 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	26.2325 [dBHz]
Probabilidad de error para 8PSK	$4.3314 \cdot 10^{-1}$
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	-7.7398 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	73.0520 [dBHz]
Probabilidad de error para 16QAM	$4.9514 \cdot 10^{-1}$
Relación energía de bit a densidad de ruido E_b/N_0	-37.3111 [dB]
Relación portadora a densidad de ruido C/N_0	43.4807 [dBHz]

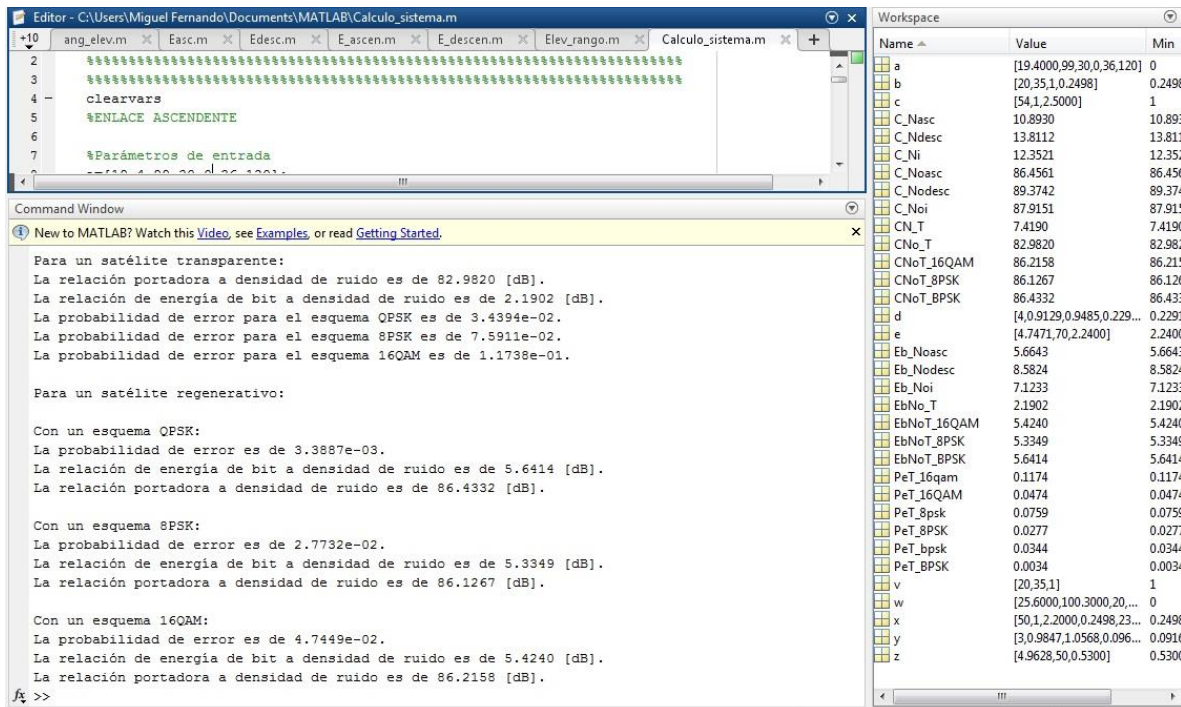


Fig. 5-4 Corrida del programa en condiciones de cielo despejado.

Como se puede notar, la lluvia es el elemento que afecta más el desempeño de un enlace en la banda Ka, sea regenerativo o no.

Se observa que cuando el enlace se efectuó a cielo despejado tanto la relación de energía del bit a densidad de ruido como las probabilidades de error fueron mejores para el satélite regenerativo; se obtuvo una mejora de 3 dB en las relaciones de la energía del bit a la densidad y de portadora a densidad de ruido.

En condiciones de lluvia, para uno u otro emplazamiento, el esquema de QPSK mantuvo niveles similares de desempeño en el satélite regenerativo como en el satélite transparente; el esquema 8PSK comenzó a mostrar un menor desempeño en el satélite regenerativo (caída de 3 dB en ambas relaciones) y un ligero aumento en la probabilidad de error con respecto al satélites transparente; mientras que el esquema 16QAM arrojó probabilidades de error casi idénticas para ambos satélites pero un mejor desempeño con el satélite regenerativo.

Por último, para condiciones de lluvia en ambos sitios, el esquema QPSK mantuvo una probabilidad de error muy parecida en los dos tipos de sistemas, pero el desempeño cayó drásticamente en el caso regenerativo; el esquema 8PSK arrojó una probabilidad de error mucho más elevada en el sistema regenerativo pero, en contraste, las relaciones de energía de bit y portadora a densidad de ruido aumentaron; por su parte, el esquema de 16QAM tuvo una probabilidad de error ligeramente mayor en el sistema regenerativo pero un desempeño ligeramente mejor en las relaciones de energía de bit y portadora a densidad de ruido.

De acuerdo con los resultados anteriores, en general, los esquemas de modulación presentan un mejor desempeño con un satélite regenerativo para condiciones de cielo despejado; en condiciones de lluvia en un solo

emplazamiento el desempeño es similar; y con lluvia en ambos lados el funcionamiento puede ser comparable pero no es bueno.

Cabe mencionar que la aproximación usada en el caso de MPSK para la probabilidad de error funciona mejor cuando la relación de portadora a ruido del enlace es muy alta, sin embargo, para condiciones de lluvia, ésta cae drásticamente, lo que compromete el desempeño de la simulación.

Por otra parte, todos los esquemas se asumieron con codificación binaria, lo que entrega un desempeño que no es tan bueno como si se usara otro tipo de codificación, Gray, por ejemplo.

El hecho de que el desempeño se haya degradado para el satélite regenerativo se explica si consideramos que para éste la relación total de la energía del bit a la densidad de ruido depende de la probabilidad de error, misma que aumenta provocada por la lluvia, pues los sistemas digitales son más sensibles a las condiciones climatológicas; en cambio, en un satélite transparente la relación portadora a ruido (y las demás) dependen directamente de la potencia de transmisión y la potencia del ruido.

Típicamente, para que un sistema satelital trabaje bien la relación portadora a ruido debe estar entre los 6 y los 10 [dB]. Cuando la lluvia se hizo presente en el enlace este valor cayó por debajo de los 0 [dB], lo que ya comprometía el desempeño.

El enlace, bajo las condiciones de la simulación, funcionaba muy bien para el escenario de cielo despejado, sin embargo, cuando aparece la lluvia, deben emplearse las técnicas de mitigación mencionadas en el capítulo 2 (diversidad del haz, control de potencia, diversidad de sitio, diversidad de órbita) para que el desempeño no se vea afectado de forma tan drástica.

Las consideraciones hechas aquí no incluyen la detección y corrección de errores a bordo, la compensación adaptativa por el clima (la lluvia) o una elección del método de acceso selectivo para el enlace ascendente y descendente (por ejemplo, FDMA, en el enlace ascendente, para poder utilizar el amplificador poco antes de la región no lineal y TDMA, en el enlace descendente, para no resentir la intermodulación).

Finalmente, la simulación es efectiva para demostrar lo mejor que puede ser el desempeño de un satélite regenerativo, en comparación con un satélite transparente, cuando se mantienen los requerimientos de operación, es decir, cuando el nivel de portadora a densidad ruido (o de energía de bit a densidad de ruido) son adecuados para la recepción.

6.- SATÉLITES DE BANDA KA EN EL MUNDO

En este capítulo se hace un recuento de los principales sistemas satelitales comerciales que operan en la banda Ka en el mundo [31] (no se consideran los satélites gubernamentales o aquellos con fines de observación, científicos, etc.).

Es importante señalar que estos sistemas no necesariamente son exclusivos de la banda Ka, pues, en muchos casos, también cuentan con transpondedores de otras bandas para aumentar la eficiencia del servicio.

Por otra parte, todos los sistemas que se mencionan a continuación se encuentran dentro de la órbita geoestacionaria y ofrecen el servicio continental, salvo aquellos que se enumeran en la sección 6.5.

6.1 Satélites en Norteamérica

1.- Satélite Echostar XVII (antes Jupiter). Tiene cobertura principal en las costas de los Estados Unidos y una cobertura menor en la región central del país aunque. También cubre parte del territorio mexicano [68].

2.- Satélite Spaceway 3. Cobertura en la región continental de los Estados Unidos y parte de México [68].

3.- Satélite AMC-15. Cobertura en todos los Estados Unidos (incluye a Hawái y Alaska). También proporciona cobertura en parte del territorio mexicano [65].

4.- Satélite Anik F3. Tiene cobertura en la costa este de los Estados Unidos, así como una parte del noreste de ese país y del sureste de Canadá [49].

5.- Satélite Anik F2. Proporciona cobertura a Estados Unidos, Canadá y la parte norte de México [49].

6.- Satélite ViaSat 1. Cobertura en los Estados Unidos, principalmente en las costas y, en menor medida, la zona centro. También incluye Hawái y Alaska [68].

7.- Satélite WildBlue 1. Proporciona Cobertura a todos los Estados Unidos y la parte norte de México [68].

8.- Satélite Amazonas 3. Proporciona cobertura al centro y norte de México; también hay cobertura al sur de Estados Unidos, en las regiones colindantes [52].

9.- Satélite Eutelsat 65W. Proporcionará cobertura para servicios de internet de banda ancha a través de 8 de sus 24 haces en la banda en América Latina, incluyendo México [71].

6.1.1 México

Es importante hacer hincapié en la cobertura que existe en el país, ya que, después de todo, se está haciendo un análisis para el uso de los satélites de la banda Ka.

De acuerdo con la lista de satélites que dan servicio en Norteamérica, seis de los nueve mencionados tienen cobertura dentro del territorio nacional, sin embargo, en la mayoría de los casos, esa penetración es, simplemente, una consecuencia del tamaño de los haces que se utilizaron para cubrir el territorio estadounidense en su totalidad, es decir, la cobertura en el país es por desborde. A pesar de utilizar haces puntuales o conformados, la huella de éstos, en la zona fronteriza, no se limita a cubrir solamente suelo estadounidense, por lo que parte de la potencia que se radia del espacio llega al territorio mexicano también, siendo lo más lógico ofrecer el servicio en la frontera y aprovechar los usuarios que puedan existir.

Solamente la huella del satélite Amazonas 3 es plenamente intencional, aunque sigue siendo insuficiente para efectos de cubrir el territorio.

Cabe mencionar que, además del satélite Amazonas 3, Hispasat también cuenta con otro satélite con capacidad en la banda, el Hispasat 1E ó 30W-5, aunque no es claro la zona de cobertura que tiene o si está en uso, pues ni en los buscadores satelitales [67] ni en los mapas de cobertura [68] figuran o, incluso, en la misma información que proporciona Hispasat [52], hacen referencia de la zona que abarca.

Cuando se trata de otras bandas de frecuencias, sea C o Ku, es seguro decir que el país tiene bastante cobertura, siendo Eutelsat e Hispasat dos ejemplos de ello, y, por el momento, se apoyan en esa infraestructura para proveer de servicios satelitales, sin embargo, las nuevas tendencias en comunicación requieren, y requerirán, de mayores recursos en capacidad.

En las figuras 6-1 a 6-6 se aprecia la huella de cobertura en el país de cada satélite mencionado anteriormente, con excepción del Eutelsat 65W que fue puesto en órbita hace sólo unas semanas.

Por lo anterior, es muy importante pensar en implementar un sistema de banda Ka que sea propiedad del país, pues la cobertura de desborde no es suficiente; en el mejor de los casos puede extenderse por toda la zona norte del país, sin embargo, la gran mayoría del territorio carece de ese servicio, lo que cobra mayor importancia si consideramos que el servicio satelital de comunicaciones surge como una opción para aquellos lugares en los que no existe o, por diversas circunstancias, no puede llegar la infraestructura cableada.

Otro factor a considerar es que con la implementación es posible recaudar parte del dinero generado por el servicio; dinero que en estos momentos va hacia las empresas extranjeras y que bien podría ser parte de las finanzas nacionales.

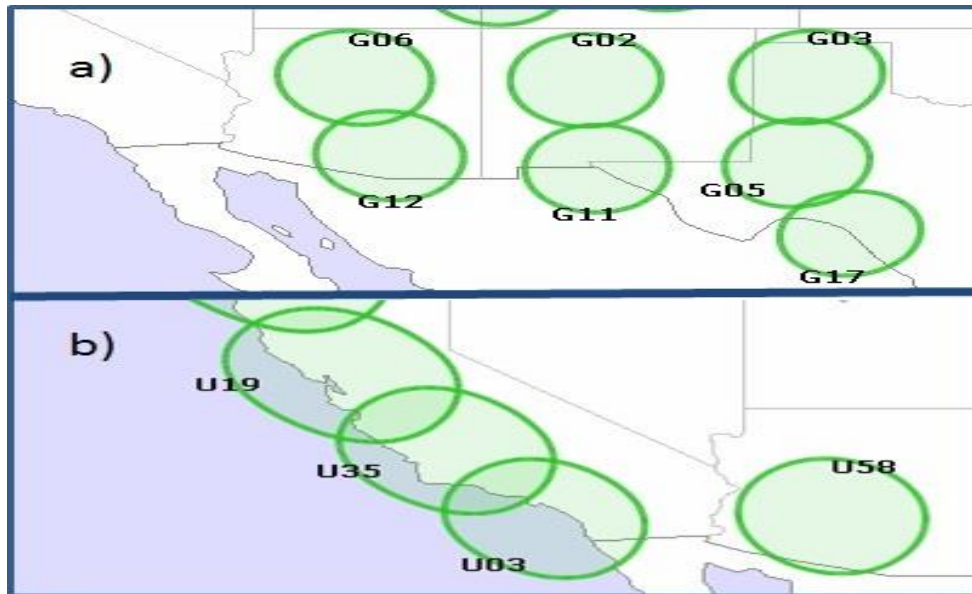


Fig. 6-1 Cobertura en México del satélite EchoStar 17 por dos diferentes tipos de haces. En a) se observa la cobertura de algunos haces pequeños, mientras que en b) se muestra la ligera cobertura de haces con diferente forma.

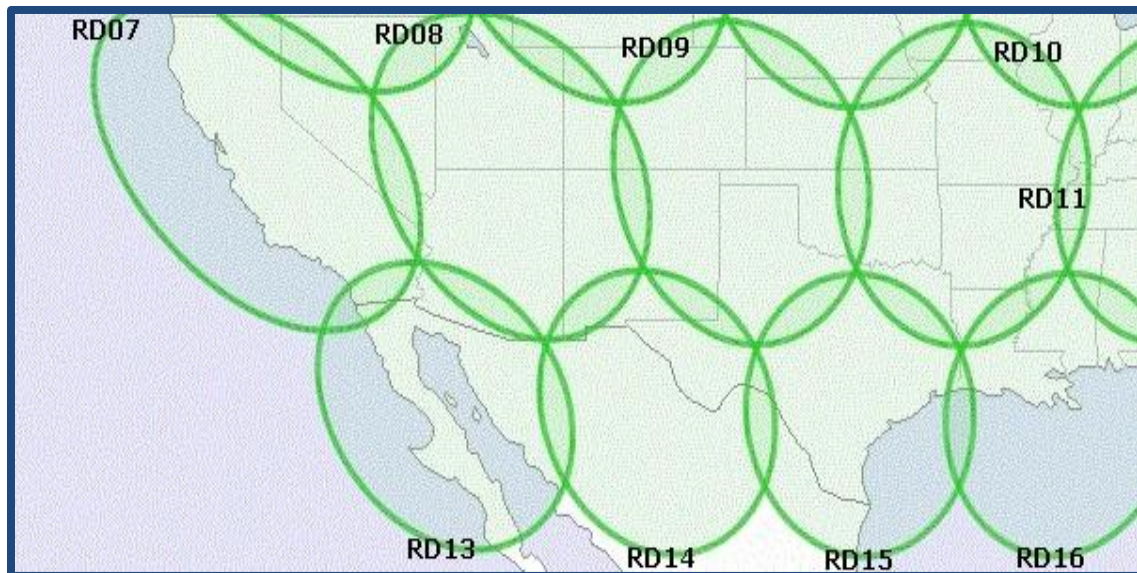


Fig. 6-2 Cobertura en México del satélite Spaceway.

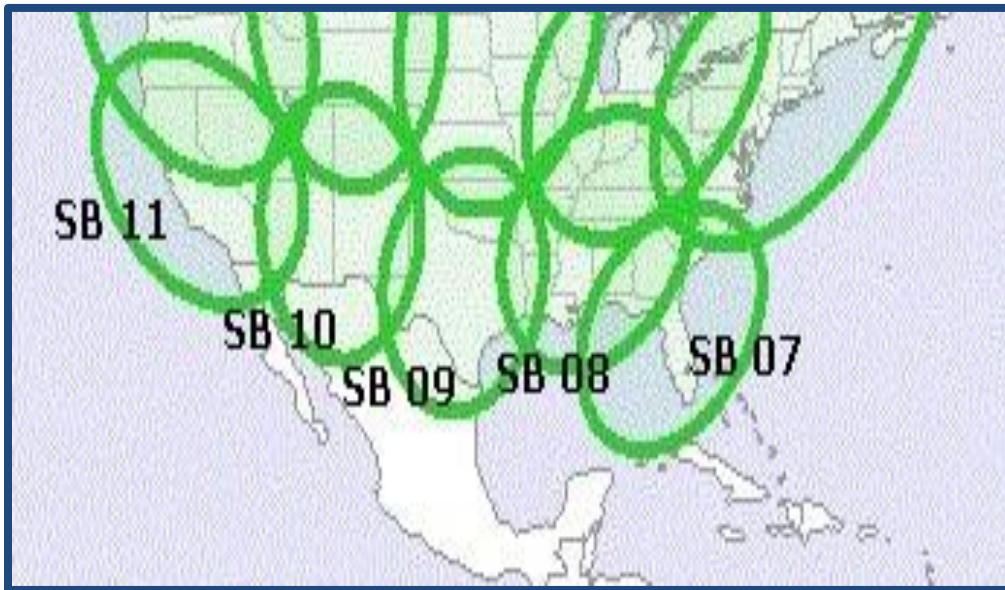


Fig. 6-3 Cobertura en México del satélite AMC-15.

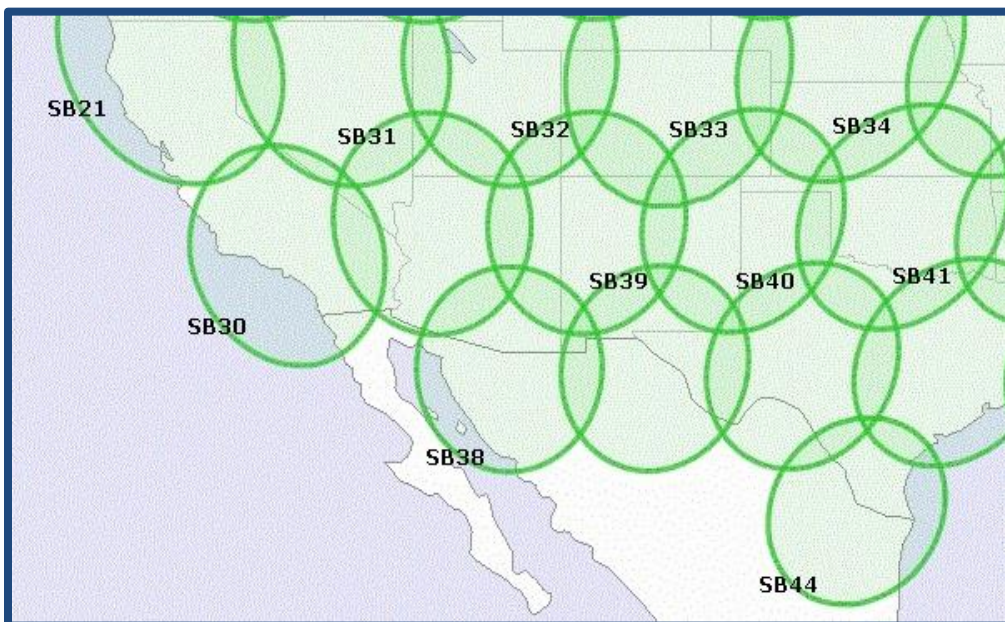


Fig. 6-4 Cobertura en México del satélite Anik F2.

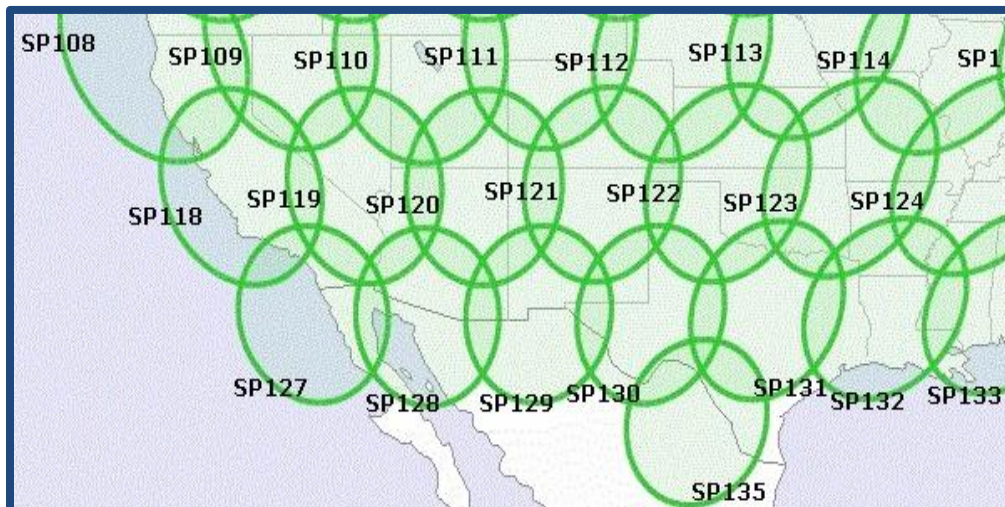


Fig. 6-5 Cobertura en México del satélite Wildblue 1.

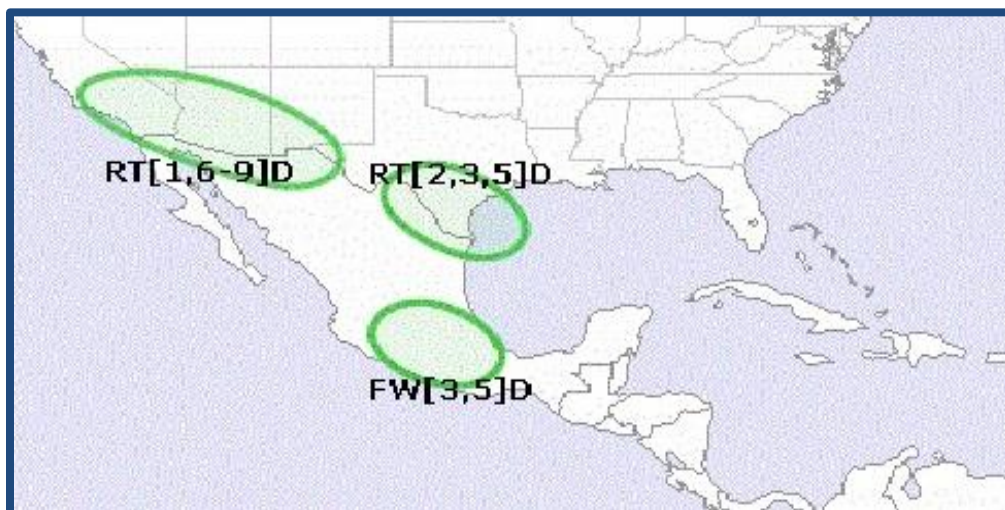


Fig. 6-6 Cobertura en México del satélite Amazonas 3.

6.2 Satélites en Europa

- 1.- Los siguientes satélites ofrecen cobertura en todo el continente: Hylas 1, Hylas 2 [66], Eutelsat 7A, Eutelsat KaSat, Eutelsat Hotbird 13A [50], Amos 3, Amos 6 y Eutelsat 16A.
- 2.- Satélite Astra 4A. Cobertura en España, Inglaterra y la región al norte de Italia, principalmente [65].
- 3.- Astra 1L. Cobertura continental centralizada; no cubre a los países nórdicos ni del este del continente [65].

- 4.- Satélite Astra 3B. Cobertura continental, similar a la del satélite Astra 1L. Aunque su cobertura es más extensa, no cubre Rusia ni los países orientales colindantes con Asia [65].
- 5.- Satélite Astra 2E. Cobertura central reducida; desde Italia hasta Inglaterra [65].
- 6.- Satélite Astra 2F. Cobertura regional en la zona francesa, principalmente, aunque la huella abarca otros países en los alrededores, en especial al norte, donde llega al Reino Unido [65].
- 7.- Satélite Astra 2G. Cobertura similar a la de Astra 2F pero más ancha [65].
- 8.- Satélite Amos 4. Cobertura en Rusia para la zona europea [67].
- 9.- Satélite ABS-3. Cobertura en toda Europa mediante el uso de haces orientables [56].
- 10.- Satélite Express AMU1. Cobertura en la parte europea de Rusia [62].
- 11.- Satélite Express AM6. Cobertura en la parte europea de Rusia y un pequeño fragmento al norte de Polonia [62].
- 12.- Satélite Turksat 4A. Cobertura en Alemania [63].
- 13.- Satélite Turksat 4B. Cobertura en la región del centro, del mediterráneo y del atlántico [63].

6.3 Satélites en América Latina

- 1.- Satélite Amazonas 3. Cobertura con haces puntuales en Brasil, Colombia, Ecuador, Perú, Chile y Perú [68].
- 2.- Satélite Eutelsat 3B. Cobertura únicamente en Brasil mediante haces puntuales [51].
- 3.- Satélite Eutelsat 65 W. Tendrá cobertura en la región y, de momento, se sabe que ofrecerá internet de banda ancha en Colombia y Perú [71].

6.4 Satélites en el resto del mundo

- 1.- Satélite Badr 5 (Arabsat 5B). Con cobertura en Medio Oriente [69].
- 2.- Satélite Arabsat 5C. Cobertura en el Medio Oriente y el norte de África [69].

- 3.- Satélite Hylas 2. Cobertura en el Medio Oriente y África [66].
- 4.- Satélite Eutelsat 7A. Cobertura en la región Panafricana y al sur del Sahara [51].
- 5.- Satélite Eutelsat Hotbird 13A. Cobertura en el Medio Oriente y al norte de África [50].
- 6.- Satélite Eutelsat 25B Es'hail 1 [57]. Cobertura en el Medio Oriente, al norte de África y en Asia central.
- 7.- Satélite Intelsat 20. Cobertura principal en el Medio Oriente [67].
- 8.- Satélite Nilesat 201. Cobertura en el norte de África y la península arábiga [54].
- 9.- Satélite Amos 3. Cobertura en el Medio Oriente [67].
- 10.- Satélite Amos 6. Cobertura en la región al sur del Sahara [67].
- 11.- Satélite Yahsat 1B. Cobertura en el Medio Oriente, África y el suroeste de Asia [55].
- 12.- Satélite ABS-3. Cobertura al norte de África [56].
- 13.- Satélite ABS-7. Cobertura en Afganistán y Paquistán [56].
- 14.- Satélite Turksat 4A. Cobertura en Turquía [63].
- 15.- Satélite Turksat 4B. Cobertura en Turquía, Medio Oriente y Asia [63].
- 16.- Satélite Amos 4. Cobertura en Asia y en Rusia [67].
- 17.- Satélite Express AM5. Cobertura en el sureste de Rusia [62].
- 18.- Satélite Measat 5. Cobertura e Malasia [59].
- 19.- Satélite Kizuna (WINDS). Cobertura en la región de Asia Pacífico.
- 20.- Satélite NBN 1A. Cobertura en Australia [67].
- 21.- Satélite Jabiro 1. Cobertura en Australia, Medio Oriente y el norte de África [61].
- 22.- Satélite Jabiro 2. Cobertura en Australia, Timor Oriental, Papúa Nueva Guinea y las islas Salomón [67].

6.5 Otros sistemas

Como se mencionó anteriormente, los sistemas que se enlistan a continuación difieren de los anteriores porque no están en órbita geoestacionaria o bien porque no utilizan la banda Ka como forma de cobertura.

1.- Satélites de la constelación Iridium. Estos satélites pertenecen a una constelación de órbita baja que opera en la banda L, pero son considerados en esta sección porque la comunicación entre ellos es en la banda Ka.

2.- Satélites Inmarsat serie 5F. Los satélites Inmarsat 5 F1, F2 y F3 son satélites de comunicaciones móviles que operan en la banda Ka con cobertura en los océanos Índico, Atlántico y Pacífico, respectivamente [58].

3.- Satélites de la constelación O3b. Esta constelación de satélites que opera en banda Ka y se encuentran en una órbita media. Proporciona servicios de conectividad, aunque se ve limitada, por la altura de la órbita, a latitudes de 45 grados norte o sur para un servicio estándar [60].

4.- Satélite Thor 7. Es un satélite para comunicaciones móviles que proporciona cobertura en el mar del Norte, el mar Rojo, el mar Báltico, el mar Mediterráneo, el norte del océano Atlántico, el mar de Noruega, el Golfo Pérsico y la Antártida [64].

5.- Satélite Ipstar (Thaicom-4). Es un satélite que proporciona cobertura en las bandas C y Ku, sin embargo, utiliza 18 haces en la banda Ka para los enlaces ascendentes de Gateway en 18 emplazamientos en la región Asia-Pacífico [53].

6.6 Propuesta para México

Con lo visto en cuanto a la cobertura para el país, se concluye que ésta es insuficiente porque es, en su mayoría, de desborde y no alcanza para cubrir todo el territorio. El satélite Amazonas 3 es el único con cobertura conscientemente pensada para el país, sin embargo, sólo abarca parte del centro y unas pequeñas regiones en el norte.

Se propone que un satélite dedicado en esta banda para el país podría ser aprovechado para proporcionar comunicaciones de banda ancha a la población, sirviendo como un medio complementario a los sistemas de comunicaciones cableados existentes y permitiendo un acceso de internet u otros servicios de información a regiones del país en donde los medios cableados no tienen suficiente infraestructura.

En la figura 6-7 se presenta el esquema propuesto para la cobertura en el país, que consiste en 17 haces angostos con un plan de reuso de frecuencia de cuatro colores para aprovechar al máximo la capacidad del sistema.

Todos los haces podrían ser generados por una sola antena iluminada un grupo de 17 alimentadores en transmisión y recepción, lo que permitiría que ocupase sólo un lado en el satélite y, por lo tanto, el lado disponible podría ser dispuesto para dar cobertura a otra región del continente (bajo el esquema Guatemala y Belice tendrían cobertura de desborde).

Como consecuencia de la puesta en órbita de este satélite no sólo se proporcionaría un servicio de banda ancha a la población mexicana (y quizá a las poblaciones de otros países), sino que la cantidad de recursos que podrían captarse como producto de la renta de capacidad serían considerables.

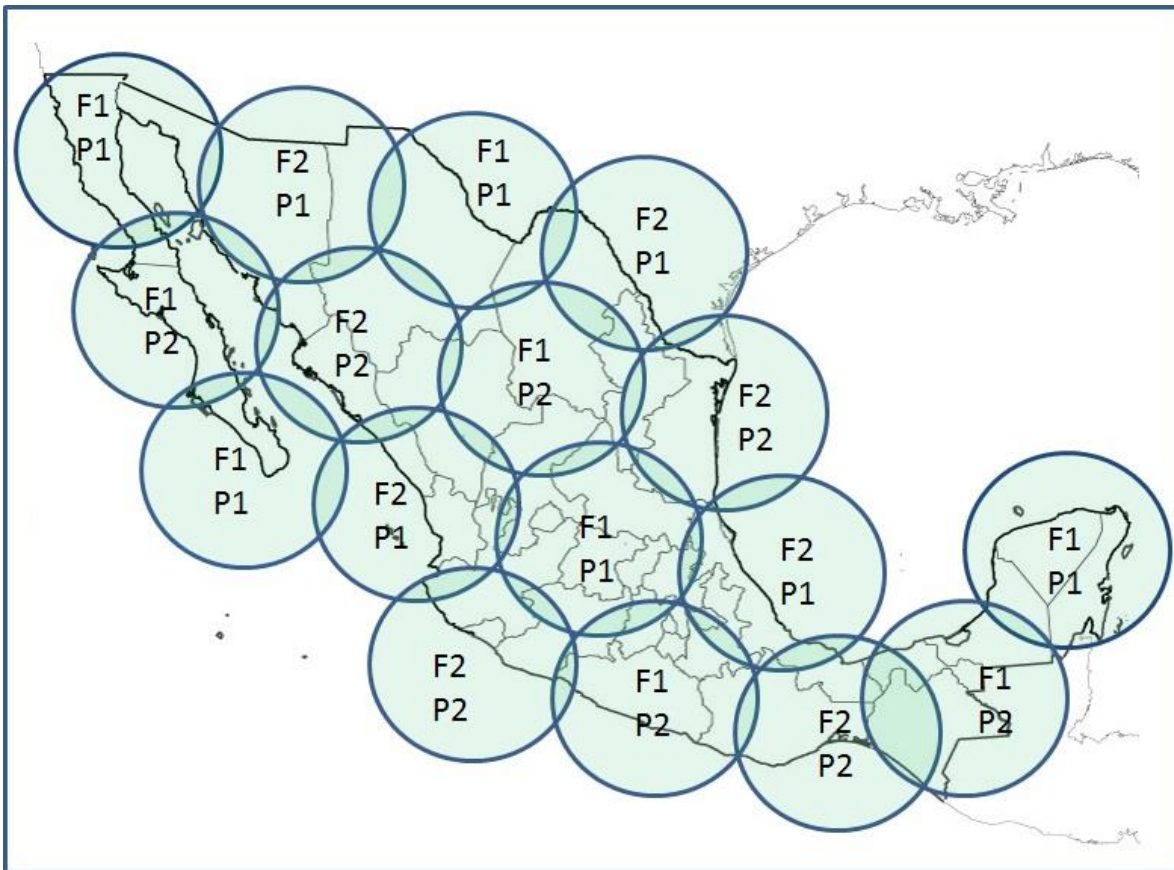


Fig. 6-7 Plan de cobertura del país para el uso de un satélite en la banda Ka con un esquema de reúso de cuatro colores.

De acuerdo con la información que el gobierno manifestó cuando el satélite Centenario se perdió debido a fallas durante el lanzamiento, éste tendría un costo de 300 millones de dólares.

Dado que el satélite no era de banda Ka, es natural suponer que su costo era menor al de uno que opera en esa frecuencia.

Dado que el costo es un factor importante en cualquier proyecto, puesto que determina si es viable o no, para efectos del siguiente análisis se considera que un satélite que opera en la banda Ka tendrá un costo de entre 300 y 400 millones de dólares.

En un satélite de banda Ku, por ejemplo, típicamente se tienen 24 transpondedores por cada espacio de 500 MHz en ancho de banda, sea ascendente o descendente, lo que significa que en un bloque de 1 GHz se tienen 48 transpondedores.

El uso de cada uno de esos transpondedores genera alrededor de 1.6 millones de dólares al año y, dado que un satélite tiene una vida útil promedio de 15 años, genera un valor total de 1152 millones de dólares.

Para un satélite en banda Ka, como el de esta propuesta, se tiene que cada haz puede tener, por sí solo, una capacidad de hasta 500 MHz, lo que significa que con el esquema del plan de cobertura de la figura 6-7 se podría tener una capacidad de 8.5 GHz en total. Lo anterior es muy importante porque al hacer el mismo análisis que se hizo con el bloque de un GHz en la banda Ku se obtiene un retorno de 9792 millones de dólares al final de la vida útil de satélite.

Ya sea que se compare el costo de satélite en su costo más conservador o el más alto resulta claro que el ingreso a largo plazo de más de 20 veces el costo del satélite vale la pena inversión.

Es verdad que además del satélite se deben considerar otros factores que pueden incrementar el costo del satélite pero generalmente son tomados en cuenta durante las estimaciones que se realizan durante la planeación.

Incluso los métodos de estimación paramétrica, como lo son las Relaciones de Estimación de Costo [34], toman en cuenta factores como la integración, el ensamblaje y pruebas, los niveles de programación, el equipo terreno que se necesita de apoyo, así como los lanzamientos y las operaciones de mantenimiento de órbita.

Es importante y necesario considerar los esquemas de mitigación para los efectos adversos de la lluvia, pues a pesar de proponer un sistema regenerativo éste no resulta inmune a los problemas inherentes a las precipitaciones.

Será conveniente contar con esquemas de modulación adaptativos para que, de acuerdo con las condiciones del clima, puedan ofrecer un poco más de robustez al sistema; así como utilizar FEC adaptativo para codificación adicional si el enlace lo requiere.

Por otra parte debe existir un control automático de potencia para aumentarla o disminuirla según lo dictamine el clima.

La mejor forma de evadir la lluvia sería contar con sitios en diferentes regiones climáticas de tal forma que la probabilidad de que llueva en ambas sea baja y así, si la transmisión a una de ellas no es posible, se puede elegir otro camino.

CONCLUSIONES

Para el caso de México, un sistema satelital en la banda Ka representa una oportunidad para ofrecer comunicaciones de banda ancha a la población, reducir la brecha digital y recaudar un gran ingreso económico en la renta de capacidad del satélite.

De acuerdo a la lista de satélites que operan en esta banda para Norteamérica, 6 de los 9 ofrecen algún tipo de cobertura al territorio, sin embargo, ésta es, en su mayoría, de desborde, por lo que resulta insuficiente.

La puesta en órbita de un satélite supondría una reducción en la brecha digital para las zonas sin acceso a la infraestructura cableada y, por ende, sería un buen complemento.

Al tratarse de un servicio fijo, las antenas en los satélites pueden ser fijas también, pues no se tiene que cambiar la posición de los haces, y su construcción puede ser con alimentadores en arreglo de fase, lo que generaría los haces necesarios para darle cobertura al territorio, dejando el espacio suficiente, al otro lado del satélite, para dar cobertura a otras partes del continente, como Centroamérica y Sudamérica.

Los haces a usarse para cubrir el territorio deben angostos, lo que disminuye el riesgo de interferencias en los enlaces y permite una mejor concentración de la potencia. Con el esquema adecuado de reúso de frecuencia es posible, además, maximizar la capacidad del satélite.

Los sistemas que operan en esta banda tienen ventajas y desventajas, como se vio en el capítulo 2, sin embargo, con el estudio adecuado de mercado, una buena planeación e implementación de técnicas de mitigación de efectos adversos (principalmente debidos al clima), este tipo de satélites aportan servicios muy confiables a gran velocidad.

La lluvia es el elemento climático más importante en la degradación del sistema, ya que incide enormemente en la relación portadora a ruido.

En un país como el nuestro, que es atravesado por el trópico de cáncer, la lluvia es intensa en varias regiones, por lo que la estabilidad del enlace puede ser comprometida; no obstante, con técnicas adecuadas de mitigación, estos efectos son reducidos en gran medida, asegurando un funcionamiento adecuado con una buena disponibilidad.

Para el país, es necesario tomar en cuenta características específicas de la lluvia para poder obtener resultados confiables. El método propuesto por la ITU considera, de manera muy generalizada, la intensidad de lluvia en el territorio, por lo que contar con información actualizada, de al menos 30 años a la fecha, es imprescindible para definir mejor las zonas de lluvia y utilizarlos en los cálculos de enlace.

La investigación realizada, junto con las simulaciones llevadas a cabo, indican que el uso de un transpondedor regenerativo mejoraría el desempeño del satélite, además, con el uso de distintos esquemas de modulación y la correcta codificación, el desempeño es comparable o mejor (dependiendo del tipo de modulación) al de un sistema transparente bajo condiciones de lluvia. En condiciones de cielo despejado es mejor usar esquemas de modulación más eficientes, como 8 PSK o MQAM, mientras que para condiciones de lluvia el uso de un esquema más robusto, como BPSK, es lo recomendado.

En general, para cielo despejado, el desempeño en un satélite regenerativo es mucho mejor, disminuyendo en varios ordenes (con el nivel adecuado en la relación portadora a ruido) la probabilidad de error y, por ende, mejorando su eficiencia; para la lluvia, dependiendo de la intensidad y la atenuación generada, el desempeño es similar o mejor en el satélite regenerativo cuando sólo se presenta precipitación en un lado del enlace, sin embargo, es importante mantener los efectos del hidrometeoro controlados para que el margen de eficiencia sea mayor, pues mientras más se degrada la relación portadora a densidad de ruido menor es la mejora con respecto al sistema transparente.

También, con el uso de un transpondedor regenerativo, los efectos de productos de intermodulación no afectan al sistema e incluso es posible cambiar el esquema de acceso y la velocidad de la tasa de transmisión de los enlaces descendentes con respecto a los enlaces ascendentes.

REFERENCIAS

Bibliografía

- [1] Landeros Ayala Salvador, Programa de estudio de UNAM de la materia de Temas Selectos de Telecomunicaciones, “Sistemas de Satélites de Comunicaciones”, Capítulo 1, 2013.
- [2] Reyes García Jesús, Programa de estudio de UNM de la materia de Sistemas de Radiocomunicaciones I, “Definiciones y conceptos básicos para comunicaciones espaciales y por satélites”, Capítulo 2, 2013.
- [3] Wijker, J. Japp. “*Spacecraft structures*”, Springer, 2008, p. 13. 1ra Edición.
- [4] Swinerd, Graham. “*How Spacecraft Fly*”, Springer, 2009, pp 143-144, 1ra Edición.
- [5] Pritchard, W.L., H. G. Suyderhoud y R. A. Nelson. “*Satellite Communications System Engineering*”, Prentice-Hall, 1993, pp. 30-39, 2da. Edición.
- [6] International Telecommunications Union-ITU. “*Handbook on Satellite Communications*”, Wiley, 2002, pp. 2-8, 3ra Edición.
- [7] Chartrand, Mark R. “*Satellite Communication for the Nonspecialist*”, SPEI-The International Society of Optical Engineering, 2004, pp. 31-34, 1ra Edición.
- [8] Neri Rodolfo y Landeros Salvador. “Comunicaciones por satélite”. Universidad Veracruzana, 2015. México. pp. 156-159, 279, 285-287, 289-293, 233, 338-360.
- [9] Ahmad Ghulam y Moshin S. A. “*Modern Communication Satellite Antenna Technology, Recent Advances in Technologies*”. Maurizio A Strangio (Ed.), InTech.
- [10] Iida Takashi, Pelton Joseph N. y Ashford Edward. “*Satellite Communications in the 21st Century: Trends and Technologies*”. Estados Unidos, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2003. pp. 63-64 (De la serie: Progress in Astronautics and Aeronautics)
- [11] Y. Jo Kenneth. “*Satellite Communications Network Design and Analysis*”. Estados Unidos, Artech House, 2011. pp. 305-308.
- [12] Dharma Raj Cheruku. “*Satellite Communication*”. Nueva Delhi, India, I.K International Publishing House, 2009. pp. 94-99.
- [13] Maral Géral y Bousquet Michel. “*Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*”. Wiley, 2009. pp. 163-167, 176-177, 207.

[14] Ippolito Luis J. "Satellite Communications Systems Engineering. Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance". Wiley and Sons, 2008. pp. 41-75, 102-111, 153-155, 164-166, 174-189, 241-261. (De la serie Wireless Communications and Mobile Computing).

Publicaciones

[15] Gargione F., et al. "Advanced Communications Technology Satellite (ACTS): Design and on orbit performance measurement", International Journal of Satellite Communications Vol. 14, 1996.

[16] Hall W., McLain C. et al. "Relative Performance of Mobile Networks in the Ku, Commercial Ka and Government Ka Bands", The 2011 Military Communications Conference-Track 5-Communications and Networks Systems, 2011.

[17] Panagopoulos A., et al. "Satellite Communications at KU, Ka and V Bands: Propagations Impairments and Mitigation Techniques", IEEE Communications Surveys, 2004.

[18] Leong S., et al. "Ka band satellite communication design analysis and optimization", DSTA Horizons, pp. 70-79, 2015.

[19] CapRock H. "Not all bands are created equal. A closer look at Ka & Ku High Throughput Satellites", Harris CapRock Communications, 2012.

[20] Schneider Michael, Hartwagner Christian y Wolf Helmut. "Antennas for multiple spot beam satellites". CEAS Space Journal. 2(1):59-66, agosto 2011.

[21] Merchilinsky Joseph, Ernst Gregory y Kepley Robert. "Ground Segment Technologies for Ka-Band and Beyond". En: Joint Conference-Satellite Systems Serving the Needs of the 21st Century (octubre 14-17, 2013). Hughes Networks Systems, 2013, pp.6.

[22] European Space Agency. Cost Action 255. "Radiowave Propagation Modelling for SatCom Services at Ku Band and Above". Holanda, ESA Publications Division, marzo 2002.

[23] Mukesh Chandra Kestwal, Sumit Joshi y Lalit Singh Garia. "Prediction of Rain Attenuation and Impact of Rain in Wave Propagation at Microwave Frequency for Tropical Region", International Journal of Microwave Science and Technology, 2014():6, 2014.

[24] Recomendación ITU-R P.838-3. Modelos de la atenuación específica debido a la lluvia para los métodos de predicción. (Cuestión UIT-R 201/3).

[25] Recomendación ITU-R P.837-6. Características de la precipitación para establecer modelos de propagación. (02/2012).

[26] Recomendación ITU-R P.618-12. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems. (07/2015).

[27] Recomendación ITU-R P.839-4. Modelos de estimación de la altura de lluvia para utilizar en los métodos de predicción. (09/2013).

[28] Recomendación ITU-R P.840-6. Atenuación debido a las nubes y a la niebla. (09/2013).

[29] Christensen J. “*ITU Regulations for Ka band Satellite Networks*”.

PRESENTACIONES

[30] Higuchi Toshio. “*Outline of KIZUNA (WINDS)*”. [Presentación de diapositivas], Hanoi, Vietnam. [2008], material digital, 34 diapositivas, color.

[31] Singarajah Kumar. “*Overview of Ka-band Satellite System Developments & Key Regulatory Issues*”. [Presentación de diapositivas], Almaty, Kazakhtan. [2012], material digital, 23 diapositivas, color.

TESIS

[32] Soto Isla Eduardo M. “Dinámica de Desvanecimiento por Lluvia en Enlaces Terrenales”. Tesis (Licenciatura). Lima, Perú. Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería. 2013. pp. 35-40.

[33] Ávila Pérez Armando, Anaya Montaña Marco A. y Contreras Cortés Dante U. “*Método gráfico para estimar la atenuación por lluvia en el sistema en el sistema satelital MEXSAT 3*”. Tesis (Licenciatura). Distrito Federal, México. Instituto Politécnico Nacional, ESIME Adolfo López Mateos, 2015. pp. 37-57.

[34] Rendón Salgado Irving. “*Implementación de herramientas computacionales para la especificación de los subsistemas y estimación de costos para un satélite de telecomunicaciones*”. Tesis (Maestría). Distrito Federal, México. UNAM, Facultad de Ingeniería, 2013. pp. 74-76, 79.

REFERENCIAS DE INTERNET

[35] Basics of Space Flight. Disponible en la dirección web: <http://www2.jpl.nasa.gov/basics/bsf11-3.php>

[36] Spacecraft bus systems. Disponible en la dirección web: <http://www.lr.tudelft.nl/en/organisation/departments/space-engineering/space-systems-engineering/expertise-areas/spacecraft-engineering/design-and-analysis/configuration-design/subsystems/subsystems/>

[37] Welch D. "Is the Ka band the Ku killer?", SatMagazine, 2013. Disponible en la dirección web: <http://www.satmagazine.com/story.php?number=1275052403>

[38] Newsat. "Not all Ka-band satellites are the same", SatMagazine, 2013. Disponible en la dirección web: <http://www.satmagazine.com/story.php?number=1482091511>

[39] 1300 Series Platform. Disponible en la dirección web: <http://sslmda.com/html/products/1300.html>

[40] SSL Information Session: Systems Engineering. 2014. Disponible en la dirección web: http://mstl.atl.calpoly.edu/~bklofas/Presentations/DevelopersWorkshop2014/Nitschke_SSL.pdf

[41] Eurostar series. Disponible en la dirección web: <http://www.space-airbusds.com/en/programmes/eurostar-series-czw.html>

[42] Eurostar e3000 Large Mechanical Platform Development. Disponible en la dirección web: <https://artes.esa.int/projects/eurostar-e3000-large-mechanical-platform-development>

[43] Eurostar Bipropellant Propulsion System. Disponible en la dirección web: <http://www.space-propulsion.com/spacecraft-propulsion/showcase/eurostar.html>

[44] Boeing 702: Historical Snapshot. Disponible en la dirección web: <http://www.boeing.com/history/products/702-satellite.page>

[45] Enciclopedia Aeronáutica. HS 702. Disponible en la dirección web: <http://www.astronautix.com/craft/hs702.htm>

[46] Hughes / Boeing: HS-702 / BSS-702, HS-GEM / BSS-GEM (Geomobile). Disponible en la dirección web: http://space.skyrocket.de/doc_sat/hs-702.htm.

[47] Comunicaciones satelitales: Tipos de Atenuación. Disponible en la dirección web: http://satelites.site90.net/Comunicaciones_satelitales/tipos_atenuacion.html

[48] Meghdadi Vahid. "BER Calculation". 2008. Disponible en la dirección web: http://www.unilim.fr/pages_perso/vahid/notes/ber_awgn.pdf

[49] Flota de Telesat y su cobertura. Disponible en la dirección web: <https://www.telesat.com/our-fleet#telstar>

- [50] Cobertura de Eutelsat América. Disponible en la dirección web:
<http://www.eutelsatamerica.com/coverage.html>
- [51] Flota de Eutelsat. Disponible en la dirección web:
<http://www.eutelsat.com/en/satellites/the-fleet.html>
- [52] Flota de Hispasat. Disponible en la dirección web:
<http://www.hispasat.com/es/flota-de-satelites>
- [53] Cobertura del satélite Thaicom. Disponible en la dirección web:
http://www.ipstar.com/pdf/thaicom_coverage.pdf
- [54] Cobertura del satélite Nilesat201. Disponible en la dirección web:
<http://nilesat.com.eg/Satellite/NileSat201/FootPrint.aspx>
- [55] Cobertura del satélite Yahsat 1B. Disponible en la dirección web:
<http://www.yahsat.com/coverage/>
- [56] Flota y cobertura de los satélites ABS. Disponible en la dirección web:
<http://www.absatellite.net/>
- [57] Cobertura del satélite Es'hail 1. Disponible en la dirección web:
<http://eshailsat.qa/Fleet.html>
- [58] Satélites Inmarsat 5. Disponible en la dirección web:
<http://www.inmarsat.com/about-us/our-satellites/>
- [59] Cobertura del satélite Measat-5. Disponible en la dirección web:
http://www.measat.com/satellite_119e_measat5.html
- [60] Satélites de la red o3b. Disponible en la dirección web:
<http://www.o3bnetworks.com/our-story/>
- [61] Cobertura del satélite Jabiru 1. Disponible en la dirección web:
<http://www.newsat.com/products/satellites/jabiru-satellite-program.html>
- [62] Sitio de RSCC (Russian Satellite Communications Company). Disponible en la dirección web: <http://eng.rsc.ru/>
- [63] Satélites Turksat 4A y 4B. Disponible en la dirección web:
<https://www.turksat.com.tr/en/satellite/turksat-satellite/satellites>
- [64] Cobertura del satélite Thor 7. Disponible en la dirección web:
<http://www.telenorsat.com/thor7/wp-content/uploads/2015/03/THOR-7-coverage.pdf>

[65] Cobertura de los satélites del SES. Disponible en la dirección web:
http://www.ses.com/fleet-coverage#?search_by=satellite#satelliteDetails

[66] Cobertura y flota de Avanti. Disponible en la dirección web:
<http://www.avantiplc.com/fleet-coverage/coverage>

[67] Buscador de satélites. Disponible en la dirección web:
<http://www.satbeams.com/satellites>

[68] Mapas de cobertura de satélites. Disponible en la dirección web:
<https://satellitecoverage.net>

[69] Flota y cobertura de Arabsat. Disponible en:
<http://www.arabsat.com/english/the-fleet>

[70] Radiofrequencies for space communications. Disponible en la dirección web:
<http://www.spaceacademy.net.au/spacelink/radiospace.htm>

[71] Stargroup selects new Eutelsat 65 west a satellite for Stargo broadband in Latin America. Disponible en la dirección web:
<http://news.eutelsat.com/pressreleases/stargroup-selects-new-eutelsat-65-west-a-satellite-for-stargo-broadband-in-latin-america-1337858>

ANEXO

Programa principal para el cálculo de enlace

El programa principal para el cálculo de enlace tiene el nombre `Calculo_sistema`.

Parámetros de entrada:

Vectores `a`, `b`, `c`, `d` y `e` de los tramos ascendente y descendente.

Valores de salida:

- a) Relación total portadora a densidad de ruido para un transpondedor transparente.
- b) Relación total de energía de bit a densidad de ruido para un transpondedor transparente.
- c) Probabilidad de error en el transpondedor transparente con un esquema de modulación QPSK.
- d) Probabilidad de error en el transpondedor transparente con un esquema de modulación 8PSK.
- e) Probabilidad de error en el transpondedor transparente con un esquema de modulación 16QAM.
- f) Probabilidad de error en el transpondedor regenerativo con un esquema de modulación QPSK.
- g) Relación total portadora a densidad de ruido para un transpondedor regenerativo con modulación QPSK.
- h) Relación total de energía de bit a densidad de ruido para un transpondedor regenerativo con modulación QPSK.
- i) Probabilidad de error en el transpondedor regenerativo con un esquema de modulación 8PSK.
- j) Relación total portadora a densidad de ruido para un transpondedor regenerativo con modulación 8PSK.
- k) Relación total de energía de bit a densidad de ruido para un transpondedor regenerativo con modulación 8PSK.
- l) Probabilidad de error en el transpondedor regenerativo con un esquema de modulación 16QAM.
- m) Relación total portadora a densidad de ruido para un transpondedor regenerativo con modulación 16QAM.
- n) Relación total de energía de bit a densidad de ruido para un transpondedor regenerativo con modulación 16QAM.

Utiliza las funciones secundarias:

- a) `E_ascen`
- b) `E_descen`
- c) `Pe_trans`
- d) `Pe_reg`
- e) `Enbtotal`

A continuación se presenta el código en Matlab

```
%CÁLCULO DE ENLACE TOTAL D.F-Monterrey
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clearvars
%ENLACE ASCENDENTE

%Parámetros de entrada
a=[19.4,99,30,0,36,120];
b=[20,35,1,0.2498];
c=[54,1,2.5];
d=[4,0.9129,0.9485,0.2291,0.2403];
e=[4.7471,70,2.24];

%Relaciones de desempeño

[C_Nasc,C_Noasc,Eb_Noasc]=E_ascen(a,b,c,d,e);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%ENLACE DESCENDENTE

%Parámetros de entrada

w=[25.6,100.3,20,0,36,120];
v=[20,35,1];
x=[50,1,2.2,0.2498,23,290];
y=[3,0.9847,1.0568,0.09611,0.09164];
z=[4.9628,50,0.53];

%Relaciones de desempeño

[C_Ndesc,C_Nodesc,Eb_Nodesc]=E_descen(w,v,x,y,z);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%ENLACE TOTAL

%En esta simulación se consideran cuatro esquemas de modulación para el
%enlace: BPSK, QPSK, 8PSK y 16QAM.
%Las probabilidades de error y la relación de energía del bit a densidad
%de
%ruido son las mismas para QPSK Y BPSK.

%SATÉLITE TRANSPARENTE

%Para un satélite transparente existirá una relación de portadora a ruido
%de intermodulación.
%Para fines del análisis, en esta simulación, esta relación se tomará
%como
%el promedio entre los valores de las relaciones portadora a ruido
```

Anexo

```
%ascendente y descendente.
%Lo mismo aplica para las relaciones de portadora a densidad de ruido y
%energía de bit a densidad de ruido.

C_Ni=(C_Nasc+C_Ndesc)/2;
C_Noi=(C_Noasc+C_Nodesc)/2;
Eb_Noi=(Eb_Noasc+Eb_Nodesc)/2;

%Se calculan las relaciones de desempeño totales del sistema

CN_T=10*log10(1/(1/10^(C_Nasc/10)+1/10^(C_Ndesc/10)+1/10^(C_Ni/10)));
CNo_T=10*log10(1/(1/10^(C_Noasc/10)+1/10^(C_Nodesc/10)+1/10^(C_Noi/10)));
EbNo_T=10*log10(1/(1/10^(Eb_Noasc/10)+1/10^(Eb_Nodesc/10)+1/10^(Eb_Noi/10
)));

%Se calculan las probabilidades de error para los esquemas de modulación.

PeT_bpsk=Pe_trans(1,EbNo_T);
PeT_8psk=Pe_trans(2,EbNo_T);
PeT_16qam=Pe_trans(3,EbNo_T);

%SATÉLITE REGENERATIVO

%En el caso de un satélite regenerativo el desempeño se evalúa sobre la
%relación de energía de bit a densidad de ruido total, que se obtiene a
%partir de las probabilidades de error de los enlaces ascendentes y
%descendentes.
%Después es posible obtener las relaciones portadora a densidad de ruido
Y
%portadora a ruido totales si se desea.

%Para QPSK

PeT_BPSK=Pe_reg(1,Eb_Noasc,Eb_Nodesc);
EbNoT_BPSK=enbttotal(1,PeT_BPSK);
CNoT_BPSK=EbNoT_BPSK-10*log10(1/(a(6)*10^6));

%Para 8PSK

PeT_8PSK=Pe_reg(2,Eb_Noasc,Eb_Nodesc);
EbNoT_8PSK=enbttotal(2,PeT_8PSK);
CNoT_8PSK=EbNoT_8PSK-10*log10(1/(a(6)*10^6));

%Para 16QAM

PeT_16QAM=Pe_reg(3,Eb_Noasc,Eb_Nodesc);
EbNoT_16QAM=enbttotal(3,PeT_16QAM);
CNoT_16QAM=EbNoT_16QAM-10*log10(1/(a(6)*10^6));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

%RESULTADOS
```



```
%Los resultados obtenidos para cada satélite se muestran a continuación
clc
fprintf('Para un satélite transparente:\n')
fprintf('La relación portadora a densidad de ruido es de %.4f
[db].\n',CNo_T);
fprintf('La relación de energía de bit a densidad de ruido es de %.4f
[db].\n',EbNo_T);
fprintf('La probabilidad de error para el esquema BPSK es de
%.4e.\n',PeT_bpsk);
fprintf('La probabilidad de error para el esquema 8PSK es de
%.4e.\n',PeT_8psk);
fprintf('La probabilidad de error para el esquema 16QAM es de
%.4e.\n',PeT_16qam);

fprintf('\nPara un satélite regenerativo:\n')
fprintf('\nCon un esquema BPSK:\n')
fprintf('La probabilidad de error es de %.4e.\n',PeT_BPSK);
fprintf('La relación de energía de bit a densidad de ruido es de %.4f
[db].\n',EbNoT_BPSK);
fprintf('La relación portadora a densidad de ruido es de %.4f
[db].\n',CNoT_BPSK);
fprintf('\nCon un esquema 8PSK:\n')
fprintf('La probabilidad de error es de %.4e.\n',PeT_8PSK);
fprintf('La relación de energía de bit a densidad de ruido es de %.4f
[db].\n',EbNoT_8PSK);
fprintf('La relación portadora a densidad de ruido es de %.4f
[db].\n',CNoT_8PSK);
fprintf('\nCon un esquema 16QAM:\n')
fprintf('La probabilidad de error es de %.4e.\n',PeT_16QAM);
fprintf('La relación de energía de bit a densidad de ruido es de %.4f
[db].\n',EbNoT_16QAM);
fprintf('La relación portadora a densidad de ruido es de %.4f
[db].\n',CNoT_16QAM);
```

Funciones secundarias del programa

1.- Las funciones E_ascen E_descen se encargan de calcular los parámetros para obtener las relaciones de desempeño.

Variables de entrada:

- a) Vectores a, b, c, d y e

Valores de salida

- a) C_Nasc, C_Noasc y Eb_Noasc (E_ascen)
- b) C_Ndesc, C_Nodesc y Eb_Nodesc (E_desc)

2.- Función Pe_trans. Calcula la probabilidad de error para los esquemas de modulación mencionados a partir de una relación energía del bit a densidad de ruido.

Variables de Entrada

- a) esq (parámetro de selección de modulación; va de 1 a 3).
- b) Eb_No

Variables de Salida

- a) Pe (Probabilidad de error)

3.- Función Pe_reg. Calcula la probabilidad de error para los esquemas de modulación mencionados a partir de las relaciones energía del bit a densidad de ruido ascendente y descendente.

Variables de Entrada

- a) esq (parámetro de selección de modulación; va de 1 a 3).
- b) Eb_Noasc
- c) Eb_Nodesc

Variables de Salida

- b) Pe (Probabilidad de error)

4.- Función ebntotal. Calcula la relación de energía de bit a densidad de ruido a partir de una probabilidad de error de uno de los esquemas de modulación.

Valores de entrada

- a) esq (parámetro de selección de la modulación; va de 1 a 3).
- b) Pe (probabilidad de error)

Valores de salida

- a) EbNo

A continuación se transcribe el código de cada una de estas funciones.

```
1.- function [ C_Nasc,C_Noasc,Eb_Noasc ] = E_ascen( a,b,c,d,e )
%Función para calcular las relaciones de desempeño del enlace
%ascendente satelital, es decir, C/N, C/No y Eb/No.
```

```
% VARIABLES GLOBALES
```

```
long_s=116.8; %[°] Posición orbital del satélite
k_b=1.38*10^(-23); %[J/K] Constante de boltzman
T_a=290; %[K] Temperatura de la antena
```

```
%Datos Generales
```

```
lat=a(1); %[°] Latitud de la estación terrena
long=a(2); %[°] Longitud de la estación terrena
f=a(3); %[GHz]Frecuencia de operación
lluvia=a(4); %¿Llueve? Si=1, No=0
BW=a(5)*10^6; %[Hz] Ancho de banda en Megahertz
Rb=a(6)*10^6; %[bps] Tasa de transmisión en Megabits por segundo
```

```
%Parámetros de la estación terrena
```

```
P_t=b(1); %[W]
```

```

G_t=b(2); %[dBi]
[theta,rango]=Elev_rango(lat,long,long_s); %Elevación y rango del
enlace
L_tx=b(3); %[dB]; Pérdidas entre la antena y el amplificador
L_aacenit=b(4); %[dB] Pérdidas por absorción atmosférica en el cenit

%Parámetros del satélite
G_r=c(1); %[dB] Ganancia de la antena
L_rx=c(2); %[dB] Pérdidas entre la antenas y el receptor.
N_f=c(3); %[dB] Figura de Ruido

%Se calcula la PIRE(considerando las pérdidas del alimentador)

PIRE=10*log10(P_t)+G_t-L_tx;

%Se calculan las pérdidas por propagación en el espacio libre, por
%atenuación debida a las nubes y por absorción atmosférica.

L_el=10*log10(((4*pi*rango*f*10^4)/3)^2);

L_nube=atenube(f,theta,d(1));

L_aa=L_aacenit*cscd(theta);

%Si está lloviendo se calculan las pérdidas por lluvia.

if lluvia==1
    [k,alpha]=coefalphak(d(2),d(3),d(4),d(5),theta);
    L_lluvia=atelluvia(e(1),e(2),e(3),theta,f,lat,k,alpha);
else
    L_lluvia=0;
end

%Se calculan las pérdidas totales

L_T=L_el+L_nube+L_aa+L_lluvia;

%Se calcula la temperatura a la entrada del sistema, considerando que
la
%temperatura del elemento atenuador (pérdidas entre la antena y el
%receptor) es 290 K.

T_s=(T_a/10^(L_rx/10))+290*(1-1/10^(L_rx/10))+290*(10^(N_f/10)-1);

%Se calcula la figura de mérito

M=G_r-L_rx-10*log10(T_s);

%Se calcula la relación portadora a ruido

C_Nasc=PIRE-L_T+M-(10*log10(k_b))-(10*log10(BW));

%Se calcula el valor de la relación portadora a densidad de ruido

```

```

C_Noasc=C_Nasc+10*log10(BW);

%Se calcula el valor de la relación energía de bit a densidad de ruido.

Eb_Noasc=10*log10(1/Rb)+C_Noasc;

end

2.- function [ C_Ndesc,C_Nodesc,Eb_Nodesc ] = E_descen( a,b,c,d,e )
%Función para calcular las relaciones de desempeño del enlace
%descendente satelital, es decir, C/N, C/No y Eb/No.

%VARIABLES GLOBALES
long_s=116.8; %[°] Posición orbital del satélite
k_b=1.38*10^(-23); %[J/K] Constante de boltzman

%Datos Generales
lat=a(1); %[°] Latitud de la estación terrena
long=a(2); %[°] Longitud de la estación terrena
f=a(3); %[GHz]Frecuencia de operación descendente.
lluvia=a(4); %¿Llueve? Si=1, No=0
BW=a(5)*10^6; %[Hz] Ancho de banda en Megahertz
Rb=a(6)*10^6; %[bps]Tasa de transmisión en Megabits por segundo

%Parámetros del satélite
P_t=b(1); %[W] Potencia transmitida
G_t=b(2); %[dBi] Ganancia de la antena
L_tx=b(3); %[dB]; pérdidas entre la antena y el amplificador.

%Parámetros de la estación terrena
G_r=c(1); %[dB] Ganancia de la antena
L_rx=c(2); %[dB] pérdidas entre la antenas y el receptor
N_f=c(3); %[dB] Figura de ruido
L_aacenet=c(4); %[dB] Pérdidas por absorción atmosférica en el cenit
T_cielo=c(5); %[K] Temperatura del cielo despejado para el ángulo de
elevación
T_ambiente=c(6); %[K] Temperatura ambiente del emplazamiento de la
estación terrena
[theta,rango]=Elev_rango(lat,long,long_s); %Elevación y rango del
enlace

%Se calcula la temperatura de la Tierra (superficie)

if theta <= 10
    T_Tierra=50;
else
    if theta <= 90 && theta > 10
        T_Tierra=10;
    end
end

T_lluvia=1.12*T_ambiente-50;

```

```
%Se calcula la PIRE(considerando las pérdidas del alimentador)

PIRE=10*log10(P_t)+G_t-L_tx;

%Se calculan las pérdidas por propagación en el espacio libre, por
%atenuación debida a las nubes y por absorción atmosférica.

L_el=10*log10(((4*pi*rango*f*10^4)/3)^2);

L_nube=atenube(f,theta,d(1));

L_aa=L_aacnit*cscd(theta);

%Si está lloviendo se calculan las pérdidas por lluvia.

if lluvia==1
    [k,alpha]=coefalphak(d(2),d(3),d(4),d(5),theta);
    L_lluvia=atelluvia(e(1),e(2),e(3),theta,f,lat,k,alpha);
else
    L_lluvia=0;
end

%Se calculan las pérdidas totales

L_T=L_el+L_nube+L_aa+L_lluvia;

%Se calcula la temperatura de la antena para dos situaciones: con o sin
%lluvia.

if lluvia == 1
    T_a=T_cielo/10^(L_lluvia/10)+T_lluvia*(1-
(1/10^(L_lluvia/10)))+T_Tierra;
else
    T_a=T_cielo+T_Tierra;
end

%Se calcula la temperatura a la entrada del sistema, considerando que
la
%temperatura del elemento atenuador (pérdidas entre la antena y el
%receptor) es 290 K.

T_s=(T_a/10^(L_rx/10))+290*(1-1/10^(L_rx/10))+290*(10^(N_f/10)-1);

%Se calcula la figura de mérito

M=G_r-L_rx-10*log10(T_s);

%Se calcula la relación portadora a ruido

C_Ndesc=PIRE-L_T+M-(10*log10(k_b))-(10*log10(BW));

%Se calcula el valor de la relación portadora a densidad de ruido
```

Anexo

```
C_Nodesc=C_Ndesc+10*log10(BW);

%Se calcula el valor de la relación energía de bit a densidad de ruido.

Eb_Nodesc=10*log10(1/Rb)+C_Nodesc;

end

3.- function [ Pe ] = Pe_trans( esq,EbNo )
%UNTITLED4 Función para calcular la probabilidad de error de uno de
cuatro
%esquemas de modulación a partir de su relación energía de bit a densidad
%de ruido.
%Todos los esquemas son coherentes y tienen asociado un valor como se
%muestra a continuación.
%BPSK ó QPSK-1
%8PSK-2
%16QAM-3

x=10^(EbNo/10);

switch esq

    case 1
        Pe=qfunc(sqrt(2*x));

    case 2
        Pe=(2/3)*qfunc(sqrt(6*x)*sin(pi/8));

    case 3
        Pe=0.94*qfunc(2*sqrt(x/5));

end

end

4.- function [ Pe ] = Pe_reg(esq,EbNoa,EbNod)
%UNTITLED Función para calcular la probabilidad de error total de uno de
%cuatro esquemas de modulación a partir de las relaciones energía de bit
a
%densidad de ruido ascendente y descendente.
%Todos los esquemas son coherentes y tienen asociado un valor como se
%muestra a continuación.
%BPSK ó QPSK-1
%8PSK-2
%16QAM-3

x=10^(EbNoa/10);
y=10^(EbNod/10);
switch esq

    case 1
        Pea=qfunc(sqrt(2*x));
```

```
Ped=qfunc(sqrt(2*y));

case 2
    Pea=(2/3)*qfunc(sqrt(6*x)*sin(pi/8));
    Ped=(2/3)*qfunc(sqrt(6*y)*sin(pi/8));

case 3
    Pea=0.94*qfunc(2*sqrt(x/5));
    Ped=0.94*qfunc(2*sqrt(y/5));

end

Pe=Pea+Ped-2*Pea*Ped;

end

5.- function [ EbNo ] = enbtotal(esq, Pe )
%Función para calcular la relación de energía de bit a densidad ruido de
%uno de cuatro esquemas de modulación a partir de su probabilidad de
error.
%Cada esquema tiene asociado un valor como se muestra a continuación.
%BPSK ó QPSK-1
%8PSK-2
%16QAM-3

% Detailed explanation goes here

switch esq

    case 1
        x=(1/2)*(qfuncinv(Pe))^2;

    case 2
        x=(1/6)*((1/sin(pi/8))*qfuncinv((3/2)*Pe))^2;

    case 3
        x=5*(qfuncinv(Pe)/2)^2;
end

EbNo=10*log10(x);

end
```

Funciones complementarias

Funciones que son utilizadas por las funciones secundarias.

1.- Función Elev_rango. Calcula el ángulo de elevación y la distancia del trayecto del enlace.

Variables de entrada

- a) Latitud de la estación terrena
- b) Longitud de la estación terrena
- c) Longitud del satélite

Variables de salida

- a) theta
- b) rango

2.-Función atenube. Calcula la atenuación producida por las nubes en el enlace.

Variables de entrada

- a) f (frecuencia de operación)
- b) theta (ángulo de inclinación)
- c) L_reducida (contenido de la columna de agua líquida reducida)

Variables de salida

- a) A_nubes (atenuación debida a nubes)

3.-Función coefalphak. Calcula los coeficientes alfa y k para usarse en la estimación de la atenuación específica por lluvia.

Variables de entrada

- a) α_v (coeficiente alfa de polarización vertical)
- b) α_h (coeficiente alfa de polarización horizontal)
- c) k_v (coeficiente k de polarización vertical)
- d) k_h (coeficiente k de polarización horizontal)
- e) theta (ángulo de elevación)

Variables de salida

- a) k
- b) α

4.- Función atelluvia. Función para calcular la atenuación por lluvia en el trayecto.

Variables de entrada

- a) h_0 (altura del isoterma a 0° promedio anual)
- b) R_01 (intensidad de lluvia excedida a 0.01% del año)
- c) h_s (altura de la estación terrena sobre el nivel del mar)

- d) theta (ángulo de elevación)
- e) f (frecuencia de operación)
- f) lat (latitud de la estación terrena)
- g) k (coeficiente de la atenuación específica)
- h) alpha (coeficiente de la atenuación específica)

A continuación se transcribe el código para estas funciones.

```

1.- function [ theta,rango ] = Elev_rango(lat,long,longs)
%Esta función calcula el ángulo de elevación y el rango entre una
estación
%terrena y un satélite, en órbita geoestacionaria, a partir de la latitud
y
%longitud (para la estación), y la longitud del satélite.

%Variables Globales

R_T=6378; %[km] Radio de la Tierra
h=42164; %[km] Radio de la órbita

%Se calcula la diferencia de longitud entre el satélite y la estación
%terrena

delta=longs-long; %[°]

%Se calcula el ángulo de elevación y el rango
theta=atand((cosd(lat)*cosd(delta)-
(R_T/h))/(sind(acosd(cosd(lat)*cosd(delta))))); %[°] Ángulo de
inclinación
rango=35786*sqrt(1.4199-0.4199*cosd(acosd(cosd(lat)*cosd(delta)))); %[km]
Distancia del trayecto

2.- function [ A_nubes ] = atenube( f, theta, L_reducida )
%UNTITLED4 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

%Se calcula el factor inverso de la temperatura y las frecuencias de
%relajación (principal y secundaria).
T=273.15;
phi=300/T;

fp=20.20-146*(phi-1)+316*(phi-1)^2;
fs=39.8*fp;

%Se calculan componentes real e imaginaria de la permitividad
dieléctrica
%del agua.

ep_0=77.6+103.3*(phi-1);
ep_1=0.0671*ep_0;
ep_2=3.52;

```

```
perm_real=(f*(ep_0-ep_1))/(fp*(1+(f/fp)^2))+(f*(ep_1-ep_2))/(fs*(1+(f/fs)^2));
perm_im=(ep_0-ep_1)/(1+(f/fp)^2)+(ep_1-ep_2)/(1+(f/fs)^2);

%Se calcula el coeficiente de atenuación específica

eta=(2+perm_real)/perm_im;

K_1=(0.819*f)/(perm_im*(1+eta^2));

%Se calcula la atenuación por las nubes

A_nubes=(L_reducida*K_1)/sind(theta);

end

3.- function [n,m] = coefalphak( av,ah,kv,kh,theta)
%RESUMEN
%Esta función calcula los coeficientes k y alfa que se usan en la
%determinación de la atenuación específica.
% Detailed explanation goes here
t=0;
n=(kh+kv+(kh-kv)*cosd(theta)^2*cosd(2*t))/2;
m=((kh*ah)+(kv*av)+(kh*ah-kv*av)*cosd(theta)^2*cosd(2*t))/(2*n);
end

4.- function [ A_lluvia ] = atelluvia( h_0,R_01,h_s,theta,f,lat,k,alpha)
%UNTITLED3 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
Re=8500;

%Se determina la altura de lluvia
h_R=h_0+0.36;

%Se calcula la longitud del trayecto de línea visible y la proyección
%horizontal.

if theta >= 5
    L_s=(h_R-h_s)/sind(theta);
else
    L_s=2*(h_R-h_s)/(sqrt(sind(theta)^2+(2*(h_R-h_s)/Re))+sind(theta));
end

L_G=cosd(theta)*L_s;

%Se calcula la atenuación específica

gamma_01=k*R_01^alpha;

% Se calcula el factor de reducción horizontal

r0_01=1/(1+0.78*sqrt(L_G*gamma_01/f)-0.38*(1-exp(-2*L_G)));
```

Anexo

```
%Se calcula el factor de ajuste vertical

zeta=atand((h_R-h_s)/(L_G*r0_01));

if zeta > theta
    L_R=(L_G*r0_01)/cosd(theta);
else
    L_R=(h_R-h_s)/sind(theta);
end

if abs(lat)<36
    ji=36-abs(lat);
else
    ji=0;
end

v0_01=1/(1+(sqrt(sind(theta))*((31*(1-exp(-
theta/(1+ji))))*(sqrt(L_R*gamma_01)/f^2))-0.45)));

%Se calcula el trayecto efectivo

L_E=L_R*v0_01;

%Se calcula la atenuación total excedida durante 0.01% del año

A_lluvia=L_E*gamma_01;

end
```