

22

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

**INGENIERÍA DE SATÉLITES LEO DE
BANDA ANCHA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
P R E S E N T A N :
NADIA RAMÍREZ MORENO
OMAR GABRIEL TORRES GÓMEZ

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. RODOLFO NERI VELA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F., NOVIEMBRE DE 2001



2001/11/01



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PREFACIO

Diversos factores son los que han dirigido el desarrollo de nuevos sistemas de comunicaciones satelitales. Entre ellos, el aumento constante en la demanda de nuevos servicios, destacando entre éstos el acceso a Internet, los servicios de multimedia, las aplicaciones en medicina remota, las comunicaciones personales globales, la transmisión de voz, video y datos en tiempo real, las redes comerciales avanzadas inalámbricas fijas, el acceso a redes de educación a distancia en áreas remotas, la interconexión a altas velocidades a redes mundiales desde localidades remotas, la intercomunicación entre supercomputadoras y redes de área local, videotelefonía, videoconferencia y multidifusión.

Los avances hasta ahora alcanzados en la comunicación por satélite han sido motivados por los desarrollos recientes en la industria de las telecomunicaciones alrededor del mundo; nuevos y variados servicios están siendo ofrecidos para permitir que el consumidor esté conectado al mundo por medio de una serie de servicios fijos y móviles. El reto actual es alcanzar nuevos desarrollos en las áreas de Internet y de servicios y aplicaciones en tiempo real que necesitan de anchos de banda mucho más grandes que los empleados actualmente.

Los sistemas satelitales actualmente están siendo desarrollados para cubrir los grandes rezagos dejados por los servicios terrestres. Desarrollos recientes en la tecnología satelital están haciendo posible que estos rezagos puedan ser cubiertos de manera inmediata con grandes ventajas tecnológicas y económicas.

Asimismo, otros factores como el incremento en tráfico y la necesidad de altas tasas de transmisión abren la pauta para nuevos requerimientos de mayor espectro y ancho de banda. Para poder satisfacer esta demanda, surge la idea de utilizar y explotar la banda Ka, lo cual permitirá el uso de pequeñas terminales y como consecuencia la posibilidad de expandir el mercado potencial sirviendo directamente a usuarios finales tanto del tipo comercial como del tipo residencial. Sin embargo, también presenta limitaciones, ya que su uso ha sido principalmente experimental y no comercial.

Hasta hace poco las comunicaciones satelitales predominaban principalmente en la órbita geoestacionaria, a una altitud de 36,000 kilómetros sobre la superficie terrestre. Los inconvenientes que ésta presenta además de la ahora congestión de ranuras satelitales en el arco geoestacionario, son la latencia (tiempo de recuperación de datos) y la atenuación, debido a la distancia desde la superficie a la que se encuentran sobre la superficie terrestre. Como ya se mencionó, estas órbitas de gran altitud introducen una desventaja inherente en retrasos en tiempo de tráfico. Además, las órbitas satelitales de gran altitud presentan la desventaja de requerir transmisores y receptores más grandes y con mayor potencia necesarios para compensar la gran atenuación.

Por tanto una solución a este problema se presenta con satélites en órbitas de mayor cercanía al usuario, también conocidas como órbitas bajas o LEO (Low Earth Orbit por sus siglas en inglés). Su baja altitud reduce la latencia, presentando un menor tiempo de propagación que aquellos en órbitas geoestacionarias o GEO (Geostationary Earth Orbit por sus siglas en inglés) lo que es satisfactorio para aplicaciones en tiempo real como telefonía, videoconferencia y ciertos tipos de transmisión de datos. Sin embargo, dado que la huella de dichos satélites en éstas órbitas se reduce, para ofrecer servicio global se requiere de un mayor número de satélites, dando lugar a las llamadas Constelaciones Satelitales.

En el tercer capítulo se estudiarán los efectos de propagación, atenuación e introducción de ruido en los satélites LEO en la banda Ka. Aspectos muy importantes que no pueden pasar desapercibidos más aún tratándose de frecuencias tan altas como lo es en esta banda.

En el cuarto capítulo se describirán las técnicas de corrección comúnmente empleadas y desarrolladas para mejorar la calidad en la banda Ka.

Finalmente, en el quinto capítulo se presentarán las conclusiones más importantes del desarrollo de esta tesis.

Esperamos que este documento atraiga la atención de futuros ingenieros en el campo de las telecomunicaciones, que deseen realizar estudios en el área de las comunicaciones por satélite, más aún en lo que se refiere a constelaciones satelitales y redes de banda ancha.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer todo el apoyo brindado para la realización de esta tesis al **Dr. Rodolfo Neri Vela**, quien fue un excelente guía en el desarrollo del presente trabajo; aportando valiosas sugerencias y comentarios. Sobre todo, queremos hacer hincapié en el granito de arena aportado para la realización de futuras investigaciones en el campo de las telecomunicaciones. Estamos seguros que su valiosa aportación pronto se verá reflejada.

Queremos hacer especial mención y agradecimiento a todos los integrantes del **Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería**, quienes nos apoyaron de muy diversas maneras durante el curso de nuestros estudios.

Agradecemos a nuestra Máxima Casa de Estudios, la **Universidad Nacional Autónoma de México**, a quien le debemos en gran parte nuestra formación como ingenieros y quien nos ha encomendado dirigirnos con rectitud y humildad para hacer de nuestro país un México mejor.

Finalmente, agradecemos sobre todo el invaluable apoyo y ayuda de nuestros **Padres, Hermanos, Familiares y Amigos** quienes siempre han estado presentes y nos han y siguen impulsado para lograr y buscar nuevas metas. A ellos les debemos nuestra formación como profesionistas, pero sobre todo, seres humanos.

Muchas gracias por creer en nosotros,

Nadia Ramírez Moreno.
Omar Gabriel Torres Gómez.

Noviembre, 2001.

1.	CONCEPTOS GENERALES DE LAS CONSTELACIONES DE SATELITES LEO	4
1.1	INTRODUCCION	4
1.2	ORBITAS LEOS	6
1.2.1	<i>Tipos de Orbitas</i>	6
1.2.1.1	Tabla de Parámetros Típicos de Orbitas	6
1.2.2	<i>Orbita Elíptica Alta: HEO</i>	7
1.2.3	<i>Orbita Geoestacionaria: GEO</i>	7
1.2.4	<i>Orbita Media: MEO</i>	8
1.2.5	<i>Orbita Baja: LEO</i>	8
1.2.5.1	Tabla Comparativa de los Satélites en los diferentes Tipos de Orbita	11
1.3	VENTAJAS DE LAS ÓRBITAS LEO	10
1.3.1	<i>Tiempo de Propagación de la señal</i>	10
1.3.2	<i>Potencia y presupuesto del enlace</i>	12
1.3.3	<i>Reutilización del espectro de frecuencias</i>	13
1.3.4	<i>Cobertura amplia y global</i>	13
1.3.5	<i>Angulo de elevación</i>	14
1.3.6	<i>Transportación</i>	14
1.3.7	<i>Peso</i>	15
1.3.8	<i>Terminales de usuario</i>	16
1.3.9	<i>Telepuertos (Estaciones gateway)</i>	17
1.4	DESVENTAJAS DE LAS ÓRBITAS LEO	17
1.4.1	<i>Geometría</i>	17
1.4.2	<i>Vida útil</i>	18
1.4.3	<i>Efecto Doppler</i>	18
1.4.4	<i>Conmutación</i>	20
1.4.5	<i>Regulación</i>	20
1.4.6	<i>Costos del servicio</i>	20
1.4.7	<i>Polarización</i>	20
1.5	BANDAS DE FRECUENCIAS UTILIZADAS EN CONSTELACIONES LEO	21
1.5.1.1	Cuadro de Atribución de Frecuencias para Operación de Comunicaciones Vía Satélite	21
1.6	TIPOS DE LEOS	23
1.6.1	<i>Satélites LEO</i>	23
1.6.2	<i>Pequeños LEOS</i>	23
1.6.2.1	Descripción	23
1.6.2.2	Aplicaciones	24
1.6.3	<i>Grandes LEOS</i>	25
1.6.3.1	Descripción	25
1.6.3.2	Aplicaciones	25
1.6.4	<i>LEOs de Banda Ancha</i>	26
1.6.4.1	Descripción	26
1.6.4.2	Aplicaciones	26
1.6.4.3	<i>EJEMPLOS DE CONSTELACIONES DE SISTEMAS LEOS</i>	27
1.7	ENLACES INTERSATELITALES	27
1.7.1	<i>Clasificación de los enlaces intersatelitales según el tipo de órbita</i>	28
1.7.1.1	Enlace LEO-GEO	28
1.7.1.2	Enlace GEO-GEO	29
1.7.1.3	Enlace LEO-LEO	29
1.7.2	<i>Enlaces intersatelitales para sistemas de satélites LEO</i>	29
1.7.2.1	Enlaces intersatelitales intraorbitales	29
1.7.2.2	Enlaces intersatelitales interorbitales	29
1.7.3	<i>Desempeño de red de constelaciones no geoestacionarias equipadas con enlaces intersatelitales</i>	30
1.8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

3.1.1.6	Ruteo eficiente.....	82
3.1.1.7	Asignación de recursos.....	82
3.1.1.8	Terminales pequeñas.....	82
3.2	EFFECTOS DE PROPAGACIÓN.....	82
3.3	EFFECTOS DE TRANSMISIÓN DEBIDOS AL MEDIO DE PROPAGACION.....	84
3.3.1	<i>Rotación de Faraday</i>	84
3.3.2	<i>Refracción atmosférica</i>	84
3.3.2.1	Centelleo ionosférico.....	85
3.3.2.2	Centelleo troposférico.....	85
3.3.3	<i>Absorción atmosférica</i>	85
3.3.4	<i>Precipitación atmosférica</i>	85
3.3.5	<i>Atenuación</i>	86
3.3.6	<i>Atenuación por nubes</i>	86
3.4	EFFECTOS DE TRANSMISION EN FRECUENCIAS DE LA BANDA KA.....	86
3.4.1	<i>Pérdidas por propagación en el espacio libre</i>	86
3.4.1.1	Pérdidas por propagación en la banda Ka para diferentes órbitas.....	87
3.4.2	<i>Desvanecimiento de la señal</i>	88
3.4.2.1	Sombra y Multitrayectoria.....	88
3.4.2.2	Observaciones por desvanecimiento.....	89
3.4.2.3	Escenarios de interacción de la red.....	91
3.5	CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y DIVERSIDAD.....	94
3.5.1	<i>Diversidad tierra - espacio</i>	95
3.5.2	<i>Diversidad de red dentro de la órbita</i>	95
3.6	HANDOVER ENTRE SATELITES Y ENTRE ESTACIONES TERRENAS.....	96
3.6.1	<i>Handover intra - haz</i>	97
3.6.2	<i>Handover Inter - haz</i>	97
3.6.3	<i>Handover satelital intraplanar</i>	97
3.6.4	<i>Handover satelital interplanar</i>	97
3.7	CARACTERÍSTICAS DEL ENLACE DE SUBIDA Y BAJADA EN ORBITAS BAJAS.....	99
3.7.1	<i>Tiempos de propagación y transmisión para satélites en diferentes órbitas</i>	100
3.7.2	<i>Tabla de parámetros del enlace de subida</i>	101
3.8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
4.	TÉCNICAS DE CORRECCION PARA MEJORAR LA CALIDAD EN LA BANDA KA.....	103
4.1.	REDUCCIÓN DEL DESVANECIMIENTO.....	103
4.1.1.	<i>Control de potencia para el enlace de subida</i>	106
4.1.2.	<i>Diversidad de sitios</i>	106
4.1.3.	<i>Conformación del haz de la antena</i>	107
4.1.4.	<i>Modulación adaptiva y codificación</i>	112
4.2.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	116
5.	CONCLUSIONES.....	117

1. CONCEPTOS GENERALES DE LAS CONSTELACIONES DE SATELITES LEO

1.1 INTRODUCCION

Actualmente se percibe que el mercado comercial satelital LEO se encuentra muy estancado y sin desarrollo. Pareciera que muchos de los grandes sistemas satelitales que han estado en desarrollo y planeación los últimos 5 y 6 años, a un ritmo muy lento, no tuvieran una fecha bien definida para concretarse.

Las fechas iniciales de lanzamiento para muchos de estos programas, han sido pospuestas de manera consistente, debido a la lucha incesante de dichas compañías por incrementar el capital de inversión necesario para pagar la construcción, lanzamiento, servicios y operaciones iniciales de cada sistema. Ha llegado a ser muy evidente que la mayoría de estos proyectos satelitales móviles y de banda ancha, - introducidos durante los inicios y mediados de los 90 - subestimaron el tiempo que les tomaría desarrollar y desplegar sus sistemas. Con base en los planes originales, muchos de estos sistemas deberían estar operando para este momento, sin embargo los representantes de dichos sistemas continúan hablando del lanzamiento de los mismos para el próximo o los próximos dos años.

Por otro lado, continúa existiendo gran expectación dentro de la industria espacial, hacia los sistemas como "Astrolink", de Lockheed Martin; "ECCO", de Constellation Communications; "Ellipso" de Mobile Communications Holdings; "FAISat" de Final Analysis; "LEO-One" de LEO One Worldwide; "Skybridge", de Alcatel; "Spaceway", de Hughes Electronics y "Teledesic", de Teledesic LLC. Sin embargo, esta expectación está llegando a crear un gran escepticismo, debido a la percepción de que estos programas no están alcanzando mucho progreso.

Pero esta expectación también se está agotando, debido a la creciente presión dentro de la industria, por identificar oportunidades que tengan base en programas diferentes a aquellos doce sistemas o más que han sido ya repetidamente citados en estudios de mercado.

El hecho es, que programas como los mencionados, representan todavía una cantidad significativa en cuanto a potencial de negocios para fabricantes satelitales y para proveedores de servicios de lanzamiento. Por lo tanto, la esperanza continúa en espera de que la mayoría de estos programas resuelvan los problemas técnicos y/o de financiamiento que han estado experimentando, para poder tener sus satélites en orbita, antes del año 2005.

El principal problema continúa siendo el financiamiento. No existe suficiente interés por parte de inversionistas privados en sistemas satelitales comerciales tan caros, cuyo objetivo es alcanzar mercados de consumidores no desarrollados, tales como las comunicaciones móviles basadas en satélite y las comunicaciones multimedia de banda ancha.

El fracaso del sistema Iridium y su incapacidad para sobreponerse de la bancarota; así como también el notificado de bancarota de Orbcomm el pasado mes de septiembre, continúa presente en la mente de muchos; lo cual ha contribuido a continuar disminuyendo la confianza de inversionistas en sistemas similares.

De un modo u otro, el papel que le espera a LEO-One y Teledesic por ejemplo, pareciera estar obligado a terminar pronto. Las concesiones otorgadas por la comisión federal de comunicaciones de los E.U. (FCC) a sistemas como éstos durante los pasados años, estipulan cumplir con un determinado programa de construcción y lanzamiento en cierto tiempo. El no acatar estas disposiciones puede resultar en una cancelación de la concesión, forzando a las

respectivas compañías a entrar a un proceso de apelación o someterse a consideración para una nueva aplicación y solicitud de concesión, reiniciando así todo el proceso.

En junio de 2000, la FCC revocó las concesiones de NetSat 28, Morning Star y PanAmsat para satélites de banda ancha porque las compañías no cumplieron con las fechas de inicio en la construcción de sus respectivos sistemas (Marzo 1998), como se especificaba en dichas concesiones. Esta decisión de la FCC es una clara muestra de que no se apoyará a sistemas satelitales como los ya propuestos si no están bien fundados y planeados. Esto debiera servir como una llamada de atención, como por ejemplo para Teledesic, quien posee amplios recursos financieros pero que ha sido incapaz de establecer una arquitectura definitiva desde que el sistema fue propuesto hace una década.

Por otro lado, el hecho de que Motorola se haya retirado y dejado de ser el primer inversionista del sistema Teledesic el pasado octubre, indica y sugiere que el sistema está al borde de otra serie de mayores esfuerzos de rediseño. Sin embargo esto requeriría que Teledesic buscara nuevas autorizaciones tanto de la FCC como de reguladores internacionales ya que un nuevo sistema sería tan diferente respecto del original, que hablaríamos totalmente de un nuevo sistema.

Se puede prever que el precedente establecido por la FCC ayudará a apoyar sistemas para que se completen de modo rápido o, en caso contrario, a que se genere un espacio disponible para otras compañías que puedan solicitar y aplicar a dichas concesiones e intenten desarrollar nuevos sistemas. Por lo anterior, no se esperará una nueva ola de lanzamientos por parte de sistemas de comunicación satelital móvil y de servicios de banda ancha y multimedia, en el próximo par de años.

Por lo anterior, se prevé que la siguiente constelación de satélites LEO para comunicación móvil será lanzada alrededor del 2002 y 2003. Siendo el más próximo, FAISAT. Final Analysis ha sabido manejar correctamente cómo atraer recursos financieros durante los pasados 2 años, por lo que se puede decir que probablemente sea el más estable de la segunda generación de sistemas satelitales de comunicación móvil.

Los primeros sistemas o constelaciones de banda ancha probablemente surgirán alrededor del 2003 y 2004. Esto incluirá a algunos de ellos tanto en órbitas LEO como es el caso de Teledesic y Skybridge, como también en órbitas GEO, que serían los casos de Astrolink y Spaceway. Cada uno de estos sistemas está bien definidos y guiados por compañías como Lockheed Martín, Alcatel/Loral y Hughes Electronics, quienes han trabajado activamente en atraer socios, así como realizando inversiones de grandes cantidades de dinero.

Por tanto, el período entre el 2003 y 2004 es visto como el siguiente gran ciclo de crecimiento en el mercado de las comunicaciones satelitales comerciales, en términos de lanzamientos; aunque este ciclo no será tan robusto como se proyectó en 1999, ya que no existirá ningún reabastecimiento de satélites Iridium. El sistema Iridium fue lanzado durante los años 1997 y 1998, con un tiempo aproximado de vida de los satélites de 6.5 años. Haciendo un juicio conservador, se estimaba que para el 2003 y 2004 el primer número de satélites a reemplazar hubiera estado ya listo.

Tal vez ingenuamente, también se esperaba que iniciaran en su lanzamiento las primeras docenas de satélites para el sistema Teledesic alrededor del 2004 y 2005. Eso ahora resulta difícil, pues se espera que sólo alguna parte del sistema Teledesic pueda ser lanzado en un futuro cercano; pero es obvio que no se acercará al número total aproximado de 300 satélites que el sistema de Craig Mc Caw dirige y ha promovido [1].

1.2 ORBITAS LEOS

Antes de analizar el desempeño de un tipo de constelación satelital a fondo, es bueno detallar conceptos de comunicación satelital así como de los diversos tipos de órbitas en las que se puede ubicar a un satélite.

Una órbita se define como el patrón de trayectoria seguida por el satélite, dada por el equilibrio entre dos fuerzas que se contraponen. Estas fuerzas son la fuerza de atracción, dirigida hacia el centro de la tierra y debida a la gravitación de la misma y la fuerza centrífuga asociada con la curvatura de la trayectoria del satélite. La trayectoria se encuentra dentro de un plano y formada por una elipse con una extensión máxima en el apogeo y una mínima en el perigeo. El satélite se mueve más lentamente en su trayectoria conforme la distancia a la Tierra aumenta.

Las órbitas de los satélites de comunicación pueden tener diversas alturas sobre la superficie de la Tierra, distinto ángulo de inclinación con respecto al plano ecuatorial y ser circulares o elípticas, de acuerdo con las coberturas geográficas requeridas y con los demás objetivos de un sistema [2].

1.2.1 Tipos de Orbitas.

Existen varias formas de clasificar a los tipos de órbitas, pero en este caso para los satélites de comunicaciones, las clasificaremos en cuatro tipos: Geostacionaria, Geosíncrona, Orbita Media y Orbita Baja. Algunos de los parámetros típicos de éstos tipos de órbitas, se muestran en la tabla 1.2.1.1 [2].

Tipo de órbita	Apogeo [Km]	Perigeo [Km]	Período	Inclinación (Grados)	Efecto Doppler
Geostacionaria	35786	35786	1 día sideral	0.0	Nada o bajo
Geosíncrona	35786	35786	1 día sideral	0 - 90	Bajo
Media • elíptica • circular	9400/7600 Entre 6000 y 10500	1000/650 Entre 6000 y 10500	1 día sideral	35 - 65 0 - 90	Alto
Baja (normalmente circular)	Entre 700 y 2000	Entre 700 y 2000	100 min. o más	0 - 90	Muy alto

Todas las órbitas son elípticas o circulares y tienen un tiempo que es el período en que el satélite recorre la órbita especificada.

Dentro de las órbitas más favorables para comunicaciones tenemos a las que se muestran en la figura 1.1.1

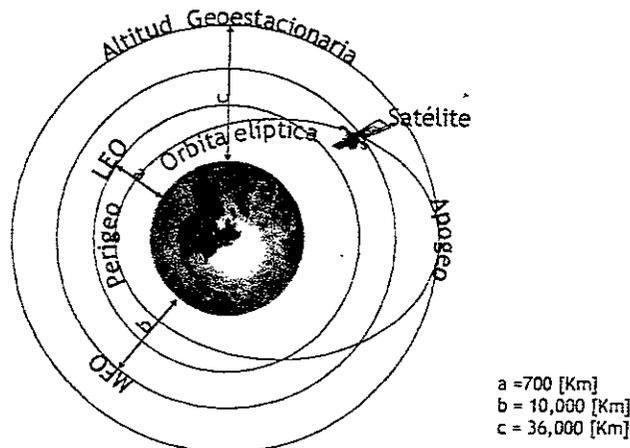


Figura 1.1.1 Tipos de órbitas empleadas en comunicaciones satelitales.

1.2.2 Órbita Elíptica Alta: HEO

Pueden usarse órbitas elípticas inclinadas con un ángulo cercano a los 64° respecto del plano ecuatorial. Este tipo de órbita es particularmente estable con respecto a las irregularidades en potencia gravitatoria terrestre y debido a su inclinación; el satélite puede cubrir regiones de alta latitud por una gran fracción del período orbital conforme pasa al apogeo. El valor particular en la inclinación es seleccionado con el fin de evitar la rotación de ápsides¹; por ejemplo, la intersección de una línea desde el centro de la tierra al apogeo y la superficie de la tierra ocurrirá siempre a una latitud de 63.4 grados norte. Debido a la alta excentricidad de la órbita, un satélite tomará cerca de dos tercios del período orbital cerca del apogeo, pareciendo casi estacionario en ese tiempo para un observador en la tierra. Después de este período se requiere un cambio a otro satélite en esta misma órbita con el fin de evitar pérdidas en la comunicación. Estas órbitas son particularmente útiles en sistemas satelitales para comunicación con móviles, donde los efectos de bloqueo causados por los obstáculos circundantes tales como edificios y árboles, así como los efectos de trayectorias múltiples son muy pronunciados a bajos ángulos de elevación (dígase menos de 30°). De hecho, las órbitas elípticas inclinadas pueden proveer la posibilidad de enlaces a latitudes medias cuando el satélite esté cercano al apogeo con ángulos de elevación cercanos a los 90° . Estas condiciones favorables no pueden ser provistas a las mismas latitudes por satélites geoestacionarios. La ventaja de estas órbitas viene de la primera ley de Kepler acerca del movimiento planetario para una órbita elíptica, que dice que la velocidad orbital de un satélite es menor en su apogeo que en su perigeo. Esta ley permite a un satélite HEO pasar un tiempo significativamente mayor sobre una región terrestre bajo su apogeo respecto de lo que podría en una órbita circular. Sin embargo el satélite pasa menos tiempo sobre regiones debajo del perigeo [2].

1.2.3 Órbita Geoestacionaria: GEO

Una órbita geoestacionaria es una órbita circular localizada en el plano ecuatorial, con período orbital igual al período de rotación de la tierra, así como en la misma dirección. Esto se logra con un radio orbital de 35786 [Km] sobre la superficie terrestre, ya que a esta altitud la fuerza de atracción terrestre y la fuerza centrífuga se equilibran y por lo tanto mantiene constante su órbita sobre nuestro planeta. De esta forma, se consigue además que el satélite, que viaja a una velocidad de 10.900 kilómetros por hora, acompañe a nuestro planeta en su movimiento de

¹ Cada uno de los dos extremos del eje mayor de la órbita de un astro.

rotación, que dura 24 horas (a una altura más baja, el satélite se adelantaría al giro terrestre). Un satélite en esta órbita parece estar fijo por arriba de la superficie de la tierra, asegurando de esta forma operación continua en tiempo real para el área de visibilidad del satélite (43% de la superficie terrestre). De esta forma, la huella o área de servicio de un satélite geoestacionario cubre casi 1/3 de la superficie terrestre (aproximadamente de una latitud de 75° S a 75° N) por lo que con un mínimo de tres satélites geoestacionarios se puede lograr una cobertura global. Una desventaja importante de los satélites geoestacionarios usados en sistemas de comunicaciones de voz es el retardo de subida y bajada de aproximadamente 250 milisegundos.[2]

1.2.4 Órbita Media: MEO

Una órbita media, también llamada órbita circular intermedia, se encuentra ubicada a una altura aproximada de entre 6,000 y 10,000 [Km] sobre la superficie terrestre. Los límites señalados permiten que los satélites queden ubicados entre el primero y segundo cinturón de Van Allen, evitando su radiación perjudicial. El período orbital mide cerca de 6 horas y el máximo tiempo durante el cual un satélite se encuentra por arriba del horizonte de un observador en la tierra es del orden de unas cuantas horas. Los ángulos de inclinación de las órbitas son similares a los de las órbitas LEO (45° - 90°) [2].

Un sistema de satélites con cobertura global requiere un menor número de satélites que un sistema LEO, en 2 o 3 planos orbitales para lograr una cobertura total. En comparación con los sistemas de órbita baja, la transferencia de servicio o relevo ("handover") es menos frecuente; no obstante, el retardo de propagación y las pérdidas por espacio libre son mayores. Los sistemas basados en satélites de órbitas MEO, operan de manera similar a como lo hacen los sistemas de órbitas bajas. Sin embargo, su movimiento relativo a la superficie terrestre es menor, por lo que el traspaso entre células o sub-huellas de iluminación es menos frecuente y el retardo de propagación es mayor [2].

1.2.5 Órbita Baja: LEO

Esta órbita puede ser elíptica o circular, siendo lo más usual una órbita circular inclinada. La altitud del satélite es constante e igual a varios cientos de kilómetros. Para operaciones de comunicaciones satelitales, ésta se puede encontrar a una altura aproximada de entre 500 y 2000 kilómetros sobre la superficie terrestre. El límite inferior generalmente no conviene que sea menor debido a razones de cobertura y a la existencia de alguna fricción atmosférica, en tanto que el superior evita la proximidad del primer cinturón de radiación de Van Allen. Existen casos especiales en que la altitud de la órbita está entre 300 o 400 [Km]. Posee un período orbital variable, del orden de 90 minutos y 2 horas, dependiendo de la altura a la cual se coloque el satélite. Presentan inclinaciones que varían entre los 30° y los 90°. Sin embargo, con cerca de 90° de inclinación, este tipo de órbita garantiza que el satélite pasará sobre cada región de la tierra a la misma hora local. Esta es la razón para escoger este tipo de órbita para satélites de percepción remota. Se puede presentar el establecimiento de comunicaciones de almacenamiento y envío ("store-and-forward") si el satélite está equipado con un método de almacenamiento de información. El diámetro de la huella de un satélite de comunicaciones en esta órbita varía de 1400 a 5900 kilómetros. El tiempo máximo en el que un satélite en esta órbita está arriba del horizonte local para un observador en tierra es de 20 minutos (Este es el tiempo en que un usuario es servido por un satélite, tras el cual otro satélite toma el relevo para continuar el servicio)[2].

Un sistema de comunicaciones global que use este tipo de órbita, requiere un gran número de satélites, en varias órbitas con diferentes inclinaciones. Cuando un satélite que da servicio a un usuario en particular se mueve bajo el horizonte local, necesita ser capaz de hacer una transferencia de servicio ("handover") a otro satélite en la misma órbita o en una adyacente. La cercanía terrestre de los satélites en órbita baja les permite operar con una potencia relativamente menor y con antenas en las estaciones terrenas de menor tamaño, comparadas con los sistemas en órbitas geoestacionarias, lo cual representa una gran ventaja para los servicios móviles actuales, donde se requieren transmisores y receptores ligeros y compactos. La proximidad a la tierra significa también un menor retraso en la señal, lo cual es requerido para dar una calidad óptima en las comunicaciones. Los sistemas LEO son similares a las redes celulares. La diferencia es que el tamaño de la célula es mayor y que éstas se mueven. Este movimiento es el que determina el intervalo de traspaso de una célula a otra [2].

En la figura 1.2.1 se presenta una descripción gráfica de las órbitas más comunes para comunicaciones:

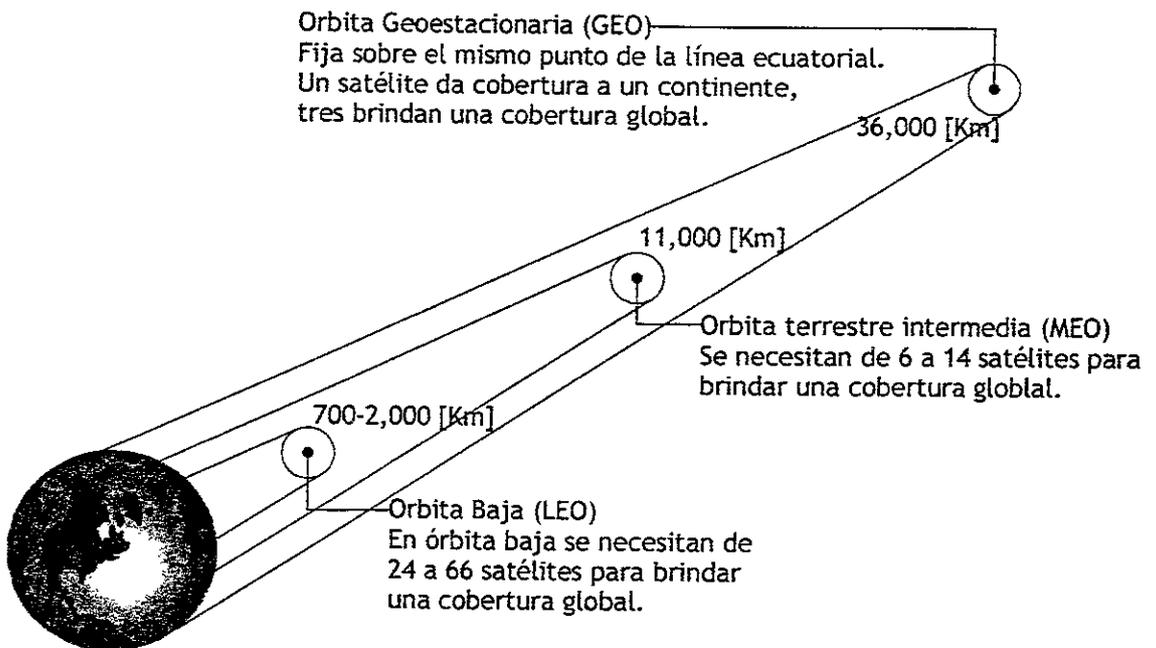


Figura 1.2.1 Descripción de órbitas empleadas en comunicaciones satelitales.

En la tabla 1.2.5.1 se presenta de manera comparativa, a los satélites en los diferentes tipos de órbita, destacando sus principales características [3].

Las constelaciones son grupos de satélites que conmutan señales entre sí, almacenando y enviando paquetes; cubren todo el tiempo un punto dado en la tierra reduciendo el almacenamiento considerablemente. Si los paquetes pueden ser enviados a otro satélite en lugar de enviarlo a tierra se tiene una constelación de red satelital [2].

Por tanto, la comunicación con terminales móviles puede ser manejada en uno de los siguientes modos:

- Cada satélite actúa como un transpondedor repetidor de conexión tonta "bent-pipe", a la tierra. Las llamadas de móvil a móvil pueden ser establecidas vía una ruta de salto doble: Móvil / satélite / estación terrena/ red terrestre/ estación terrena /satélite

/móvil. El retraso del enlace se ve mejorado considerablemente respecto de los GEOs debido a las bajas altitudes satelitales, pero aún no son aceptables en el caso extremomóvil - móvil, además de que se requiere un gran número de estaciones terrenas para que cada satélite siempre pueda ver a una estación terrena dentro de su huella y así poder pasar llamadas a y desde usuarios móviles en su región de cobertura. El costo de construcción de estas estaciones compensará la ventaja de satélites baratos usando tecnología probada. Este enfoque es adoptado por Globalstar y Ellipso y se basa en: "almacenar tan poco como sea posible y enviarlo a la tierra" [2].

- Este otro enfoque, permite a los satélites comunicarse entre sí, de tal manera que una llamada desde un móvil, pase al satélite y después sea ruteada a través de satélites vecinos hasta alcanzar un satélite visible desde el otro móvil. Esto permite disminuir el retraso de propagación considerablemente, siendo esta opción preferible para llamadas interactivas en tiempo real; además de tener la ventaja de poder construir menos y más grandes estaciones terrenas, conforme las llamadas de una red móvil / terrestre pueden ser manejadas al pasarlas entre satélites en lo alto y otros satélites, hasta que un satélite visible desde una estación terrena sea alcanzado y hasta que las llamadas móvil /móvil no necesiten incurrir cargos terrestres. Este enfoque es adoptado por Iridium y Teledesic, tomando como base el almacenar tan poco como sea posible y enviarlo a otro satélite o a tierra. Esto se refiere al concepto de red de constelaciones satelitales. En lugar de almacenar paquetes y después enviarlos a una estación terrena, cuando alguno se encuentre visible desde el satélite; los paquetes son pasados inmediatamente a otros satélites visibles al satélite y ruteados finalmente a las estaciones terrenas. De éste modo se ha permitido la evolución de comunicaciones interactivas en tiempo real, vía conmutación de paquetes, con la integración de nuevo equipo para enlaces intersatelitales. Con este modo de comunicación nos aproximamos efectivamente a una red amplia de elementos distribuidos en el espacio [2].

1.3 VENTAJAS DE LAS ÓRBITAS LEO

Los satélites LEO ofrecen varios beneficios con respecto a satélites geoestacionarios (GEO) y las redes terrestres. Su baja altitud reduce la latencia (tiempo de recuperación de datos) usualmente experimentado por usuarios de satélites GEO mayores. En suma, los satélites proveen una ventaja en costo sobre los sistemas móviles terrestres porque son capaces de cubrir un área mayor y por tanto reducir el costo de abastecimiento de un sistema omnipresente. La cobertura universal de los satélites LEO permite al usuario realizar funciones más fácilmente que con redes terrestres [4]. Entre las razones que abogan por la arquitectura no geoestacionaria cabe citar las siguientes:

1.3.1 Tiempo de Propagación de la señal

El tiempo de propagación de «ida y retorno» desde y hasta un satélite geoestacionario es de 1/4 segundo aproximadamente, tiempo que algunos consideran insatisfactorio para aplicaciones en tiempo real, como telefonía, videoconferencias y ciertos tipos de transmisión de datos². Sin embargo, el tiempo de propagación (es decir, transmisión) de ida y retorno en el caso de un satélite LEO en órbita es mucho menor y está dado por el rango en altitud a la que se pueden encontrar dichos satélites (700 - 2000 [Km]). Sabemos

² Este es un problema relativamente secundario hoy en día, porque los protocolos de transmisión de datos mejorados (pues utilizan codificación Viterbi, Red Solomón y/o Secuencial) reducen considerablemente el efecto del retardo de propagación del satélite sobre el caudal de tráfico y el tiempo de respuesta del sistema total en comparación con los protocolos de generaciones anteriores.

13.1.1 Tabla Comparativa de los Satélites en los diferentes Tipos de Orbita

TIPO DE SATELITE	HEO	GEO	MEO	LEO
Descripción	(Highly Elliptical Orbit) Orbita elíptica alta	(Geostationary Earth Orbit) Orbita terrestre geostacionaria	(Medium Earth Orbit) Orbita terrestre media	(Low Earth Orbit) Orbita terrestre baja
Altura	Perigeo: 500 [Km] Apogeo: 50 mil [Km]	36 mil [Km]	10 mil - 20 mil 150 [Km]	700 - 2 mil [Km]
Período Orbital	Entre 8 y 24 hrs	23 hrs. 56 min. 4 seg.	En promedio 260 min.	Entre 90 y 120 min.
Tiempo de Línea de Vista	4 - 8 hrs en la región de su apogeo	24 hrs	2-4 hrs	15 min.
Velocidad de transmisión	4.8 a 28.8 Kbps	Arriba de los 155 Mbps	9.6 a 38.4 Kbps	2.4 a 300 Kbps
Retardo	Mayor a 400 ms	0.25 - 0.5 seg.	0.10 seg.	0.05 seg.
Banda de frecuencia para comunicación móvil	S, L	L	Ku y L	L, Ku y Ka (en planeación)
Cobertura Máxima	Zonas Polares que no cubren los GEO	(140° - 150°); 8 mil [Km]	6 mil [Km]	5 mil [Km]
Servicios Básicos	TV en zonas alejadas y aplicaciones experimentales. Ejemplos de estos son el sistema ruso Molniya y el europeo Arquimedes.	Radiodifusión, datos, TV, radio, voz, conexión punto a punto, aplicaciones meteorológicas, militares y experimentales.	Voz móvil y fija, datos a baja velocidad.	Voz, datos, Internet, Fax, control de inventarios, emergencias, transmisión de archivos, registro y monitoreo de operaciones y de vehículos.
Ventajas	Su operación es similar a las de los GEOs. Sus movimientos respecto a la superficie terrestre son relativamente pequeños, los intervalos de traspaso son idénticos a la duración del apogeo y el retardo de la propagación es similar al GEO. Llevan servicios a zonas agrestes localizadas en los polos.	Tres satélites equidistantes pueden transmitir instantáneamente señales de radio y TV a casi el área completa de la tierra. Su cobertura aproximada es aproximadamente el 42.2% de la superficie terrestre. Vista constante.	Existe una reducción sustancial de la latencia y se utilizan para posicionamiento. Costos moderados de lanzamiento.	Ofrecen buen ancho de banda, para diversas aplicaciones. Aquellos de banda ancha pueden competir e integrarse con las redes de fibra óptica. Ayudan en la minimización de los retardos asociados a las comunicaciones satelitales. Por lo anterior permite la generación de aplicaciones en tiempo real. Pequeña pérdida de trayectoria. Costos de lanzamiento mucho menores.
Desventajas	Tardan 12 horas en promedio en completar una revolución y ofrecen mejores condiciones de uso en las telecomunicaciones cuando su altitud es de 40 [Km]	No proveen demoras similares a la fibra óptica ya que es insostenible para aplicaciones en tiempo real como videoconferencia y para protocolos estándares de datos, pues presenta un gran retardo en la subida y bajada de la señal.	Al estar ubicados a una altitud menor, se necesitan más satélites para tener cobertura mundial. Mayor pérdida de trayectoria.	Al igual que los MEO se requieren más satélites para obtener una cobertura mundial. Para el caso de LEOs pequeños, es limitado el ancho de banda, por lo que tan sólo dan servicio de datos y mensajería. Tienen menor tiempo de vida y son más afectados por los cinturones de radiación.
Vida útil.	7 - 10 años	15 años en promedio	7 años en promedio	5 años en promedio.
Costo de instalación		Estas constelaciones requieren el menor número de satélites: típicamente entre 3 y 6 porque cada uno es más alto y cubre más de la tierra. Estos satélites tienden a ser los más complejos y pesados, por tanto los más caros. Consecuentemente el costo de transporte de cada uno es mayor.	El número de satélites requeridos está entre 10 y 20. Son moderados en costo y transporte por cada satélite.	Este sistema requiere el mayor número de satélites, típicamente 30 a 60. Cada uno de éstos cuesta típicamente menos que las constelaciones de altitud media o alta siendo más barato transportarlos. Sin embargo, se encuentran más cerca al cinturón de radiación Van Allen así como mayormente sujetos a condiciones climáticas

antena muy pequeña y no direccional (con una ganancia por consiguiente muy pequeña) en el aparato de bolsillo u otra terminal de usuario, lo que aumenta también su transportabilidad [4].

1.3.3 Reutilización del espectro de frecuencias

Como los sistemas LEO y otros sistemas globales de comunicación satelital funcionan en altitudes orbitales relativamente bajas, es posible enfocar el haz del enlace descendente de cada satélite, si así se desea, para que ilumine solamente una zona limitada de la superficie de la Tierra. Ello significa que las mismas frecuencias pueden ser reutilizadas muchas veces por muchos satélites diseminados en torno a una órbita y proporcionar así una gran cantidad de capacidad con una cantidad relativamente pequeña de espectro. En la práctica, las arquitecturas de estos sistemas están concebidas para un gran número de pequeños satélites en órbita en torno al globo en «constelaciones» [4]. Por tanto, muchas de las propuestas de sistemas de satélites LEO consideran, como se muestra en la figura 1.3.2, la partición de la huella de cada satélite en pequeñas áreas o celdas mediante el uso de antenas de haces puntuales muy finos [5].

Al utilizar antenas de haces puntuales múltiples, la huella de cada satélite se divide dentro de áreas más pequeñas, denominadas celdas. El concepto básico de seccionar la huella del satélite dentro de celdas surge de la idea utilizada en sistemas celulares. Generalmente, como ventaja, en una configuración de múltiples celdas, podemos reutilizar las bandas de frecuencia en celdas suficientemente separadas o mejorar la eficiencia del ancho de banda. Otra ventaja es que al dividir áreas de servicio amplio dentro de pequeñas celdas, la potencia de radio frecuencia de los usuarios puede ser reducida debido a la concentración de potencia dentro de áreas más pequeñas, equivalente a una ganancia de la antena satelital mayor. Con la potencia concentrada en pequeñas celdas, los requerimientos para la variación en potencia de los transmisores de usuario pueden hacer que ésta sea más limitada. Con antenas de haces puntuales múltiples, la potencia es reducida aproximadamente por el número de celdas en cada huella satelital. El detalle de tener menor potencia de transmisión es un punto clave para la concepción de terminales de usuario de bolsillo [5].

Como se menciona, una ventaja de dividir la huella en celdas más pequeñas, es la disponibilidad del reuso de frecuencia. En el caso de sistemas TDMA, eso puede limitar el nivel de interferencia desde celdas adyacentes. Típicamente, se utiliza el patrón de reuso de 7 frecuencias, siendo el punto central rodeado de 6 cuyas frecuencias FDM son diferentes para cada punto en cualquier conglomerado de 7. Para el caso de CDMA, es posible reutilizar la misma frecuencia en cada haz, debido a que en CDMA la señal de banda amplia mitiga la interferencia de acceso múltiple así como señales no deseadas [5].

1.3.4 Cobertura amplia y global

Una constelación global de comunicación satelital LEO puede abarcar una zona muy extensa de la superficie de la Tierra y prestar servicio a usuarios en latitudes altas e incluso (con algunas de las arquitecturas) en el centro de las regiones polares. Estas zonas no están generalmente atendidas hoy en día por sistemas de telecomunicaciones terrenales ni geostacionarias [4].

que el tiempo de propagación T_p está determinado por la altitud h del satélite y la velocidad c de la luz, por lo que este rango en tiempo de propagación sería del orden de milésimas de segundo y se muestra en la figura 1.3.1. Esta cifra puede aumentar a causa de otras fuentes de retraso en la arquitectura general de un sistema global de comunicación satelital³ [4].

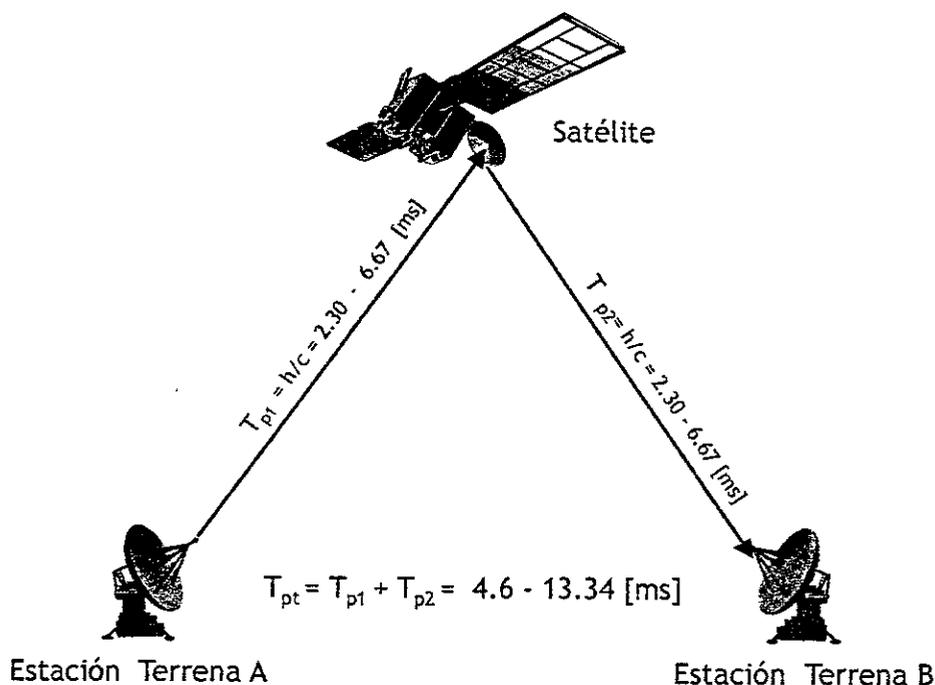


Figura 1.3.1 Tiempo de propagación de la señal en satélites LEO.

Para el caso geostacionario se puede ignorar el cambio en la velocidad de la luz dentro de la atmósfera, la cual es insignificante comparada con la distancia total. Para estaciones terrenas que no se encuentran en el nadir satelital, el retraso es ligeramente mayor. Para el caso de un satélite no geostacionario el cambio en la velocidad de la luz dentro de la atmósfera es más significativo, puesto que conforme las huellas de los satélites son más pequeñas, el aumento en el retraso a través de las mucho menores huellas es lejanamente menor.

1.3.2 Potencia y presupuesto del enlace

Como los satélites de estos sistemas están considerablemente más cerca de la superficie de la Tierra que los satélites geostacionarios, la potencia que los satélites necesitan transmitir hacia el suelo para «cerrar el enlace» con objeto de comunicarse con la terminal del usuario es menor (en igualdad de otros factores), y la potencia que es preciso transmitir desde el suelo hacia el satélite por la terminal de usuario para «cerrar el enlace» en la dirección ascendente desde la Tierra al satélite es menor también. Por lo tanto, estas consideraciones en estos sistemas permiten que la terminal de usuario alimentado por pilas sea sumamente móvil, suficientemente compacto para que sea fácilmente transportable y que tenga sin embargo un período de autonomía aceptablemente largo, con un precio de fabricación relativamente bajo. En particular, la arquitectura de estos sistemas permite utilizar una

³ Por ejemplo, el tiempo de proceso de la señal, el tiempo de formación de la trama y el tiempo de propagación en los enlaces entre satélites cuando se los utiliza. Quizá sea necesario añadir también en el caso de los sistemas geostacionarios y no geostacionarios el tiempo de codificación de voz y de formación de trama en la terminal.

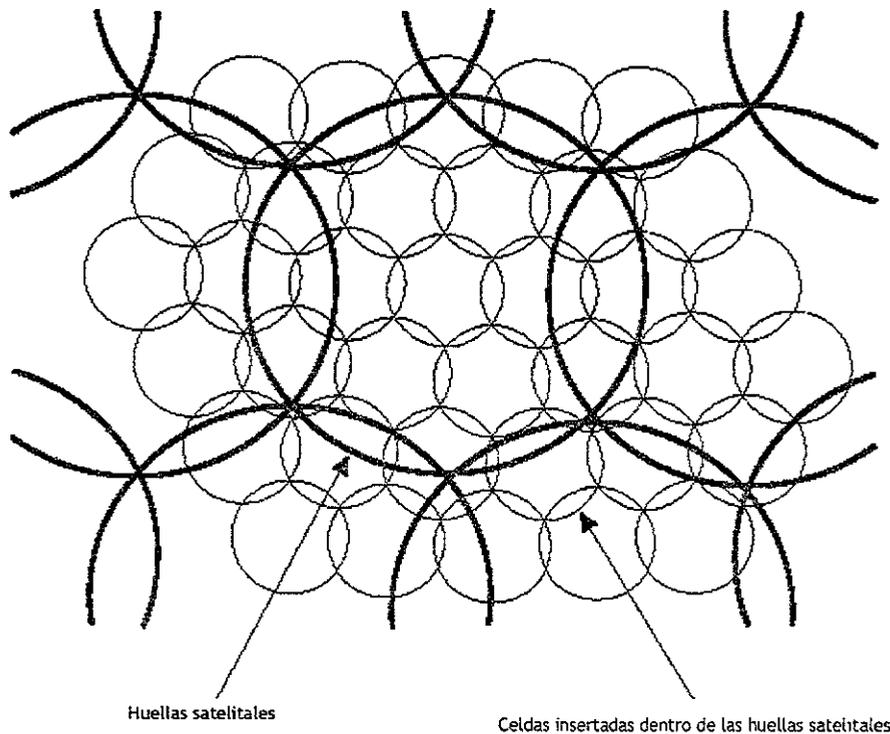


Figura 1.3.2 Partición de la huella de un satélite LEO en celdas o áreas más pequeñas.

1.3.5 Angulo de elevación

Es posible configurar una constelación de satélites de órbita baja de modo que el ángulo mínimo de elevación con el que el abonado se comunica con el satélite - que en ese momento se encuentra visible y ha sido seleccionado por el sistema para proporcionar el enlace de comunicaciones -, pueda ser relativamente grande. Por tanto, la elevación sobre el horizonte depende del número de planos orbitales del sistema, del número de satélites en cada uno de ellos y de la forma de la órbita (que puede ser circular o elíptica). Un ángulo de elevación alto es aconsejable porque minimiza la atenuación de la señal o su interrupción a causa del mal tiempo u otros factores, y porque reduce el riesgo de interferencia con los usuarios terrestres del espectro radioeléctrico [4].

1.3.6 Transportación

Dada la necesidad de extensas constelaciones y la corta vida de estos satélites, los LEOs están diseñados para un fácil despliegue, individualmente o por grupos, por medio de una variedad de vehículos de lanzamiento ampliamente disponibles. En un mismo vehículo espacial es posible enviar hasta una decena de satélites, dependiendo de la empresa lanzadora encargada para este fin. Así, la producción y lanzamiento masivo de estos satélites ayudará a disminuir los costos y tiempos de construcción y lanzamiento, y a amortizar los costos de investigación y desarrollo [4]. Tal es el caso de la familia de lanzadores SOYUZ, que posee un vehículo denominado Soyuz - Ikar, que ha realizado los lanzamientos de las cargas satelitales de Globalstar, siendo este vehículo principalmente utilizado para el lanzamiento múltiple de satélites. Asimismo, poseen otro vehículo denominado Soyuz/ST que tiene como fin el lanzamiento de un total de 32 satélites para la constelación satelital Skybridge. Se realizarán 11 lanzamientos a partir del 2002, con 3 satélites Skybridge en cada uno. Ambos se presentan en la figura 1.3.3a

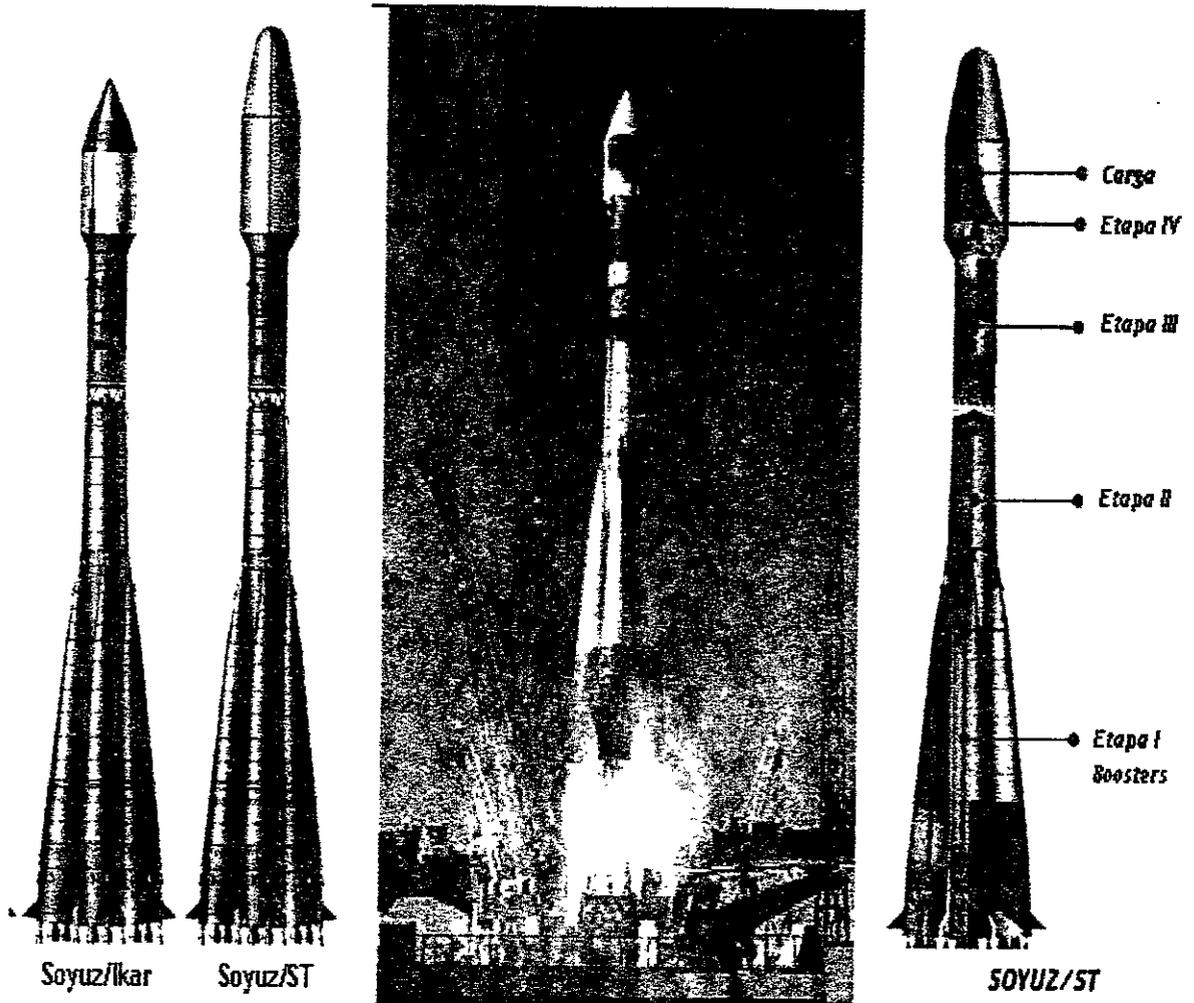


Figura 1.3.3a Vehículos de lanzamiento múltiple.

Asimismo, el Ariane 5 se puede equipar con toda una variedad de carenados de carga, adaptadores y estructuras para lanzamientos de carga simple, doble o múltiple. Su futura evolución (Ariane 5 Plus) permitirá al lanzador satisfacer la demanda de un mercado en continuo cambio, incluido el importante aumento en el peso de los satélites y el número cada vez mayor de órbitas (concretamente, respecto a las constelaciones de satélites). De este modo, con las nuevas etapas superiores, podrá llevar a cabo todo tipo de misiones en la próxima década, incluyendo el despliegue de constelaciones de satélites en órbita media (MEO) o baja (LEO). Esta versión mejorada, de la etapa superior actual del Ariane 5, se muestra en la figura 1.3.3b como la configuración 2.

1.3.7 Peso

Debido a que estos sistemas satelitales tienen un determinado número de satélites en varios planos orbitales repartidos sobre la esfera terrestre, el peso y dimensión de los mismos es considerablemente menor al de sistemas geoestacionarios o de órbita media, debido también a la disminución en potencia requerida para cerrar el enlace. El peso promedio de cada satélite se encuentra dentro del rango de 40.86 [Kg] hasta 800 [Kg] [4]. Así por ejemplo, los

satélites del sistema Orbcomm tienen un peso aproximado de 43 [Kg], los del sistema Globalstar 450 [Kg] y los del sistema Teledesic 771 [Kg].

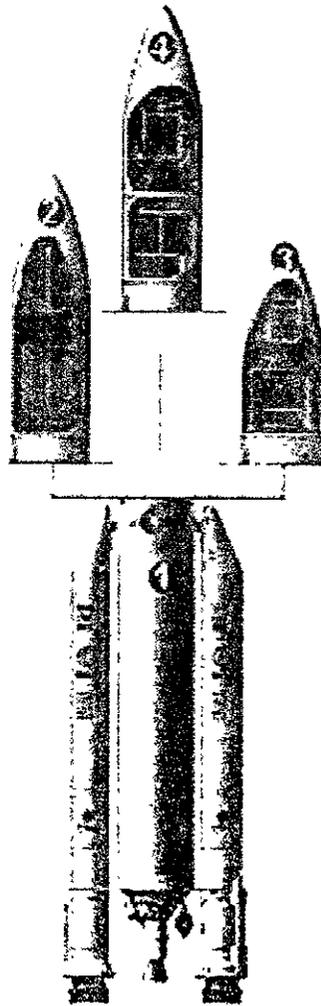


Figura 1.3.3b Vehículo de lanzamiento con configuración múltiple (2-LEO múltiple).

1.3.8 Terminales de usuario

La terminal de usuario ideal para constelaciones de satélites LEO orientadas a voz, tales como Iridium y Globalstar, es concebida como un handset móvil, similar en tamaño y función a la existente para redes celulares. Es probable incorporar la capacidad de la red celular terrestre de tal forma que la red constelación satelital sea sólo utilizada cuando la red terrestre no esté disponible o sea específicamente escogida, dado que el uso de la red terrestre provee mejor calidad de llamada así como mejor precio para el usuario, y evita disgustar al gobierno como dueño de compañías de telecomunicaciones, al remover una fuente de ingreso de su control. Teledesic toma un diferente enfoque, pues planea soportar una variedad de terminales o computadoras móviles y fijas con tasas de datos variables y requerimientos del enlace, en vez de concentrarse en servicios de voz [6].

1.3.9 Telepuertos (Estaciones gateway)

Estas estaciones actúan como la interfaz entre la constelación satelital y la red fija terrestre. Es probable que también actúen como las fuentes de señales de control para los satélites, para control de altitud, mantenimiento de posición en la órbita y funciones de cuidado interno, pero se asume que este tráfico de control es pequeño e insignificante en comparación con el tráfico de usuario. Un telepuerto será capaz de ver uno o más satélites en la constelación en todo tiempo, para asegurar que puede pasar conexiones entre las redes terrestres y las espaciales. Un determinado número de telepuertos, distribuidos en todo el mundo, es necesario para maniobrar toda la carga interna de la red así como para mantener conexiones con enlaces retrasados. En teoría, una constelación puede ser completamente funcional con sólo un telepuerto, siempre y cuando el telepuerto y los enlaces intersatelitales tengan capacidad suficiente [6].

No se pretende sugerir aquí que las arquitecturas de satélite no geoestacionario concebidas concretamente para los sistemas de comunicación personal global son necesariamente superiores en general a las arquitecturas de los satélites geoestacionarios; se ponen más bien en relieve los atributos de estas arquitecturas que las hacen superiores en ciertas misiones precisas, como prestar un servicio móvil a terminales en zonas muy extensas del mundo [4].

1.4 DESVENTAJAS DE LAS ÓRBITAS LEO

A pesar de todas las ventajas mencionadas en el apartado anterior, este tipo de arquitectura también presenta ciertas limitaciones específicas:

1.4.1 Geometría

El que el tamaño de las huellas de estos satélites sea relativamente pequeño, requiere un gran número de los mismos para proveer una cobertura suficiente en una escala global, mediante un número diferente de órbitas inclinadas. De ahí la necesidad de toda una red de estos satélites o también denominada constelación.

Es importante destacar que toda constelación satelital debe ser definida por:

- Número total de satélites
- Número de planos orbitales
- Número de satélites por plano
- Parámetros orbitales (altitud, inclinación, excentricidad, etc.)
- Fase entre satélites

Como principal aspecto a considerar en el diseño del sistema, se tiene la selección de la constelación, ya que es un elemento clave para el cumplimiento de los requerimientos del sistema concernientes a la extensión del área de servicio, a la disponibilidad del mismo y a la carga de tráfico [7].

Otras elecciones importantes del sistema pueden afectar el diseño de la constelación satelital y es valioso mencionarlas:

- Infraestructura terrestre (número y ubicación de las estaciones terrenas o telepuertos)
- Ruteo y handover
- Estrategia del lanzamiento para el despliegue de la constelación

1.4.2 Vida útil

Comparada con otro tipo de satélites y debido a su tamaño, la vida útil de un satélite LEO es relativamente corta, siendo ésta de 5 a 7 años, lo cual implica tener un cierto número adicional de satélites como respaldo y para mejor y oportuno mantenimiento de la constelación [7].

1.4.3 Efecto Doppler

La frecuencia y longitud de onda de un campo electromagnético son afectadas por el movimiento relativo. Sólo la componente de movimiento radial (que se acerca o aleja) produce este fenómeno. El efecto Doppler es significativo en sistemas satelitales LEO. Todos los satélites LEO se encuentran constantemente moviéndose con relación a cada uno de ellos y con relación a puntos en la superficie. Esto causa variaciones en las frecuencias y longitudes de onda de las señales recibidas. En sistemas satelitales GEO, el efecto Doppler no es un factor muy importante, a menos que el usuario final estuviera a bordo de un vehículo espacial, por la alta velocidad. El corrimiento Doppler se define como el problema de recibir frecuencias más altas o más bajas que la frecuencia original transmitida. Se origina por la diferencia en la relativa alta velocidad entre el transmisor y el receptor. En el caso de sistemas satelitales en altitudes bajas, cada satélite tiene una relativamente alta velocidad; consecuentemente, el sistema podría ser afectado por altos valores en el corrimiento de la frecuencia Doppler. La siguiente figura ilustra el escenario durante el movimiento de un satélite LEO sobre una estación terrena fija. Como se muestra en la figura, conforme el satélite se acerca a la estación terrena, mayores valores de frecuencia serán alcanzados en la estación. Por otro lado, conforme el satélite se aleja de la estación, las señales serán recibidas por la estación terrena a menores frecuencias.

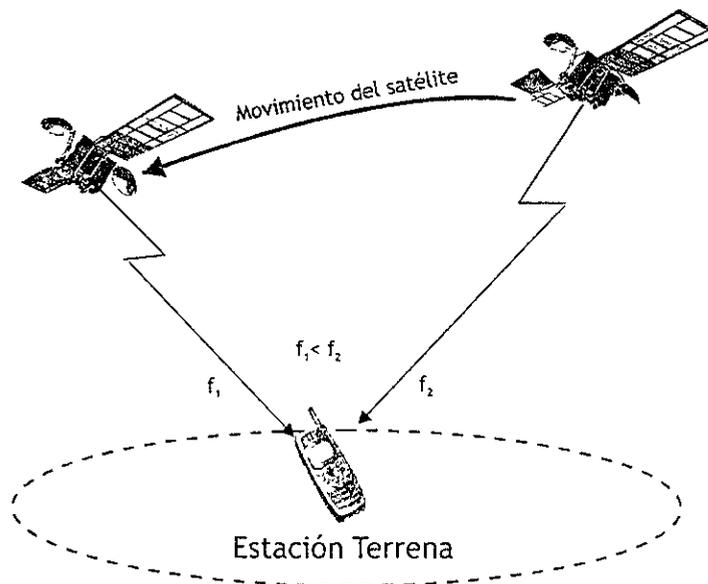


Figura 1.4.1 Problema del corrimiento Doppler de frecuencia en sistemas satelitales LEO.

Lo anterior queda definido por la fórmula siguiente:

$$\frac{f_r - f_t}{f_t} = \frac{\Delta f}{f_t} = \frac{v}{c}$$

siendo v la velocidad radial del transmisor en dirección hacia el receptor, f_r la frecuencia de la señal recibida y f_t la frecuencia de la señal transmitida. Por lo que $f_r > f_t$ cuando el transmisor se mueve hacia el receptor (es decir, se acerca), mientras que $f_r < f_t$ cuando el transmisor se aleje. El corrimiento en la frecuencia debido al efecto Doppler está muy relacionado con la frecuencia de la portadora de la señal transmitida y el método de modulación. Asumiendo una modulación BPSK, definimos el corrimiento Doppler normalizado como el valor del offset del corrimiento Doppler dividido por la frecuencia de la portadora. La figura 1.4.3 muestra el corrimiento Doppler normalizado para diferentes altitudes orbitales, calculados con la frecuencia de una portadora de 2.4 GHz y una tasa de transmisión de 19.4 Kbps, respectivamente. Resultados similares pueden derivarse para el caso de la técnica de modulación QPSK [5].

El eje horizontal en la figura es la diferencia en tiempo entre el punto subsatelital y la ubicación de la estación terrena, en un punto en el punto ecuador y al que se denota por "0". El tiempo indicado como cero es el instante cuando el punto subsatelital está en la ubicación de la estación terrena.

Como puede observarse, el cambio en el corrimiento en frecuencia llega a ser muy agudo y más significativo conforme la altitud del satélite disminuye. Los valores del corrimiento en frecuencia para sistemas con órbitas LEO circulares son mucho mayores que la existente en sistemas geoestacionarios. Por otro lado, en sistemas con órbitas no geoestacionarias altamente elípticas, los satélites son utilizados cerca de sus apogeos, los cuales se encuentran lejos de la Tierra; por consiguiente todas las estaciones terrenas en un área de servicio poseen casi las mismas relaciones en posición a un satélite determinado y por lo tanto los mismos valores de corrimiento Doppler. En tal caso, es posible que los transmisores de las estaciones terrenas obtengan el valor del corrimiento al recibir sus propias señales desde los satélites y cancelar los efectos del corrimiento Doppler mediante un offset de sus frecuencias portadoras con ese valor.

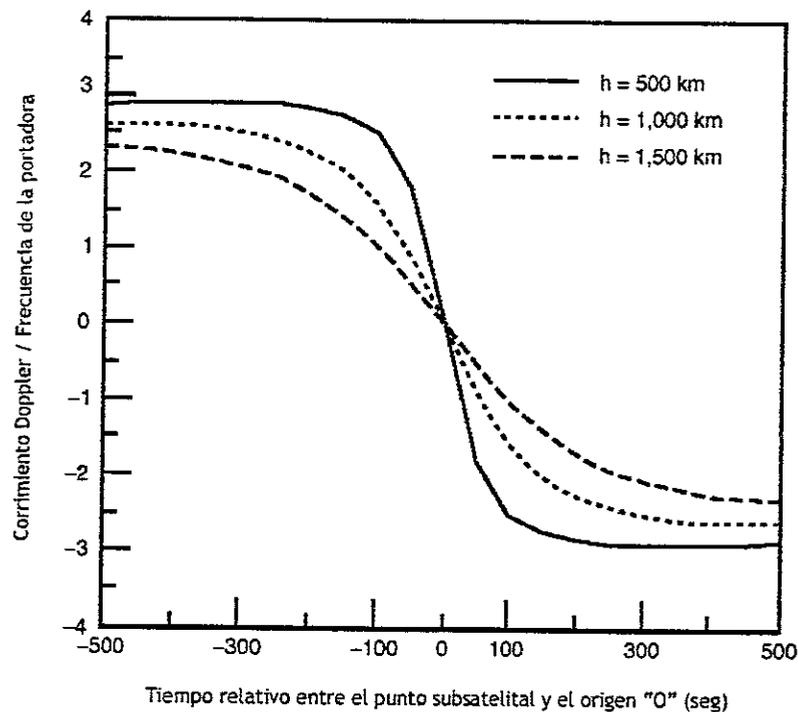


Figura 1.4.3 Ejemplos numéricos del corrimiento Doppler en sistemas satelitales LEO a diferentes altitudes satelitales.

Sin embargo, en los sistemas satelitales LEO, debido a que la distancia entre las estaciones terrenas y los satélites es muy pequeña, algunas estaciones terrenas sufren corrimientos Doppler positivos y otros negativos al mismo tiempo. En esa situación, la compensación del offset de la frecuencia portadora por transmisores es imposible, y son entonces requeridas las técnicas basadas en los receptores.

1.4.4 Conmutación

Para los sistemas LEO que utilizan la arquitectura de enlaces intersatelitales, a diferencia de los que utilizan la arquitectura "bent-pipe" o saltos a estaciones terrenas, se requiere del uso de tecnología compleja de conmutación a bordo; esto es, cuando una terminal móvil requiere comunicarse con otra terminal fuera de la zona de cobertura del satélite, es necesario llevar a cabo un enrutamiento de la información a través de otro u otros satélites, sin bajar a una estación terrestre, hasta alcanzar la terminal deseada [5].

1.4.5 Regulación

Como la atribución actual⁴ de frecuencias de los sistemas de comunicación satelital global en el ámbito de los servicios móviles por satélite generales es pequeña, la congestión de frecuencias se ha planteado ya como un serio problema para la concesión de las licencias; incluso ya para los cinco primeros solicitantes. Es por eso que se ha requerido hacer un esfuerzo para dar cabida a los ulteriores solicitantes (por ejemplo para aquéllos que pretenden dar servicios de banda ancha). Estos sistemas tienen a su vez otra diferencia importante: la atribución a este nuevo servicio posee una cantidad muy limitada del espectro de frecuencias radioeléctricas. La totalidad del espectro atribuido será utilizado por un pequeño número de sistemas con licencias concedidas por unas cuantas administraciones y todos esos sistemas prestarán servicio a los teléfonos de bolsillo que, por definición, cruzan con toda facilidad las fronteras nacionales [4], [8].

1.4.6 Costos del servicio

Según datos actuales, el costo del segmento espacial por minuto de tráfico en los servicios prestados por los sistemas globales no geostacionarios, al menos durante el presente decenio, será considerablemente superior al costo correspondiente en los sistemas geostacionarios. Esta diferencia en costo obedece en parte a la complejidad de explotación de una constelación de satélites que se desplaza constantemente en relación con la superficie de la Tierra. Un ejemplo de esta complejidad es la necesidad de traspasar una llamada a media conversación de un satélite que está saliendo del campo de visibilidad a un satélite que está entrando en ese campo de visibilidad [4]. Así por ejemplo, el costo estimado del servicio por minuto para el sistema ICO es de 1 a 2 USD/min; para el caso de Globalstar de 0.45 a 0.63 USD/min y para el sistema Teledesic de 0.15 USD/min [9].

1.4.7 Polarización

El tipo de polarización preferida para estas constelaciones es la de tipo circular. Se hace uso de polarización opuesta para contrarrestar la interferencia interna ocasionada por haces

⁴ Las atribuciones adoptadas por la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones (CAMR-92) e incorporadas al Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT (RR) fueron adoptadas e incorporadas en la legislación nacional de Estados Unidos por la FCC. La atribución en la que la FCC procede actualmente a la concesión de licencias es 1610-1626,5 MHz (en la banda L) y 2483-2500 MHz (en la banda S).

puntuales adyacentes y cobertura de traslape en una región determinada por diversos satélites. Asimismo, el uso de polarización dual permite a los enlaces de alimentación el reuso del espectro. La polarización circular se prefiere para estaciones terrenas en que es difícil asegurar la orientación fija de las antenas respecto de una polarización lineal como ocurre en los servicios móviles. Sin embargo, dicha polarización es más afectada por la despolarización causada por la lluvia, lo que reduce el aislamiento en mayor medida que en las polarizaciones horizontal o vertical, siendo más significativo en las bandas más altas.

1.5 BANDAS DE FRECUENCIAS UTILIZADAS EN CONSTELACIONES LEO

Un satélite o sistema de satélites puede operar en una o más de las bandas atribuidas a los servicios de satélite dependiendo de las necesidades de capacidad de tráfico. Las diversas bandas de frecuencias que pueden utilizar los satélites son determinadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) en forma exclusiva para éstos o en forma compartida con otros servicios. En la tabla 1.5.1.1 se muestra la atribución de frecuencias para los servicios de comunicación satelital en diferentes bandas de frecuencias. Cada banda dispone de una parte de la misma para los enlaces ascendentes Tierra - Satélite y otra para los enlaces descendentes Satélite - Tierra a fin de evitar interacciones inconvenientes.

Los sistemas de comunicación emplean el espectro de frecuencia electromagnética. Las frecuencias utilizadas para la comunicación satelital son localizadas en frecuencias súper altas (SHF) y frecuencias extremadamente altas (EHF). Por razones prácticas, a las bandas de frecuencias más comunes para el servicio por satélite se les designa por fabricantes de equipos, operadores de satélites y usuarios, mediante letras empleadas originalmente para radar; aunque no son utilizadas oficialmente por la UIT. Las principales bandas para los servicios por satélite son las siguientes:

Banda de Frecuencia	Rango (GHz)	Designación	Designación alternativa:	Tipo de Sistema y Aplicaciones
P	0.23-1	VHF-UHF	-	Pequeños LEOs. Posicionamiento, Rastreo, Mensajería
L	1.53-2.7	UHF	1.5 GHz	Servicio Móvil Satelital (GEO). Voz y datos de baja velocidad a terminales móviles. Grandes LEOs. Telefonía, Datos, Paging.
S	2.7-3.5	UHF-SHF	2 GHz 2.5 GHz	Servicio Móvil Satelital (GEO). Voz y datos de baja velocidad a terminales móviles. Grandes LEOs. Telefonía, Datos, Paging.
C	4-8 Enlace Subida: 3.7-4.2 Enlace Bajada: 5.925-6.425	SHF	4/6 GHz 5/7 GHz	Servicio Fijo Satelital. Entrega de video, VSAT, telefonía

Ku	12-18 EUROPA Enlace Subida: FSS; TELECOM: 14-14.8 DBS: 17.3-18.1 Enlace Bajada: FSS: 10.7-11.7 DBS: 11.7-12.5 TELECOM:12.5-12.75 AMERICA Enlace Subida: FSS: 14-14.5 DBS: 17.3-17.8 Enlace Bajada: FSS: 11.7-12.2 DBS: 12.2-12.7	SHF	11/14 GHz 12/14 GHz	Servicio Fijo Satelital. Entrega de video, VSAT, telefonía. Radiodifusión Directa Satelital. Video / audio directo al hogar (DTH). GEOs y LEOs de Banda Ancha. Acceso a Internet, voz, video, datos, videoconferencia.
Ka	27-40	SHF-EHF	30 GHz	GEOs y LEOs de Banda Ancha. Acceso a Internet, voz, video, datos, videoconferencia.
Q/V	Enlace Subida: 47.2-50.2 Enlace Bajada: 39.5-42.5	EHF	-	Servicio Fijo Satelital. Proveer servicios de banda ancha como distribución de multimedia e Internet.

Actualmente, la mayoría de los sistemas satelitales soportan tráfico de telecomunicaciones y radiodifusión en órbitas geoestacionarias a una altitud de 36000 kilómetros sobre la superficie terrestre. Como ya se mencionó, estas órbitas de gran altitud introducen una desventaja inherente en retrasos en tiempo de tráfico. Además, las órbitas satelitales de gran altitud presentan la desventaja de requerir transmisores y receptores más grandes y con mayor potencia. Consecuentemente, no es posible hacer uso de pequeños transmisores y receptores, tales como los denominados "handheld".

Afortunadamente, avances dentro de la tecnología satelital han producido nuevos sistemas que eliminan estas desventajas en órbitas altas. Estos nuevos sistemas satelitales son no geoestacionarios, y operan en órbitas bajas (LEO) y órbitas medias (MEO). Típicamente, los LEOs y MEOs se aluden a altitudes que van de los 700 a 10,000 kilómetros, valores de altitud significativamente menores que aquella de 36,000 kilómetros requerida por órbitas geoestacionarias.

La CAMR-92 atribuyó espectro en las bandas L y S para estos sistemas, en particular (aunque no exclusivamente) en las bandas de frecuencias 1 610-1 626.5 y 2 483.5-2 500 MHz. Estos sistemas se componen típicamente de un número de satélites comprendido entre 12 y 66 situados en diversas posiciones orbitales subgeoestacionarias y tienen por objeto la cobertura en tiempo real con telefonía y datos de grandes partes del globo. Hay diversas entidades privadas y semiprivadas, con sede principalmente en Estados Unidos, que preparan grandes sistemas LEO, pero hay también en preparación sistemas de esta clase en Brasil y Rusia y para Inmarsat-P. Los pequeños sistemas LEO funcionan por debajo de 1 GHz, utilizan típicamente un número menor de satélites y ofrecen diversos servicios de datos y mensajería con almacenamiento y retransmisión.

Los grandes sistemas LEO han planteado problemas de reglamentación y coordinación nacional e internacional particularmente acuciantes, pero muchas de sus conclusiones son también aplicables a los pequeños sistemas LEO.

Los grandes sistemas LEO en su desarrollo presentaron gran interés y apoyo, pero también cierta controversia. Se expresó inquietud acerca de las repercusiones mundiales de las decisiones de Estados Unidos al conceder licencias a estos sistemas [4].

1.6 TIPOS DE LEOS

Los satélites de órbita baja denominados LEOs, se encuentran en órbitas tanto elípticas o (más usual) circulares a una altura de menos de 2000 [Km]; hasta 1850 [Km] por arriba de la superficie terrestre. El período o tiempo requerido por estos satélites para orbitar el centro de gravedad a estas altitudes varía entre 90 minutos y 10 horas dependiendo de su distancia a la tierra. El tiempo máximo que un satélite LEO está sobre el horizonte local para un observador en la tierra es de hasta 20 minutos. Los satélites LEO poseen una huella con radio entre los 3000 y 4000 [Km] [8].

El nombre de órbita "baja" se refiere a la distancia de 700 a 1850 [Km] a la cual estos satélites se encuentran ubicados por arriba de la superficie terrestre; son sólo bajos con relación a los satélites geoestacionarios de comunicaciones, que orbitan la tierra a una distancia de 36,000 [Km]. De hecho estos satélites de órbita baja están casi al doble de altitud que la estación espacial MIR la cual orbitaba alrededor de la tierra a 400 [Km] hasta el pasado marzo del 2001 [8].

Estos sistemas son no geoestacionarios, lo cual significa que la posición de los satélites cambia con relación a la superficie del planeta. En operación, formarán una constelación en movimiento orbitando al globo y transmitiendo mensajes de una parte a otra, entre cada uno a otro, y entre usuarios y/o estaciones terrenas [8].

1.6.1 Satélites LEO

Existen 3 tipos principales de LEOs. Se caracterizan por su frecuencia, sus variadas capacidades de tráfico, el tipo de señal y la clase de servicio a prestar. Estos tipos son:

- Pequeños LEOs
- Grandes LEOs
- LEOs de banda ancha

1.6.2 Pequeños LEOs

1.6.2.1 Descripción

Estos satélites operan a frecuencias por debajo de 1 [GHz] y poseen una capacidad de transmitir en canales de entre 100 y 300 [bps]. Esta relativamente pequeña capacidad es utilizada para transmitir pequeños paquetes de datos. Los pequeños LEOs utilizan repetidores relevadores fijos terrestres para proveer cobertura geográfica global.

Los pequeños LEOs son generalmente satélites muy pequeños del orden de $1m^3$ de dimensión con un peso aproximado de 100 Kg, como ya se mencionó. La mayoría de las empresas comerciales actualmente en la línea de espera proponen usar los satélites como sistemas "bent pipe" ya sea como sistemas de almacenamiento y envío, conocidos como "store-and-forward" [10].

El sistema denominado de "bent pipe", - que se presenta en la figura 1.6.1 - transmite mensajes directamente entre usuarios, mientras que el método de almacenamiento y envío significa que el satélite recibe información desde una estación base, la almacena en la memoria a bordo, continúa en su órbita y libera la información a la siguiente estación base apropiada o al usuario. Los usuarios accederán a los nuevos sistemas LEOs utilizando pequeñas unidades de mensaje portátiles, conocidas también como unidades "hand-held", que pesan menos que 0.5 Kg e incorporan una antena omnidireccional de baja potencia [10].

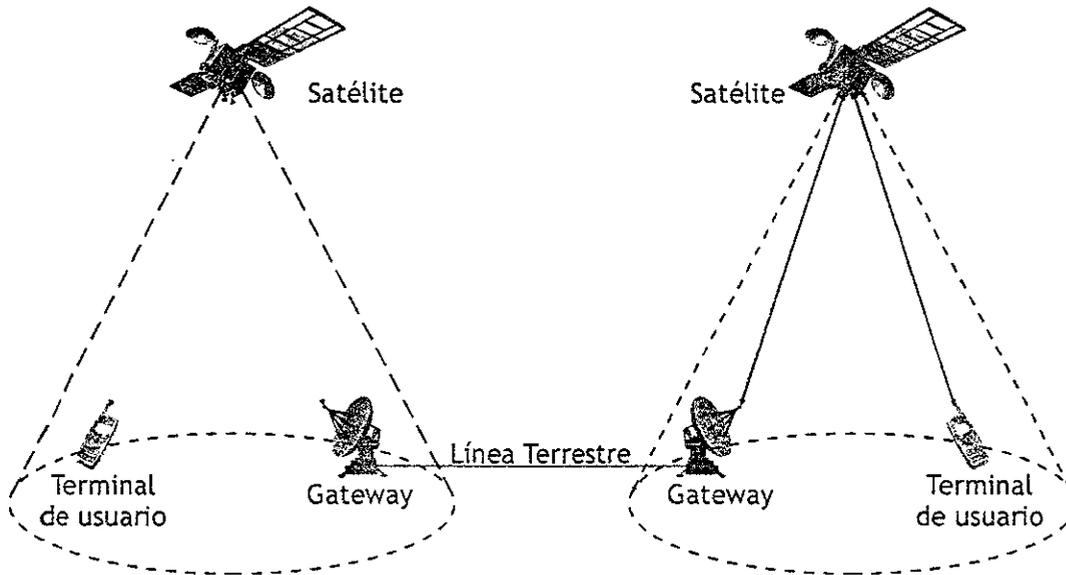


Fig. 1.6.1 Arquitectura de red tipo Bent-pipe utilizada en sistemas satelitales LEO.

1.6.2.2 Aplicaciones

Los satélites denominados pequeños LEO ofrecerán una variedad de servicios de texto y datos. Dada la relativamente pequeña frecuencia en la cual operan los pequeños LEOs, sus aplicaciones se concentran alrededor de pequeños paquetes alfanuméricos [10].

La tecnología de pequeños LEOs fue inicialmente aplicada en las industrias de mensajería personal, paging y computación. Los pequeños LEOs han evolucionado en aplicaciones incluyendo rastreo de cargamento, lectura de medición de ganancia y monitoreo de instrumentos marítimos, geológicos, o meteorológicos remotos [10].

Los servicios de los pequeños LEOs impactarán a un amplio rango de mercados. El envío de mensajes se espera sea un servicio de alta demanda que incluirá correo electrónico, acceso limitado a Internet, radiolocalización de dos vías y fax. Las comunicaciones de datos vía remota serán también una importante área, especialmente para servicios de emergencia [10].

Otro importante nicho de mercados será el rastreo digital (para el mercado de manejo de transportación), monitoreo ambiental, y SCADA (Adquisición de Datos y Control de supervisión - un sistema que provee de monitoreo remoto de lugares aislados como minas, refinerías, etc.). Aquellos que proponen a los pequeños LEOs esperan obtener ganancias ofreciendo servicios rápidos no tan caros y consiguiendo un punto de apoyo en el mercado por delante de sus competidores mayores [10].

1.6.3 Grandes LEOs

1.6.3.1 Descripción

Estos satélites operan a frecuencias entre 1 y 3 GHz. Su capacidad típica se encuentra dentro del rango de 2 - 10 Kbps. Los grandes LEOs tienen mayor funcionalidad a bordo, lo cual les permite utilizar funciones de comunicación intersatelital [11].

Todo satélite de órbita baja que provee voz y datos interactivos para comunicación personal, cae dentro de la categoría de Grandes LEOs. Esta categoría comprende a los satélites de órbita baja orbitando entre 778 - 1575 [Km] (420-850 millas náuticas) y aquellos satélites de órbitas medias entre 9260 - 11112 [Km] (5000-6000 millas náuticas). Estos sistemas se asemejan a las redes celulares terrestres [11].

1.6.3.2 Aplicaciones

Dada la capacidad relativamente grande y la posibilidad para comunicaciones intersatelitales, los grandes LEOs son utilizados para servicios de voz y datos. Su alta capacidad les permite manipular fácilmente el amplio ancho de banda de transmisiones de voz y datos. Los protocolos intersatelitales permiten a estas transmisiones viajar de manera global sin presentar un retraso de repetición significativo [11].

Al operar en órbitas más bajas que las generaciones previas de satélites de comunicación, los grandes LEOs no requieren de un voluminoso microteléfono para transmitir la señal. Este desarrollo permite comunicaciones globales empleando un teléfono celular no demasiado grande. Ofrecerán por tanto servicios de voz global no recortada, fax y posiblemente también servicios de banda ancha. La mayoría de estos sistemas, promete ofrecer un mayor rango de servicios [11].

El más conocido de estos es el servicio de telefonía móvil global - la habilidad para realizar y recibir llamadas en un teléfono móvil en cualquier parte del mundo. Otros servicios sin embargo incluirán datos y fax, así como incluso video de banda ancha [11].

En este mercado tan competitivo, los contendientes principales ofrecerán pequeñas terminales móviles portátiles "hand-held", que son tan sólo un poco mayores a los teléfonos celulares diminutos actuales, los cuales incorporarán una antena suficientemente grande. (La apariencia de las unidades es en hecho semejante a los teléfonos móviles analógicos, existentes a la mitad de los años 80) [11].

Los sistemas de grandes LEOs comprenden una constelación de diversos satélites, moviéndose alrededor del globo y recogiendo y transmitiendo llamadas telefónicas de usuarios de una región, país, o continente a otro. Algunos de los sistemas propuestos soportan comunicaciones entre satélites, convirtiéndolos en la realidad en una enorme y extensa red. La mayor parte, se confía sin embargo en los enlaces de subida o bajada a las estaciones terrenas con el fin de completar el circuito de llamada [11].

Como se muestra, comparados con los pequeños LEOs, el costo de una llamada, al menos en su fase inicial, será prohibitiva para la mayoría de los usuarios, excepto para las grandes corporaciones con una necesidad genuina por comunicaciones de voz global instantáneas a áreas remotas en cualquier momento [11].

Esos usuarios que necesitan tan solo de una red de voz global, o de una red de computadoras de alta velocidad global, pueden en muchas instancias alcanzar sus necesidades con redes existentes

de fibra óptica o vía los servicios de red del tipo de valor agregado ahora ofrecidos por la mayoría de los carriers de telecomunicaciones [11].

1.6.4 LEOs de Banda Ancha

1.6.4.1 Descripción

Estos satélites proveen velocidades de acceso hasta 2000 veces más rápidas que los módems analógicos promedio y operan a frecuencias entre los 19 y 29 GHz. Aproximadamente, se utilizan 400 MHz para los enlaces de subida y bajada. Esto permitirá a usuarios transmitir información a velocidades hasta 64 Mbps en el enlace de bajada y hasta 2Mbps en el enlace de subida. En suma, algunas terminales de mayor velocidad ofrecerán capacidades de 64 Mbps o más en ambas direcciones [12].

1.6.4.2 Aplicaciones

Los satélites de banda ancha se utilizan para aplicaciones que requieren y consumen gran ancho de banda tales como los servicios de vídeo y datos. Algunas aplicaciones para este tipo de servicio incluyen videoconferencia y acceso a Internet de banda ancha, así como voz de alta calidad y otras transmisiones digitales de datos [12].

Debido a la calidad de las transmisiones de los satélites de banda ancha, estos han sido considerados como la fibra óptica de las redes terrestres. Las redes de satélites LEO de banda ancha permitirán tener un acceso de telecomunicaciones de alta calidad para los negocios, escuelas e individuos en cualquier lugar del planeta [12].

Otro tipo de LEOs, son los llamados de banda ancha. Estos sistemas al igual que los grandes LEOs, serán capaces de soportar voz tan bien como se realiza con datos y fax. Pero a diferencia de los sistemas de grandes LEOs, su objetivo principal es el mercado de la computación y se enfocarán más en las capacidades de transferencia de datos de alta velocidad que en el abastecimiento de telefonía móvil [12].

Un ejemplo de este tipo de sistemas es el de Teledesic, que comprende con mucho el mayor número de satélites (estimados en una constelación de cientos de unidades girando alrededor del planeta en órbitas no geoestacionarias), metas para proveer a los usuarios con servicios tipo multimedia de banda ancha, permitiéndoles rápidamente acceder y transferir datos, texto, imágenes fijas y con movimiento, así como sonido a cualquier parte del mundo. El sistema es altamente ambicioso pero no entrara en operación hasta el año 2005 [12].

Existe un gran interés por estos sistemas, sin embargo numerosos problemas técnicos se contraponen para que estas complejas constelaciones satelitales se establezcan, lancen y operen. Además, dado que este tipo de sistemas nunca ha existido antes, inevitablemente estarán sufriendo problemas antes de que funcionen y puedan garantizar un servicio de alta calidad y libre de problemas [12].

La evolución de satélites geoestacionarios a satélites de órbita baja ha resultado en un número de sistemas globales satelitales propuestos, los cuales pueden ser agrupados en tres distintos tipos, como ya se mencionó. Estos pueden ser mejor distinguidos con referencia a su contraparte terrestre, tal y como se muestra en la siguiente tabla a continuación [13]:

1.6.4.3 EJEMPLOS DE CONSTELACIONES DE SISTEMAS LEOS			
Tipo de sistema	Pequeños LEOS	Grandes LEOS	LEOS de banda Ancha
Ejemplos	<ul style="list-style-type: none"> • ORBCOMM (operando) • Odyssey (cancelado) • VITA-Sat • Aries (cancelado) • Final Analysis (se espera inicie en el 2002) • Gonets • Leo-One (se espera inicie en el 2003) • Starsys (cancelado) • Gemnet (ahora incluido en el sistema Orbcomm) 	<ul style="list-style-type: none"> • Iridium (reactivado por el gobierno de los E.U.) • Globalstar (operando) • ICO (cambia diseño con mayor ancho de banda, uniéndose a Teledesic) • Elipso (se espera inicie en el 2002) • Constellation (se espera inicie a mediados del 2001) • E-sat (se espera inicie a mediados del 2001) • Leo-sat courier 	<ul style="list-style-type: none"> • Teledesic (se espera inicie en el 2004) • Celestri (incorporado al sistema Teledesic) • Skybridge (se espera inicie en el 2003) • M-Star (se esperaba operara como parte del sistema Celestri; ahora incluido en el sistema Teledesic)
Contraparte Terrestre	Paging Radiolocalización	Celular	Fibra Óptica

1.7 ENLACES INTERSATELITALES

Los satélites de comunicaciones desde sus inicios han funcionado como simples repetidores en el espacio. Conforme las necesidades de las comunicaciones especiales han evolucionado, se ha desarrollado el uso de enlaces entre los mismos satélites, con la finalidad de mejorar la capacidad, cobertura y conectividad de los sistemas satelitales actuales [5].

Generalmente denominamos a un enlace intersatelital, a cualquier conexión entre dos satélites. De esta forma, podemos hablar de varios tipos de enlaces intersatelitales o ISL (intersatellite links, por sus siglas en inglés), dependiendo de la naturaleza del satélite y la órbita del mismo [5].

Para el caso de sistemas GEO satelitales, en donde la huella del satélite cubre varios gateways en tierra, una red entre satélites, o los denominados enlaces intersatelitales (ISL), no han sido considerado tan estrictamente, ya que en estos sistemas una llamada de larga distancia intercontinental puede ser ruteada a través de gateways en la tierra, y por tanto un costo adicional para comunicaciones entre satélites no es necesario [5].

Sin embargo para un satélite LEO a bajas altitudes y cobertura pequeña, todos los gateways en tierra usualmente están fuera de vista del satélite. Establecer una red entre satélites es una tarea compleja y cara, dado por las largas distancias entre satélites y el cambio en las posiciones relativas de los satélites, los cuales requieren direccionamiento de antenas [5].

También, para establecer enlaces intersatelitales cada satélite requiere tener transmisores, receptores y antenas adicionales, lo cual incrementa el peso de la carga y el costo del satélite. Sin embargo los satélites en un sistema con enlaces intersatelitales no tienen que ver a las estaciones gateways en tierra todo el tiempo, por lo que el sistema se hace completamente independiente de las facilidades terrestres. Por supuesto debido a consideraciones económicas,

todos los sistemas satelitales LEO, incluyendo aquellos que utilizan enlaces intersatelitales, proponen trabajar en Internet con los sistemas terrestres existentes. Pero la posibilidad de ser estos sistemas independientes de aquellos terrestres, representa una gran ventaja de los sistemas con LEOs [5].

Se dice muy seguido que dado que los satélites están en el cielo pueden proveer comunicaciones a la tierra incluso en el caso de desastres. La experiencia sin embargo, muestra que esa creencia no es cierta. Tenemos el caso en donde se presentó un gran terremoto en Kobe, Japón, en Enero 17 de 1995, cuatro de las cinco estaciones gateway GEO satelitales en el área fueron completamente dañadas y la quinta no funcionó por la interrupción del suministro de corriente, dando como resultado la carencia de comunicaciones por varias horas [5].

Proveer de comunicaciones de voz en el área mediante terminales satelitales portátiles tomó varias horas y grandes gastos. En tales situaciones, la comunicación con satélites sin ninguna gran estación gateway fija en tierra es un logro, el cual puede ser provisto por aquellos sistemas LEO satelitales que utilizan enlaces intersatelitales y con sus terminales o handhelds [5].

1.7.1 Clasificación de los enlaces intersatelitales según el tipo de órbita

Los enlaces intersatelitales han sido considerados no sólo para los sistemas satelitales LEO sino también para otros sistemas en donde las diferentes órbitas se entrelazan. Algunos planteamientos para comunicaciones globales proponen una combinación de satélites en órbitas bajas, medias e incluso geoestacionarias. En dichos sistemas, por ejemplo, los satélites LEO pueden cubrir tráficos densos y locales, mientras los satélites GEO y MEO pueden actuar como gateways o estaciones de control para los satélites LEO y también cubrir áreas más amplias y tráficos más esparcidos. En dichos sistemas, los enlaces entre satélites LEO, MEO y GEO permiten el intercambio de información y datos de control entre satélites de diferente órbita [5].

Destacan por tanto los siguientes tipos de enlaces intersatelitales:

1.7.1.1 Enlace LEO-GEO

Este tipo de enlace sirve para establecer una transmisión permanente vía un satélite geoestacionario entre una o más estaciones terrenas y un grupo de satélites procedentes de una órbita baja a una altitud del orden de 500 a 1000 [Km]. Este tipo de enlace se conoce también como enlace interorbital, dado que enlaza satélites en dos diferentes órbitas. Por razones principalmente económicas, no es deseable instalar una red tan grande de estaciones, en donde a cada instante los satélites que pasen sean visibles desde al menos una estación. Es por ello que se pueden usar uno o más satélites geoestacionarios, como repetidores de comunicaciones ya que son visibles de forma permanente y simultánea tanto por las estaciones como por los satélites en órbita baja. Esta técnica también permite que posibles limitaciones de la red terrestre sean evitadas. Este tipo de enlace se pretende poner a prueba en el proyecto ARTEMIS⁵, un satélite de la ESA de la siguiente generación. Su sistema más impresionante es el denominado SILEX, terminal láser-óptica para comunicaciones de banda amplia directamente entre satélites. Las comunicaciones ópticas entre satélites GEO se buscan con el fin de evitar múltiples enlaces de subida y bajada cuando existen distancias largas, por ejemplo: entre Europa y Japón o la costa Oeste. Tales enlaces ópticos permitirían ahorrar valiosos recursos, reducir tiempos de retraso y más aún, ofrecer potencialmente altas tasas de transmisión de datos. Por ahora la ESA en Europa y Japón están desarrollando esta tecnología para comunicaciones intersatelitales civiles. Por otro lado en el proyecto del satélite ACTS OSC se buscó analizar y realizar un enlace de transmisión óptica capaz de trabajar en el espacio con una tasa mínima de 2.4 Gbps. El objetivo era

⁵ Artemis Telecom, satélite geoestacionario a ser lanzado en el verano del 2001 por Arianespace para el proyecto Artemis de la Agencia Espacial Europea (ESA).

demostrar que funciona este tipo de enlace para ser utilizado en futuras constelaciones. Aspectos clave, como la selección de longitud de onda y las condiciones en el espacio (especialmente térmicas y de radiación) serán evaluadas para aplicarse. La potencia del enlace óptico esta en el rango de 68 a 71 [dB] e implica el uso de un amplificador de potencia para fibra en el lado del transmisor y otro utilizado como preamplificador en el lado de recepción. Se pretende así, probar un enlace óptico intersatelital de 2488 Mbps bajo niveles de radiación de 100Krad.

1.7.1.2 Enlace GEO-GEO

En este tipo de enlace, los satélites en órbita geoestacionaria pueden tener una distancia de separación corta de pocos kilómetros, o incluso mayor. En el primer caso, los satélites deben ocupar la misma posición orbital, para que sean visibles desde una misma antena en tierra. Un grupo de satélites interconectados de esta forma, puede ser una solución ideal para la implementación gradual y modular de segmentos espaciales de grandes dimensiones. En el segundo caso, los satélites tienen varios grados de separación, y el ISL se usa para incrementar el área geográfica de servicio del sistema de satélites, evitando el aumento del retraso de propagación de la señal, ayudando así al aumento de la capacidad del sistema sin inversión fuerte en el segmento terrestre.

1.7.1.3 Enlace LEO-LEO

Las ventajas de los satélites de órbitas bajas y la creciente congestión de la órbita geoestacionaria ha traído como consecuencia el desarrollo de las redes de satélites LEO. Las desventajas de un satélite LEO (duración limitada del tiempo de comunicación y cobertura relativamente pequeña), se reducen usando una red que contiene un gran número de satélites de órbita baja conectados entre sí con enlaces intersatelitales y equipados con un medio de conmutación entre ellos.

1.7.2 Enlaces intersatelitales para sistemas de satélites LEO

En la figura 1.7.1 se muestra cómo para un sistema de satélites LEO, existen dos tipos de enlaces intersatelitales, ya que los satélites están en diversas órbitas [5].

1.7.2.1 Enlaces intersatelitales intraorbitales.

Es el primer tipo referido a enlaces entre satélites en el mismo plano orbital. En este tipo, los satélites viajan en un arreglo fijo sucesivo y las antenas pueden ser casi fijas [5].

1.7.2.2 Enlaces intersatelitales interorbitales.

Este segundo tipo de enlaces incluye a aquellos enlaces entre satélites en planos orbitales (adyacentes) diferentes [5].

A diferencia de los enlaces intersatelitales intraorbitales, los enlaces intersatelitales requieren direccionamiento de antenas. Aún más, dado que en este tipo de enlaces, las distancias entre satélites en diferentes órbitas varían con un gran rango, y la tierra puede interrumpir su mutua línea de vista, las comunicaciones intersatelitales deben ser conmutadas y no conmutadas a ciertos intervalos [5].

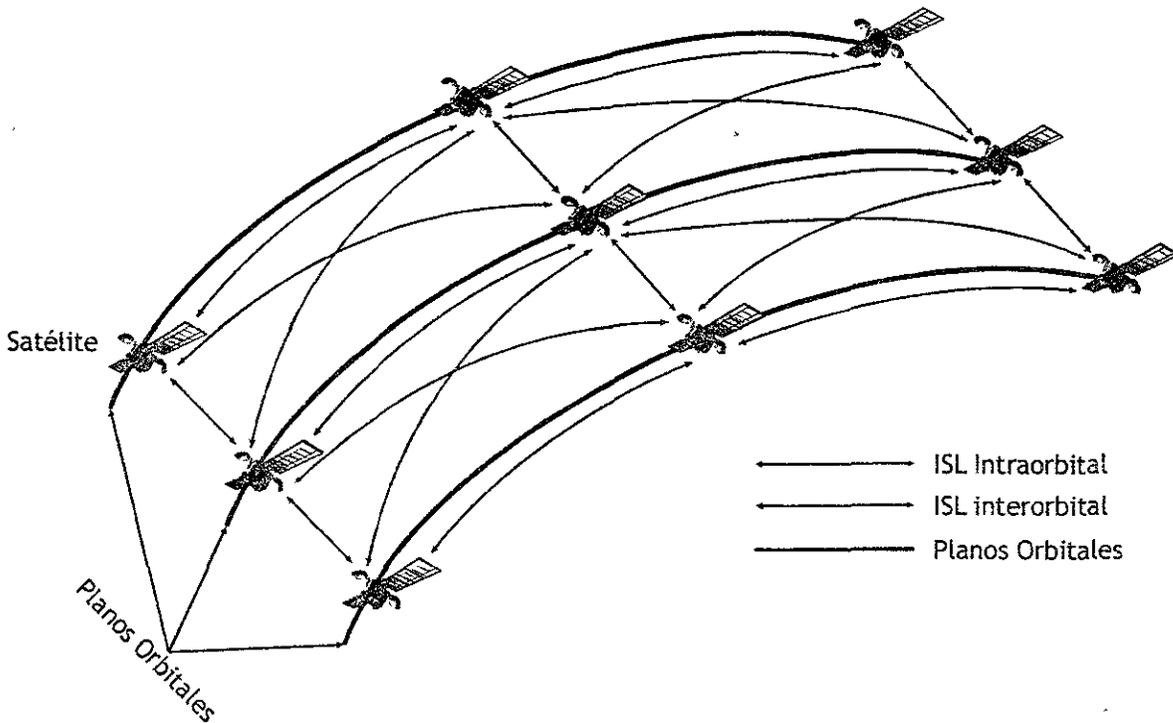


Figura 1.7.1 Tipos de enlaces intersatelitales (ISL) en un sistema LEO satelital

1.7.3 Desempeño de red de constelaciones no geoestacionarias equipadas con enlaces intersatelitales.

El advenimiento de los enlaces intersatelitales, mediante los cuales los satélites se comunican directamente entre sí por línea de vista, soportan llamadas móvil a móvil entre diferentes huellas satelitales (a pesar de introducir complejidades adicionales, tales como handover entre satélites), y remueven el tráfico desde la parte terrestre [6].

Con los enlaces intersatelitales, se tiene una mayor flexibilidad en el ruteo, se crea redundancia inherente dentro de la red y no se requiere la visibilidad entre ambos, el usuario y el gateway por cada satélite en la constelación [6].

Una de las consecuencias de tener enlaces intersatelitales es que, para facilidad en la construcción de satélites, son preferibles las antenas fijas. Esto no sería posible en el caso interplanar entre satélites de diferentes órbitas, ya que las trayectorias de línea de vista entre estos satélites cambiarán en ángulo y longitud conforme las órbitas se separan y convergen entre cruces orbitales, dando origen a:

- Velocidades relativamente altas entre los satélites,
- Problemas en el control de rastreo conforme las antenas deban girar,
- Efecto Doppler

Sin embargo, es posible tener antenas fijas en el caso intraplanar, por ejemplo, entre satélites a diferentes fases, en la misma trayectoria orbital, siempre y cuando las órbitas sean circulares [6].

Esto puede ser considerado como resultado de la segunda ley de Kepler, en donde áreas iguales del arco del plano orbital son alcanzadas en tiempos iguales. Con órbitas elípticas, un satélite vería las posiciones relativas de los satélites delante y detrás de él, como si ascendieran o cayeran considerablemente a través de la órbita y el apuntamiento controlado de la parte

delantera y trasera de las antenas del enlace intraplano sería requerido para compensar esto. El elegir órbitas circulares evita esta complicación técnica [6].

La elección de órbitas circulares también tiene la ventaja de permitir un tamaño y forma de huella terrestre relativamente constante con enlaces y retrasos en el enlace constantes (a pesar de tener alguna variación debido a lo achatado de la tierra y otros factores perturbadores), evitando el problema de zooming. Como resultado de esto, la mayoría de las constelaciones satelitales propuestas adoptan órbitas circulares[6].

La excepción a esta regla es el sistema Ellipso, donde la cobertura mundial es conocida de antemano a favor del efecto aparente de colgarse en el cielo, a altas latitudes en ciertas órbitas elípticas en donde estamos a 63°. Otras órbitas con esta inclinación pero diferente período son las órbitas Molnya (12 Hrs) y Tundra (24 Hrs); Ellipso utiliza órbitas retrogradadas síncronas con el sol de 3 horas y una órbita ecuatorial adicional. Estas órbitas inclinadas permiten una mayor cobertura de más regiones económicamente remunerativas y densamente pobladas, a cuenta de carecer de cobertura en regiones consideradas poco lucrativas [6].

1.8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cáceres, M.A., "Investor Disinterest Stymies, Commercial Satellite Industry", Aviation Week & Space Technology, Aerospace Source Book, January 15, 2001, pág. 161-164
- [2] Maral, G./ Bousquet, M., "Satellite Communication Systems", Ed. John Wiley & Sons, 1998, 734 pp.
- [3] Alike Vargas, "Satélites: Un hito para las telecomunicaciones de fin de siglo", RED La Comunidad de Expertos en Redes, Abril 1999, Pág. 64
- [4] Michael Taylor, "Sistemas Mundiales de Comunicaciones Móviles Personales", Coloquio de la UIT sobre Reglamentación", 1994, 176 pp.
- [5] Abbas Jamalipour, "Low Earth Orbital Satellites for Personal Communication Networks", Ed. Artech House, 1998, 294 pp.
- [6] Lloyd Wood, "Network performance of non-geostationary constellations equipped with intersatellite links", 1995, 129 pp.
- [7] Marco Carosi, "Architecture definition for small satellite personal communications systems", Telespazio, Italy, 1994.

[Internet 1] <http://www.itu.int/pforum/fact-e.htm>

[Internet 2] <http://www.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/constellations/tables/table.htm>

[Internet 3] <http://www.itu.int/pforum/feat1-e.htm>

[Internet 4] <http://www.itu.int/pforum/feat2-e.htm>

[Internet 5] <http://www.itu.int/pforum/feat3-e.htm>

[Internet 6] <http://www.analysis.com/scripts/satellite.exe>

2. DESCRIPCIÓN DE ALGUNOS SISTEMAS GLOBALES LEO Y GEO DE BANDA ANCHA EN PLANEACIÓN

Tradicionalmente, los satélites de comunicaciones han operado en la Órbita Geostacionaria (GSO) y los Satélites de Órbita Baja (LEOS) han sido usados para el monitoreo del estado del tiempo, cartografía, percepción remota o comunicaciones personales de baja velocidad. En el comienzo del nuevo milenio, durante los primeros cinco años, una revolución ocurrirá en la industria de los satélites de comunicación con la introducción de redes satelitales LEO de banda ancha y alta velocidad, formando parte esencial de la súper carretera de la información, también conocida como Internet.

La evolución que va desde los satélites geostacionarios hasta los sistemas de órbita baja ha resultado en un gran número de propuestas de sistemas satelitales de cobertura global, los cuales pueden ser agrupados en tres distintos tipos, como se vio en el capítulo anterior: pequeños LEOS, grandes LEOS y LEOS de banda ancha. Estos sistemas pueden ser distinguidos de una mejor manera al referenciarlos con su contraparte terrestre: sistemas de radiolocalización, sistemas celulares y redes de fibra óptica.

Desde una perspectiva terrestre, los sistemas mencionados son servicios complementarios, no competitivos, debido a que ellos ofrecen fundamentalmente diferentes tipos de servicio. Similarmente, los pequeños LEOS, los grandes LEOS y los LEOS de banda ancha son complementarios en lugar de ser competitivos, debido a que ellos proporcionan diferentes tipos de servicio orientados a diferentes mercados.

Durante el presente capítulo, se hará una descripción amplia de los sistemas que actualmente están más avanzados y que muy probablemente serán introducidos en unos cuantos años. Todos estos sistemas están diseñados para operar en las bandas Ku y Ka del espectro radioeléctrico debido a las altas tasas de transmisión que deben soportar.

En la primera sección se describirán dos sistemas LEO de banda ancha, **Teledesic** y **Skybridge**, mostrando sus características técnicas y los servicios ofrecidos a los usuarios finales. De manera semejante, en la segunda sección se describirán dos sistemas híbridos, **Spaceway** y **Astrolink**, encontrados en el cinturón geostacionario, con la característica semejante de operar en la banda Ka, con el objetivo de brindar servicios de banda ancha. Dichos sistemas son considerados híbridos debido a que tienen algunas características de los satélites LEOS de banda ancha, entre las más importantes se puede mencionar que están dirigidos a mercados que requieren servicios de alta velocidad y que forman constelaciones satelitales en la órbita geostacionaria con unos cuantos satélites brindando una cobertura global. Finalmente, al término de cada una de las secciones se encontrará una tabla comparativa mostrando las características más importantes de cada uno de estos sistemas.

Cabe mencionar que la información mostrada durante el presente capítulo fue recopilada principalmente de Internet y de artículos técnicos escritos por fuentes directamente involucradas a cada uno de los proyectos. Dicha información es la más actualizada de la literatura actualmente abierta a todo el público. Sin embargo, debido a posibles cambios en el diseño, esta información podría parcialmente no ser válida en un futuro.

2.1. SISTEMAS LEO DE BANDA ANCHA

Desde sus inicios, la industria de las telecomunicaciones ha estado bajo un continuo crecimiento y desarrollo. Los sistemas satelitales fueron desarrollados para ser una parte vital de los servicios de telecomunicaciones proporcionados a los consumidores, incluyendo a

corporativos, gobiernos y hasta individuos dentro de una amplia variedad de propósitos. Sin embargo, los satélites más viejos eran demasiado costosos como para tomar ventaja de sus servicios. Esta y muchas otras razones han hecho que la industria satelital reconociera la necesidad de proporcionar servicios de mejor calidad y mucho más económicos.

Las avances hasta ahora alcanzados en la comunicación por satélite han sido motivados por los desarrollos recientes en la industria de las telecomunicaciones alrededor del mundo; nuevos y variados servicios están siendo ofrecidos para permitir que el consumidor esté conectado al mundo por medio de una serie de servicios fijos y móviles. El reto actual es alcanzar nuevos desarrollos en las áreas de Internet y de servicios y aplicaciones en tiempo real que necesitan de anchos de banda mucho más grandes que los empleados actualmente.

Los sistemas satelitales actualmente están siendo desarrollados para cubrir los grandes rezagos dejados por los servicios terrestres. Desarrollos recientes en la tecnología satelital están haciendo posible que estos rezagos puedan ser cubiertos de manera inmediata con grandes ventajas tecnológicas y económicas. Tecnologías del estado del arte, operando en las bandas Ku y Ka del espectro de frecuencias, están próximas a emerger dentro del mercado de las telecomunicaciones. Tal es el caso de las constelaciones LEO de banda ancha, cuyo objetivo primordial es el brindar una cobertura global de servicios a costos relativamente bajos comparados con los actualmente desarrollados.

A continuación se hará una descripción detallada de dos sistemas LEO, Teledesic y Skybridge, con miras a comenzar sus servicios durante los próximos tres o cuatro años. En cada uno de los apartados se brinda una explicación técnica así como de los servicios que se proporcionarán, tanto a pequeños como a grandes consumidores, dentro del mercado de las telecomunicaciones.

2.1.1. Teledesic

El primer sistema propuesto es Teledesic, fundado en 1990, con su centro de operaciones en la ciudad de Bellevue, Washington, un suburbio de Seattle [1]. Actualmente, Teledesic cuenta con varios centros de operaciones en Bruselas, Londres, Madrid, Munich, Ottawa y Washington D.C. [Internet 1].

Dentro de los principales accionistas de este sistema se encuentran Craig O. McCaw, William H. Gates III, Motorola, el Príncipe Saudi Alwaleed Bin Talal, la compañía de inversión Abu Dhabi y Boeing [Internet 1].

Un hecho importante en la historia de Teledesic, es la inversión realizada en ICO Global Communications, después de que ésta última se declaró en quiebra bajo la protección Capítulo 11 en Agosto 27 de 1999. De esta forma, a partir de Mayo 17 del año 2000, ICO Global Communications se convierte en New ICO y junto con Teledesic forman lo que hoy es conocido como ICO - Teledesic Global. ICO-Teledesic Global planea ser un proveedor global de servicios de comunicaciones satelitales de Internet inalámbrico, incluyendo servicios fijos y móviles de banda ancha basados en el protocolo de Internet (IP). Estos dos sistemas, New ICO y Teledesic, tienen capacidad para brindar servicios móviles de voz de alta calidad; New ICO ofrecerá el equivalente satelital de los servicios inalámbricos de tercera generación (3G), incluyendo servicios de Internet y otros servicios de paquetes de datos. New ICO comenzará a ofrecer sus servicios en el año 2003, mientras que Teledesic entregará datos de banda ancha y servicios de valor agregado sobre una red global optimizada para el protocolo de IP, teniendo como

objetivo salir al mercado a finales del año 2004 (no antes del año 2002, como se tenía previsto en la primera arquitectura del sistema) [Internet 2].

A diferencia de sistemas como Iridium, Teledesic no intentará vender servicios directamente a los usuarios finales; más bien, proporcionará una red abierta para la entrega de dichos servicios, para que compañías más pequeñas, como por ejemplo los Proveedores de Servicio de Internet (ISP's), entreguen el servicio al usuario final. La red de Teledesic tiene la misión de ayudar a compañías locales de telefonía y a autoridades gubernamentales para extender sus redes dentro de sus propios países, ambos en términos de alcance geográfico y en los tipos de servicios que ofrecen o pretenden ofrecer en un futuro próximo; todo ello logrado gracias al uso de puertas de enlace (gateway's) terrestres que habilitarán a los proveedores de servicios a ofrecer enlaces inalámbricos a otras redes tanto alámbricas como inalámbricas [1].

2.1.1.1 Introducción

La red del sistema satelital Teledesic es una red de banda ancha de alta capacidad que combina las características de una red con cobertura global con la ventaja de un sistema de latencia baja, integradas en una constelación de satélites LEO, con la flexibilidad del Internet y la calidad de transmisión de una red de fibra óptica. Aunque optimizada para servir a terminales de sitio fijas, la red es capaz de servir a terminales transportables y a algunas terminales móviles, así como aplicaciones marítimas y aeronáuticas [1].

La arquitectura inicial de la constelación de Teledesic estaba organizada en 21 planos orbitales con una altitud entre 695 y 705 [Km]. Cada plano contenía un mínimo de 40 satélites operacionales con 4 satélites de repuesto espaciados a lo largo de la órbita, obteniendo así un total de 924 satélites [1].

Actualmente, la constelación Teledesic tiene las siguientes características:

- Uso de la banda Ka para los enlaces de subida y los enlaces de bajada.
- Los satélites orbitan la Tierra a una altitud nominal de aproximadamente 1375 [Km],
- Tiene 12 planos orbitales circulares en una inclinación próxima a una inclinación polar (near-polar¹), con nodos ascendentes adyacentes espaciados alrededor del ecuador a 15°. La inclinación aproximada de los satélites es de 84.72° con una excentricidad de 0.00096° [4]. Este sistema LEO es parecido a Iridium debido a que ambos sistemas están basados en una inclinación near-polar y utilizan enlaces intersatelitales de comunicación (ISL's); para el caso de Iridium se tiene una inclinación de aproximadamente 86.4° con una excentricidad de 0.002° [5].
- Cada plano orbital contiene un mínimo de 24 satélites activos espaciados uniformemente alrededor de la órbita para tener un total de 288 satélites en toda la constelación.
- Los planos están espaciados en altitud en intervalos de dos kilómetros alrededor de lo nominal para prevenir la posibilidad de colisiones entre satélites en las órbitas de cruce. Por otra parte, propulsores de a bordo y una configuración de "órbita congelada" (frozen orbit) son usados para mantener la separación en altitud.
- Cada plano soporta una franja de cobertura de 15° que se extiende hasta los planos adyacentes.

¹ Las constelaciones que tienen órbitas near polar tienen la característica de que el ángulo de inclinación de los satélites varía de 80° a 100°, pero nunca es igual a 90°; valor que es una constante en constelaciones con órbitas polares [3]

- La franja de cobertura tiene aproximadamente 1650 [Km] de ancho (este-oeste) en el ecuador y disminuye en ancho conforme se acerca a los polos.
- Dentro de una órbita, cada satélite proporciona cobertura a la porción de su franja de cobertura, la cual es estrecha, con una distancia máxima norte-sur de aproximadamente 1650 [Km]. La huella de cobertura del satélite en el ecuador puede ser imaginada como un cuadrado de 1650 [Km] proyectada sobre la superficie curva de la tierra.
- Está diseñada de tal forma que siempre habrá al menos un satélite a 40° arriba del horizonte sobre toda la faz de la tierra; este ángulo de inclinación alto es requerido para lograr enlaces de comunicación confiables en la banda Ka, minimizando el bloqueo de estructuras y del terreno; también minimiza la interferencia con los enlaces de microondas terrestres y limita los efectos de la lluvia.

En la Figura 2.1.1.1.1, se puede observar la constelación Teledesic.

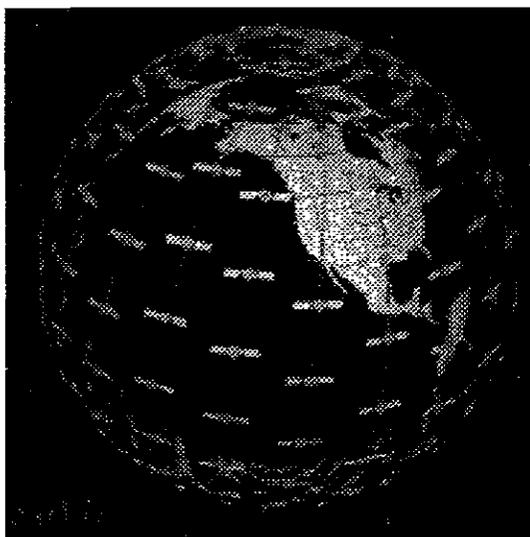


Figura 2.1.1.1.1 Constelación satelital de Teledesic.

La constelación incluye repuestos activos adicionales en órbita para disminuir el tiempo que toma llenar un hueco en la cobertura debido a un evento de falla de un satélite. El objetivo es hacer de la reparación de la constelación un evento automatizado, es decir, una operación de mantenimiento de rutina que tiene un efecto mínimo en la disponibilidad de la red. Cuando un satélite falla, los otros satélites en el anillo de la órbita son reposicionados inmediatamente para llenar el hueco [1].

El sistema de interconexión interno y la carga útil están diseñados para una vida útil de 10 años. El tiempo de vida es relativamente limitado para los estándares actuales debido a las baterías, las celdas solares, tasas de falla en los componentes electrónicos y la propulsión de a bordo. El diseño del sistema anticipa que hasta el 30% de los satélites puede fallar aleatoriamente antes del término de los 10 años [1].

2.1.1.2 Interfaces y protocolos del sistema

Una familia de dispositivos de interfaz de red (referidos aquí como terminales) en la red periférica proporciona la interfaz entre los protocolos "internos" de la capa de red satelital y los protocolos "externos" de los usuarios y redes terrestres. Estos soportan una comunicación simétrica y asimétrica a tasas de hasta 64 [Mbps] con disponibilidad para ajustar el ancho de banda bajo demanda de acuerdo a las necesidades de cada aplicación. En la tabla 2.1.1.2.1, se encuentran los principales protocolos externos e internos referidos en este párrafo [1].

Las interfaces terminales pueden soportar una amplia variedad de interfaces y protocolos externos estándar incluyendo TCP/IP, ISDN, ATM y otros. Satelitalmente hablando, un diseño de interfaz modular en la terminal proporciona una "capa de adaptación" que aísla a la capa de red de la complejidad y cambio inherente en el manejo de múltiples protocolos externos. Esos módulos traducen los datos, direcciones e información de señalización recibidos en la interfaz externa de los datos, direcciones y protocolos de señalización de la capa de red y viceversa. Por otra parte, la terminal también desempeña otras funciones de red tales como el manejo de ancho de banda bajo demanda, control de acceso a la red, recolección de información de contabilidad y resolución de direcciones [1].

2.1.1.2.1 Tabla de Protocolos externos e internos	
Protocolos Externos	ATM Apple Talk ETHERNET/IP Frame Relay IP IPX ISDN Novell SAP Token Ring
Protocolos Internos	Orientados a paquetes Orientados a emulación de circuitos Enrutamiento de paquetes a través de la red Teledesic

Teledesic cuenta con la capacidad de manejar múltiples tasas de canales, protocolos y prioridades de servicio, proporciona la flexibilidad para soportar un amplio rango de aplicaciones incluyendo Internet, intranets corporativas, multimedia, interconexión de redes LAN y concentración de datos (backhaul). De hecho, la flexibilidad es una característica crítica de la red debido a que muchas de las aplicaciones y protocolos a los que Teledesic servirá en un futuro aún no han sido concebidas. Cabe aclarar que esta red no está diseñada para aplicaciones de una sola vía, servicio de transmisión de área ancha, servicio celular, paging o para grandes volúmenes de troncalización [1].

Paquetes de datos de longitud fija se usan para todas las comunicaciones dentro de la red. Cada paquete incluye información útil al usuario (payload), encabezado (header) y códigos de corrección de errores por adelantado (FEC). El encabezado tiene una porción fija que proporciona la información necesaria para enrutar el paquete a su destino dentro de la red Teledesic, y una porción variable usada en la terminal destino para recomponer una serie de paquetes en el formato requerido por la interfaz terminal externa. El tratamiento de la porción

variable del encabezado está confinado a las terminales, el cual permite la adaptación eficiente de múltiples protocolos y de ambientes de servicio de red externos sin afectar el segmento espacial. El paquete incluye un campo de prioridad que es usado para soportar múltiples grados de servicio, yendo desde el mejor desempeño hasta la emulación de circuitos. Las capacidades de la terminal facilitan los dos protocolos de paquetes existentes; protocolos orientados a paquetes (IP) y protocolos orientados a circuitos (telefonía). Una terminal tiene la capacidad de soportar múltiples interfaces externas y puede ser involucrada en la comunicación con múltiples destinos simultáneamente [1].

La terminal segmenta un paquete o flujo de datos entrante recibido de una interfaz externa dentro de una secuencia de uno o más paquetes "Teledesic", agrega a cada paquete la información de encabezado, calcula y anexa el código corrector de errores y transmite los paquetes al satélite que está sirviendo a la misma. La red satelital entrega los paquetes a la terminal destino donde son reensamblados en el formato de los paquetes o flujo de datos originales y entregados a la interfaz de la terminal externa [1].

La capa de red satelital proporciona una función elemental de entrega de datos de baja latencia: ésta entrega paquetes al destino especificado en el encabezado dentro de la calidad del servicio implicada por la prioridad del paquete. Dicha capa trata a cada paquete como una unidad independiente y no requiere conocimiento del estado en que se encuentra dentro la sesión de la cual proviene el paquete; es decir, la secuencia que tiene dentro de la sesión así como del protocolo externo usado o la aplicación específica. La complejidad de tratar con múltiples servicios y protocolos de red está contenida dentro de las terminales periféricas de la red a fin de mantener a la capa simple e inmune a cambios [1].

El segmento espacial de la red se compone de una constelación de satélites LEO y de los enlaces intersatelitales que los conectan. Cada satélite incluye un nodo de conmutación de paquetes de alta velocidad que es conectado hasta con ocho nodos vecinos para formar una malla o red robusta. Un algoritmo de ruteo en cada nodo maneja las tablas que el conmutador (switch) utiliza para enrutar un paquete a través de la trayectoria adecuada hacia el destino especificado en su encabezado. Este algoritmo de ruteo opera en un modo interno (background) y continuamente actualiza las tablas de ruteo para adaptarse a la topología cambiante de la red. La decisión de ruteo de tiempo real para cada paquete individual es hecha en un modo de primer plano (foreground), esto esencialmente es un vistazo a la tabla basada en las direcciones de destino de los paquetes y su prioridad. La dirección destino en el paquete es el lugar físico de la célula fija (huella sobre la faz de la Tierra) en la cual la terminal actualmente reside. Esta dirección, combinada con un conocimiento de la topología de la constelación, identifica al satélite sirviendo a la terminal de destino y simplifica extraordinariamente el manejo de la tabla de ruteo [1].

En el sistema Teledesic, como en muchos otros sistemas, las huellas de cobertura son divididas en células; una célula es el área geográfica dentro de la cual una serie de terminales comparten una serie de recursos de comunicación, tal como canales de frecuencia o ranuras de tiempo. Esto es típicamente definido por el área servida por un haz de antena o haz de cobertura. En general, mientras más pequeña sea la celda, los recursos de comunicación que pueden ser usados en un área serán más eficientes. Las células del sistema Teledesic están ordenadas en una rejilla fija terrestre en la cual el satélite electrónicamente dirige sus haces de antena conforme va viajando, opuesto al diseño de propagación llevado a cabo por un satélite fijo (GEO), esto resulta en las células moviéndose con la huella del satélite. Dado que las terminales Teledesic normalmente permanecen en la misma célula terrestre fija, esto simplifica el direccionamiento de la terminal y el enrutamiento de paquetes; es decir, se minimiza el cambio de célula (hand-off) de la terminal y los cambios de manejo de frecuencia asociados con las células terrestres fijas; facilita el uso de células pequeñas, resultando en un uso eficiente del espectro y de la capacidad del sistema; y permite que el servicio de Teledesic

sea hecho a la medida, de acuerdo a fronteras diseñadas geográficamente. Cada célula del sistema tiene 80 [Km] de diámetro aproximadamente, lo cual es muy pequeño y, por lo tanto, eficiente para un sistema satelital [1].

La figura 2.1.1.2.1, muestra las características de dos huellas y una célula de cobertura.

Debido a que la red Teledesic emplea un acceso inalámbrico, los canales de comunicación no son dedicados a las terminales; es decir, los recursos del canal asociados con una célula son compartidos con todas las terminales en esa célula, con capacidad asignada bajo demanda para cubrir sus necesidades actuales. Esta flexibilidad permite que el sistema maneje eficientemente una amplia variedad de necesidades de usuario; desde uso ocasional hasta uso de tiempo completo, desde ráfagas hasta aplicaciones de tasas de bit's constantes, desde tasas bajas hasta tasas altas, desde áreas de densidad baja hasta áreas de densidad relativa alta [1].

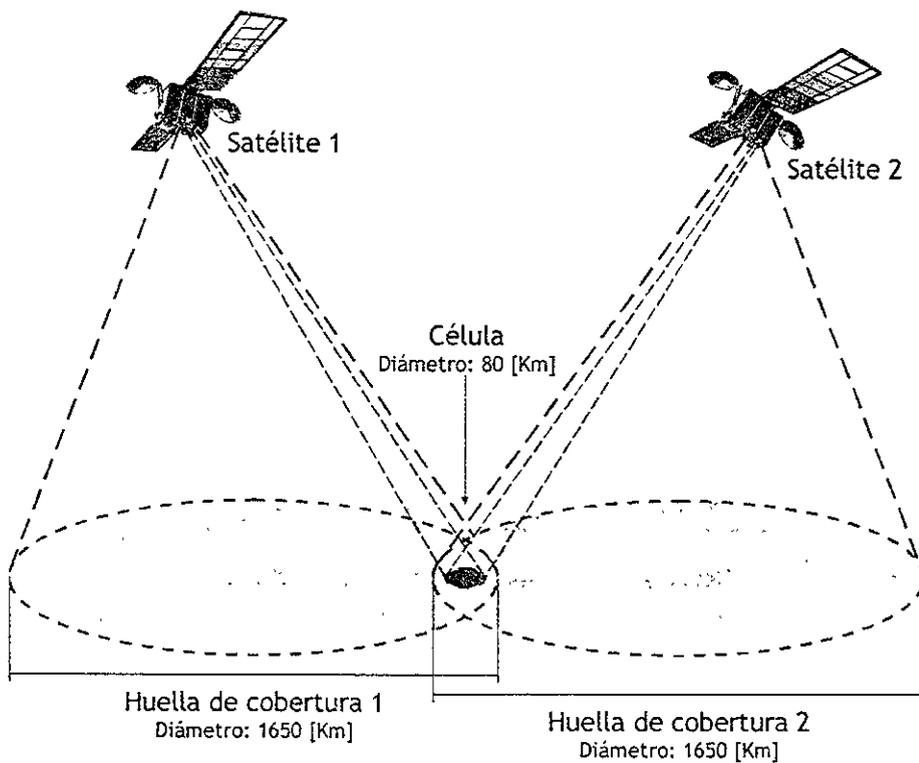


Figura 2.1.1.2.1 Huellas y célula de cobertura.

Un esquema de acceso múltiple implementado dentro de las terminales y el satélite proporciona que las células manejen la compartición de los recursos del canal a través de las terminales. Dentro de una célula, la compartición del canal es llevada a cabo con la combinación de un Acceso Múltiple por División en el Tiempo de Multifrecuencia (MF-TDMA) en el enlace de subida y con un Multiplexaje por División en el Tiempo Asíncrono en el enlace de bajada (ATDM). La rejilla de la célula terrestre fija es usada para garantizar la suficiente separación espacial para prevenir interferencia entre células usando los mismos recursos. La capacidad disponible para las terminales dentro de una célula es de 64 [Mbps], tanto en el enlace de subida como en el de bajada [1].

La banda Ka es la banda de frecuencias más baja con suficiente espectro para proporcionar los objetivos del servicio de banda ancha, calidad y capacidad. Los enlaces de comunicación Satélite-Terminal operan dentro de la porción de esta banda de frecuencias que ha sido designada internacionalmente por el Servicio Satelital Fijo no Geoestacionario (NGSO FSS) y asignado dentro de Estados Unidos de Norteamérica para Teledesic. Uno de los inconvenientes que se presentan en los enlaces de comunicación en esas frecuencias es la degradación causada por la lluvia y el bloqueo debido a obstáculos en la línea de vista. Para prevenir obstáculos y limitar la porción de la trayectoria expuesta a la lluvia se requiere que el satélite que se encuentra sirviendo a una terminal tenga un ángulo mínimo de elevación arriba del horizonte; la constelación de Teledesic asegura un ángulo de elevación mínimo (ángulo máscara) de aproximadamente 40° dentro de su área de servicio total. En la Figura 2.1.1.2.2 se ilustra el concepto de ángulo de elevación mínimo [1].

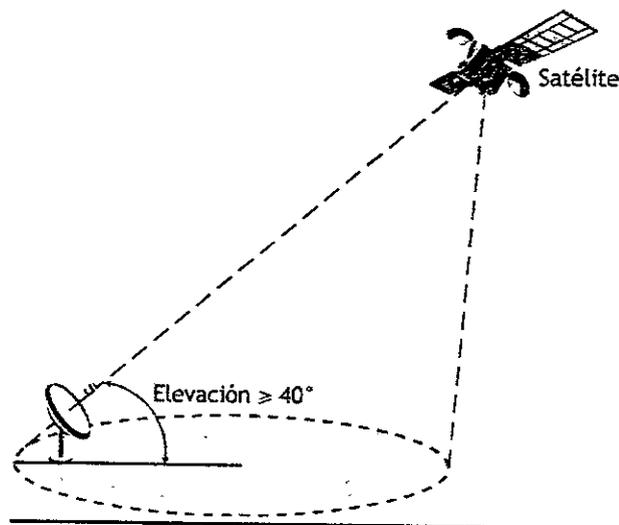


Figura 2.1.1.2.2 Angulo de elevación mínimo.

Un parámetro crítico de la calidad de servicio de comunicación es la latencia, particularmente para la comunicación interactiva y para muchos protocolos de datos estándar. Para ser compatible con los requerimientos de latencia de los protocolos desarrollados por la infraestructura de banda ancha terrestre, los satélites Teledesic operan a una altitud baja, debajo de los 1400 [Km]. La combinación de un ángulo de inclinación alto y la órbita baja terrestre resulta en una zona de cobertura satelital relativamente pequeña como para servir a todo el planeta; por ello la constelación Teledesic proporciona cobertura global con una constelación de 288 satélites incluyendo repuestos en órbita. En la Figura 2.1.1.2.3, se ilustra el concepto del parámetro latencia para este sistema [1].

Comparando esta figura con la Figura 1.3.1 (capítulo 1), se observa que el tiempo de propagación o también llamado tiempo de retraso es 10.68 [ms], valor que está dentro del rango existente para los sistemas de órbita baja. Cabe destacar que el usuario tendría este tiempo total (T_t) de propagación multiplicado por dos. Esto debido a que una trama de datos (por ejemplo un comando Ping²) saldría de una estación, pasaría por el satélite, llegaría a una

² Una de las utilidades del comando Ping (Buscador de paquetes de Internet, Packet Internet Groper) es medir el tiempo de respuesta que existe entre una red y otra.

segunda estación y recorrería el camino inverso; obteniéndose así un tiempo total aproximado de 21.36 [ms] como se muestra a continuación.

$$Tp1 \approx Tp2$$

$$Tp1 \leq \frac{\sqrt{h^2 + (d/2)^2}}{c} = \frac{\sqrt{1375^2 + (1650/2)^2} [m]}{3 \times 10^8 [m/s]} = 5.34 [ms]$$

$$Tpt = Tp1 + Tp2 = 10.68 [ms]$$

$$Tt = (Tp1 + Tp2) \times 2 = 21.36 [ms]$$

En donde: h = altura nominal del satélite sobre el nivel de la tierra.
 d = diámetro de la región de cobertura

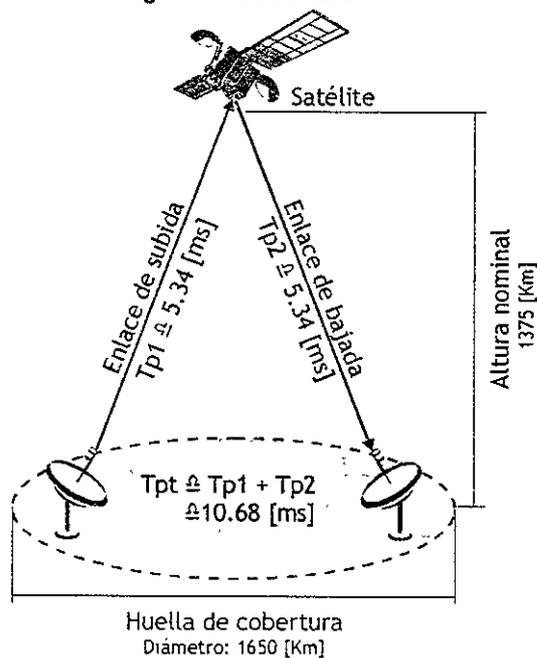


Figura 2.1.1.2.3 Latencia para el sistema Teledesic.

Desde el punto de vista de la red, una constelación grande de nodos de conmutación interenlazados ofrece un número de ventajas en términos de la calidad del servicio, confiabilidad y capacidad. La red malla altamente interconectada es un diseño robusto, tolerante a fallas que automáticamente se adapta a los cambios de la topología, la congestión de tráfico de datos o a los nodos o enlaces con fallas en su desempeño. Para alcanzar una capacidad del sistema y densidad del canal alta, cada satélite es capaz de concentrar una gran cantidad de capacidad en su área de cobertura pequeña. Para lograr la reparación rápida de la red, siempre y cuando la falla de un satélite resulte en un hueco de cobertura, es necesario contar con áreas de cobertura traslapadas, además del uso de satélites-repuestos en órbita [1].

La capacidad de una célula Teledesic es de 64 [Mbps] en ambas direcciones. Con cerca de 100,000 células servidas por el sistema, la capacidad teórica del sistema espectralmente limitada excedería los 6,400 [Gbps]. Sin embargo, cada satélite es capaz de soportar una tasa instantánea máxima de 10 [Gbps] hacia y desde las terminales dentro de su huella de cobertura, lo cual limita el pico máximo de capacidad simultánea a aproximadamente 2,880

[Gbps]. Para traducir la capacidad pico en una capacidad utilizable promedio, muchos otros factores tales como la distribución de usuarios actuales y las características de uso, potencia del satélite y relaciones pico a promedio deben ser consideradas [1].

2.1.1.3 La red Teledesic

La red Teledesic consta de un segmento terrestre conformado por: terminales, gateway's, sistemas de operación y control y de un segmento espacial (la red de conmutación satelital que proporciona los enlaces de comunicación entre las terminales). Las terminales son la frontera de la red y proporcionan la interfaz entre la red satelital y redes y usuarios finales terrestres. Dichas terminales desarrollan la traducción entre los protocolos internos de las redes de Teledesic y los protocolos de estándares terrestres, a través de ello se aísla la capa de red satelital de la complejidad y el cambio (Figura 2.1.1.3.1) [1].

Las terminales del sistema se comunican directamente con la red satelital. Estas soportan una amplia variedad de tasas de datos e incluyen configuraciones para aplicaciones fijas, transportables y móviles (primariamente aeronáutica y marítima). Una terminal puede ser el punto final de la conexión de red o puede actuar como un gateway para un switch o ruteador que completa la conexión a un destino vía una red privada o pública. Las terminales interactúan con un rango amplio de protocolos de red estándar y desarrollan la conversión entre los protocolos de red interna de Teledesic y aquellos de los sistemas de conexión. Una única terminal puede soportar varias conexiones simultáneas a otras terminales [1].

Las terminales también proporcionan los puntos de interconexión para los Centros de Control de Operaciones de la Constelación de la Red Teledesic (COCC) y para los Centros de Control de Operaciones de Red (NOCC); los COCC's coordinan el desarrollo inicial de los satélites, reemplazo de repuestos, diagnósticos de falla, reparación y la desorientación (desórbita) de los satélites; los NOCC's incluyen una variedad de administración de red distribuida y funciones de control incluyendo bases de datos de la red, procesamientos, administración de la red y sistemas de facturación [1].

La red satelital emplea una conmutación rápida de paquetes; todos los tipos de comunicación son tratados idénticamente dentro de la red tal como flujos de paquetes de longitud fija pequeña. Cada paquete contiene un encabezado que incluye la dirección destino y la información de secuencia, una sección de control de errores usada para verificar la integridad del encabezado y una sección de información de usuario que lleva los datos de usuario digitalmente codificados (voz, video, datos, etc.) Dentro de la red Teledesic se realiza una conversión del formato original entregado por el usuario y estos son entonces transformados en el formato de los paquetes que toman lugar en las terminales en la frontera de la red [1].

Cada satélite en la constelación es un nodo en la red de conmutación de paquetes rápida y tiene un enlace de comunicación intersatelital (ISL's) con hasta 8 satélites en el mismo plano orbital o en planos orbitales adyacentes. Esta distribución de interconexión forma una malla robusta no jerárquica o geodésica. La red combina las ventajas de una red de conmutación de circuitos ("tuberías digitales" de bajo retardo) y de una red de conmutación de paquetes (manejo eficiente de multitasas y ráfagas de datos) [1].

La topología de una red LEO es dinámica; es decir, la red debe adaptarse continuamente a aquellas condiciones de cambio para alcanzar conexiones óptimas (retraso menor) entre terminales. Esto es logrado gracias a que la red emplea una combinación de direccionamiento de paquetes basado en destinos y un algoritmo de ruteo de paquetes adaptivo distribuido para

alcanzar un retardo bajo a través de la red; cada paquete lleva la dirección de la red de la terminal destino, y cada nodo selecciona independientemente la ruta de menor retraso hacia el destino. Los paquetes de la misma sesión pueden seguir patrones diferentes a través de la red y, finalmente, la terminal en los destinos almacena y, si es necesario, reordena los paquetes recibidos para eliminar el efecto debido a las variaciones del tiempo [1].

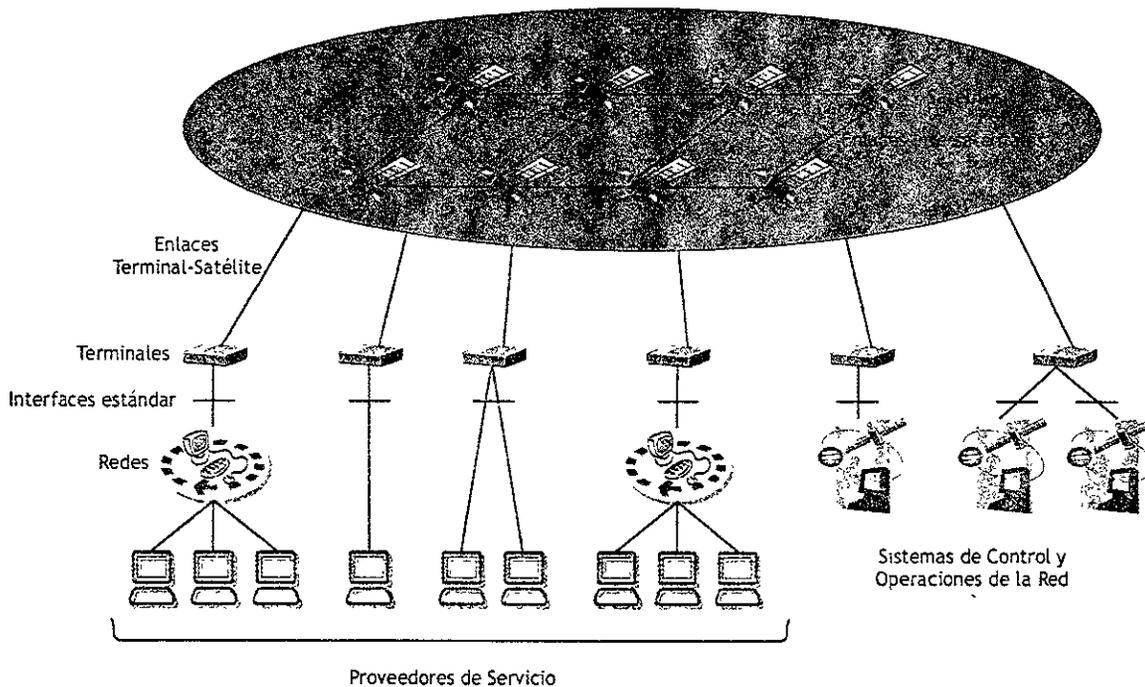


Figura 2.1.1.3.1. Apreciación global del sistema.

El algoritmo de ruteo de paquetes residente en cada nodo satelital dinámicamente ajusta el ruteo de paquetes para adecuar la dinámica pero determinística naturaleza de la topología de una red LEO; este opera en un modo interno actualizando las tablas de ruteo a los cambios reflejados en las áreas de cobertura y patrones de interconexión así como también la congestión de tráfico. La conmutación de paquetes rápida usa esas tablas en un modo de primer plano para enrutar paquetes a su célula destino dentro del área de cobertura o hacia el satélite interconectado que ofrezca la mejor vía hacia el destino [1].

2.1.1.4 Operación y control de la red

Las operaciones y control de la red abarcan un amplio rango de funciones que están distribuidas entre los elementos de la red; incluyendo terminales, satélites y NOCS terrestres. La comunicación entre los elementos de la red se logra vía un protocolo de señalización basado en paquetes [1].

Las terminales juegan un papel activo en los procesos de control y operaciones de la red. Tal como la interfaz física y lógica entre las aplicaciones cliente y la red Teledesic, las terminales desarrollan la conversión entre los protocolos externos estándar y los protocolos internos de la red. Ellas son también responsables de adquirir y mantener los enlaces de comunicación hacia

la red satelital y de enviar las peticiones de servicio desde y hacia la red y responder a los requerimientos de servicio [1].

Las funciones de control de red que residen en la porción satelital de la red son responsables de proporcionar la entrega confiable de bajo retardo de los paquetes hasta su destino, así como también de manejar los recursos de canales y enlaces que proporcionan el acceso y comunicación hacia los nodos de red [1].

Los NOCS soportan las funciones de control y operaciones de red amplia, incluyendo la administración de la red, monitoreo y administración del desempeño, de la seguridad, de las fallas, de la conexión de alto nivel, de la contabilidad y del acceso a las bases de datos a nivel sistema [1].

2.1.1.5 Estructura de las células

Haciendo una analogía con un sistema celular terrestre, el área de servicio es dividida en áreas geográficas (células), cada una asociada con una serie de recursos del canal (tal como frecuencia, códigos de propagación y/o ranuras de tiempo). Las células están acomodadas en un patrón de tal forma que se permite que las frecuencias y ranuras de tiempo sean reutilizadas varias veces dentro del área de servicio sin interferirse entre células adyacentes. Los usuarios dentro de cada célula comparten estos recursos usando un método de acceso múltiple. Cuando un usuario cruza la frontera de una célula, el sistema debe realizar un proceso de pasar al usuario de una célula a otra próxima (hand-off) reasignando al usuario recursos de canal en la nueva célula. En general, las células pequeñas permiten que los recursos de canal sean reusados más a menudo en un área dada resultando en un uso del espectro más eficiente, con una densidad del canal y capacidad del sistema más altas [1].

Con base en la estructura anterior, Teledesic emplea células pequeñas combinadas con un grupo reuso de canal de siete células para alcanzar una densidad de canal y capacidad del sistema altos [1].

La huella de cobertura de un satélite LEO barre la superficie de la Tierra en aproximadamente 25,000 [Km] por hora. Debido a esto, si el modelo de células pequeñas se mueve con la huella de cobertura del satélite (células satelitales fijas), una terminal permanecerá en una célula por pocos segundos antes de una reasignación de canal o de un hand-off a la siguiente célula que sería requerida. Como en el caso de los sistemas celulares terrestres, frecuentes hand-off's resultan en una ineficiente utilización del canal, costos de procesamiento alto y capacidad del sistema bajo [1].

Para evitar los inconvenientes mencionados, Teledesic utiliza células terrestres fijas para reducir la ineficiencia de los hand-off's de las terminales así como también para facilitar la coordinación de frecuencias y para permitir que el servicio sea conformado a las áreas geográficas. Esto es logrado debido a que La tierra es cartografiada en una malla fija de aproximadamente 120,000 células, organizada en zonas contiguas de reuso de canal de 7 células, referidas como supercélulas. Los métodos de acceso múltiple y las células de geometría fija de la malla previenen de la auto interferencia para garantizar la separación entre terminales usando la misma frecuencia en el mismo tiempo. Gracias a esto, la banda de frecuencia asignada puede ser reutilizada en cada supercélula más de 17,000 veces sobre la faz de la tierra. Las células terrestres fijas pequeñas también permiten que el sistema Teledesic pueda conformar áreas de servicio a fronteras nacionales, un logro imposible con células grandes o con células que se muevan con el satélite [1].

2.1.1.6 Enlaces de comunicación, terminales y acceso múltiple

La red Teledesic usa frecuencias en la banda Ka (aproximadamente 28 [GHz] en el enlace de subida y 18 [GHz] en el enlace de bajada) para enlaces de comunicación entre las terminales y la red satelital, así como también para el canal del radiofaro (beacon) satelital y para el control y telemetría. Una parte de la banda Ka tiene una asignación internacional para el servicio NGSO FSS, esta parte está en la banda de frecuencia más baja que tiene espectro suficiente para satisfacer los requerimientos de servicio para Teledesic. Estas frecuencias están sujetas a la atenuación por lluvia y requieren de una línea de vista clara para una comunicación eficiente; la constelación Teledesic garantiza siempre habrá al menos un satélite 40° arriba del horizonte sobre el área de servicio total; este ángulo de elevación alto previene muchas de las interferencias debidas a la topología del terreno, minimiza la interferencia con sistemas terrestres y limita la parte de la trayectoria que es sujeta a la atenuación por lluvia a unos cuantos miles de kilómetros. Empleando este diseño, el sistema Teledesic es capaz de alcanzar una disponibilidad alta, con caídas por lluvia menores que el 0.1% en muchas de las zonas climáticas [1].

Los enlaces de comunicación entre la red satelital y las terminales Teledesic se logran a través de los enlaces Terminal-Satélite (TSL's). Estos enlaces operan en la parte de la banda Ka que ha sido asignada para el servicio NGSO FSS internacionalmente y asignado para Teledesic en los Estados Unidos de Norteamérica. Los enlaces Terminal-Satélite soportan una variedad de terminales de usuario que operan a tasas de datos de 64 [Mbps] o más altas en ambas direcciones. Las terminales de usuario comparten el acceso a la red a través de un sistema eficiente de ancho de banda bajo demanda que emplea un Acceso por División en el Tiempo de Multifrecuencia (MF-TDMA) en el enlace de subida y un multiplexaje por división en el tiempo asíncrono (ATDM) en la bajada. Los enlaces de bajada operan en la banda de 18.8 [GHz] - 19.3 [GHz] y los enlaces de subida en la banda de 28.6 [GHz] - 29.1 [GHz]; esto se puede apreciar en la Figura 2.1.1.6.1, siguiente página [1].

La red Teledesic cuenta con enlaces intersatelitales ópticos (ISL's) que interconectan a cada satélite con hasta otros ocho satélites en un mismo plano y en planos adyacentes. Cada satélite es normalmente enlazado con cuatro satélites en su propio plano orbital (dos enfrente y dos atrás) y con uno en cada uno de los dos planos en ambos lados. La figura 2.1.1.6.2, ilustra este concepto [1].

Dichos enlaces operan en frecuencias cercanas a los 60 [GHz] tanto para los enlaces de transmisión como para los enlaces de recepción entre satélites [6]. Asignación basada en el Anexo 2 (Características y requerimientos de sistemas planeando utilizar servicios de enlaces intersatelitales (ISS) cerca de los 60 [GHz]) de la Recomendación S.1327 de la UIT (Requerimientos y bandas adecuadas para la operación del servicio intersatelital dentro del rango de 50.2-71 [GHz])³ [2].

2.1.1.7 Sistema de antena satelital y de usuario

El sistema de antena de los satélites Teledesic presenta cambios significativos comparado con el sistema de antena convencional. Los requerimientos del diseño de las antenas están basados

³ Una característica distintiva de estos sistemas es el requerimiento de grandes anchos de banda (1 [GHz])

en el tamaño de los haces dirigidos (tamaño de las células de cobertura), la huella de cobertura total del satélite y la necesidad del reuso del espectro disponible [7].

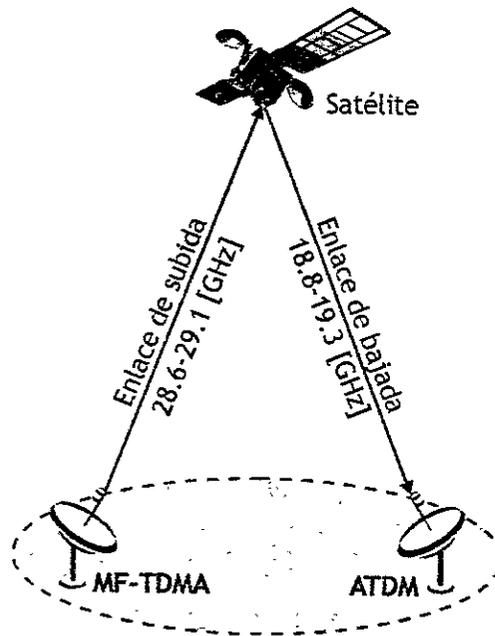


Figura 2.1.1.6.1 Enlaces de comunicación y técnicas de acceso.

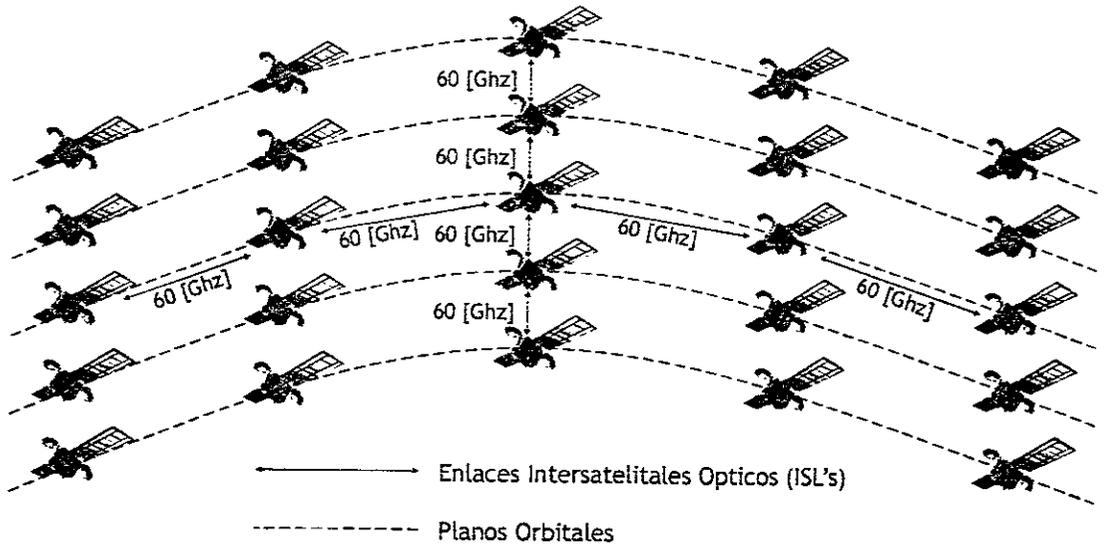


Figura 2.1.1.6.2 Enlaces intersatelitales Ópticos (ISL's).

La antena receptora (enlace de subida Tierra-Satélite) está conformada por una antena de haces múltiples con una gran cantidad de ellos (varios cientos). Los haces son formados para conformar las fronteras nominales de las células terrestres mientras mantienen niveles de potencia bajos en los lóbulos laterales, requeridos para el reuso de frecuencias. La antena proporciona una serie de traslapes o superposiciones de haces polarizados ortogonalmente.

Consecuentemente, una calidad de polarización mínima debe ser alcanzada para mantener el aislamiento de la polarización cruzada a niveles consistentes con los requerimientos necesarios para el reuso de frecuencias [7].

La antena transmisora (enlace de bajada Satélite-Tierra) proporciona un número nominal de haces de alta directividad los cuales son compartidos en el tiempo entre todos los usuarios en la huella de cobertura (haces de cobertura conmutados y dirigidos). Al igual que en la antena receptora, los niveles de los lóbulos laterales están diseñados para alcanzar los requerimientos necesarios para el reuso de frecuencias. También se emplea un reuso de frecuencias sobre una polarización ortogonal, por lo que el nivel de aislamiento en la polarización es un parámetro sumamente importante. Los niveles de Potencia Radiada Efectiva (ERP) son establecidos de acuerdo a niveles de lluvia extremos, de tal forma de garantizar que el enlace siempre estará disponible no importando las condiciones meteorológicas [7].

La antena de usuario o residencial tiene un amplio campo de vista, tiene la capacidad de ser totalmente bidireccional, cumple con la característica de tener una polarización dual de alta calidad además de ser estéticamente agradable a la vista y, lo más importante, es producida, distribuida e instalada a un bajo costo. El diámetro de la antena varía de 16 [cm] hasta 180 [cm] y está determinada por la tasa de transmisión de datos, la región climática y por la disponibilidad del enlace requerida [7].

2.1.1.8 Producción, lanzamiento y operación satelital

El satélite Teledesic está diseñado para ajustar eficientemente a varios satélites dentro de una gran variedad de vehículos de lanzamiento. Esto está acompañado con un satélite de alta densidad y un contorno que ajusta dentro de diferentes volúmenes aerodinámicos de carga útil. Para maximizar el levantamiento de masa de los vehículos de lanzamiento, los satélites son colocados en una órbita estacionaria baja y emplean sus propulsores eléctricos de eficiencia alta para alcanzar su altitud final. Las operaciones de lanzamiento tradicionales incluyen procedimientos complejos y extensos de procesamiento y pruebas [1].

Teledesic utiliza un grado alto de operación automatizada para reducir costos y personal de staff en operaciones de la constelación. Un software de abordo administra la posición satelital dentro del plano orbital; controla su altitud, monitorea su estado de salud y desarrolla la detección y resolución de algunas anomalías. Repuestos operacionales en órbita y un procedimiento rápido de llenado de huecos permiten a un satélite que sea removido de la red para diagnósticos más extensos y para la resolución de anomalías. Los satélites en un anillo orbital se reposicionan a ellos mismos para llenar el hueco en la cobertura mientras el satélite está fuera de línea. Si la anomalía es exitosamente resuelta, el satélite es reinsertado en la red y los satélites otra vez son reposicionados uniformemente en el anillo. Si el problema no puede ser resuelto, el satélite es desorbitado y quemado al penetrar en la atmósfera terrestre [1].

2.1.2. SkyBridge

SkyBridge es una solución satelital de acceso local de banda ancha que permitirá, a proveedores de servicios y a operadores, entregar servicios multimedia en línea con características muy vastas [Internet 2].

Este sistema representa la versión europea del sistema norteamericano Teledesic; el diseño y la orientación de mercado son similares desde un punto de vista económico, sin embargo tienen algunas diferencias desde un contexto tecnológico.

Alcatel Space desarrolla el sistema SkyBridge, el cual proporcionará accesos locales en cualquier parte del mundo a través de una constelación de 80 satélites en una órbita terrestre baja [Internet 2].

SkyBridge es una solución ideal para accesos de tiempo real y hasta servicios altamente interactivos como:

- Acceso a Internet de alta velocidad y, siendo más generales, servicios en línea
- Acceso a través de telecomunicaciones para servidores corporativos, redes de área local e intranet's
- Videoconferencia y videotelefonía
- Telemedicina
- Comercio electrónico
- Servicios de entretenimiento: video interactivo bajo demanda, videojuegos y más.

Además, SkyBridge proporcionará:

- Enlaces para conexiones punto-a-punto
- Servicios mejorados de banda angosta para transmisión de voz y datos

Este sistema ha sido aprobado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) y recientemente por la FCC. SkyBridge estará operacional en el año 2005, y proporcionará tasas de transmisión de 10 hasta 1,000 veces más grande que las aquellas requeridas por una llamada telefónica tradicional [Internet 2].

Conceptualizado en 1993 por Alcatel Space, SkyBridge tiene a inversionistas tales como: Loral Space & Communications y E.M.S. de Estados Unidos de Norteamérica, Mitsubishi Electric Corporation y Sharp del Japón, COMDEV de Canadá, la Agencia Espacial Europea CNES, SNECMA de Francia, y SRIW de Bélgica [Internet 2].

2.1.2.1 Introducción

El sistema SkyBridge tiene sus raíces iniciados los años 90; después de que la primera regulación, WRC 1997, fue aprobada, SkyBridge entró a una fase de preconstrucción, fase en la cual se encuentra situada actualmente [8].

El estatus del diseño satelital es presentado más adelante, después de una breve introducción del sistema [8].

2.1.2.2 Información general del sistema

El sistema SkyBridge involucra a:

- Una constelación de satélites LEO de 80 satélites en orbitas inclinadas,
- Los sistemas terrestres asociados de control y misión,

- Los gateway's de comunicación los cuales enlazan los terminales de usuario dentro de un área de servicio (un disco con diámetro de 700 [Km]) con redes terrestres de banda ancha,
- Las terminales del usuario final que están instaladas sobre el techo de edificios de acuerdo a las necesidades de los usuarios, y son conectadas a las computadoras de los usuarios o a redes de área local.
- El sistema define dos tipos de usuarios: residenciales y corporativos. Los usuarios residenciales están equipados con antenas de 50 [cm] con una tasa de datos de hasta 20 [Mbps] para el enlace de bajada y con hasta 2 [Mbps] para el enlace de subida. Los usuarios corporativos están equipados con antenas de 80 [cm] o 100 [cm] con 60 [Mbps] ó 100 [Mbps] para el enlace de bajada y con 6 [Mbps] ó 10 [Mbps] para el enlace de subida, respectivamente.

En la Figura 2.1.2.2.1. se encuentran plasmados todos los elementos de los que cuenta el sistema.

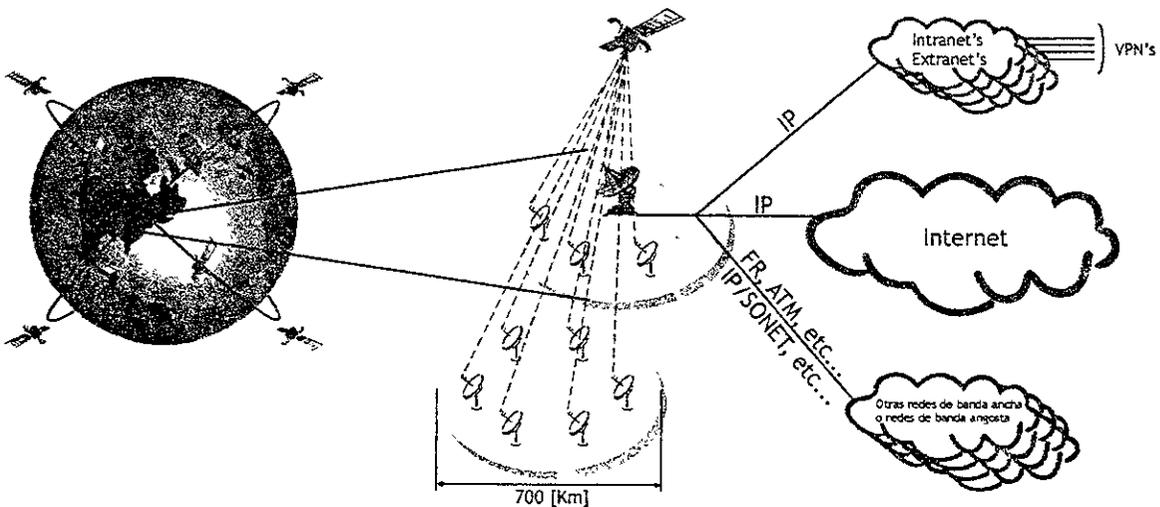


Figura 2.1.2.2.1. Arquitectura del sistema SkyBridge.

Las principales características del sistema son:

- Uso la banda Ku
- Uso de transpondedores transparentes (sin procesamiento de abordo)
- Sin enlaces intersatelitales
- Protección de los sistemas geoestacionarios y terrestres a través del manejo de hand-over satelital y de un diseño de antena cuidadoso

Todas esas características minimizan el costo del sistema y el riesgo asociado con la implementación del mismo [8].

Por otra parte, al igual que en sistema Teledesic, la latencia sigue siendo un parámetro muy importante. Skybridge, al tener una altitud nominal de 1469 [Km], con franjas de cobertura de 6,000 [Km] de diámetro y con un diámetro de 700 [Km] en sus células de cobertura satelitales, tiene una latencia de 10.07 [ms] en el enlace Tierra-Satélite y un valor aproximado de 20.14 [ms] al recorrer el camino inverso, tal como lo demuestran los siguientes cálculos para una célula de cobertura. La figura 2.1.2.2.2 muestra este concepto.

$$Tp1 \approx Tp2$$

$$Tp1 \leq \frac{\sqrt{h^2 + (d/2)^2}}{c} = \frac{\sqrt{1469^2 + (700/2)^2} [m]}{3 \times 10^8 [m/s]} = 5.035 [ms]$$

$$Tpt = Tp1 + Tp2 = 10.07 [ms]$$

$$Tt = (Tp1 + Tp2) \times 2 = 20.14 [ms]$$

En donde: h = altura nominal del satélite sobre el nivel de la tierra.
 d = diámetro de la célula de cobertura

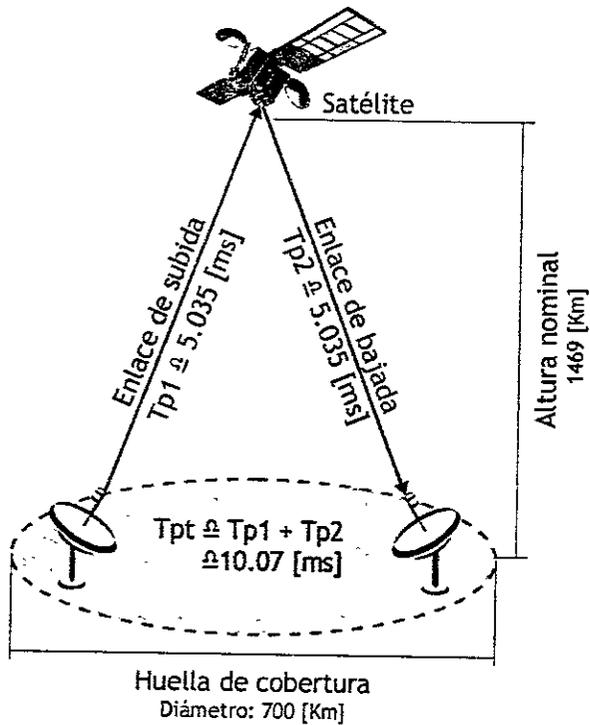


Figura 2.1.2.2.2 Latencia para el sistema Skybridge.

La terminal de usuario es capaz de ser enlazada al gateway a través de dos satélites diferentes (para manejar el hand-over de uno a otro satélite, cuando un satélite desaparece abajo de la mínima elevación, o cuando un satélite se encuentra muy cercano al cinturón geostacionario). Un bosquejo de la terminal residencial de SkyBridge es mostrado en la Figura 2.1.2.2.3 [8].

La terminal de usuario tiene, por consiguiente, la capacidad de formar dos haces diferentes simultáneos, ya sea usando dos antenas diferentes o usando un lente focal con dos elementos focales como en el ejemplo mostrado anteriormente [8].

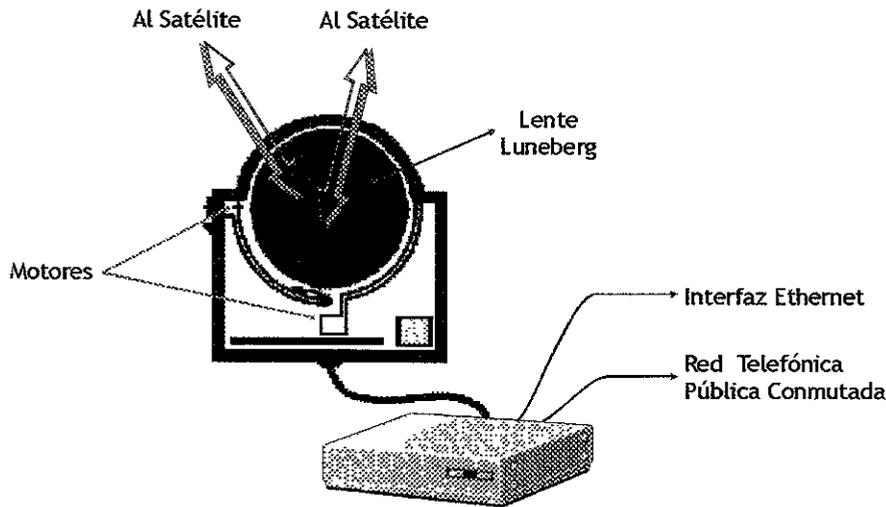


Figura 2.1.2.2.3. Terminal de usuario de banda ancha SkyBridge.

2.1.2.3 Segmento espacial

La constelación satelital fue diseñada para una cobertura mundial completa entre las latitudes 68° Sur y 68° Norte. Este diseño toma en cuenta el esquema de protección del cinturón geostacionario. Además, la constelación fue diseñada con el propósito de permitir un servicio abierto con la mitad de los satélites (40). Este diseño se tomó en cuenta en caso de que se requiriera brindar servicios antes de completar el diseño final con los 80 satélites propuestos. En este caso, el servicio será ofrecido en bandas de latitud limitada (latitudes templadas) [8].

Actualmente, el segmento espacial de SkyBridge está compuesto de una constelación de 80 satélites LEO y está asociado a las facilidades terrestres para el control satelital, pruebas en órbitas, etc. [8].

La constelación actual de 80 satélites está repartida en 20 planos orbitales de 4 satélites acomodados como se muestra en la figura 2.1.2.3.1. Los planos orbitales tienen una inclinación de 53° cuyas órbitas son circulares con una altitud de 1469 [Km] [8].

2.1.2.4 Carga útil

La carga útil de comunicaciones del sistema Skybridge incluye 18 transpondedores transparentes (bent-pipe); es decir sin procesamiento de abordo o también llamados "tontos", transpondedores de tráfico alto aislado (HTT); esto es, cada HTT puede proporcionar una serie de dos enlaces de comunicación para el área de cobertura del gateway, enlace de subida y de bajada [8].

Dichos transpondedores son instalados sobre el panel terrestre satelital en donde cada HTT tiene un ensamble de antena dedicado y un repetidor. Una característica de los transpondedores es que el equipo electrónico del mecanismo de apuntamiento de antena es compartido entre varios HTT's. Además todos los osciladores a bordo están referenciados a una

única frecuencia de referencia ultra estable. En la figura 2.1.2.4.1 se muestra el panel terrestre que contiene dos subpaneles, soportando cada uno a 9 HTT's, las antenas HTT son empacadas en el panel con cara que mira hacia la Tierra, mientras que el equipo repetidor asociado está colocado en la cara que no mira hacia la Tierra [8].

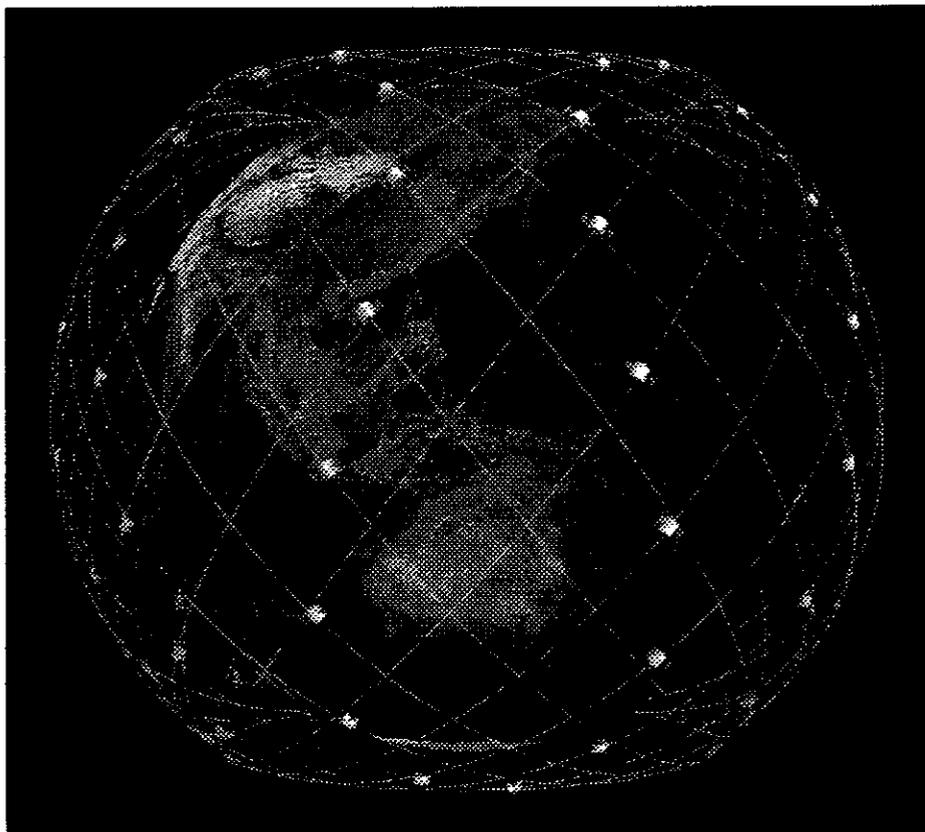


Figura 2.1.2.3.1. Constelación SkyBridge.



Figura 2.1.2.4.1. Mitad del panel terrestre satelital (cara hacia la Tierra).

En la figura 2.1.2.4.4 se muestra una antena individual y desplegada de este arreglo, para un mayor detalle.

El servicio de SkyBridge es proporcionado a través de áreas de servicio fijo, acomodadas en un patrón de superposicionamiento sobre la tierra para cubrir los lugares requeridos, esas áreas de servicio tienen discos de 700 [Km] de diámetro. En la Figura 2.1.2.4.2 se puede observar un bosquejo de las áreas de cobertura sobre la faz de la Tierra [8].

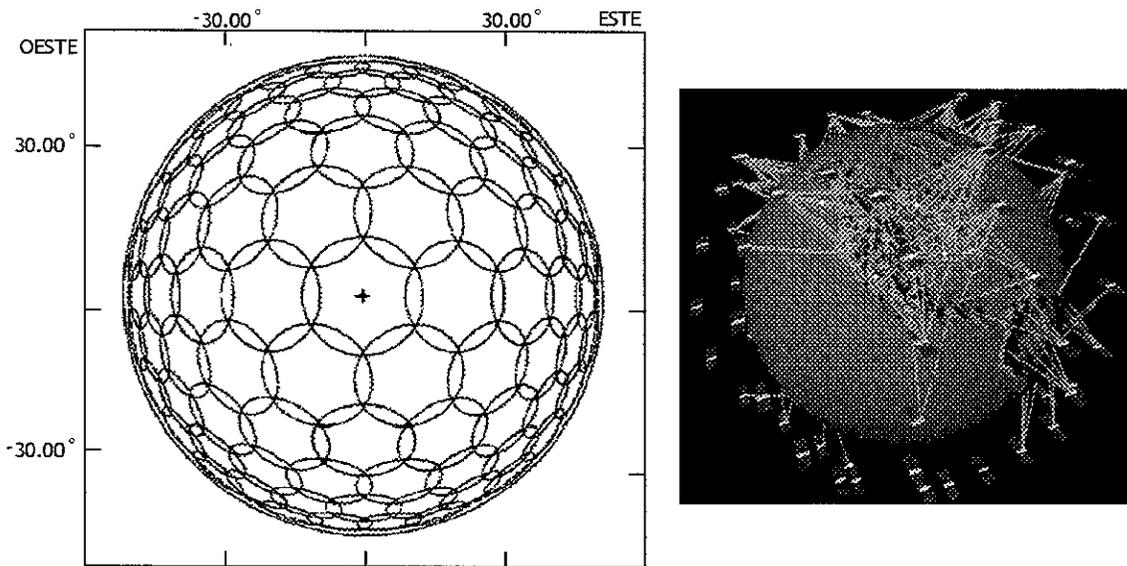


Figura 2.1.2.4.2. Areas de servicio vistas desde los satélites SkyBridge.

Una característica especial es que cada antena continuamente rastrea un área de servicio en la faz de la Tierra durante el tiempo que es requerido y que es especificado por la computadora de a bordo (ranuras de tiempo de unos cuantos minutos). Durante este tiempo el patrón de radiación de la antena es ajustado para acoplarse a la forma elíptica del disco de 700 [Km], tal como es visto desde el satélite como lo muestra la Figura 2.1.2.4.3; en esta imagen se puede observar que la huella va de un gran círculo en el nadir hasta una pequeña elipse horizontal cerca del borde la cobertura. Este patrón es actualizado regularmente tal como el satélite se mueve para seguir la forma del área de servicio [8].

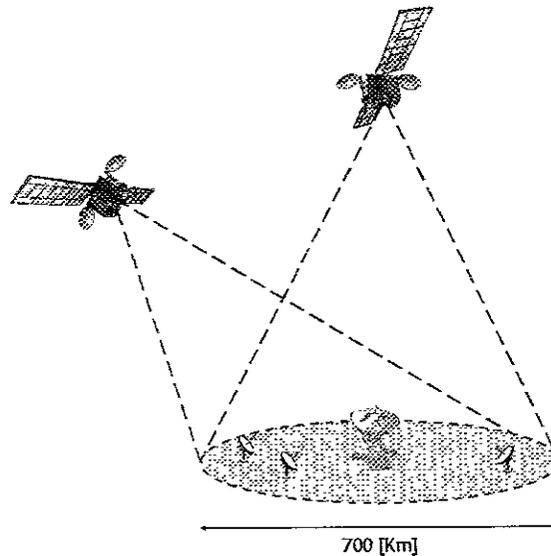


Figura 2.1.2.4.3 Definición del área de servicio.

El diseño y desempeño de la antena son optimizados al combinar una dirección de haz mecánica con un contorno y acercamiento (zoom) de haz electrónico. El barrido del haz mecánico mantiene la máxima eficiencia de área mientras el desapuntamiento del haz alcanza su máximo de 54° [8].

La antena HTT está compuesta de un arreglo de radiación directo receptor, un arreglo de radiación directo transmisor y un mecanismo de apuntamiento de antena (APM), el cual soporta a ambas antenas y permite llevar el apuntamiento al centro del haz puntual. Ambos arreglos de transmisión y recepción combinan redes de distribución de striplines y guías de onda para alimentar a los elementos de arreglos con polarización circular [8].

El arreglo de recepción es alimentado por un LNA/BFN (amplificador de bajo ruido/red de formación del haz), el cual desarrolla ambas funciones de recepción de bajo ruido y de conformación del haz [8].

El arreglo de transmisión es alimentado por una red de formación del haz de baja pérdida, el cual proporciona las funciones de conformación del haz con una capacidad de manejo de alta potencia. Este equipo está basado en una serie de divisores de potencia y dispositivos dirigidos por comandos de corrimiento en frecuencia de ferrita acomodados en la estructura del árbol. Los módulos de RF de la antena también incluyen filtros de guía de onda de entrada y de salida. Los mecanismos de apuntamiento de antena (APM) implementan las siguientes funciones:

- 2 ejes de apuntamiento de los arreglos de transmisión y recepción
- Guía de onda de ruteo de las señales de RF desde el repetidor HTT hasta la antena transmisora usando dos uniones rotatorias
- Cable coaxial de ruteo desde la antena receptora hasta el repetidor HTT
- Ruteo de DC desde el interior del satélite hasta las unidades de antena
- Antenas con funciones de auto guardado y apertura durante y después del lanzamiento del satélite

La Figura 2.1.2.4.4 muestra un bosquejo del ensamble completo de cada una de las antenas del arreglo de la figura 2.1.2.4.1, la cual muestra el concepto del APM seleccionado [8].

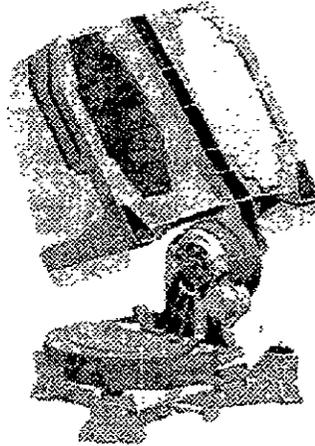


Figura 2.1.2.4.4. Configuración del ensamble de la antena.

Los 18 transpondedores incluyen 9 HTT's operando en la polarización circular izquierda (LHCP) y 9 HTT's operando en la polarización circular derecha (RHCP). Cada transpondedor HTT incluye canales de envío y retorno; los canales de envío repiten las señales desde los gateway's hasta los usuarios finales, mientras que los canales de retorno repiten señales de los usuarios finales a los gateway's. Todos los transpondedores usan el mismo plan de frecuencias. El reuso de frecuencias entre los 9 haces co-polarizados es posible gracias al aislamiento espacial de haz a haz de antena [8].

Skybridge tiene una asignación de frecuencias para el enlace de subida que va de 12.85 [GHz] a 13.25 [MHz], de 13.75 [MHz] a 14.5 [GHz] y de 17.3 [GHz] a 17.8 [GHz]. Para el enlace de bajada tiene una asignación de 10.7 [GHz] hasta 12.7 [GHz] [9]. La Figura 2.1.2.4.5 presenta los recursos de frecuencia disponibles para el sistema de SkyBridge. Las bandas de los "alimentadores" se refieren a los enlaces gateway-satélite mientras que las bandas de "servicio" se refieren a los enlaces usuario-satélite [8].

A pesar de que todos los transpondedores son independientes y cada uno puede ser usado para servir a un área de servicio dedicada acoplada a un gateway, existen conexiones cruzadas que son implementadas entre los transpondedores para extender las áreas potenciales de servicio del gateway con la finalidad de minimizar la inversión inicial de los operadores de gateway's. Los conmutadores que desarrollan esas conexiones son de estado sólido, activados dinámicamente cuando es necesario a través del camino orbital del satélite. Esto es hecho de acuerdo a planes predefinidos cargados desde la Tierra hasta la computadora de a bordo del satélite. Un ejemplo de una conexión multi-celular es mostrado en la Figura 2.1.2.4.6 [8].

2.1.2.5 Bus satelital

El diseño del satélite debe minimizar el costo por transpondedor en órbita. La definición de la forma del satélite y el sentido en que los productos o artículos de la carga útil y no útil son

colocados, son diseñados a la medida maximizando el número de transpondedores y satélites acomodados sobre los cohetes lanzadores escogidos [8].

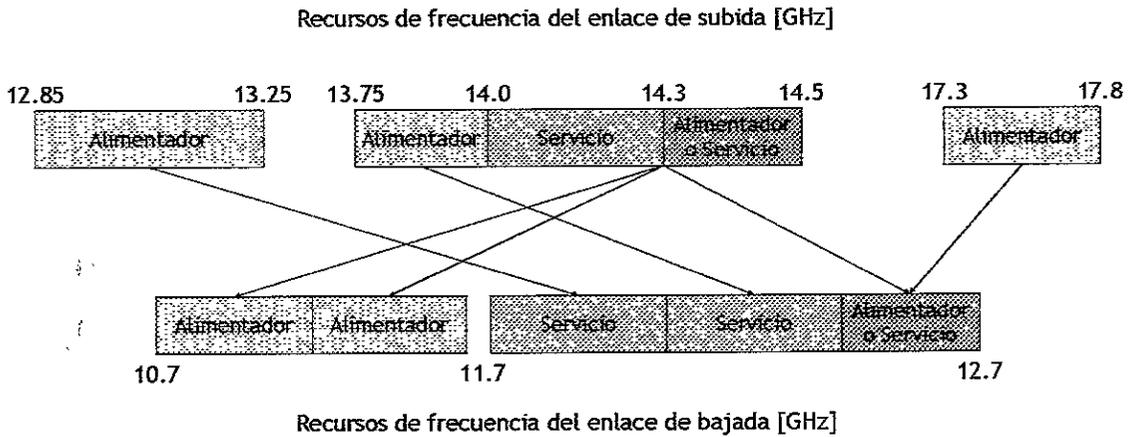


Figura 2.1.2.4.5. Recursos de frecuencia disponibles.

La forma del satélite, antes que nada, es optimizado para la colocación de varias naves sobre la cubierta del cohete lanzador, como se muestra en las Figura 2.1.2.5.1 y Figura 2.1.2.6.2.

Skybridge utiliza sistemas de propulsión plásmica y de baterías de lón-Litio. Esas dos tecnologías actualmente son propuestas por Alcatel Space para programas geoestacionarios futuros. La propulsión plásmica ha sido ampliamente usada en satélites rusos y será probada en el programa Stentor junto con las baterías de lón-Litio [8].

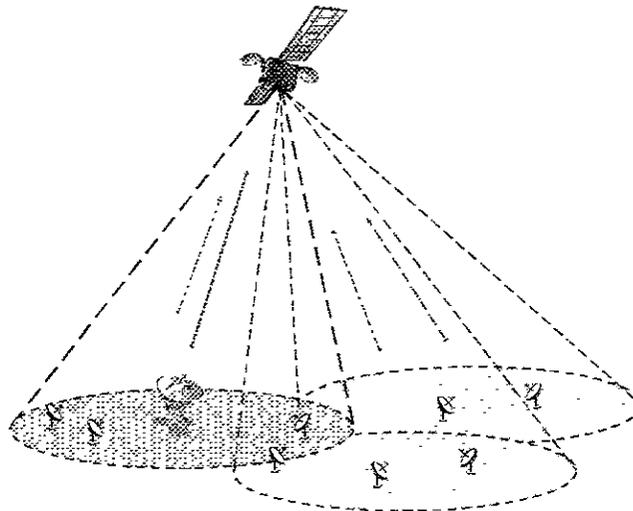


Figura 2.1.2.4.6. Area de servicio multi-celular.

La fuente de energía eléctrica está basada en un bus regulado con 50 [V] con secciones de carga de arreglos solares dedicados (Bus híbrido) [8].

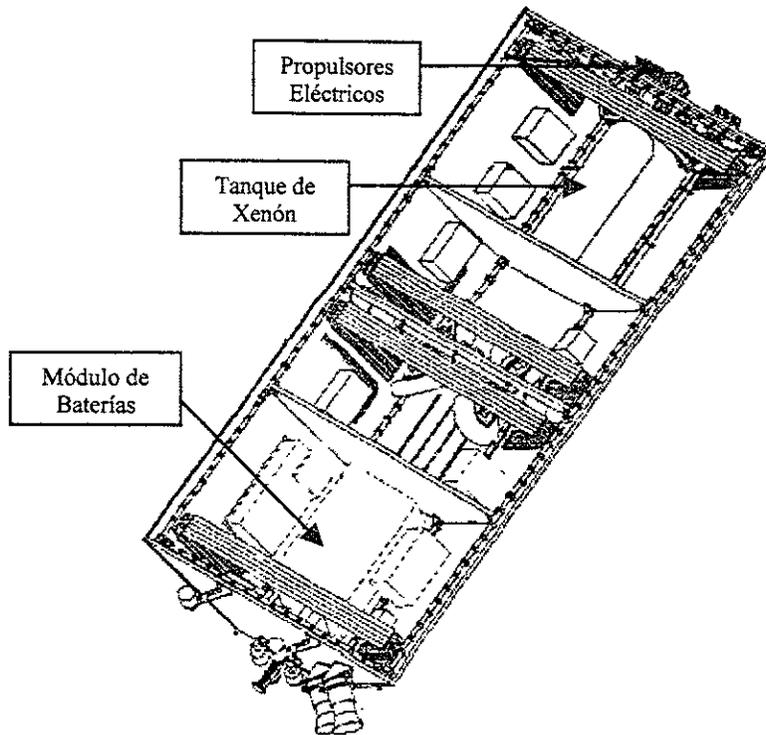


Figura 2.1.2.5.1. Bus Satelital.

Durante la luz solar, la potencia es entregada por las secciones de arreglos solares (10 + 10) conectados al bus, enrutados a la batería de recarga o desviada a tierra (en caso de una potencia excesiva) a través de conmutadores electrónicos dedicados, controlados por el voltaje de salida del Amplificador de Error Principal (MEA) y por el Control de Carga de Baterías [8].

Durante un eclipse, o en caso de un consumo pico más grande que la capacidad de los arreglos solares, la potencia se suministra desde la batería a través de 6 Reguladores de Descarga de Baterías (BDR), también controlados por el voltaje de salida del amplificador de Error Principal [8].

El uso de baterías de Ión-Litio trae los siguientes beneficios comparados con los de las baterías de NiH₂:

- Un ahorro de 20 [Kg] de masa para el satélite; esto debido a una mayor densidad de carga (130 [Wh] por [Kg]) comparado con 60 [Wh] por [Kg])
- Una mejor eficiencia de recarga
- Disipación térmica más baja (cuatro veces menor), simplificando el control térmico de la batería (uso de caleoductos)
- Temperatura operacional más alta y auto descarga más baja. Esto permite una mejor simplificación operacional en el ensamblaje del satélite, en la Integración & Prueba (AIT) y en el soporte del lanzador.

La batería está compuesta de 12 paquetes en serie, cada paquete está compuesto de 4 x 38.6 [Ah] células en paralelo, el cátodo es de LiCoNiO₂ y el ánodo es de carbón. La masa resultante total de la batería es de 70 [Kg] [8].

El objetivo del uso de la propulsión del sistema se puede resumir en los siguientes puntos:

- Ascender a la órbita después de la expulsión hecha por el lanzador
- Mantener la posición orbital
- Eliminación al término de su vida útil

Dicha propulsión está basada en la propulsión de plasma; usando al Xenón como propulsor y de propulsores de efecto Hall; este tipo de propulsión es muy atractivo debido a que ofrece una reducción de propelente más grande:

- Por una tasa de 5 comparada a la propulsión por líquido usada en satélites GSO
- Por una tasa de 7 comparada al tipo de propulsión mono-propelente (Hidracina)

Además, el consumo de potencia eléctrica para un nivel de propulsión de 0.08 a 0.1 [N] es del mismo orden de magnitud del consumo de potencia eléctrica e la carga útil (en promedio). Esto permite un uso eficiente del subsistema de potencia eléctrica del satélite, el cual es usado para este propósito durante el ascenso y descenso al término de su vida en la órbita cuando la carga útil es apagada [8].

2.1.2.6 Diseño satelital

La figura 2.1.2.6.1 muestra una vista de un satélite SkyBridge en órbita, anterior a encontrarse en ese estado, el satélite tiene que ser lanzado y elevado a esa altitud. Esta tarea será asignada a varios lanzadores con el objetivo de minimizar el riesgo, el costo y optimizar el cronograma de la misión. El rango del lanzador actual en términos de satélites por lanzamiento va de 2 a 10, sin embargo, el número de ofertas es máximo para 4 y 8 satélites por lanzamiento [8].

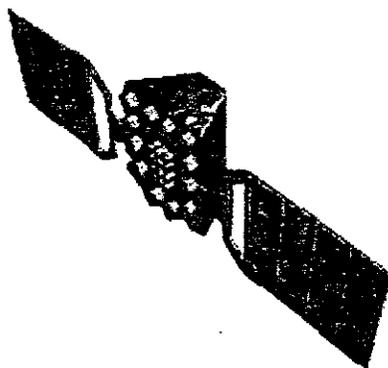


Figura 2.1.2.6.1. Configuración en órbita satelital.

Desde el punto de vista de tiempo de conformación de la constelación, lanzar 4 satélites inyectados directamente a la órbita operacional es el recurso más óptimo. La Figura 2.1.2.6.2 muestra a los satélites en la plataforma del lanzador en un lanzamiento de una configuración de 4 satélites [8].

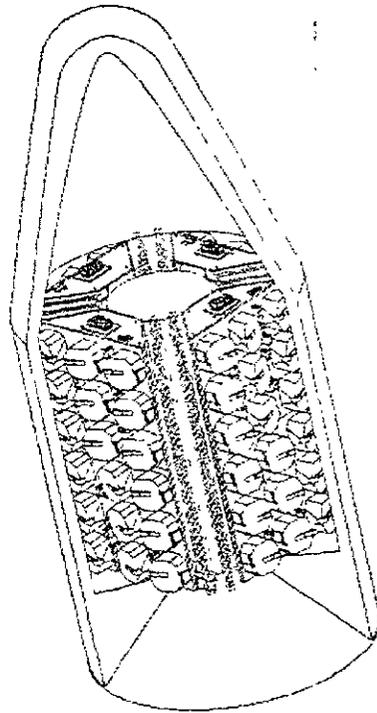


Figura 2.1.2.6.2. Configuración de lanzamiento de 4 satélites.

2.1.3. Características más importantes de los sistemas LEO de banda ancha: Teledesic y Skybridge

A continuación, en la Tabla 2.1.3.1, se muestran las características más importantes de los dos sistemas satelitales LEO descritos anteriormente.

En esta tabla se encontrarán parámetros como el número de satélites de la constelación, número de planos, número de satélites por plano, altura de los satélites, diámetro de cobertura, inclinación, frecuencias de operación para los enlaces de subida y bajada, frecuencias de operación de los enlaces intersatelitales, tipo de antenas satelitales, técnicas de acceso, años de vida de los satélites, ancho de banda disponible por satélite y el año de inicio de operación de la red.

2.1.3.1 Tabla de las características más importantes de los sistemas LEO de banda ancha: Teledesic y Skybridge

	TELEDESIC	SKYBRIDGE
Tipo de usuarios	ISP's	ISP's
Número de satélites	288	80
Número de planos orbitales	12	20
Número de satélites por plano	24	4
Altitud nominal de los satélites	1375 [Km]	1469 [Km]
Tipo de inclinación	Próxima a los polos (near-polar)	Inclinada
Inclinación	84.75°	53°
Excentricidad	0.00096	0
Separación entre planos	15°	18°
Franja de cobertura de los satélites (diámetro de la huella)	1650 [Km]	6000 [Km]
Tipo de cobertura	Célula: 80 [Km] de diámetro	Célula: 700 [Km] de diámetro
Región de cobertura	Global	68° N a 68° S
Banda de frecuencias de operación (enlaces de subida y bajada)	Ka	Ku
Frecuencias para el enlace de subida	28.6 [GHz] - 29.1 [GHz]	12.85 [GHz] - 13.25 [GHz] 13.75 [GHz] - 14.5 [GHz] 17.3 [GHz] - 17.8 [GHz]
Frecuencias para el enlace de bajada	18.8 [GHz] - 19.3 [GHz]	10.7 [GHz] - 12.7 [GHz]
Diámetro de la antena de usuario	16 [cm] - 180 [cm]	50 [cm], 80 [cm], 100 [cm]
Frecuencia para los enlaces intersatelitales	60 [GHz]	No aplica

Capacidad de los enlaces intersatelitales	1 [Gbps]	No aplica
Número de saltos para los enlaces intersatelitales	8: 2 enfrente, 2 atrás y 2 en cada uno de los planos adyacentes	No aplica
Angulo mínimo de elevación de las terminales	40°	53°
Protocolos de usuario	ATM, ISDN, TCP/IP	Frame Relay, ATM, IP, SONET
Capacidad mínima disponible en las terminales corporativas	64 [Mbps], bajo demanda	60 [Mbps]
Aplicaciones de usuario	Internet de banda ancha, intranet's corporativas, multimedia, interconexión de redes LAN, multicast, etc.	Internet de banda ancha, intranet's corporativas, videoconferencia, videotelefonía, telemedicina, comercio electrónico, etc.
Tipo de antenas satelitales	Antenas de multihazas dirigidos electrónicamente	Antenas multihazas dirigidas mecánicamente
Método de acceso	MF-TDMA (enlace de subida) ATDMA (enlace de bajada)	No disponible en la literatura abierta
Polarización	Polarización lineal ortogonal	Circular izquierda (LHCP) Circular derecha (RHCP)
Latencia máxima aproximada	10.68 [ms] (medio circuito) 21.36 [ms] (circuito completo)	10.07 [ms] (medio circuito) 20.14 [ms] (circuito completo)
Tasa instantánea máxima por satélite	10 [Gbps]	24 [Gbps]
Tasa instantánea máxima en todo el sistema	2,880 [Gbps]	1,920 [Gbps]
Conmutación de abordó	Conmutación de paquetes	Ninguna
Inicio de operaciones	2004 - 2005	2005
Vida útil de los satélites	10 años	8 años

2.2. SISTEMAS GEO GLOBALES DE BANDA ANCHA

El uso de la banda Ku, pero principalmente el de la banda Ka, tiene un atractivo para muchos constructores y operadores de satélites. Debido a la amplia gama de servicios de banda ancha que se pueden ofrecer, han sido desarrollados sistemas híbridos como *Spaceway* y *Astrolink*, cuyo objetivo primordial es el de brindar una cobertura global a través de constelaciones satelitales en la órbita GEO.

El uso de sistemas geoestacionarios operando en la banda Ka tiene muchas ventajas; como el empleo de menor potencia, a pesar de que la frecuencia es más alta, tanto en el satélite como en las terminales de usuario; y se puede brindar una cobertura global con menos satélites en comparación con los sistemas LEO. Sin embargo, uno de los mayores inconvenientes que presentan estos sistemas es la latencia, involucrando un elevado tiempo de retraso (500 [ms] aproximadamente) que existe en la comunicación punto a punto y que es muy problemático en aplicaciones como Internet, sin mencionar las aplicaciones en tiempo real. Otro de los inconvenientes es la mayor atenuación por propagación en el espacio libre.

A pesar de ello, resulta interesante conocer el desarrollo actual de constelaciones de banda ancha utilizando la banda Ka dentro de la órbita geoestacionaria. Enseguida se podrá encontrar una descripción de *Spaceway* y *Astrolink*, sistemas que actualmente son los más avanzados en este campo. Finalmente se hará una comparación mostrando las características más importantes encontradas en cada uno de ellos.

2.1.4. *Spaceway*

Spaceway, sistema concebido en 1996 por Hughes Electronics Corporation, es una red de comunicaciones satelitales global con el objetivo de proporcionar servicios de conectividad de banda ancha y de alta velocidad; basados en el protocolo IP orientándose a grandes empresas, pequeños y medianos negocios y a ciertos segmentos del mercado; soportando a intranet's como a extranet's, Proveedores de Servicios de Internet (ISP's) y a otros Proveedores de Servicios de Aplicación (ASP's) [10].

Utilizando un sistema satelital global geoestacionario junto con infraestructura terrestre, los usuarios podrán transmitir y recibir video, audio, multimedia y datos a tasas entre los 16 [kbps] hasta 16 [Mbps]. *Spaceway* tiene contemplado comenzar operaciones en el 2003 en Norteamérica [Internet 4].

Spaceway fue diseñado para tener una flota de 20 satélites esparcidos en 15 ranuras orbitales en el cinturón geoestacionario operando en la banda Ka. Además, cuenta con enlaces intersatelitales, los cuales pueden enlazar hasta 4 satélites del sistema operando en la banda de los 60 [GHz], teniendo en cada enlace una tasa de bits de 1 [Gbps] [9]. Las ocho primeras ranuras orbitales que entrarán en operación se muestran en la Figura 2.2.1.4.1.

En la primera etapa del desarrollo del sistema se pondrán en órbita 8 satélites brindando cobertura global. En la segunda etapa se planean colocar 5 repuestos para los satélites más importantes y, en la etapa final, se colocarán los satélites restantes para cubrir las 15 ranuras orbitales propuestas. Sin embargo, actualmente se está rediseñando el sistema por lo que en un futuro próximo este diseño podría cambiar parcial o totalmente. [9]

En posteriores apartados se describirá este sistema desde una perspectiva de servicios, tal y como lo observarían un usuario final y proveedores de servicios asociados. También se hará

mención de las capacidades y características en las áreas de las interfaces de usuario, transmisión satelital, ruteo de paquetes, métricas de servicio, control del sistema y administración de operaciones [10].

2.2.1.1 Introducción

Spaceway está diseñado para proporcionar servicios de conectividad de redes IP de alta velocidad a través de terminales satelitales de muy bajo costo. Esto permitirá que las empresas y proveedores de servicio a usuarios finales puedan proporcionar accesos de banda ancha bajo demanda de hasta varios mega bits por segundo con la finalidad de incorporar a clientes; tales como sucursales, socios de pequeños negocios, etc., con acceso a intranet's y extranet's corporativas, videoconferencia, telemedicina, multicast, educación a distancia, etc. Así mismo, los sistemas ISP's podrán usar el sistema Spaceway para ofrecer servicios de acceso a Internet de banda ancha a sus subscriptores [10]. El sistema es totalmente compatible con una amplia variedad de estándares de transmisión terrestres como : ATM, ISDN, Frame Relay y X.25. [Internet 5]

Gracias al uso de una avanzada antena de haces puntuales múltiples y de tecnologías de procesamiento de datos, los satélites Spaceway están a la vanguardia de muchos de los satélites de la siguiente generación en la banda Ka de alta capacidad a entrar al mercado en los próximos dos años. Tales capacidades son el fundamento para un host de características avanzadas, así como redes totalmente malladas con conectividad de un sólo salto entre las terminales de usuario, con perfiles de servicio soportando aplicaciones emergentes. El sistema también brindará monitoreo del desempeño de transmisión, configuración "en el aire" de las terminales de usuario y actualizaciones de software para nuevas características que estarán disponibles para cubrir las necesidades únicas de los proveedores de servicio [10].

El sistema global Spaceway está planeado inicialmente para conformar cuatro sistemas regionales geosíncronos en la banda Ka, cada uno de ellos está basado en un Sistema Central como se muestra en la Figura 2.2.1.1.1, dichos sistemas estarán interconectados vía enlaces interregionales en forma de enlaces intersatelitales o por fibra óptica de acuerdo al mejor ajuste para cada región. En una fase posterior, se tiene esperado que sea proporcionado a través de un sistema no-geoestacionario (NGSO) cuando esto sea económicamente factible [10].

Spaceway, está basado en una avanzada infraestructura de transmisión de paquetes con interfaces de usuario basadas en IP, en terminales satelitales, en interfaces satelitales, en señalización, en seguridad y en la administración de protocolos; todas diseñadas, desarrolladas y listas para proporcionar servicios de conectividad de red punto a punto [10].

2.2.1.2 Modelo de referencia particionado de Servicios y Funciones

La Figura 2.2.1.2.1 define el modelo de referencia de Spaceway con la finalidad de separar o particionar todas las funciones de la red y los servicios requeridos. El modelo identifica tres capas funcionales y operacionales:

- Una capa suministrando servicios al usuario final (ESP),
- Una capa suministrando servicios de red (NSP) y
- Una capa de servicios del núcleo del sistema.

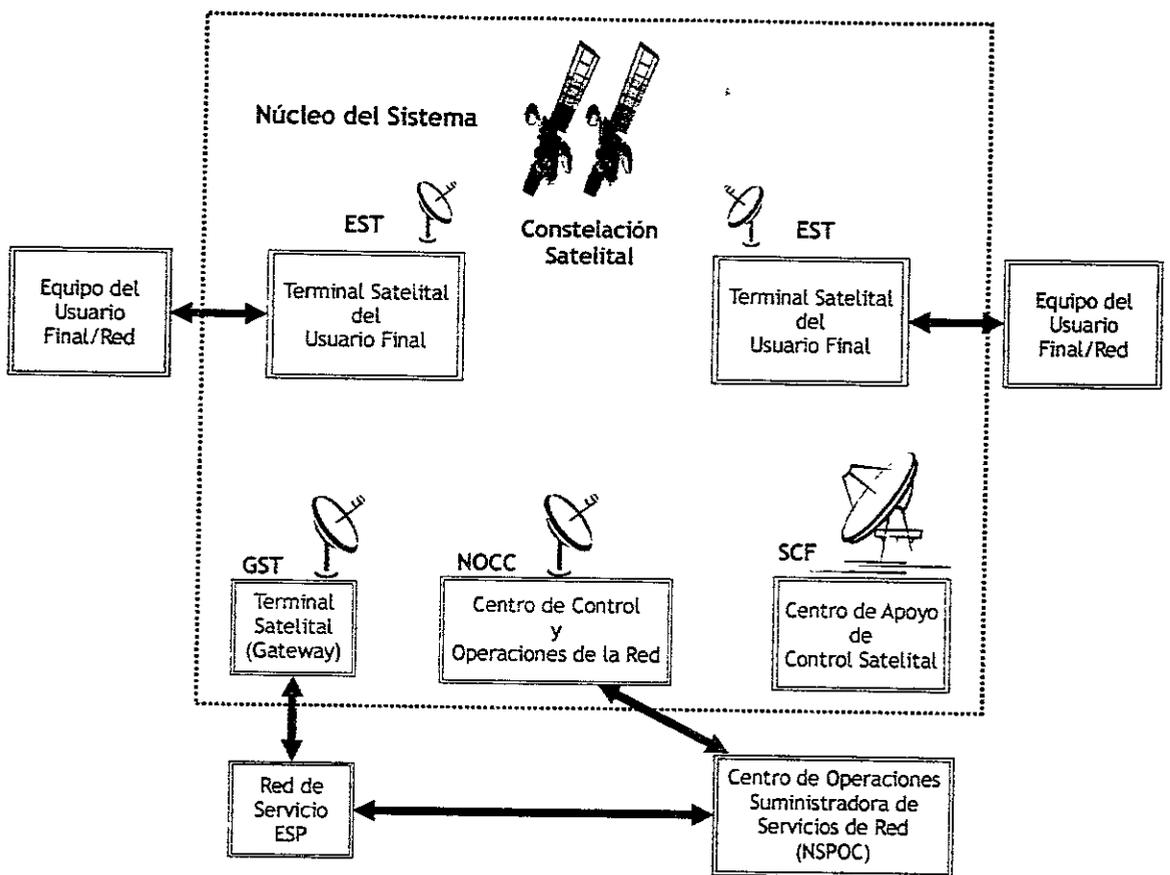


Figura 2.2.1.1.1. Contexto de Spaceway y Elementos del Sistema.

El proceso de comunicación entre capas es sencillo: los usuarios finales reciben ciertos servicios de red y aplicaciones de la capa ESP; la capa ESP recibe ciertos servicios de red de la capa NSP, la cual recibe la entrega de paquetes básicos y los servicios de conectividad de la capa del núcleo del sistema. La combinación de las capas NSP y del núcleo del sistema realizan la mayor parte del proceso de entrega de los servicios brindados por Spaceway [10].

Desde un punto de vista de diseño e implementación, tal como se muestra en el diagrama del sistema de la Figura 2.2.1.2.1, las tres capas de servicios abarcan las funciones siguientes y los elementos del sistema de red:

- La Capa del Núcleo del Sistema incluye a la constelación satelital, un centro maestro y de respaldo para el de control y operación de la red (NOCC); una interfaz común entre las terminales de usuario y el satélite, y otros protocolos de administración y operación de la red. Esta capa proporciona los servicios de conectividad directamente a los usuarios finales individuales en representación de las capas ESP y NSP. Esta también proporciona soporte operacional, cuidado del usuario y registros detallados de uso a la capa NSP.
- La capa NSP es una capa "no-participante", desde el punto de vista de transmisión, en la entrega de los servicios de conectividad actuales hacia la capa ESP y a sus usuarios finales. Sin embargo, la capa NSP complementa las funciones del núcleo del sistema con todos aquellos servicios que juntas entregan a la capa ESP. Estos muy importantes servicios son: intercambio de los

servicios del núcleo del sistema; interconexión técnica y contractual con la capa ESP; suministro, instalación y mantenimiento de las terminales satelitales de usuario; cuidado del cliente a un primer nivel; registros detallados de uso y facturación a la capa ESP, así como muchas otras funciones. En un modelo de negocios, la capa NSP podría ser un cliente de la capa del núcleo del sistema.

- La capa ESP es el cliente de la capa NSP. Ejemplos de ESP's son los propietarios de redes corporativas, ISP's y cualquier entidad que use a Spaceway con el objetivo de vender o suministrar una aplicación de servicio a sus subscriptores o usuarios finales. La capa ESP se interconecta con la capa NSP sólo a un nivel de operación, de soporte y de sistema (OSS). Las funciones de la capa ESP: soportan a clientes de primer nivel hasta usuarios finales; suministro, operación y administración de los servicios de aplicación y la entrega asociada de plataformas y redes, así como la facturación donde sea apropiado.
- Estrechamente atado a la capa ESP se encuentran los usuarios finales. Ellos son los "grupos familiares" individuales o pequeños negocios. Los usuarios finales no están conscientes de la existencia de la capa NSP o de la capa del núcleo del sistema, lo que hace de Spaceway un sistema totalmente transparente al usuario.

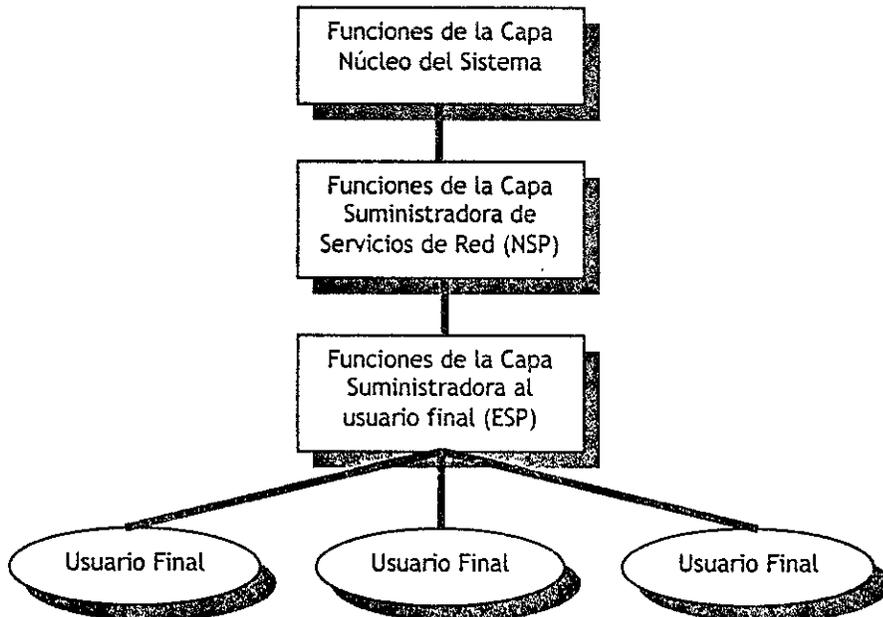


Figura 2.2.1.2.1. Modelo funcional de referencia particionado.

2.2.1.3 Servicios de conectividad y entrega de paquetes

Los servicios de conectividad punto a punto de Spaceway son proporcionados en dos tipos básicos: uno es en la forma de una conexión orientada en circuitos virtuales de tasa fija que pueden ser proporcionados sobre un esquema bajo demanda o programada para aplicaciones de tasas de bit's continuas, orientado a la conexión. El segundo tipo es un servicio de transmisión de paquetes bajo demanda, basado en el volumen, no orientado a la conexión. Una combinación de estos dos tipos puede ser proporcionada como un sistema Frame Relay equivalente [10].

Además de los servicios punto a punto, Spaceway también proporciona servicios de multicast de tasa fija además de transmisiones de área amplia basadas en el volumen [10].

2.2.1.4 Áreas de servicio

La Figura 2.2.1.4.1 ilustra las ranuras orbitales autorizadas para la fase 1 y el número de satélites en cada una de ellas. Cada satélite soporta muchos haces puntuales angostos en su cobertura; los haces de cada satélite en una diferente ranura, estando en una región de varias ranuras, pueden estar superpuestos para la entrega de capacidad adicional si es requerido. El sistema regional para dar cobertura a Norteamérica, todavía en construcción, sitúa un número extenso de haces sobre 48 estados contiguos en Estados Unidos de Norteamérica, además de tener haces cubriendo Hawaii, la mayor parte de Alaska y una cuantas áreas metropolitanas en Latinoamérica [10].

La constelación inicial en Norteamérica estará conformada por dos satélites HS 702 construidos por Boeing Satellite Systems, además de contar con un repuesto en órbita. El sistema empleará procesadores digitales de abordo y tecnología de haces puntuales con conmutación de paquetes para ofrecer comunicaciones punto a punto [Internet 4].

Las ranuras asignadas para el sistema son:

- Ranuras para Norteamérica: 99° O y 101° O (en cada ranura se tendrá un satélite de repuesto) [Internet 4 y 8]
- Ranuras Internacionales: 25° E, 49° O, 111° E (en cada ranura se tendrá un satélite de repuesto en órbita) [Internet 4 y 8]
54° E, 101° E y 164° E (en estas ranuras no se contará con repuestos en órbita) [Internet 4 y 8]

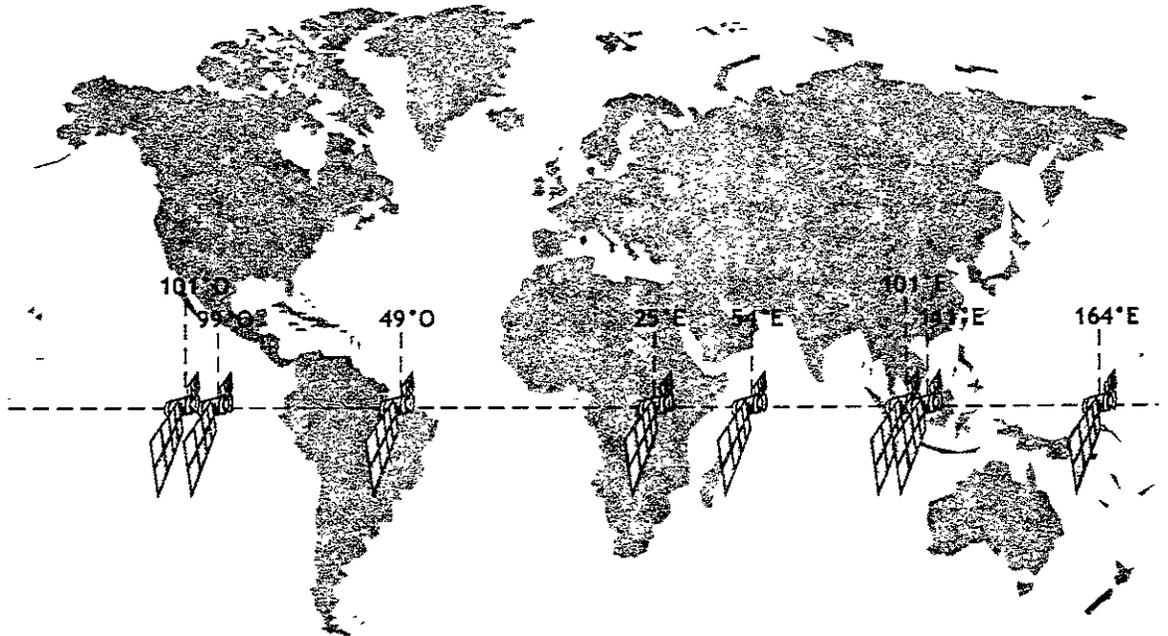


Figura 2.2.1.4.1. Cobertura global Spaceway. Etapa Inicial.

En la Figura 2.2.1.4.2, se muestra artísticamente la región de Norteamérica cubierta por haces puntuales de uno de los satélites [Internet 5].

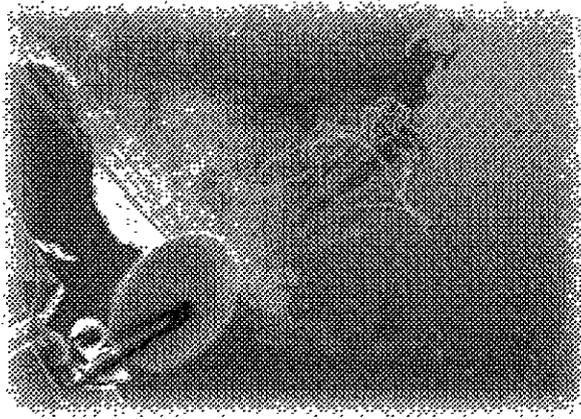


Figura 2.2.1.1.2. Región de Norteamérica.

2.2.1.5 Tecnologías de transmisión

La Figura 2.2.1.5.1 ilustra, en forma resumida, las tecnologías de transmisión satelital y ciertas características de desempeño; todas las terminales satelitales emplean la misma interfaz satelital usando transmisiones FDMA-TDMA en el enlace de subida y TDMA en el enlace de bajada. Diferentes tamaños de la plataforma de transmisión soportan ráfagas de datos usuario de pocos a varios kilo bits por segundo [10].

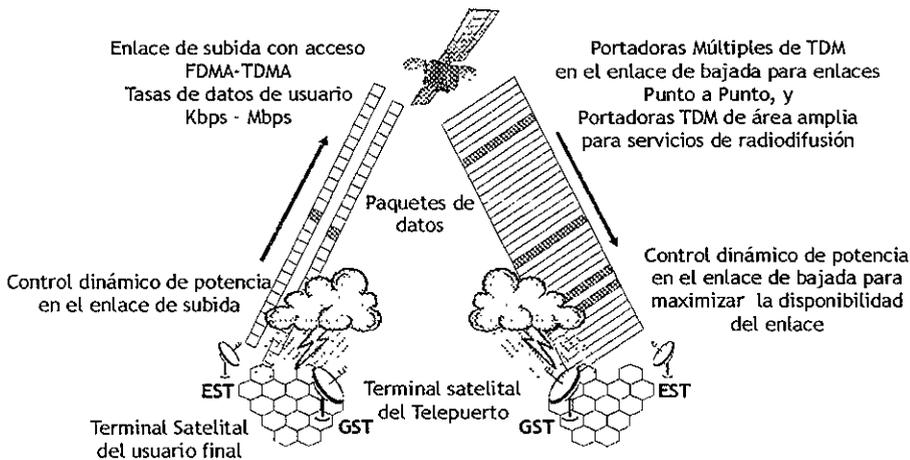


Figura 2.2.1.5.1. Tecnologías de transmisión Spaceway.

Por otra parte, el satélite y el NOCC administran la asignación del ancho de banda del enlace de subida en cada haz de los usuarios individuales tal como sea requerido. Los paquetes

Spaceway recibidos en el satélite de todos los haces son recuperados y conmutados a sus haces de enlace de bajada de destino; esto es logrado gracias a campos de direccionamiento en el encabezado de los paquetes. Los paquetes con destino en el mismo haz de destino son agrupados y transmitidos en la dirección del enlace de bajada a través de ráfagas de portadoras TDM de muy alta velocidad. Para lograr esto, ambos tipos de terminales gateway y de usuario final dinámicamente comparten el ancho de banda total disponible como sea necesario para soportar el flujo de tráfico en cada dirección [10].

2.2.1.6 Características de los satélites y bandas de operación

A través del uso de avanzadas tecnologías de antena, cada satélite Spaceway (modelo Hughes HS702) soporta un gran número de haces puntuales angostos. Esos haces pequeños son necesarios para permitir que las terminales de usuario alcancen las altas tasas de transmisión deseadas a través del uso de amplificadores para la banda Ka de bajo costo. La capacidad total del satélite es obtenida con una muy alta disponibilidad del enlace para varios tamaños de antena de usuario final en las regiones de lluvia A-M de la ITU, bajo todas las condiciones de clima a través de avanzados mecanismos de control automático de potencia en los enlaces de subida y de bajada [10].

Los satélites que conforman la red Spaceway tienen una capacidad de 500 [MHz] de espectro en cada polarización, lo que brinda una capacidad total de 1,000 [MHz] de ancho de banda. Cada satélite soporta 68 transpondedores, 64 de los cuales ocupan 125 [MHz] (capacidad destinada a las terminales de usuario) y 2 ocupando 250 [MHz] (capacidad destinada a los gateway's), permitiendo así un mejor reuso de frecuencias. Dichos transpondedores operan en haces puntuales angostos con un PIRE (Potencia Radiada Efectiva Isotrópica) de 59 [dBW] y haces puntuales anchos con un PIRE de 52.3 [dBW], alineados para cubrir grandes regiones visibles a los satélites. Por otra parte, los satélites permiten la comunicación entre ellos mismos gracias al uso de enlaces intersatelitales en la banda de los 60 [GHz] con una tasa de datos de 1 [Gbps] [9].

Los servicios de comunicación serán proporcionados a tasas que van desde los 16 [Kbps] hasta 1.544 [Mbps] a través de las terminales de usuario con antenas en el rango de los 66 hasta los 200 [cm] de diámetro. Además cuentan con amplificadores para el enlace de subida de hasta 2 [W]. Gracias a un procesamiento de a bordo de los paquetes llegando al satélite se puede para enrutar y juntar el tráfico entre los haces en cualquier transpondedor dentro de un flujo de 92 [Mbps] [9].

El control de potencia del enlace de subida de las terminales de usuario está diseñado para combatir la atenuación por lluvia. Cuando una terminal es operada a 0.5 [W] una atenuación por lluvia de 7.6 hasta 2.6 [dB] puede ser superada en el haz angosto, considerando estos valores del centro al límite de cobertura respectivamente. Para el haz ancho, las atenuaciones que pueden ser superadas van de 6.7 hasta 1.7 [dB]. Estos valores están considerados para una tasa de 384 [Kbps] [9].

Además de las altas tasas de transmisión instantáneas (throughput), los satélites Spaceway están diseñados para ofrecer un alto grado de flexibilidad para los operadores del sistema de acuerdo a las demandas de cambio del mercado, las claves para lograr esto son:

- Asignación de la capacidad total entre haces,
- Asignación de la capacidad entre los enlaces punto a punto,
- Servicios de multicast (multidifusión) y de área amplia,
- Asignación y administración de la capacidad por las capas NSP y ESP,

- Listas de grupos de usuarios con multicast configurable,
- Algoritmos de control de potencia y,
- Un host con otras características.

Todo esto permitirá que los operadores del sistema utilicen de una mejor manera la capacidad satelital en cualquier tiempo de acuerdo a la demanda de cambio en mercados mezclados y en sitios geográficos [10].

En la Figura 2.2.1.6.1 se muestra una vista artística de un satélite Spaceway.

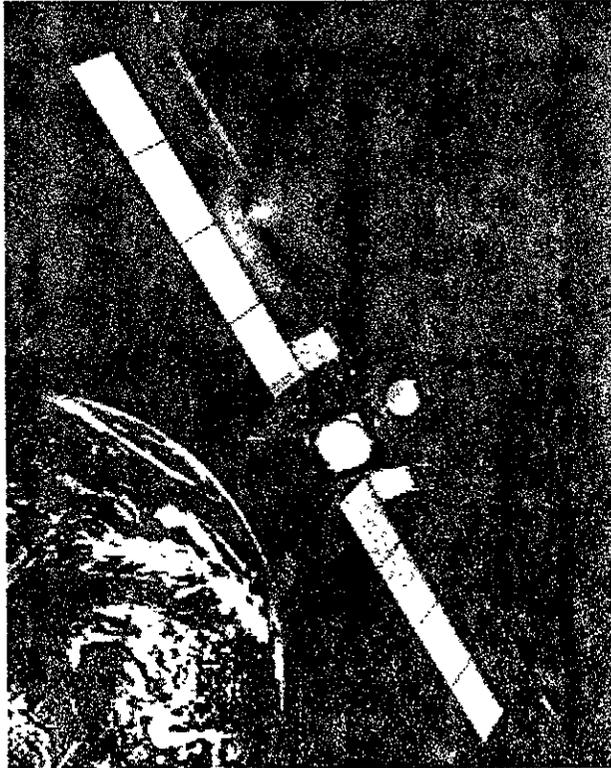


Figura 2.2.1.6.1. Satélite Spaceway.

Por otra parte, con base en la Orden y Autorización liberada por la FCC el 31 de enero del año 2001, se establecen los lineamientos técnicos que regirán al sistema Spaceway para la autoridad para construir, lanzar y operar un sistema satelital en la banda Ka para el servicio satelital fijo (FSS) en la órbita geostacionaria. Dichos lineamientos se muestran a continuación:

- Autorización para operar en el rango de frecuencias 28.35 [GHz] - 28.6 [GHz] y 29.25 - 30.0 [GHz] para los enlaces de transmisión, pertenecientes al espectro de la banda Ka [11].
- Autorización para operar en el rango de frecuencias 19.7 [GHz] - 20.2 [GHz] y 18.3 [GHz] - 18.8 [GHz] para los enlaces de recepción, también pertenecientes al espectro de la banda Ka [11].
- Se asignan las bandas de 54.25 [GHz] - 56.90 [GHz], 57.0 [GHz] - 58.2 [GHz] y 65.0 [GHz] - 69.05 [GHz] para la operación de enlaces intersatelitales, siempre y cuando exista una coordinación con el Subcomité de Asignación de Frecuencias del Comité

Consultivo de Radio Interdepartamental de la NTIA (NTIA's Interdepartment Radio Advisory Committee's Frequency Assignment Subcommittee), quien tiene la misión de administrar estas bandas para este y otros sistemas que actualmente se encuentran desarrollando enlaces intersatelitales; tal es el caso de Teledesic [11].

Además, para no perder la licencia otorgada es imperativo llevar a cabo los siguientes puntos:

- Comienzo de construcción [11]:

Primer satélite	Enero 2002
Satélites restantes	Enero 2003

- Lanzamiento y operación [11]:

Satélite autorizado en 101° O	Junio 25, 2005
Satélite autorizado en 99° O	Junio 25, 2005
Satélite autorizado en 49° O	Julio 2, 2005
Satélite autorizado en 25° E	Octubre 10, 2004
Satélite autorizado en 54° E	Julio 9, 2005
Satélite autorizado en 101° E	Julio 16, 2005
Satélite autorizado en 111° E	Octubre 10, 2004
Satélite autorizado en 164° E	Julio 23, 2005

2.2.1.7 Ruteo de paquetes IP

Spaceway es totalmente adecuado para todo tipo de ambientes en redes IP debido a que fue diseñado como una plataforma de transmisión de paquetes basada en datagramas, y con capacidades especiales de carga útil satelital. Con esta misma consideración, la interfaz de línea entre las terminales Spaceway y el equipo de usuario o de red es totalmente estándar al protocolo Ethernet/IP; esto es, lo que observan los usuarios finalmente es un protocolo IP de entrada y salida. Cada paquete IP de usuario entrando al puerto-usuario de la terminal satelital tendrá sus campos de lectura de encabezado de IP y, después de proporcionar un manejo adecuado para las mediciones del servicio específico, será encapsulado en uno o más paquetes Spaceway (SP) de longitud fija según sea el caso. Cada paquete SP tiene un campo de direccionamiento de terminal Spaceway dentro del encabezado, el cual lo identifica como una terminal única registrada en el sistema. Agregado como parte de este campo de direccionamiento se encuentra un subcampo de enrutamiento satelital, el cual identifica la localidad del haz de la terminal en el área de cobertura satelital destino [10].

Por ejemplo, para un paquete IP que será entregado de una terminal originadora a una terminal de destino, una interpretación de una dirección IP a una dirección Spaceway debe tomar lugar. Esta función de resolución es desarrollada de una manera distribuida en la terminal originadora y en el NOCC. La función de enrutamiento que es desarrollada en cada terminal emplea el Protocolo de Información Ruteo (RIP) para intercambiar información de ruteo con otras terminales de la misma red IP a través del NOCC. Los segmentos de cada paquete IP son así entregados a la terminal de destino y son reensamblados en un paquete IP original, el cual entonces es introducido en la red adjunta para continuar su viaje hacia la red final IP y, finalmente, al host del usuario final. Esta capacidad permite soportar fácilmente ambientes en redes IP [10].

2.2.1.8 Administración de operaciones y control del sistema

Para complementar y entregar todo lo expuesto anteriormente, el sistema confía altamente en un complemento amplio de funciones de administración y operación que son estratégicamente distribuidas y desarrolladas primariamente en el NOCC, en la carga útil del satélite y en las terminales satelitales [10].

La Figura 2.2.1.10.1 ilustra el contexto de esta interacción de funciones entre todos los elementos y entidades involucradas en la entrega de los servicios Spaceway a los ESP's y a sus usuarios finales [10].

2.2.1.9 Características de la calidad del servicio

Finalmente, el sistema Spaceway proporciona muchas características de servicio que permiten a proveedores de servicios de usuarios finales administrar mediciones de comunicaciones variadas para cada usuario final. Con el objetivo de conocer las necesidades del usuario final para muchos tipos de terminales y aplicaciones, las cuales correrán sobre la red Spaceway, el sistema desarrolla cualquiera de las dos clases de identificación o clasificación en los bit's TOS (Diferenciación del servicio) en los paquetes IP. Esto es hecho para planificar flujos de entrada del tráfico de usuario en los servicios de transporte apropiados de Spaceway. Un perfil de nivel de servicio configurable cargado en cada terminal Spaceway también permite las restricciones en el manejo de transmisiones, seguridad y conectividad para cada usuario [10].

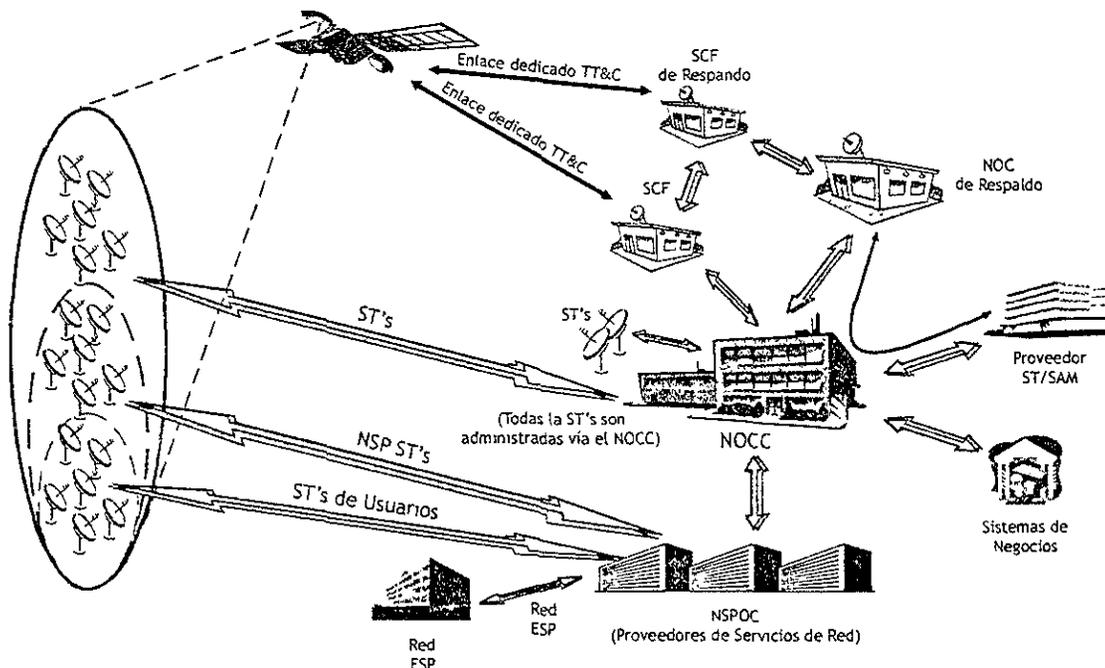


Figura 2.2.1.9.1. Administración del Sistema de Control y Operaciones.

2.1.5. Astrolink

La licitación para el uso de la banda Ka del sistema Astrolink fue propuesta a la FCC en Septiembre de 1995 por Lockheed Martin Corporation; en Diciembre de 1997, la licencia para llevar nueve satélites en cinco órbitas geosíncronas (Figura 2.2.2.1) fue concedida. Sin embargo, varios análisis y procesos de negociación, regulación y desarrollo del sistema fueron llevados a cabo por Lockheed Martin, TRW y Telespazio hasta Julio de 1999 cuando finalmente se formó el grupo Astrolink International LLC [12].

2.2.2.1 Introducción

La red Astrolink proporcionará a los usuarios un acceso de interconectividad global y directa a servicios multimedia e Internet de banda ancha; esta red tiene como objetivo interconectar redes de banda ancha terrestres a través de una constelación satelital con hasta nueve satélites geosíncronos en cinco ranuras orbitales actualmente autorizadas alrededor de la faz de la Tierra. Se tiene planeado que esta red comenzará a operar en el año 2003 [12].

A través de la selección de la órbita geosíncrona, Astrolink podrá proporcionar capacidad para transmitir y recibir a aproximadamente un cuarto de la superficie terrestre con cada uno de sus satélites. El sistema realiza estas transmisiones y recepciones por medio de 46 haces puntuales con 0.8° de ancho de haz en la banda Ka, cada uno proporcionando cerca de 200,000 kilómetros cuadrados de área geográfica [12].

Astrolink proporcionará un servicio de transmisión de dos vías de banda ancha a cada uno de sus usuarios; esta capacidad será proporcionada con la instalación de una terminal Astrolink compuesta de una pequeña antena parabólica (65, 85 o 125 [cm], según lo determine el cálculo de enlace), operando a niveles de potencia que pueden ir desde 0.25 a 10 [W] con tasas de transmisión entre 16 [Kbps] hasta 9.216 [Mbps] y una unidad electrónica interior. Estas terminales se interconectarán con la red conmutada terrestre a través de telepuertos satelitales, los cuales emplean antenas de 2.4 hasta 4.5 [m] de diámetro con amplificadores de 200 [W] de potencia [9 y 12].

Astrolink emplea al Modo de Transferencia Asíncrono (ATM) para interconectar a sus terminales y gateway's. La conexión del usuario a otras terminales Astrolink, así como también a Internet a través de los gateway's proveedores de servicio de Astrolink, es logrado gracias a los procesadores satelitales de a bordo y a conmutadores ATM. Este diseño de "conmutador en el cielo" ATM asegura que Astrolink tenga una ventaja competitiva en el suministro de un acceso global a una red totalmente mallada; esto gracias a las propiedades de ATM en donde se puede brindar ancho de banda bajo demanda, directamente al usuario [12].

2.2.2.2 Información general del sistema

Astrolink es una infraestructura global de telecomunicaciones que forma parte de una red satelital y se complementa a través de la interconexión con redes terrestres proporcionando servicios bajo demanda de banda ancha y multimedia; a través de una constelación de satélites geosíncronos en la banda Ka (20 [GHz] para el enlace de bajada/30 [GHz] para el enlace de subida). Los cuatro primeros satélites Astrolink y sus componentes asociados están actualmente en construcción con un servicio comercial planeado para el año 2003 [12].

En la Figura 2.2.2.2.1 se muestran las asignaciones orbitales geosíncronas de la constelación Astrolink.

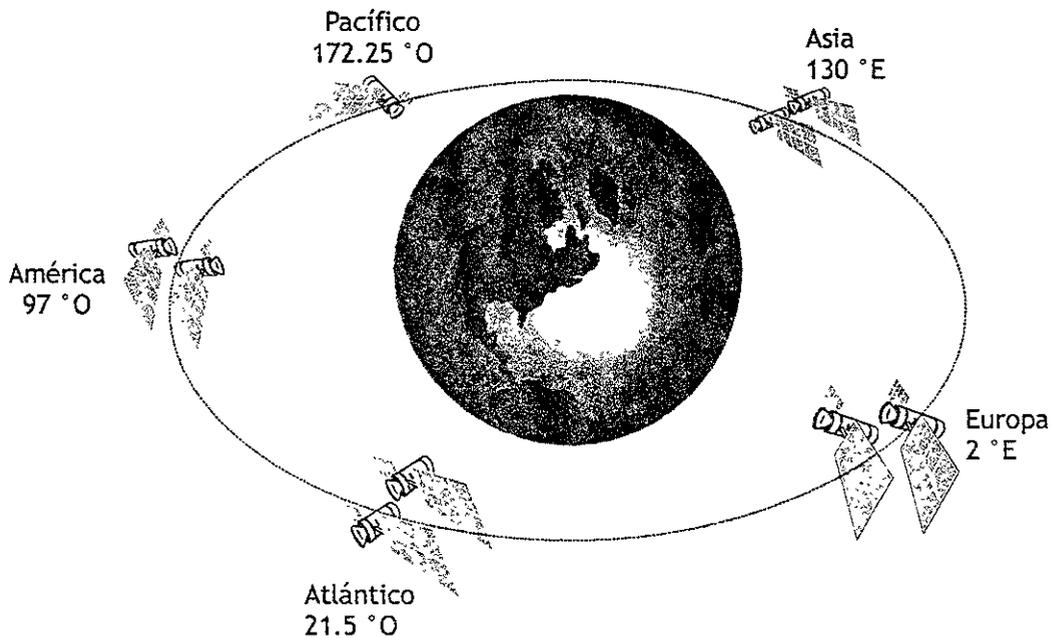


Figura 2.2.2.2.1. Asignaciones orbitales geosíncronas para la constelación Astrolink.

La constelación Astrolink está diseñada para cubrir las siguientes áreas geográficas:

- Norte y Sur de América usando satélites desplegados en 97° O,
- Europa, África y el Medio Este usarán satélites en 2° E,
- Asia y Australia usarán los satélites en 130° E,
- Los satélites en el Atlántico estarán en 21.5° O y podrán cubrir porciones de las costas del Este de Estados Unidos de Norteamérica, Sudamérica, África y Europa,
- La ranura en el Pacífico en 175.25° O permitirá cobertura adicional al borde del Océano Pacífico.

La Figura 2.2.2.2.2 muestra la arquitectura de la red terrestre soportando a una constelación inicial de cuatro satélites, la cual está actualmente en construcción. La infraestructura terrestre asociada consta de un Centro de Control de Operaciones Satelitales (SOCC) primario y otro de respaldo, tres estaciones de Seguimiento, telemetría y Comando (TT&C), un Centro de Control de Red Maestro (MNCC), cuatro Centros de Control de Red Regionales (RNCC) y de cuatro estaciones de Enlace Terrestre Intersatelital (ISGL) [12].

La Facilidad de Control Satelital (SCF) asegura que la salud y seguridad del satélite a través del uso de sus SOCC's primario y respaldo soportado por tres estaciones TT&C). El MNCC proporciona servicios al usuario y funciones de facturación. La planificación de recursos de comunicación y asignación, control de congestión, control de llamadas y administración de la red para cada región satelital son desarrollados por los RNCC's. Los satélites son enlazados a través de los ISGL's para proporcionar una red de telecomunicaciones global [12].

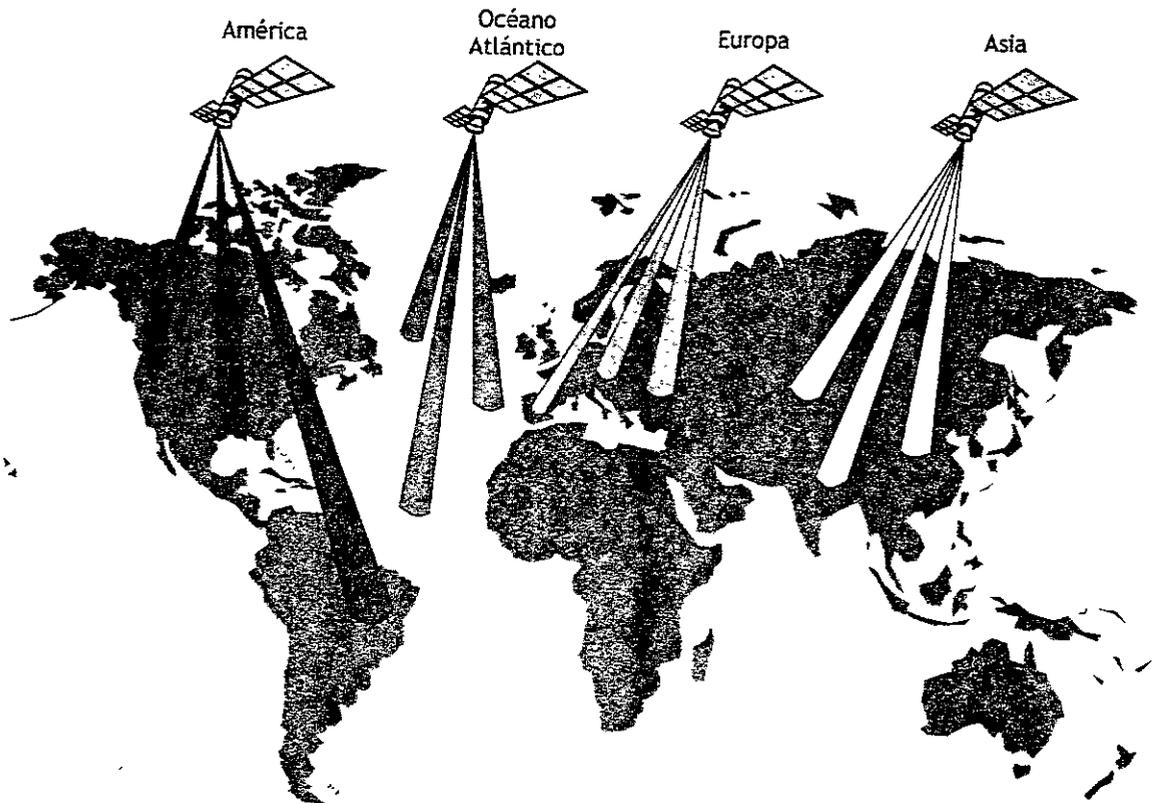


Figura 2.2.2.2.2. Arquitectura de red inicial Astrolink.

2.2.2.3 Sistema de comunicaciones y conmutación ATM distribuida

El sistema de comunicaciones y de conmutación ATM distribuido es uno de los más importantes para el sistema. Dentro de este sistema el procesamiento de la carga útil es facilitado en una gran extensión por el uso de una codificación corrección de errores adaptiva tanto para los enlaces de subida como para los enlaces de bajada. La codificación adaptiva ha sido ampliamente comprobada en el sistema experimental ACTS de la NASA debido a que este tipo de codificación facilita el uso eficiente del espectro de la Banda Ka y la potencia del satélite; estos son aspectos muy importantes desde un punto de vista económico [12].

La carga útil satelital fue diseñada para proporcionar una alta disponibilidad del servicio, una alta capacidad del sistema y permitir el uso de terminales de usuario a un costo efectivo. Los elementos clave de la carga útil de los satélites Astrolink son las antenas multihaz de alto desempeño y el uso del empaquetamiento de la microelectrónica de estado del arte aplicados a los diseños de Circuitos Integrados de Aplicación Específica (ASIC). Dentro de las características de estos diseños se pueden resaltar los siguientes puntos:

- Permiten la concentración de alta capacidad de tráfico con la ayuda de haces puntuales con la mira en mercados específicos,
- Flexibilidad para dinámicamente reasignar capacidad debido al cambio de los mercados

Por otra parte, el sistema tiene la capacidad de brindar un procesamiento de la alta capacidad de a bordo para ofrecer costos efectivos y, además, posee un sistema de conmutación ATM

para una conectividad del sistema totalmente mallado y de ruteo inteligente; esta capacidad se encuentra en la demodulación simultánea y en una decodificación de corrección de errores; decodificando alrededor de 7400 canales de subida, en donde cada uno de esos canales son accesados por terminales Astrolink usando un Acceso Múltiple por División en el Tiempo (TDMA) como se describe más adelante. Gracias a que los datos que son decodificados se encuentran en forma de celdas ATM, estos pueden ser conmutados en los haces de bajada [12].

2.2.2.3.1 Estructura de acceso múltiple, reuso de frecuencias y codificación adaptiva

Cada satélite Astrolink tiene asignado un espectro de 1.0 [GHz]; 500 [MHz] son para los enlaces de subida y 500 [MHz] para los enlaces de bajada, para el manejo del tráfico proveniente de las terminales; para el caso de los telepuertos regionales la misma capacidad es utilizada [12].

El espectro de frecuencias utilizado en las terminales es adicionalmente dividido en un plan de reuso de frecuencias de cuatro vías, con cada Canal de Comunicaciones Astrolink (ACC) asignado con un ancho de banda de 125 [MHz]; con esto se obtienen hasta ocho ACC's que puede ser asignados a un haz satelital [12].

Como se ilustra en la Figura 2.2.2.3.1.1, una terminal ACC puede ser dividida hasta en 7 canales clase C, los cuales pueden ser subdivididos en 5 canales clase B y cada canal clase B es subdividido en 5 canales clase A para un total de 175 canales clase A por ACC [12].

Para el caso del espectro de frecuencias empleado en los gateway's, se emplea un plan de reuso de frecuencias de 7 vías con cada Gateway ACC subdividido en 7 canales clase C [12].

Astrolink es capaz de multiplexar estadísticamente 149 [Mbps] (empleando celdas ATM de 48 bytes) en cada ACC del enlace de subida. Para el enlace de bajada se tiene una capacidad de 113 [Mbps] en cada ACC [12].

Referente al manejo de datos en banda base, los datos de la terminal son modulados en una portadora única empleando una modulación QPSK con un muestreo de Nyquist. Para cada terminal ACC, las terminales Astrolink emplean un Acceso Múltiple por División en el Tiempo de Frecuencia Múltiple (MF-TDMA) en donde las terminales activas tienen ranuras de tiempo asignadas en tramas de subida; cada trama tiene una duración de aproximadamente 90 [ms] [12].

Las terminales emplean una codificación en el enlace de subida adaptivamente concatenado con un código exterior Reed Solomon (RS) [236,212] y con un código biortogonal interior Reed Mueller [8,4,4]. La baja complejidad del código interior es empleada adaptivamente como sea necesario para disminuir la atenuación por lluvia [12].

La codificación en el enlace de bajada también es concatenada con un código exterior Reed Solomon. Durante una operación a cielo despejado (condiciones de baja atenuación por espacio libre), el código RS es concatenado con un código convolucional perforado de tasa $\frac{3}{4}$. Para adaptarse a eventos de desvanecimiento por lluvia, el código interior es cambiado a un código perforado de tasa $\frac{3}{8}$ [12].

La Figura 2.2.2.3.1.2 ilustra las funciones de administración y señalización involucradas en la codificación adaptiva hacia los recursos de codificación adaptiva a través de canales de señalización hacia el RNCC. El RNCC determina los cambios de la configuración de la red necesarios para conceder peticiones de codificación adaptiva y, además, alerta a las terminales

apropiadas de cambios cuando ello aplique. Cada terminal determina la existencia de desvanecimiento por lluvia y selecciona el nivel de potencia apropiado e inicia una petición para elevar o disminuir la codificación [12].

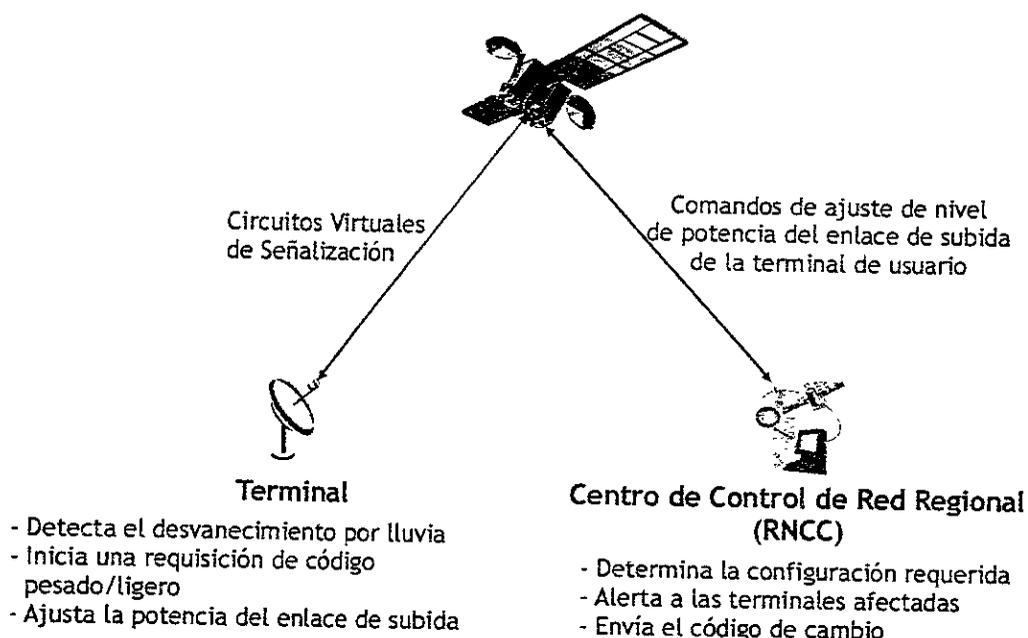


Figura 2.2.2.3.1.2. Funciones de administración y señalización de la codificación adaptiva Astrolink.

2.2.2.3.2 Conmutación ATM distribuida

Los recursos manejados por el sistema de administración de los recursos de comunicación generalmente caen en dos categorías: a largo plazo y a corto plazo. Todos los recursos del conmutador y sus puertos de procesamiento de entrada son administrados y controlados por el RNCC. El concepto para el control del conmutador de abordaje a través del RNCC es ilustrado en la Figura 2.2.2.3.2.1 [12].

Una relativa administración de recursos a largo plazo es aplicada a la canalización y despliegue asociado de demoduladores y decodificadores (ver Figura 2.2.2.3.1.1). Los cambios en las 58 tablas de conmutación son realizados en una tasa alta determinada por la aceptación de llamada y de la tasa de llamadas caídas del elemento de administración del Control de Admisión de Llamadas (CAC) y por el escenario de codificación adaptivo. La política de la administración del CAC es asignar equitativamente ancho de banda y recursos de almacenamiento para los circuitos virtuales de usuario [12].

Parámetro	Enlace de subida	Enlace de bajada	Características
Formato	FDM-TDM	TDM	El formato soporta ancho de banda bajo demanda
Modulación	QPSK	QPSK	
Canalización	<p>Enlace de subida G/W AT</p> <p>28.35 [GHz] 28.60 [GHz] 29.50 [GHz] 30.00 [GHz]</p> <p>125 [MHz] 125 [MHz]</p> <p>7C Canales de 17.6 [MHz]</p>	<p>Enlace de bajada G/W AT</p> <p>18.30 [GHz] 18.80 [GHz] 19.70 [GHz] 20.20 [GHz]</p> <p>250 [MHz] 250 [MHz]</p>	Tres tasas de ráfagas permiten la selección del ancho de banda/potencia de la terminal de acuerdo a las necesidades del usuario
Sub-Canalización	<p>5 B's en cada C Canales de 3.5 [MHz]</p> <p>5 A's en cada B Canales de 0.7025 [MHz]</p>	<p>Salteados en las siguientes combinaciones (%)</p> <p>(25/75, 33.3/66.6, 50/50, 100/0)</p>	Forma de onda AT-G/W incrementa la flexibilidad de acuerdo al desarrollo futuro del usuario
Corrección de errores por adelantado	Codificación/Decodificación de a bordo	Codificación/Decodificación de a bordo	Alta calidad del servicio proporcionado por técnicas avanzadas de codificación de datos
Código de entrada	Ninguno (Ligero), Reed Muller (Pesado)	Convolutional (3/4 Ligero, 3/8 Pesado)	
Código de salida	Reed Solomon	Reed Solomon	
Código adaptivo	Hasta un 100% de Canales	Hasta un 100% de Canales	
Tamaño de la celda codificada	4 celdas ATM	4 celdas ATM	

Figura 2.2.2.3.1.1. Canalización Astrolink.

2.2.2.3.3 Interfaz terminal y administración del ancho de banda

Las terminales de usuario Astrolink son parte del conmutador ATM distribuido. Ellas manejan los circuitos virtuales, los cuales están asociados con fuentes de entrada a la terminal y las cuales son asignadas a ellas vía el CAC. La administración del ancho de banda llevado hacia la terminal de usuario es una parte integral de la ganancia del multiplexaje estadístico global, hecho posible a través del uso de ATM [12].

Las funciones de administración de circuitos virtuales de la terminal de usuario incluyen un control de parámetros de usuario (UPC). El UPC incluye el modelado de las estadísticas fuente, por ejemplo, modelado del ancho de banda y monitoreo, el cual revisa los flujos de las celdas de usuario contra de los parámetros de tráfico negociado [12].

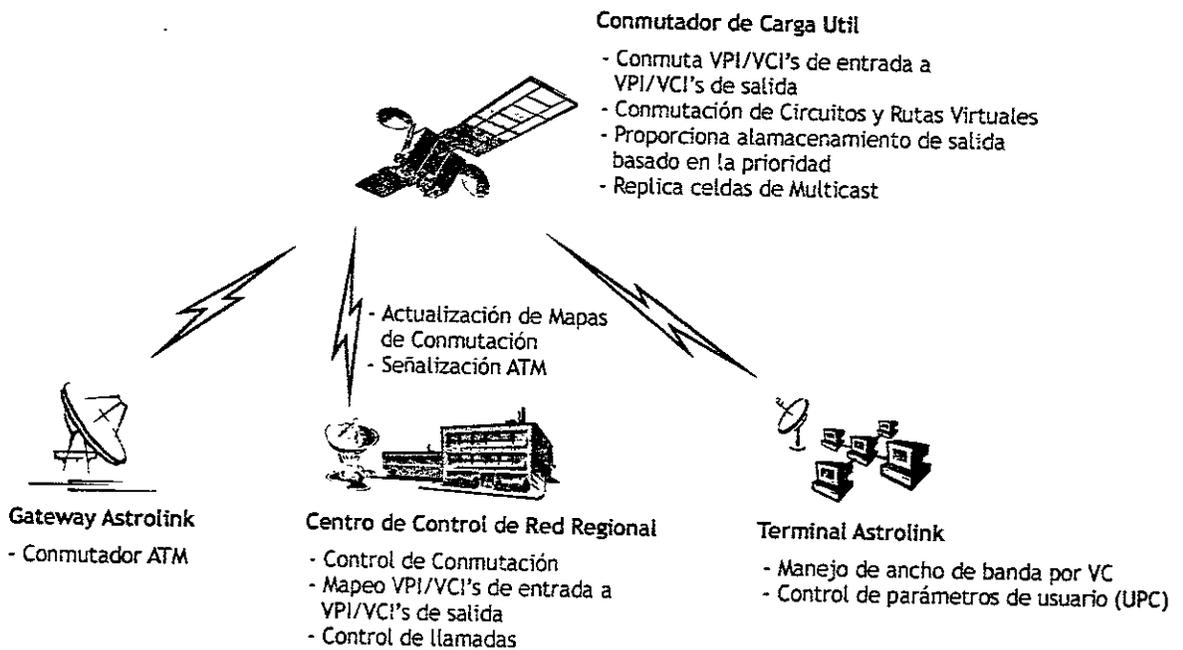


Figura 2.2.2.3.2.1. Conmutación ATM distribuida.

2.1.6. Características más importantes de los sistemas GEO globales de banda ancha: Spaceway y Astrolink

A continuación, en la Tabla 2.1.3.1, se muestran las características más importantes de los dos sistemas satelitales GEO descritos anteriormente.

2.1.3.1 Tabla de las características más importantes de los sistemas GEO globales de banda ancha: Spaceway y Astrolink

	SPACEWAY	ASTROLINK
Tipo de usuarios	ISP's y ASP's	ISP's
Número de satélites	20 satélites en 15 ranuras orbitales	9 en 5 ranuras orbitales
Ranuras orbitales geoestacionarias	9 inicialmente, 15 a futuro	5
Altitud nominal de los satélites	35,786 [Km] (GEO)	35,786 [Km] (GEO)
Región de cobertura	Norte América - 99° O y 101° O 49° O, 25° E, 111° E, 54° E, 101° E y 164° E	América - 97° O Pacífico - 172.25° O Atlántico - 21.5° O Asia - 130° E Europa 2° E
Banda de frecuencias de operación	Ka	Ka
Frecuencias para el enlace de subida	28.35 [GHz] - 28.6 [GHz] 29.25 [GHz] - 30.0 [GHz]	28.3[GHz] - 30 [GHz]
Frecuencias para el enlace de bajada	19.7 [GHz] - 20.2 [GHz] 18.3 [GHz] - 18.8 [GHz]	18.30 [GHz] - 20.20 [GHz]
Diámetro de la antena del usuario	66 [cm] - 200 [cm]	65 [cm], 85 [cm], 125 [cm]
Tipo de enlaces Intersatelitales	Enlaces intersatelitales (ISL's)	Enlaces intersatelitales Terrestres (ISLG's)
Frecuencia para los enlaces intersatelitales	60 [GHz]	No disponible en la literatura abierta
Capacidad de los enlaces intersatelitales	1 [Gbps]	No disponible en la literatura abierta
Número de saltos para los enlaces intersatelitales	4 satélites	No disponible en la literatura abierta
Tasa de datos para el enlace de subida	16 [Kbps] - 1.544 [Mbps]	16 [Kbps] - 9.216 [Mbps]
Protocolos de usuario	Frame Relay, ATM, IP, ISDN, X.25	Frame Relay, ATM, IP, SONET
Protocolos del sistema	Conexión orientada a circuitos Conexión orientada a paquetes	ATM

CAPÍTULO 2

Aplicaciones de usuario	Internet de banda ancha, intranet's corporativas, multimedia, interconexión de redes LAN, multicast, etc.	Internet de banda ancha, intranet's corporativas, videoconferencia, videotelefonía, telemedicina, comercio electrónico, etc.
Tipo de antenas satelitales	Antenas de haces puntuales angostos	Antenas de haces conmutados (hopping beams)
Método de acceso	FDMA-TDMA (enlace de subida) TDM (enlace de bajada)	MF-TDMA (enlace de subida) TDMA (enlace de bajada)
Polarización	No disponible en la literatura abierta	Polarización Lineal Ortogonal
Tipo de cobertura	Global	Global
Latencia mínima aproximada	239 [ms] (medio circuito) 478 [ms] (circuito completo)	239 [ms] (medio circuito) 478 [ms] (circuito completo)
Conmutación de abordó	Conmutación de paquetes	ATM
Inicio de operaciones	2003 - 2004	2003 (región Norteamérica)
Vida útil de los satélites	15 años	12 años

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

2.3. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Petterson, D.P., "Teledesic: A global broadband network", Aerospace Conference, 1998 IEEE. Volume: 4, 1998, Page(s): 547-552 vol. 4
- [2] Recommendation ITU-R S.1327: Requirements and suitable bands for operation of the inter-satellite service within the range 50.2-71 GHz. 1997, ITU.
- [3] Keller, H.; Salzwedel, H.; Schorcht, G.; Zerbe, V., "Geometric aspects of polar and near circular orbits for the use of intersatellite links for global communication", Vehicular Technology Conference, 1998, VTC 98, 48th IEEE. Volume: 1, 1994. Page(s) 81-85 vol. 1.
- [4] Keller, H.; Salzwedel, H., "Comparison of the probability of visibility of new planned mobile satellite systems (M-star, Celestri, Skybridge)", Vehicular Technology Conference, 1998, VTC 98, 48th IEEE. Volume: 1, 1994. Page(s) 199-203 vol. 1.
- [5] Wood, L., "Network performance of non-geostationary constellations equipped with intersatellite links", 1995. University of Surrey, U.K.
- [6] Sturza, M.A., "The Teledesic Satellite System", Telesystems conference, 1994. Conference Proceedings., 1994 IEEE National. 1994. Page(s): 123-126.
- [7] Kreutel, R. W., "Antennas for the Teledesic System", Antennas and Propagation Society International Symposium, 1998. IEEE. Volume: 1. 1998. Page(s): 6 vol. 1.
- [8] Fraise, P.; Coulomb, B.; Monteuis, B.; Soula, J., "SkyBridge LEO satellites: Optimized for broadband communications in the 21 st century", L. Aerospace Conference Proceedings, 2000 IEEE. Volume 1, 2000, Page(s): 241-251 vol. 1
- [9] Evans, J. V., "The U.S. Filings for multimedia satellites.; International Journal on Satellite Communications", John Wiley & Sons, Ltd. Page(s): 121-160. Vol. 18, Issue 3, 2000
- [10] Sarraf, J., "The Spaceway (TM) system: a service providers' perspective", Broadband Satellite: The Critical Success Factors - Technology, Services and Markets (Ref. No. 2000/067), IEE Seminar on , 2000 , Page(s): 15/1 -15/6
- [11] "Application for Authority to Construct, Launch, and Operate a Ka-band Satellite System in the Fixed-Satellite Service", FCC International Bureau. Jan 31, 2001.
- [12] Gobbi, R.L.; Grant, J.D.; Rosener, D.S.; Ming Liu., "Astrolink: an evolutionary telecommunications venture", Broadband Satellite: The Critical Success Factors - Technology, Services and Markets (Ref. No. 2000/067), IEE Seminar on , 2000 , Page(s): 9/1 -9/9
- [Internet 1]. <http://www.teledesic.com/tech/tech.htm>
- [Internet 2]. http://www.teledesic.com/newsroom/articles/2000-7-11_ITGLinvestment.htm
- [Internet 3]. <http://www.alcatel.com/telecom/space/>
- [Internet 4]. <http://www.hns.com/spaceway/index.htm>
- [Internet 5]. <http://www.hns.com/spaceway/advantages.htm>

3. EFECTOS DE PROPAGACION, ATENUACION E INTRODUCCION DE RUIDO EN SATELITES LEO EN LA BANDA KA

3.1 INTRODUCCION

La nueva generación de sistemas satelitales, también denominada "redes satelitales de banda ancha o multimedia", proveerán un amplio rango de servicios interactivos a usuarios terminales en hogares o negocios al proveer interconectividad total. Estas redes satelitales multimedia usarán, para proveer servicios de banda ancha, tecnologías como: antenas múltiples de haces puntuales de alta ganancia, procesamiento y conmutación a bordo y enlaces intersatelitales. Es por esto que para ofrecer estos servicios de comunicación de datos se utilizarán bandas de frecuencia como la Ka; debido a la ya congestión en la banda C y Ku. Asimismo, la rápida convergencia de factores técnicos, regulatorios y de negocios, ha aumentado el interés en esta banda. Sin embargo, diversos factores tienen influencia en el desarrollo de estos sistemas a estas frecuencias, y son [1]:

3.1.1 Factores que han permitido el desarrollo de sistemas en la banda Ka.

3.1.1.1 Control de potencia y codificación adaptiva.

Estas tecnologías han sido desarrolladas para mejorar el desempeño del sistema y mitigar el impacto por propagación [1].

3.1.1.2 Tasas de datos altas.

La atribución de un amplio ancho de banda a servicios satelitales fijos geoestacionarios y no geoestacionarios hacen posible tener servicios de tasas altas de datos [1].

3.1.1.3 Tecnologías Avanzadas.

El desarrollo de transistores de bajo ruido operando en la banda de los 20 GHz, así como transistores de alta potencia trabajando en la banda de los 30 GHz han tenido influencia en el desarrollo de terminales terrestres de bajo costo. Amplificadores TWTA (Travelling Wave Tube Amplifier) de alta eficiencia y el desarrollo de ASICs (Application-Specific Integrated Circuit) han mejorado la potencia de procesamiento. Diseños de bus satelitales mejorados con arreglos solares eficientes y métodos de propulsión eléctrica de alta eficiencia hacen posible tener vehículos de lanzamiento de costo eficiente [1].

3.1.1.4 Cuestión regulatoria.

La congestión cada vez mayor en las bandas C y Ku han permitido y generado un interés por operar bandas de frecuencias más altas [1].

3.1.1.5 Conectividad global.

Se han desarrollado protocolos de red avanzados e interfaces para una conectividad casi transparente con la infraestructura terrestre [1].

3.1.1.6 Ruteo eficiente.

El procesamiento a bordo y la conmutación por paquetes o celdas hacen posible tener ya servicios multimedia [1].

3.1.1.7 Asignación de recursos.

Algoritmos de acceso múltiple por asignación en demanda (DAMA) junto con esquemas de manejo de tráfico proveen asignación de capacidad eficiente con base en el parámetro de demanda [1].

3.1.1.8 Terminales pequeñas.

Sistemas multimedia utilizaran antena pequeñas y de alta ganancia en tierra y en los satélites para sobreponerse a la pérdida por trayectoria y desvanecimientos en ganancia [1].

3. 2 EFECTOS DE PROPAGACIÓN.

Un sistema satelital que se comunica directamente a una terminal móvil requiere el análisis básico de un enlace de terminales fijas pequeñas, pero con las características de canal adicionales debido al movimiento de la terminal. Este movimiento introduce cambios espectrales en las formas de onda transmitidas que pueden provocar subsecuentes degradaciones relativas a aquéllas de sistemas fijos. Los efectos son principalmente originados por las multitraectorias variantes en el tiempo que pretenden transmitir un campo electromagnético desde un satélite a una terminal móvil o vehículo. El desvanecimiento por multitraectoria restringe severamente la transmisión de datos [2].

El desvanecimiento afecta al medio de propagación imponiendo variaciones aleatorias en fase y amplitud en la transmisión de la señal. Sin embargo, el efecto relativo de una variación aleatoria no deseada es reducida por la presencia de una fuerte componente de línea de vista.

Por consiguiente, el entendimiento de los efectos de desvanecimiento es de gran importancia para el diseño de canales para sistemas satelitales móviles en tierra. Existen modelos que estiman la atenuación promedio y el margen de enlace requerido para una probabilidad de falla específica. La observación y comparación de modelos llevan a concluir que este tipo de canales son fuertemente dependientes de la frecuencia utilizada por el enlace, el ángulo de elevación y las características del ambiente en la vecindad del móvil [2].

Todos los satélites en el espacio experimentan algunos efectos perjudiciales, tales como deformación y daño térmico, outgassing (liberación de constituyentes en forma de vapor o gas) en el vacío y más. A pesar de eso, el ambiente de un satélite LEO es un tanto diferente del ambiente de un GEO. La radiación ionizante es un mayor peligro aun cuando existe en todas las altitudes orbitales. Las dos principales fuentes son los destellos solares y los rayos cósmicos. Sin embargo, el campo magnético de la tierra atrapa a la mayoría de las partículas cargadas en dos cinturones toroidales concéntricos centrados en el ecuador, denominados cinturones de radiación de Van Allen. El más bajo consiste predominantemente de protones de alta velocidad y el más alto de electrones. El nivel de radiación en los cinturones varía con la época del año, la latitud geográfica y la actividad geo-magnética y solar. En promedio, en el plano del ecuador la radiación alcanza su máximo alrededor de 2200 y 18500 km por encima de la tierra [2].

Debido a la existencia de los cinturones, todas las órbitas por debajo de ellas están un tanto protegidas de la radiación espacial. Los satélites que alcanzan o pasan a través de ellos, sin embargo, requieren medidas de protección especiales tales como endurecimiento en contra de la radiación para sus componentes electrónicos. En órbitas altamente elípticas, las partículas cargadas del viento solar pueden causar también daño electrostático a los componentes electrónicos [2].

En muy bajas altitudes existe un efecto de erosión de oxígeno atómico, el cual es más pronunciado en el "frente dirigente"¹ de vehículos espaciales LEO; se requiere un recubrimiento de aleación y materiales poliméricos para prevenir este efecto en ellos. Las celdas solares, en particular son vulnerables a la radiación y oxidación. Un polímero más grueso o un recubrimiento de vidrio debe ser utilizado para protegerlos contra esos dos efectos[2].

Varios desechos espaciales, satélites fuera de servicio, meteoroides naturales e incluso el combustible agotado se suman a un ambiente LEO moderadamente hostil. Por ejemplo, debido a la atracción gravitacional terrestre, más meteoros naturales son encontrados a altitudes menores, así como también, el flujo de desechos es incrementado entre 600 y 1100 Km [2].

Como ejemplo, podemos ver a continuación la dosis de radiación recibida respecto del espesor protector, en las tres órbitas circulares orbitales y una órbita elíptica, en una misión de 5 años.

Otro aspecto de interés es la interferencia solar; ésta se presenta cuando hay una alineación del satélite con el sol y la antena de la estación terrena, ocasionando que la antena reciba ruido solar. El sol representa a un transmisor con significativamente mayor potencia que el satélite y el ruido solar agobia a las señales que llegan desde el satélite, ocasionando una pérdida total de tráfico [3].

Esta degradación ocurre 2 veces al año durante la primavera y el verano, durando de 5 a 6 días. La degradación en el primer y último día dura pocos minutos pero no más de 15, dependiendo de la ubicación [3].

Si se utiliza un rastreo continuo en la estación terrena, se debe desactivar este rastreo continuo durante los períodos de interferencia para asegurar que el plato no rastree al sol en lugar de al satélite [3].

La intensiva actividad comercial planeada para sistemas satelitales móviles congestionará el limitado ancho de banda de frecuencias en la banda L. Por tanto, satélites GEO y no GEO específicos operando en la banda Ka (20/30 GHz) podrían ser los sistemas más apropiados para ofrecer servicios de comunicación personal móvil en este siglo [4].

Por un lado, los satélites GEO con grandes antenas operando a altas frecuencias pueden hacer uso de haces puntuales de gran enfoque, y permitir una reducción considerable del tamaño de las terminales móviles, y consecuentemente incrementar el mercado potencial para comunicaciones personales. Por otro lado, satélites no geoestacionarios que tengan menores "pérdidas por trayectoria" y menos retraso en su propagación que el de los satélites GEO puede simplificar el proceso de integración. En consecuencia, un sistema de órbita media, el cual de algún modo es la mejor opción entre las arquitecturas no geoestacionarias, tal vez se beneficie de todas las mencionadas ventajas. Sin embargo, los efectos de transmisión en la banda Ka van no obstante a ser exitosamente controlados. Así pues, para avanzar un poco más en este aspecto, se describirán a continuación algunos de los fenómenos de la propagación de la señal en la banda Ka [4].

¹ En aeronaves, el borde de la superficie aérea que está en la parte delantera en dirección del movimiento.

Los deterioros en la propagación producidos por la troposfera son un factor limitante para el uso efectivo de la banda Ka (20/30 GHz). La mayoría de los sistemas propuestos en dicha banda aspiran a utilizar terminales terrenas de menor tamaño para el consumidor y para aplicaciones de negocios. En general, el tener terminales pequeñas, no permite tener márgenes de enlace suficientes para interiores con el fin de combatir pausas relacionadas con la propagación [5].

Así los factores que afectan a los enlaces satelitales en la banda Ka operando en ángulos de elevación moderadamente altos incluye efectos refractivos y absorbentes. La absorción de gases, la atenuación por nubes, lluvia y por fusión de capas son efectos absorbentes que producen tanto atenuación de la señal como un aumento proporcionado en el ruido térmico recibido en el puerto de la antena. Los sistemas que emplean polarización ortogonal para implementar el reuso de frecuencias, sufren de interferencia producida por la despolarización por lluvia y hielo [5].

Sin embargo, el centelleo troposférico es no absorbente y produce atenuación de la señal así como incrementos de la misma [5].

3. 3 EFECTOS DE TRANSMISIÓN DEBIDOS AL MEDIO DE PROPAGACION.

Por tanto, para comprender mejor mencionaremos la descripción de los fenómenos que provoca la atmósfera en un enlace y que son los siguientes:

3.3.1 Rotación de Faraday

La rotación de Faraday es la rotación del eje de polarización de una onda polarizada no circularmente, debido a la ionosfera. Esto puede ser causa de pérdidas en propagación adicionales para una onda directa. Mediciones experimentales extensas muestran que la pérdida introducida por la rotación de Faraday en la banda L para antenas polarizadas linealmente para el peor 1% del año, bajo las peores condiciones (bajos ángulos de elevación de 20° y en un período de máximo solar) es del orden de 3 dB. La pérdida puede ser eliminada utilizando polarización circular. La ionosfera introduce una rotación del plano de polarización, siendo el ángulo de rotación inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia y es función del contenido de electrones de la ionosfera, por lo que varía con el tiempo, la estación y el ciclo solar. Como las variaciones cíclicas pueden predecirse, este efecto puede ser compensado mediante una rotación consecuente de la polarización de la antena [2].

3.3.2 Refracción atmosférica

La troposfera y la ionosfera tienen diferentes índices de refracción. El índice de refracción de la troposfera disminuye con la altitud, es función de las condiciones meteorológicas pero independiente de la frecuencia. Por otro lado, el índice de refracción de la ionosfera depende de la frecuencia y de su contenido de electrones. Ambos están sujetos a fluctuaciones locales rápidas. Este efecto de refracción es la causa de la curvatura de la trayectoria de la onda, la variación de la velocidad de la onda y por lo tanto del tiempo de propagación. Las variaciones del índice de refracción llamadas "centelleo", causan variaciones en el ángulo de llegada, la amplitud y la fase de la onda transmitida. El fenómeno más problemático es el centelleo ionosférico; el cual es más grande cuando la frecuencia es baja y la estación terrestre está cerca del ecuador. La señal recibida varía en amplitud y la amplitud pico a pico de estas variaciones puede exceder 1 dB para el 0.01% del tiempo a una frecuencia de 11 GHz y

latitudes medias. Los otros fenómenos son significativos solamente para ángulos de elevación bajos (menores de 10°) o cuando la portadora es usada para medidas de distancias precisas [2].

3.3.2.1 Centelleo ionosférico

El centelleo ionosférico es producido por irregularidades en la distribución horizontal de electrones libres en la ionosfera. Es menos severo para latitudes medias con respecto al ecuador geomagnético. Se ha observado que la pérdida ocasionada por el centelleo en banda L es menor que 1 dB para el 99.9% del tiempo en la mayoría de las localidades. Sin embargo las irregularidades en la parte superior de la ionosfera pueden causar centelleo con fluctuaciones pico a pico tan grandes como 6 dB en enlaces de bajada con 6 GHz a estaciones cerca del ecuador. Esto tiende a ocurrir aproximadamente una hora después de la puesta del sol local y son más frecuentes en la primavera y en los equinoccios de otoño [2], [3].

3.3.2.2 Centelleo troposférico

En épocas no predecibles los niveles de recepción de las señales de un satélite fluctúan rápidamente. Esto es debido a la turbulenta mezcla de masa de aire a diferentes temperaturas y humedades, y por la adición aleatoria de partículas como lluvia, hielo y humedad. Este fenómeno se presenta por las variaciones en amplitud y fase de las señales conforme se propagan a lo largo de la trayectoria inclinada a través de la atmósfera. Las masas de aire que comprenden la atmósfera no son homogéneas, provocando que el índice de refracción de las masas de aire varíen con el tiempo y la posición dentro de las masas [2], [3].

3.3.3 Absorción atmosférica

A frecuencias suficientemente altas, las ondas electromagnéticas interactúan con las moléculas de los gases atmosféricos, produciendo atenuación. Estas interacciones ocurren a frecuencias resonantes. Las frecuencias resonantes importantes debajo de 100 GHz son aquellas en las que se concentra el vapor de agua (22.235 GHz) y el oxígeno (entre 53.5 y 65.2 GHz). Las bandas para comunicaciones satelitales se pretende sean evitando estas frecuencias, de tal manera que la absorción de gases no sea importante en la mayoría de los enlaces comerciales. La atenuación resultante es comúnmente menor a 1 dB, y usualmente está dentro del factor de corrección del sistema. La absorción de gases que surge por vapor de agua y oxígeno presente en la atmósfera, comparada con otros efectos de absorción, es relativamente muy pequeña. La absorción debida al oxígeno es cercanamente constante y aquella debida al vapor de agua varía lentamente con el tiempo en respuesta a las variaciones en el contenido de vapor de agua en la atmósfera. Así mismo, la absorción de gases se incrementa con la humedad relativa y con la temperatura [3].

3.3.4 Precipitación atmosférica

La lluvia degrada un enlace de comunicación satelital de dos formas: atenuando la señal sobre su trayectoria, e incrementando la temperatura de ruido del sistema de la terminal terrestre. La atenuación es causada por la dispersión y la absorción de las ondas electromagnéticas. Conforme se incrementa la frecuencia, la longitud de onda disminuye. En la proporción en que la longitud de onda sea comparable al tamaño de una gota de lluvia típica (aprox. 1.5mm), la señal se hace más susceptible a la dispersión y absorción. La temperatura de ruido del sistema se incrementa ya que la antena ve la lluvia tibia en lugar del cielo frío [2].

En la banda Ku (14 GHz) por ejemplo, la longitud de onda es de 21 mm y la atenuación por lluvia de trayectoria es de 1 dB/km para una tasa de lluvia máxima de 22 mm/h, correspondiente por ejemplo a una disponibilidad del 99.95% [2].

En general, se considera que la atenuación por lluvia es significativa para frecuencias mayores a 10 GHz. La ocurrencia de precipitación es definida por el porcentaje de tiempo durante el cual se excede un nivel de intensidad dado. Intensidades bajas con efectos insignificantes corresponden a porcentajes de tiempo altos (típicamente 20%); éstas son descritas como condiciones de "cielo limpio". Intensidades altas con efectos insignificantes, corresponden a porcentajes de tiempo pequeños (típicamente 0.01%); éstas son descritas como condiciones de "lluvia". Como estos efectos pueden degradar la calidad del enlace por debajo de un umbral aceptable, la disponibilidad del enlace está directamente relacionada a las estadísticas temporales de precipitación [2].

Pero a pesar de la no despreciable atenuación atmosférica y la despolarización, el bloqueo y los efectos por multitrayectoria no tienen un dramático impacto en el desempeño de sistemas móviles satelitales en la banda Ka. Sin embargo, para terminales pequeñas, los efectos por lluvia sólo forman una relativamente pequeña parte del margen total del enlace de propagación [2].

3.3.5 Atenuación

La principal fuente del fenómeno de atenuación y despolarización, la cual depende de la frecuencia utilizada, es la propagación electromagnética a través de la atmósfera.

Un sistema en banda Ka sufre principalmente la atenuación por gases (ej. Vapor de agua, oxígeno) e hidrometeoros (ej. Nubes, lluvia, cristales de hielo) así como despolarización, lo cual principalmente se debe a efectos troposféricos. Estos efectos tienden a aumentar la degradación conforme las frecuencias aumentan [2].

3.3.6 Atenuación por nubes

En las frecuencias de la banda Ka, las nubes conteniendo vapor de agua pueden producir tanto atenuación de la señal como centelleo por amplitud; las nubes con hielo, en general no producen estos efectos. El pequeño tamaño de las partículas de las nubes, relativo a la longitud de onda, hace la atenuación por nubes esencialmente función de la temperatura y el contenido de agua líquida integrado a lo largo de la trayectoria de propagación. Dependiendo del ángulo de elevación y la climatología de las nubes, de la ubicación de la estación terrena, los niveles de atenuación por lluvia del orden de hasta 3 dB pueden ser esperados al final superior de la banda de frecuencias de 20/30 GHz [2].

3. 4 EFECTOS DE TRANSMISION EN FRECUENCIAS DE LA BANDA KA

3.4.1 Pérdidas por propagación en el espacio libre

Las pérdidas en un enlace satelital ocurren a lo largo de toda la trayectoria de éste; algunas de éstas son constantes, otras solamente pueden ser estimadas de datos estadísticos, y otras más son dependientes de las condiciones climáticas, especialmente de la lluvia [4].

Como primer paso para el cálculo de las pérdidas, debe obtenerse la componente de la pérdida de propagación en el espacio libre, la cual está dada por :

$$L_f = \left[\frac{4\pi s f_o}{c} \right]^2 \quad (3-1)$$

si se expresa s en kilómetros y f_o en GHz, entonces la fórmula anterior puede escribirse como:

$$L_f = 92.4 + 20 \log f_o + 20 \log s \quad [dB] \quad (3-2)$$

Las pérdidas por trayectoria para un satélite dependen de la distancia y frecuencia de operación por lo que para las frecuencias de 20 y 30 GHz (banda Ka), tendríamos respectivamente en satélites GEO y LEO los siguientes valores de atenuación de la tabla 3.3.1.1 [4].

3.4.1.1 Pérdidas por propagación en la banda Ka para diferentes órbitas			
20 GHz		30 GHz	
GEO (36000 Km)	$L_f = 92.4 + 26.02 + 91.12 = 209.54 \quad [dB]$	GEO (36000 Km)	$L_f = 92.4 + 32.04 + 91.12 = 215.56 \quad [dB]$
LEO (700 Km)	$L_f = 92.4 + 26.02 + 56.90 = 175.32 \quad [dB]$	LEO (700 Km)	$L_f = 92.4 + 32.04 + 56.90 = 181.34 \quad [dB]$
LEO (2000 Km)	$L_f = 92.4 + 26.02 + 66.02 = 184.44 \quad [dB]$	LEO (2000 Km)	$L_f = 92.4 + 32.04 + 66.02 = 190.46 \quad [dB]$

Las pérdidas totales del enlace están dadas principalmente por esta componente más un número de pérdidas menores provocadas por el medio de propagación [4].

En los servicios satelitales móviles uno de los más serios problemas de propagación es el desvanecimiento de la señal debido a los efectos de sombra y multitrayectoria. Para el caso de servicios satelitales móviles en tierra la sombra provocada por árboles y otras obstrucciones es la predominante. Para servicios aeronáuticos y marítimos, los efectos de multitrayectoria son más significativos [4].

Las condiciones de propagación para sistemas móviles satelitales son usual y considerablemente más hostiles que en los sistemas fijos punto a punto. Las pérdidas en los enlaces para servicios móviles regularmente están influenciadas por el pequeño tamaño de las antenas en los vehículos móviles y por el desvanecimiento debido a los efectos de multitrayectoria y sombra en la señal [4].

Las señales que pasan entre un vehículo móvil terrestre y un satélite normalmente son obstruidas por árboles y edificios, los cuales atenúan considerablemente la línea de vista directa, por lo que estas pérdidas de la señal son referidas como ensombrecimiento de la señal [4].

En contraste, para un ambiente satelital marítimo, éste no sufrirá del efecto de sombra; sin embargo, estará rodeado de olas en movimiento y estructuras de barcos, los cuales actúan como dispersores de la señal provocando el efecto de multitrayectoria. Cabe destacar que una antena móvil usualmente presenta una mucho menor ganancia que aquella de una gran antena direccional utilizada para el servicio fijo. Como resultado de esto, tendrá un ancho de haz relativamente amplio y tenderá más a captar reflexiones de multitrayectoria de la señal satelital [4].

3.4.2 Desvanecimiento de la señal.

La sombra y reflexiones por multitrayectorias dan origen al desvanecimiento de la señal, que son, variaciones en la amplitud y fase de la señal recibida conforme el vehículo se mueve. Desvanecimientos de 20 dBs o más por debajo del nivel medio de la señal pueden ser comunes para sistemas móviles satelitales en tierra. Estas variaciones de la señal tienen el potencial para introducir despliegues de errores en la transmisión, resultando en distorsiones intolerables y ruido para transmisiones de voz, o en altas tasas de error para transmisiones de datos. En estas circunstancias, aumentando la potencia del transmisor puede no necesariamente mejorar la calidad en la recepción. Por consiguiente, son necesarias técnicas especiales de procesamiento de la señal para aligerar los efectos de desvanecimientos [4].

3.4.2.1 Sombra y Multitrayectoria

En transmisiones entre un vehículo en movimiento y un satélite, la propagación tiene lugar por diversas trayectorias. Resultados experimentales indican que una fracción significativa de la energía total, típicamente llega al receptor por medio de una onda directa. La potencia restante es recibida por medio de una onda reflejada terrestre especular y los muchos rayos aleatoriamente esparcidos que forman una onda difusa. La onda directa llega al receptor vía una trayectoria con línea de vista sin reflexión. Para frecuencias hasta de 10 GHz, la propagación no es significativamente afectada por la lluvia. Cabe destacar que es conveniente usar la onda directa como un retraso para referencia doppler y en amplitud para otras ondas reflejadas y difusas [4].

El efecto de sombra es la atenuación de la onda directa debida a árboles, edificios y montañas. Pruebas experimentales indican que la sombra ocasionada por árboles es el factor más dominante para la determinación de la degradación de la señal para sistemas satelitales móviles en tierra. Existen mucho mayores factores que afectan a la sombra. Su efecto depende enormemente en el ángulo de elevación desde la terminal móvil al satélite y en el tipo de vegetación circundante y edificios [4].

El desvanecimiento debido a la atenuación por sombra aumenta conforme el ángulo de elevación disminuye. Es más severo en ángulos de elevación bajos donde la sombra proyectada del obstáculo es alta. Se ha observado que si uno asume un desvanecimiento de 10 dB a 30°, entonces una reducción en desvanecimiento de 5 dB existe a 45° y una reducción de 7 dB existe a 60° por debajo de otras condiciones similares [4].

La extensión del desvanecimiento inducido por la vegetación también es dependiente de la frecuencia e intercepción de los árboles, la longitud de la trayectoria a través de los árboles y la densidad de ramas y follaje. Árboles individuales con follaje completo se ha visto que forman válvulas de atenuación en la transmisión de entre 10 y 20 dB en frecuencias entre 800 y 900 MHz y ángulos de elevación entre 10° y 40°. La variación con las estaciones en la densidad de hojas se ha visto que aumenta la variación en el desvanecimiento cerca del 40% [4].

Para una densidad de árboles y un ángulo de elevación dados, la atenuación por sombra aumenta con el aumento en frecuencia. A 100 MHz el promedio en la atenuación por árboles moderadamente densos puede ser de 5 a 10 dB para polarización vertical y de 2 a 3 dB para polarización horizontal. A frecuencias mayores que 300 MHz la atenuación por árboles tiende a ser independiente de la polarización. Se ha observado que los desvanecimientos en la banda L exceden aquellas en la banda de UHF por 1 o 2 dB [4].

Por otro lado, sabemos que en todos los enlaces, la señal portadora viaja a través de la atmósfera. Lo cual, considerando el rango de frecuencias involucradas para satélites LEO (1 a

30 GHz), solamente dos regiones de la atmósfera influyen en su comportamiento: la troposfera y la ionosfera. La troposfera se extiende desde el suelo hasta una altitud aproximada de 15 Km, mientras la ionosfera está ubicada entre los 70 y 1000 Km. En cada caso su mayor afectación es en la cercanía del suelo para el caso de la troposfera y en una altitud aproximada de 400 Km para la ionosfera [4].

Como ya se mencionó, las ondas pueden llegar simultáneamente a la antena receptora por diferentes trayectorias de propagación y, por interferencia de una con otra, originar el desvanecimiento por multitrayectoria, también llamado desvanecimiento por selección de frecuencia. Por estas razones, los enlaces comerciales tratan de evitar los ángulos de elevación bajos [4].

El bloqueo y los efectos por multitrayectoria varían en grado y dependen de diferentes escenarios de operación. Por ejemplo, si los sistemas satelitales móviles en la banda Ka están operando en áreas urbanas abiertas, se puede asumir que la sombra por árboles es despreciable pero cualquier otro objeto que genere bloqueo podría ser una fuente directa de errores. El desvanecimiento por multitrayectorias es debido a la reflexión especular y esparcimiento difuso del terreno alrededor de la terminal móvil [5].

En este caso, la amplitud de la reflexión y la conductividad de la tierra incrementa con la frecuencia de RF (el escaso obstáculo o cualquier terreno irregular pueden crear una importante dispersión). No obstante, el patrón de radiación de la antena móvil a estas frecuencias se contrae suficientemente para reducir casi de manera total el problema. Entonces, podría concluirse que la influencia por multitrayectoria no deteriora a los sistemas móviles satelitales en banda Ka más, que a un sistema móvil satelital en banda L. Sin embargo, si el sistema en banda Ka está operando en un área con una cantidad razonable de árboles, se debe comprender que la longitud de onda en la banda Ka es comparable con las dimensiones de hojas y pequeñas ramas. Por lo tanto, se esperan mayores pérdidas en propagación que en sistemas en banda L [5].

Desafortunadamente, datos específicos y experimentales en relación al efecto de sombra en la banda Ka, no son aún disponibles. Sin embargo, en otros estudios utilizando a la banda L, se ha mostrado que un efecto denso de sombra o de gran bloqueo en línea de vista llega a ser una gran fuente de error que reduce la calidad del servicio [5].

3.4.2.2 Observaciones por desvanecimiento

A continuación se presenta como referencia la figura 3.3.2.2.1, en donde se observan diferentes valores de desvanecimiento, al variar la frecuencia dentro de la banda Ka, pero manteniendo la transmisión de datos estable [5].

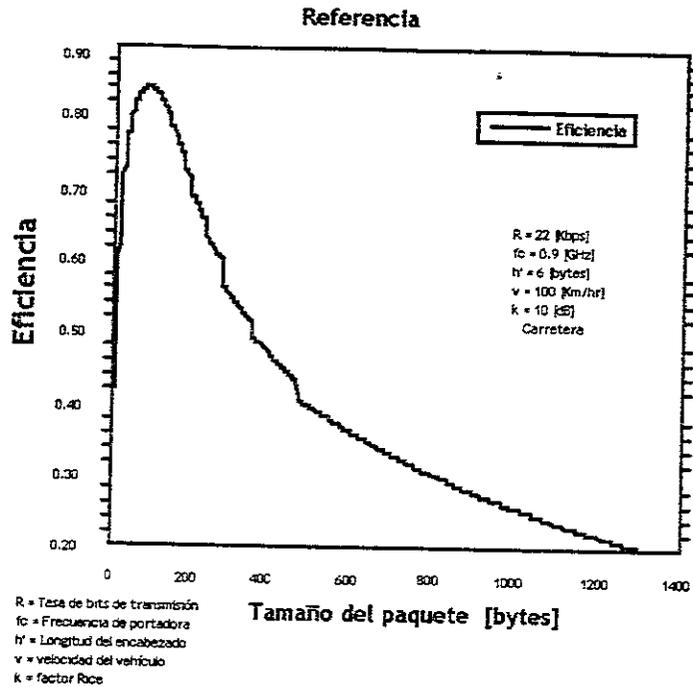


Figura 3.3.2.2.1 Gráfica de referencia para observaciones de desvanecimiento, bajo las condiciones de los parámetros mencionados [5].

Estos valores de desvanecimiento se presentan en la gráfica de la figura 3.3.2.2.2, que muestran claramente que en la banda Ka la duración del desvanecimiento es menor que en la banda L dado que la fluctuación de la señal es más rápida [5].

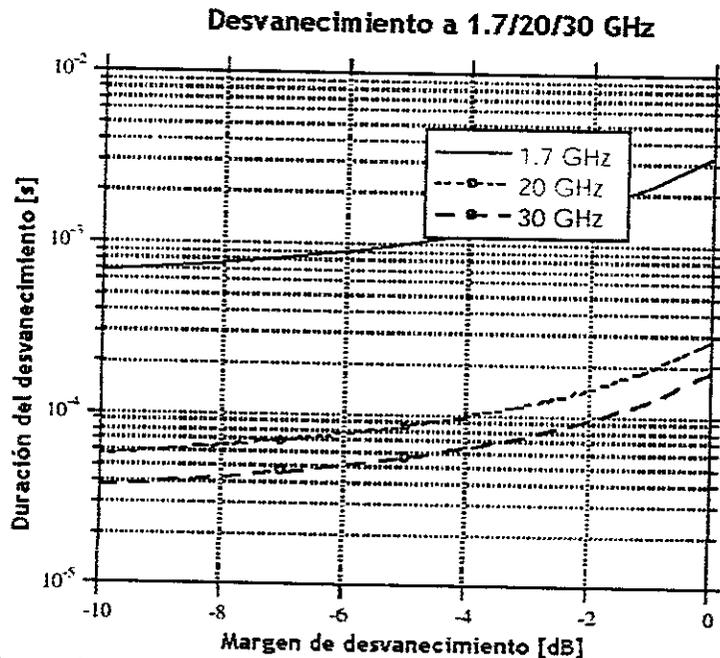


Figura 3.3.2.2.2 Observaciones de desvanecimiento en la banda L y Ka. Parámetros: Tasa de tx = 22 Kbps, Longitud de encabezado = 6 bytes, Margen de desvanecimiento = 6 dB, Velocidad del vehículo = 100 Km/hr, Región = Suburbana [5].

Esto implica que si los intervalos de desvanecimiento son muy pequeños y cambian rápidamente, la duraciones entre desvanecimientos son también cortas como se ilustra en la figura 3.3.2.2.3 [5].

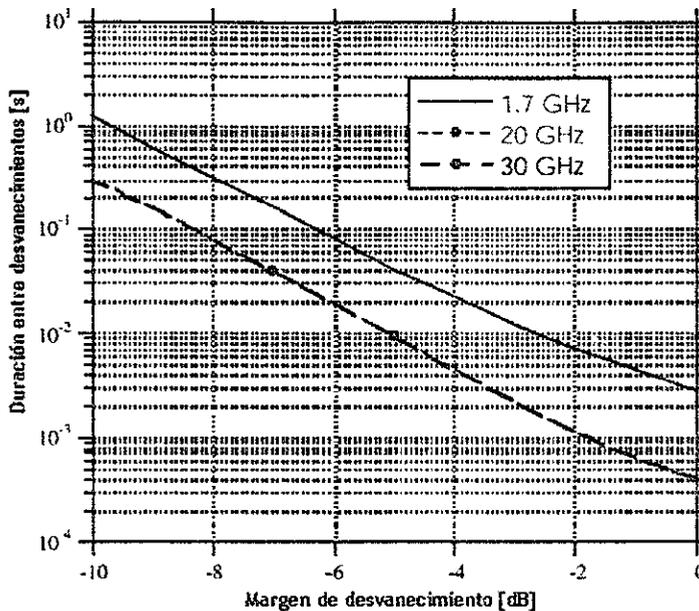


Figura 3.3.2.2.3 Observaciones de desvanecimiento en la banda L y Ka. Parámetros: Tasa de tx = 22 Kbps, Longitud de encabezado = 6 bytes, Margen de desvanecimiento = 6 dB, Velocidad del vehículo = 100 Km/hr, Región = Suburbana [5].

3.4.2.3 Escenarios de interacción de la red

Conforme la estación móvil opera sobre áreas amplias y variadas, las propiedades ambientales cambian y la señal recibida posee una característica estadística variable. Esto significa que el nivel de la potencia recibida no puede ser representada por un modelo con parámetros uniformes o constantes. Aún más, esto implica que el canal es no estacionario. Sin embargo, aunque las características estadísticas del canal varían significativamente sobre regiones extendidas, experimentos en propagación muestran que permanecen constantes cuando las áreas tienen atributos ambientales no variables. Por consiguiente, el canal satelital móvil puede ser modelado como un sistema no estacionario representado por modelos de canal M-estacionario [5].

En el contexto de servicios de comunicación personal, un sistema móvil cruzará diferentes áreas ambientales en secuencia aleatoria pero con caracterización probable. Los escenarios de propagación de la señal durante un evento de transmisión podrían ser entonces clasificados en cuatro estados independientes (figura 3.3.2.3.1) basados en el análisis de la función de densidad de probabilidad de la señal recibida en el sistema móvil. De tal modo, las siguientes distribuciones de la señal recibida son propuestas:

- S1 Trayectoria - cielo -> Servicios Aeronáuticos -> Distribución Rician Alta.
- S2 Trayectoria - despejada -> Áreas abiertas rurales -> Distribución Rician baja.
- S3 Trayectoria - en sombra -> Áreas suburbanas, ligeramente boscoso -> Distribución Log-normal.
- S4 Trayectoria Difusa -> Áreas urbanas, bosque denso -> Distribución Rayleigh.

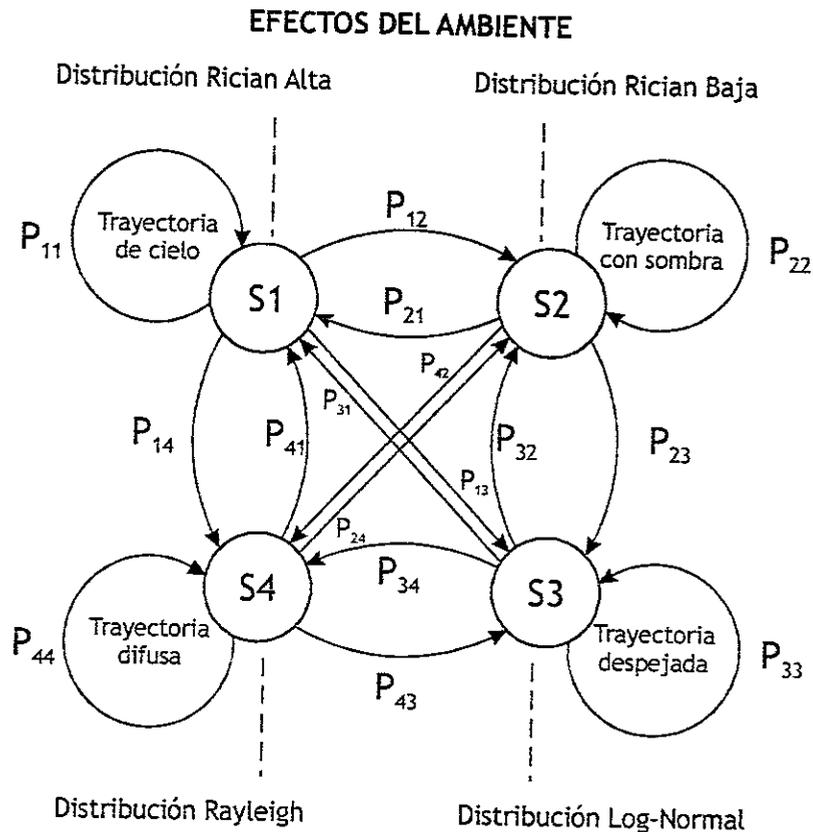


Figura 3.3.2.3.1 Escenarios de propagación de la señal.

Prácticamente, desde el lado del uso como se ilustra en la figura 3.3.2.3.1, S1 corresponde a las condiciones cuando el usuario está viajando a través del espacio, mientras S2 se refiere a las transmisiones en áreas planas o desiertas y mares con superficies casi uniformes. S3 se relaciona con regiones suburbanas o semitrópicas con carreteras esparcidas y árboles dispersos con efectos temporales de sombra. Finalmente, S4 indica comunicaciones en áreas urbanas o bosques muy densos como las junglas de la región amazónica o algunas áreas en Asia. Realistamente, es más probable pasar de un estado con trayectoria de sombra (S3) a un estado de trayectoria despejada (S2) y viceversa. Análogamente, desde un estado de trayectoria con sombra (S3) a un estado de trayectoria difusa (S4) y viceversa; que desde una trayectoria con sombra (S3) o difusa (S4) a una trayectoria de cielo (S1) [5].

Sin embargo, debemos comprender que teóricamente es posible cambiar de modo aleatorio entre todos los estados; por consiguiente, todos los estados tienen una probabilidad de transición a otro estado. Debe ser entendido que no necesariamente implica el 100% de la recepción de la señal, dado que el fenómeno de propagación está sujeto al efecto atmosférico. Es claro que la red satelital servirá principalmente áreas S1 y S2, en cuyo caso un máximo de margen de enlace de 3 a 5 dB podría ser aceptable desde el punto de vista de la disponibilidad del enlace [5].

Mayor penetración en áreas S3 y S4 requerirán mayores márgenes de enlace (12-15 dB). De cualquier modo, estas 2 últimas áreas estarán bien servidas por un sistema terrestre en el caso de una región altamente urbanizada [5].

En la figura 3.3.2.3.2 se muestran curvas adecuadas de las duraciones promedio de desvanecimiento desde todos los ambientes descritos. Se puede distinguir ampliamente el profundo fenómeno de desvanecimiento de la trayectoria difusa representando un área grande de la ciudad. La gráfica también muestra una clara transición de la desfavorable propagación de una señal satelital a condiciones de propagación más favorables. Si mediciones estadísticas de estos eventos son percibidas por el sistema móvil dentro de periodos dados, entonces estos pueden fácilmente llegar a ser entradas directas para ser coordinadas con una unidad de control interna, con el fin de pasar eventualmente información decisiva a la estación pertinente. Esto significa que el sistema móvil no sólo recolectará información para pasarla a la estación correspondiente, sino que también participa en el proceso de selección de la red [5].

En suma, la figura 3.3.2.3.2 muestra una distensión altamente perceptible del proceso de discriminación sugerido por los cuatro estados (S1-S4) para representar ambientes de propagación típicos en los que la señal del sistema móvil satelital viaja. De ese modo, un canal de cuatro estados puede ciertamente ser utilizado para caracterizar un canal de servicios de comunicación de propósito completo o establecer un handheld universal [5].

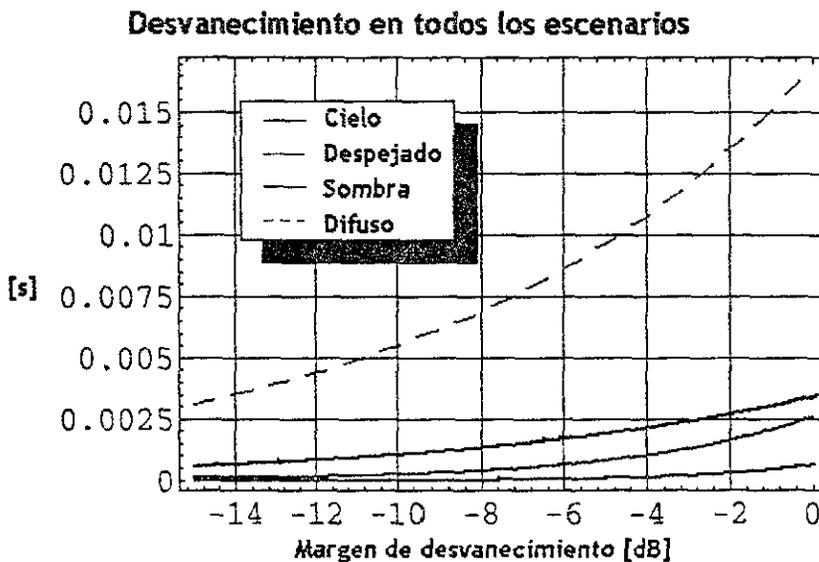


Figura 3.3.2.3.2 Desvanecimiento en diferentes escenarios de propagación de la señal.

Para los problemas que se presentan en la propagación en la banda Ka, una estrategia para mitigar el problema de desvanecimiento por lluvia es el emplear control de potencia en el enlace de subida durante periodos de deterioro por lluvia. La decisión de incrementar la potencia puede ser basada en la intensidad de las señales recibidas, la temperatura de ruido de cielo o el comando y directriz satelital. Cambios relativos en el nivel de potencia están probablemente en el rango de 5 a 10 veces, logrando de 7 a 10 dB de mejora en el enlace. Sin embargo tal característica sería cara y es muy probable que se vea su uso en amplias terminales profesionales. Mas aun, a menos que la potencia satelital sea también incrementada, el enlace podría aun fallar.

La segunda estrategia es conmutar a tasas de bits mucho menores durante periodos de lluvia. Este alcance no sería apropiado para muchas aplicaciones, pero podrían ser satisfactorias para algunas, tales como el acceso a Internet.

Un tercer alcance para lograr un buen desempeño involucra el uso de codificación concatenada. Los bits de la señal son procesados por un codificador, el cual suma bits redundantes que permiten que un decodificador en el receptor detecte y corrija errores. Sin embargo, este esquema (llamado codificación convolucional) falla si más bits están en error que lo que el esquema es capaz de corregir. Una ráfaga de errores es entonces producida. Para combatir esto, los bits son leídos en las columnas de una matriz trellis y después sacados en renglones. Esto extiende el tiempo entre los bits con error, permitiendo que un segundo codificador de bloques externo los corrija.

3. 5 CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD y DIVERSIDAD.

Estas mediciones pueden ser definidas para un sistema de comunicación satelital, para un satélite o un enlace de comunicación [4].

La confiabilidad del sistema es la probabilidad de que permanecerá en operación durante determinado período de tiempo. Está determinado por la confiabilidad de los componentes vitales del sistema. Para eliminar algunos puntos de falla e incrementar la confiabilidad del sistema, los componentes vitales del sistema son usualmente duplicados y arreglados con configuraciones redundantes [4].

La disponibilidad del sistema es el porcentaje del tiempo en un período determinado en el que el sistema puede desempeñar su función en un cierto nivel de desempeño específico [4].

La confiabilidad del satélite es el factor dominante en toda la disponibilidad del sistema de comunicación satelital. Un satélite en falla, un subsistema o una unidad no puede ser reparada. Las fallas en los satélites pueden ser tanto aleatorias, por desgaste de componentes, o bien por extinción de combustible [4].

Tanto la disponibilidad del sistema de comunicación como la del enlace, están relacionadas pero con diferentes características. La disponibilidad del sistema, A_s , depende de la disponibilidad terminal, A_{term} , la disponibilidad del satélite, A_{sat} , y la disponibilidad de la estación terrena, A_{gs} , siendo expresada como:

$$A_s = (A_{term}) (A_{sat}) (A_{gs}) \quad (3-3)$$

La parte mas crítica de la disponibilidad del sistema de comunicación es la disponibilidad del satélite. Asumiendo un modelo exponencial para la probabilidad de falla del satélite, la disponibilidad de un satélite en una posición orbital única y el número n de satélites requeridos en un período T_L están dados respectivamente por:

$$A_{sat} = 1 - \frac{T_R}{pT_F} \quad n = \frac{T_L}{T_F \left(1 - \exp^{-\frac{T_R}{T_F}} \right)} \quad (3-4)$$

Para un sistema de k repuestos orbitales por posición orbital esto se convierte en:

$$A_{sat} = 1 - k \frac{T_R}{pT_F} \quad n = k \frac{T_L}{T_F \left(1 - \exp^{-\frac{T_R}{T_F}} \right)} \quad (3-5)$$

En donde T_L es la duración del sistema, T_R el tiempo para reemplazar al satélite en órbita, T_M la vida de misión del satélite (dada por el combustible), T_F el tiempo promedio del satélite para fallar y p denota la probabilidad de éxito de lanzamiento [4].

Cuando está apropiadamente diseñado, el tiempo promedio del satélite para fallar puede ser considerablemente mayor que la vida de la misión [4].

La disponibilidad de un sencillo salto de enlace de comunicación A_L depende de la disponibilidad del equipo, A_{equip} , y la disponibilidad de la trayectoria de propagación, A_{prop} , como:

$$A_L = (A_{\text{equip}})(A_{\text{prop}}) \quad (3-6)$$

La disponibilidad de la trayectoria de propagación es afectada por pérdidas atmosféricas, sombra por objetos, efectos de multitrayectoria e interferencia. La disponibilidad del equipo depende de la confiabilidad de todo el equipo en la cadena, desde el transmisor terminal al receptor, a través del transpondedor del satélite, y el transmisor y receptor de la estación terrena [4].

Para un sistema de múltiples satélites, con o sin enlaces intersatelitales, la disponibilidad del enlace depende también del número de satélites vistos en cualquier momento. Sistemas de doble o múltiple cobertura tendrán mayor disponibilidad que sistemas de cobertura sencilla [4].

La principal diferencia entre satélites LEO y GEO en el dominio de la confiabilidad es que, debido a menores restricciones de peso, un mayor nivel de redundancia en el equipo puede ser provista. Esto permite el uso de unidades de menor costo y simplifica las pruebas del sistema. Otro factor que ayuda a la confiabilidad y disponibilidad del sistema es la diversidad [4].

3.5.1 Diversidad tierra - espacio

Se define como el uso de más de un satélite al mismo tiempo para la comunicación. Esto permite una mejora en la disponibilidad física, al disminuir el impacto de la sombra (edificios obstruyendo la trayectoria entre la terminal terrestre y el satélite) y al proveer redundancia al nivel físico o del enlace de datos. La diversidad es también explotada por hand overs suaves [4].

La diversidad tierra - espacio puede ser explotada en varias capas de las capas de red. La diversidad en la capa física puede ser explotada en constelaciones, por ejemplo, con el uso de CDMA por Globalstar y la recombinación de señales a través de múltiples transpondedores satelitales. Puede ser explotado en la capa de datos del enlace, a través del manejo de TDMA. Mas allá de esto está el trabajo de investigación en la diversidad de código y la diversidad de capas de red, las cuales actualmente todavía no son propuestas para su explotación en constelaciones comerciales [4].

3.5.2 Diversidad de red dentro de la órbita.

La diversidad dentro de órbita es explotada como se muestra en la figura 3.4.2.1, para proveer redundancia por fallas en los enlaces y satélites. Esto es sólo posible debido al gran número de satélites en la constelación, así como por su cercano espaciado. Como puede afectar el ruteo a través de la malla de enlaces intersatelitales, puede tener un efecto considerable en el reparto de inicio a fin [4].

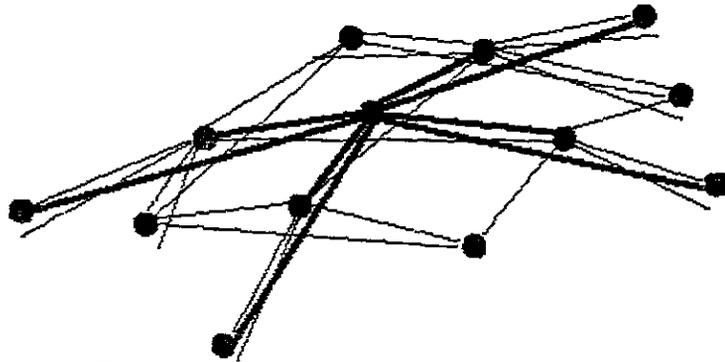


Figura 3.4.2.1 Diversidad de red dentro de órbita.

Se utiliza también otro tipo de diversidad conocida como diversidad dual entre satélites vecinos en las dos subconstelaciones para evitar enviar transmisiones desde la parte del cielo ya habitado por el arco geoestacionario. Esto es necesario para el caso de Skybridge porque tiene como base el reuso de frecuencias en la banda Ku ya utilizadas por satélites geoestacionarios [4].

Desde un punto de vista de red, la diversidad debe sólo significar un pequeño cambio en el retraso de inicio a fin, con ningún otro efecto visible.

Existen estadísticas de los valores mínimos y promedio en el ángulo de elevación de cada constelación. Estas estadísticas influyen en la disponibilidad del enlace satelital, dado que usualmente la línea de vista entre un usuario y un satélite es requerida. Un ángulo de elevación promedio alto significa que la probabilidad de tener un satélite en línea de vista es más alto. En algunas constelaciones el ángulo medio de elevación para altas latitudes es bajo (ya que no planean proveer servicio en esas áreas) [4].

3. 6 HANDOVER ENTRE SATELITES Y ENTRE ESTACIONES TERRENAS.

Mientras que los hand overs (handoffs) de comunicaciones son bien entendidos en las redes inalámbricas terrestres, los hand overs en redes satelitales no geoestacionarias soportando tráfico de multimedia representan un vasto campo de investigación [4].

El hand over es requerido para evitar llamadas caídas en curso. Las celdas satelitales se mueven junto con el satélite y las llamadas deben ser transferidas de un haz puntual al siguiente (handover de haces), y eventualmente al siguiente satélite (hand over satelital). Durante el evento, el siguiente haz o satélite no posee circuito inactivo para tomar la llamada; la llamada es terminada (terminación forzada), y este evento es referido como una falla en hand over. Un hand over prematuro generalmente termina en un hand over innecesario, mientras un hand over retrasado ocasiona una probabilidad incrementada de terminaciones forzadas de llamadas. El hand over puede ser inicializado con base en el nivel de la señal y/o mediciones en distancia [4].

Existen dos diferentes escenarios para el hand over por haces y éstos se describen a continuación:

3.6.1 Handover intra - haz.

Asume que el suscriptor está definido por un haz A utilizando la frecuencia 1 y ésta, asociada con el satélite S. Conforme el haz alcanza otra región geográfica, la frecuencia 1 ya no estará disponible. Existen dos posibles razones para esto. La primera es de tipo regulatorio, significando que el conjunto en particular de frecuencias no está disponible en la región a la que se aproxima. Otra razón es la interferencia, que puede ser causada cuando el satélite S se mueve muy cerca de otro satélite utilizando la misma frecuencia. En este caso, aun cuando el suscriptor esté todavía dentro del haz A (satélite S), el satélite enviará un mensaje a la unidad portátil para cambiarse a la frecuencia 2 con el fin de mantener el enlace de comunicación. El satélite es la entidad inteligente en este tipo de handover [4].

3.6.2 Handover Inter - haz.

La unidad portátil continuamente monitorea la potencia de la frecuencia 1 utilizada en el haz A. Esta también monitorea la potencia de RF de 2 haces adyacentes candidatos a handover, B y C, por medio de un canal de difusión general (canal de información). La unidad personal determina cuando realizar el handover con base en la intensidad de la señal de RF. Si la señal del haz B llega a ser mayor que la señal utilizada en el haz A, la unidad portátil iniciará una petición de handover al satélite para conmutar al usuario al haz B. El satélite asigna una nueva frecuencia (3) a la unidad portátil porque dos haces adyacentes no pueden utilizar la misma frecuencia (Iridium, por ejemplo, utiliza un patrón de reuso de 12 haces). El handover inter - haz puede ser extremadamente frecuente (cada 2 minutos o incluso menos). La unidad personal es la entidad inteligente en este tipo de handover [4].

Así mismo existen dos escenarios para el handover satelital, que son posibles en situaciones en donde la diversidad no es explotada [4].

3.6.3 Handover satelital intraplano.

Asume que el suscriptor se mueve de haz a haz dentro del área de cobertura de los satélites S's. El telepuerto sabe cuando el suscriptor está alcanzando el límite entre el satélite S y el satélite T porque conoce el código de área de la ubicación del suscriptor y las ubicaciones del satélite. El telepuerto enviará un mensaje al satélite de rastreo S para prepararse para transferir al suscriptor, y otro mensaje al satélite T a la cabeza, en el mismo plano para preparar el que acepte al suscriptor. El telepuerto entonces enviará un mensaje a la unidad portátil vía el satélite S para resincronizar el corrimiento Doppler y el tiempo de llegada de la señal. Finalmente, el handover es completado cuando el satélite envía un mensaje a la unidad portátil informándola de cual será la nueva frecuencia a utilizar. El telepuerto es la entidad inteligente en este tipo de handover [4].

3.6.4 Handover satelital interplano.

Es muy semejante al intraplano, excepto que, en lugar de transferir la conexión a un satélite en el mismo plano, se realiza a un satélite en diferente plano. La razón de hacer un handover a un satélite en otro plano puede ser que ningún satélite en el mismo plano es capaz de cubrir al suscriptor, o no existen canales disponibles en el satélite dentro del mismo plano a realizar un handover. Otra razón puede ser que el satélite en un diferente plano es capaz de proveer mejor servicio (satélites en planos más bajos tienen más problemas con el efecto de sombra que los satélites en un nivel más alto) [4].

El tiempo necesario para establecer y ejecutar el handover debe ser muy corto. En suma, los handovers no deben dañar la calidad de servicio de las conexiones negociadas.

Con la velocidad orbital de los satélites y la dimensión de las celdas, el tiempo para cruzar el área de traslape de dos celdas es relativamente corto (unos pocos segundos). Sin embargo, debido a las características de la constelación satelital, una terminal puede ser cubierta por al menos dos satélites. Eso ofrece la posibilidad de optimizar el handover respetando la calidad de servicio de cada conexión y dando servicio a un mucho mayor número de conexiones [4].

La siguiente relación está dada por el ángulo de cobertura α , el ángulo de elevación β y la altitud h .

$$h = R_T \left(\frac{1}{\cos(\alpha)(1 + \tan(\alpha)\tan(\alpha + \beta))} - 1 \right) \quad (3-7)$$

La figura 3.5.4.1 muestra la relación entre el ángulo de elevación y la altitud:

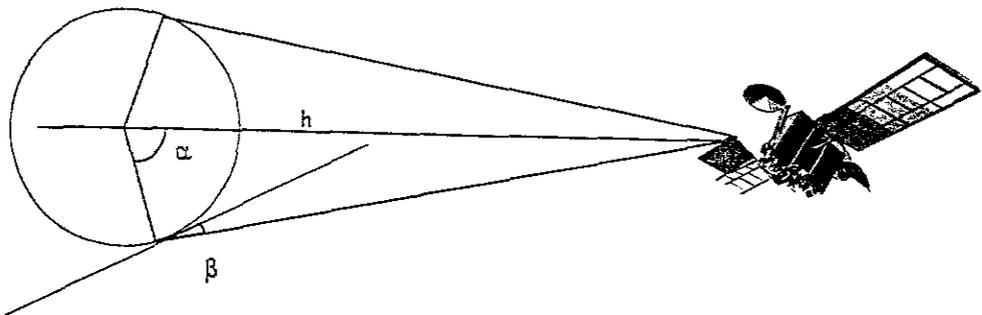


Figura 3.5.4.1 Relación entre el ángulo de elevación y la altitud.

La evolución del retraso por Inter - handover de acuerdo a la altitud y el mínimo ángulo de elevación es mostrado en la figura 3.5.4.2 [4].

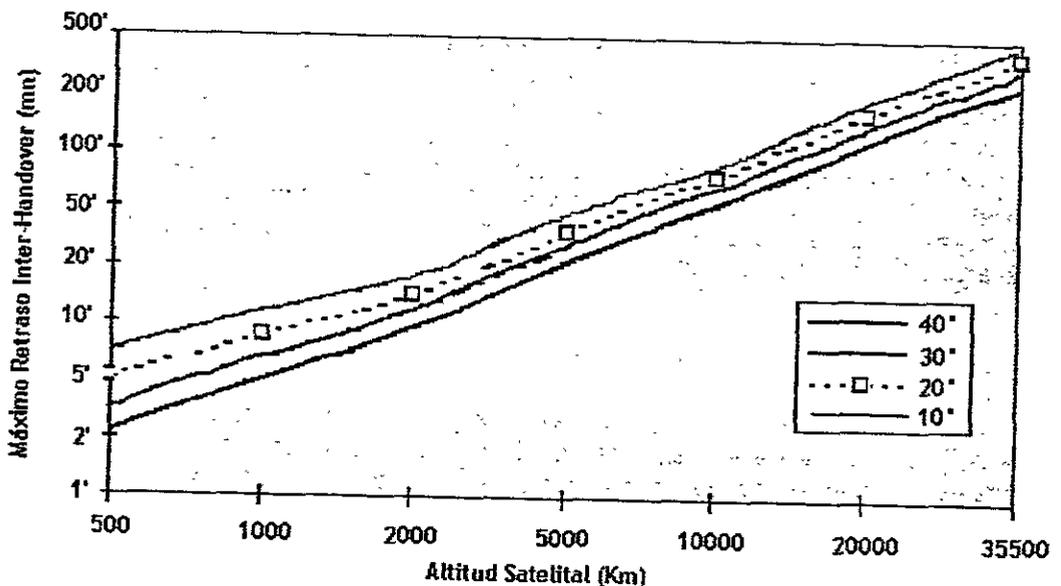


Figura 3.5.4.2 Máximo retraso Inter-handover.

3. 7 CARACTERÍSTICAS DEL ENLACE DE SUBIDA Y BAJADA EN ORBITAS BAJAS.

El retraso en la propagación de paquetes en una conexión es la suma de las siguientes tres cantidades: el retraso en la propagación de la terminal terrestre al satélite (t_{up}), los retrasos en propagación por los enlaces intersatelitales (t_i) (si son utilizados enlaces intersatelitales) y el retraso en la propagación del satélite destino a la terminal terrestre destino (t_{down}) [4].

Los retrasos en propagación de subida y bajada en la dirección del satélite a tierra (t_{up} y t_{down} respectivamente) representan el tiempo necesario para que la señal viaje desde la terminal terrestre al primer satélite en la red (t_{up}), y el tiempo que toma a la señal alcanzar la terminal terrestre destino desde el último satélite en la red (t_{down}) [4].

$$t_{up} = \text{distancia desde la terminal al satélite} / \text{velocidad de la luz} \quad (3-8)$$

$$t_{down} = \text{distancia desde el satélite a la terminal destino} / \text{velocidad de la luz} \quad (3-9)$$

Los retrasos en el enlace dependen del diseño de la constelación. En contraste con los satélites GEO, el retraso en satélites LEO en los enlaces de subida y bajada es variable con el tiempo, en particular para constelaciones con celdas fijas terrestres [4].

A continuación se desarrolla un modelo de retraso en el enlace de subida y bajada de una red satelital. Este modelo puede ser utilizado para estimar el retraso de inicio a fin en redes satelitales LEO. Este retraso (D) experimentado por el trayecto de un paquete de datos a través de la red satelital es la suma del retraso en la transmisión (t_t), el del enlace de subida (t_{up}), el del enlace de bajada (t_{down}), el de los enlaces intersatelitales (t_i), el debido al procesamiento y conmutación a bordo (t_s) y el de almacenamiento (t_q). Los retrasos por enlaces intersatelitales, conmutación y procesamiento a bordo y el debido al almacenamiento son acumulativos a lo largo de la trayectoria cursada en la conexión. En este modelo sólo se considera la componente satelital del retraso, ya que el retraso total experimentado por un paquete es la suma de los retrasos en la red satelital y las terrestres. Este modelo no incorpora la variación en el retraso experimentado por las celdas de una conexión. La variación en el retraso es causada por la dinámica orbital, el almacenamiento, el ruteo adaptivo (en LEOs) y el procesamiento a bordo.

Un análisis cuantitativo del retraso por jitter no es considerado aquí. Por tanto el retraso de inicio a fin quedaría definido por:

$$D = t_t + t_{up} + t_i + t_{down} + t_s + t_q \quad (3-10)$$

El retraso en la transmisión, t_t , es el tiempo que toma transmitir un sencillo paquete de datos en la tasa de datos de la red [4].

$$T_t = \text{tamaño del paquete} / \text{tasa de transmisión de datos} \quad (3-11)$$

Para redes de banda ancha con altas tasas de transmisión de datos, los retrasos en la transmisión son despreciables en comparación con los retrasos de propagación del satélite. Por ejemplo, un paquete TCP de 9180 bytes es transmitido en cerca de 734 microsegundos a una tasa de información de 100 Mbit/s (para un enlace de subida de 155 Mbps). Este retraso es mucho menor que los retrasos en propagación de los satélites [4].

El retraso en la propagación para las celdas de una conexión es la suma de las siguientes tres cantidades:

- El retraso de originación en la dirección terminal - satélite (t_{up})
- El retraso por enlaces intersatelitales (t_i)

- El retraso de terminación en la dirección satélite - terminal (t_{down})

Para una celda ATM de 53 bytes de longitud (424 bits), y para un velocidad de transmisión de datos aproximado de 150 000 Km/s en fibra y 300 000 Km/s en un enlace satelital:

$$t_p = \text{distancia} / \text{velocidad de propagación} \quad (3-12)$$

$$t_t = t_p (\text{tasa de bits}) / 424 \quad (3-13)$$

La siguiente tabla muestra los valores mínimos para los retrasos en propagación y transmisión para diferentes sistemas satelitales (para un ángulo de elevación de 90° con el satélite directamente sobre la terminal terrestre) y el número de celdas que pueden ser emitidas a una cierta tasa de bits y tiempo de propagación [4].

3.7.1. Tiempos de propagación y transmisión para satélites en diferentes órbitas.

Distancia [Km]	tp (en fibra) [microseg]	tp (en satélite) [microseg]	tt (Sat) 64 Kbps [celdas]	tt (Sat) 2 Mbps [celdas]	tt (Sat) 155 Mbps [celdas]
Teledesic: 1375	9400	4700	0.71	22.17	1718.16
Skybridge: 1469	9793	4897	0.74	2.09	1790.05
MEO ₂ : 20000	133333	66667	10	314	24371
GEO: 38000	253333	126667	19	597	46305

El retraso por enlaces intersatelitales es la suma de los retrasos en propagación de cada enlace intersatelital atravesado por la conexión. Estos enlaces pueden ser intraplanares o interplanares. En sistemas GEO, los retrasos por este tipo de enlaces se consideran constantes para cualquier conexión porque los satélites están casi estacionarios respecto de un punto dado en el ecuador, y con respecto a otros. En constelaciones LEO, los retrasos por enlaces intersatelitales dependen del radio orbital, el número de satélites por orbita y la distancia inter - orbital (o el número de orbitas). Todos los enlaces intraplanares en orbitas circulares, incluyendo anillos GEO son constantes. Los retrasos de enlaces intersatelitales interplanares cambian con el tiempo, se cortan en altas latitudes y deben ser regenerados. Como resultado, los sistemas LEO pueden presentar una alta variación en los retrasos por enlaces intersatelitales, definiéndose estos por la siguiente formula:

$$t_i = \frac{\sum \text{Longitud}_{\text{Enlace_Intersatelital}}}{\text{Velocidad}_{\text{Señal}}} \quad (3-14)$$

Los satélites LEO tienen menores retrasos por propagación debido a sus bajas altitudes, pero muchos satélites son necesarios para proveer el servicio de manera global. Mientras los sistemas LEO tienen un menor retraso en la propagación, también pueden presentar una mayor variación en el retraso debido a los muchos handovers y otros factores relacionados con la dinámica orbital [4].

Los efectos de los retrasos en propagación para sistemas LEO son de mayor intensidad por almacenamiento de los retrasos pudiendo ser del orden de los de propagación especialmente para tráfico IP [4].

Los grandes retrasos en GEOs y las variaciones de estos en LEOs afectan tanto a aplicaciones en tiempo real como las que no son en tiempo real. En mecanismos de control de congestión basados en el tiempo en el cual se intenta realizar la conexión (como TCP), el desempeño está intrínsecamente relacionado con el producto del ancho de banda del retraso de la conexión.

Más aún, las mediciones del tiempo de ida y regreso en TCP son sensibles a las variaciones en el retraso que pueden causar falsos tiempos de intento de conexión y retransmisiones. Como resultado, los aspectos relacionados con el control de congestión para redes satelitales de banda ancha son un tanto diferentes de aquellas redes terrestres de baja latencia [4].

La principal consideración en la planeación de un enlace satelital completo es la calidad requerida en banda base. Esto es medido en términos de la relación S/N para un sistema análogo y en términos de la tasa de bits con error (BER) para un sistema digital. En ambos casos la calidad del enlace es proporcional a la relación portadora a ruido total (C/N_T) a la entrada del demodulador receptor. El cálculo del enlace toma en cuenta la relación en potencia (C/N) en el lado de recepción de un enlace de transmisión, tomando en consideración el medio de transmisión y las características del transmisor y receptor [4].

La atenuación atmosférica se obtiene de la densidad de vapor de agua, la temperatura del ambiente, la frecuencia, el ángulo de elevación y la altitud de la estación terrena.

La pérdida por lluvia se calcula a partir de la frecuencia, la tasa de lluvia, la latitud y altitud de la estación terrena y el ángulo de elevación de la trayectoria desde la estación terrena al satélite [4].

Las relaciones C/N y E_b/N_0 se obtienen de la pérdida atmosférica, la pérdida por lluvia, la pérdida por propagación, la eficiencia de la antena, el margen del enlace, la pérdida por apuntamiento de la antena de transmisión y la codificación.

Por lo tanto, los parámetros requeridos para el diseño del canal de subida y sus posibles valores son:

3.7.2. Tabla de parámetros del enlace de subida	Valores posibles
Distancia entre la estación terrena y el satélite	Hasta 2000 [Km]
Ángulo de elevación estación terrena al satélite	$\pi/2$ a $\pi/9$ [rad]
Altitud de la estación terrena	-1 a 30 [Km]
Latitud de la estación terrena	$-\pi/2$ a $\pi/2$ [rad]
Frecuencia de transmisión [GHz]	Banda Ku y Ka
Polarización	0 - 360 [°]
Tasa de tx de datos	1 - 155 [Mbps]
Eficiencia de la antena de tx	0.4 - 0.8
Diámetro de la antena de tx	0.6 - 20 [m]
Potencia de la antena de tx	1 - 100 [Watts]
Pérdida por apuntamiento de la antena de tx	0.5 - 3 [dB]
Temperatura	Invierno noche: 0 [°C] Invierno día: 6 [°C] Verano noche: 15 [°C] Verano día: 20 [°C]
Nivel de vapor de agua	Seco: 3 [g/m ³] Medio: 5 [g/m ³] Alto: 8 [g/m ³] Muy alto: 12 [g/m ³]
Tasa de lluvia [mm/h]	Depende de la región
Margen del enlace	1 - 3 [dB]

G/T	-5 a -15 [dB/°K]
Acceso múltiple	TDMA, FDMA, CDMA, PRMA
Número de usuarios (simultáneos)	1 - 500
Modulación	BPSK, QPSK, DPSK, MQPSK
Esquema de codificación	Códigos Reed Solomon, Convolutionales y de bloque

3. 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Miller Michael J., Branka Vucetic, Les Berry, "SATELLITE COMMUNICATIONS, Mobile and Fixed Services", Kluwer Academic Publishers, 1993, pag. 345-385.
- [2] "EARTH STATION TECHNOLOGY", Intelsat Manual, JUNE 1999.
- [3] Cruickshank H., Sun Z., Wood L., "Broadband Integrated Satellite Network Traffic Evaluations, Report on LEO satellite network characteristics", BISANTE Consortium, 1998.
- [4] Javornik T., Kandus G., Jurij Tasic, Sykora J., Vejrazka F., "Final Report of COST 227 Action Chapter 3: Radio Interface", COperation Européene dans le domaine de la recherché Scientifique et Technique, 1996.

4. TÉCNICAS DE CORRECCION PARA MEJORAR LA CALIDAD EN LA BANDA KA

Actualmente, los nuevos sistemas de comunicación satelital están siendo desarrollados en bandas de frecuencia mucho más altas, con el fin de ofrecer canales de transmisión más grandes y de mejor calidad para aplicaciones multimedia. Esto, debido a la congestión existente en las bandas de frecuencias C y Ku del espectro de radio frecuencias satelitales.

En el Capítulo 2 se describieron nuevos sistemas satelitales que están siendo promovidos en la banda Ka (20/30 [GHz]), involucrando principalmente a terminales de apertura muy pequeña (VSAT).

En el Capítulo 3, se mencionó que en la banda Ka existen varios fenómenos de propagación, entre ellos los meteorológicos, que limitan ampliamente la calidad y disponibilidad en los servicios satelitales de esta banda de frecuencias. Las limitaciones tecnológicas y económicas de las terminales VSAT no permiten el uso de márgenes de enlaces fijos demasiado altos. Por lo tanto, nuevas técnicas de corrección para mejorar la calidad de los enlaces en la banda Ka han sido desarrollados.

El diseño y planeación de los servicios en la banda Ka requieren de estimaciones más exactas del impacto de los efectos atmosféricos (absorción por gases, atenuación por nubes, atenuación por agua en estado gaseoso, atenuación por lluvia, centelleo troposférico, entre otros) sobre el desempeño del sistema, para reducir al máximo los márgenes de operación.

En el presente capítulo, se describirán las siguientes técnicas de mitigación o reducción del desvanecimiento para la corrección de este tipo de problemas que conlleva a una reducción importante en el costo de los equipos terrestres:

- Control de potencia para el enlace de subida
- Diversidad de sitios (Site Diversity)
- Conformación del haz de antena (Antena Beam Shaping)
- Modulación adaptiva y codificación

La mayoría de estas técnicas fueron desarrolladas en el satélite experimental ACTS de la NASA en los años 90. Muchas de ellas han sido modelo a seguir para la mayoría de los sistemas satelitales operando en la banda Ka a principios de este siglo.

4.1. REDUCCIÓN DEL DESVANECIMIENTO

La reducción del desvanecimiento involucra la detección del mismo reaccionando hacia él de una manera rápida y precisa. La detección del desvanecimiento puede ser realizada a través de mediciones de la señal del radiofaro (beacon) del satélite, la relación Señal/Ruido (C/N), la relación de bits en error (BER) o el ruido celeste (Sky Noise) [1].

Existen diversos métodos propuestos con los cuales puede ser medido el desvanecimiento, uno de ellos es el método de la contramedida del desvanecimiento (Fade Countermeasure) o también conocido como FCM [2].

Este método está basado en predecir el desvanecimiento o comportamiento que puede sufrir una señal en un tiempo corto (por ejemplo, un segundo después), de tal forma que se pueda tomar una decisión apropiada antes de que la señal caiga debajo de algún valor específico [2].

Generalmente este método es aplicado en la medición de la potencia de la señal en las frecuencias del enlace de bajada. Después de inferir la atenuación por lluvia de tales mediciones, se puede estimar el incremento en potencia que se debe realizar en el enlace de subida utilizando el método del escalamiento en potencia en la frecuencia de atenuación para el espectro utilizado en el enlace de subida. El diagrama a bloques del método mencionado se muestra en la Figura 4.1.1 [2].

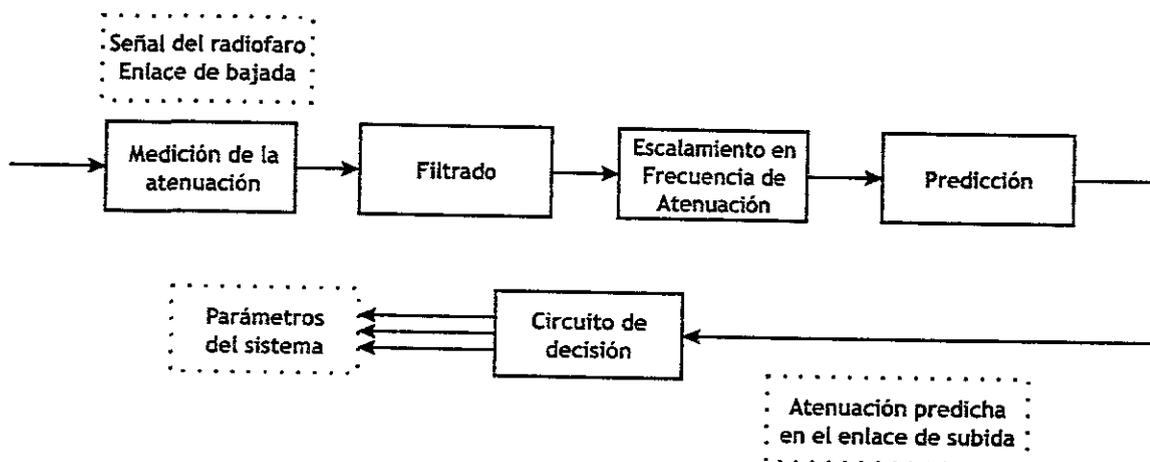


Figura 4.1.1 Estructura de un sistema predictorio FCM.

De acuerdo al diagrama, la señal del radiofaro satelital debe ser filtrada con el objeto de prevenir el impacto de fluctuaciones rápidas del nivel de la señal en el módulo del predictor. La frecuencia de corte del filtro debe caer entre 0.01 y 0.03 [Hz] y la atenuación del filtro pasobanda debe ser de al menos 40 [dB]. Sin embargo, el proceso de filtración introduce un retardo, el cual debe ser compensado; por lo que para este propósito, un valor instantáneo de la curva de desvanecimiento (por ejemplo, la diferencia entre el nivel de señal actual y el nivel previo) puede ser utilizada. Asumiendo que la curva de desvanecimiento permanece constante, el valor de la señal predicha puede ser encontrado de la siguiente manera [2]:

$$S_p[K+1] = S_f[k] + (S_f[k] - S_f[k-1])(N/2+1) \quad (4-1)$$

donde:

- S_p = señal predicha
- S_f = señal medida y filtrada
- N = orden del filtro.

El desempeño de este esquema de predicción y compensación del retardo para diversas longitudes del filtro han sido investigadas y se ha llegado a la recomendación de que el mejor desempeño se logra con un filtro de orden 20 [2].

Los parámetros de transmisión (por ejemplo, la potencia de salida del transmisor para el control de potencia para el enlace de subida) son seleccionados de acuerdo al nivel actual de la señal predicha S_p y del historial del evento. La Figura 4.1.2 explica el proceso de decisión [2].

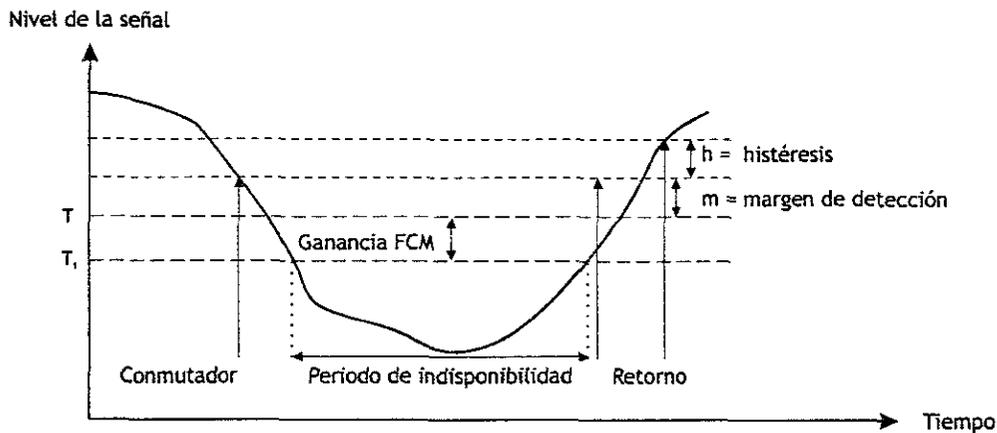


Figura 4.1.2 Principio de la selección de parámetros del sistema FCM.

El nivel mínimo de la señal requerida para conocer el criterio de la calidad del enlace es igual al valor umbral T . El sistema FCM introduce dos parámetros que junto con el valor T se controla el comportamiento del sistema. Esos parámetros son el margen de detección del desvanecimiento (m) y el valor de histéresis (h). El valor de $T + m$ es tratado con un nivel mínimo aceptable de la señal monitoreada predicha. El margen de detección del desvanecimiento es usado como una protección en contra de fluctuaciones rápidas de la señal recibida y en contra de la inexactitud del esquema de predicción. El valor de m puede ser cualquier constante o puede ser adaptada a la variación actual de la componente de fluctuación rápida (por ejemplo, varianza del movimiento de centelleo). Si el sistema detecta un nivel de señal más bajo que $T + m$, los parámetros seleccionados son cambiados de tal forma que el nivel de señal recibido sea reducido a T_1 . La diferencia entre T y T_1 es la ganancia del sistema FCM. El sistema podría llegar a ser no disponible si el nivel de la señal recibida decrece debajo de T_1 . Durante la recuperación del desvanecimiento los parámetros de transmisión originales son almacenados sólo cuando el nivel de la señal excede el valor de $T + m + h$. La histéresis es introducida de tal forma de prevenir conmutaciones frecuentes de los parámetros de transmisión en caso de que el nivel de señal oscile alrededor del umbral de decisión $T + m$ [2].

La selección más adecuada de los valores m y h es crucial para el desempeño del sistema FCM. Dichos valores pueden ser estimados gracias a simulaciones realizadas en el sistema [2].

En general, la reducción del desvanecimiento puede tener un impacto global sobre toda la capacidad de la red. La cantidad de la capacidad perdida está en función de la técnica de reducción y sobre el método empleado. Las técnicas de reducción del desvanecimiento mencionadas al inicio de este capítulo son discutidas a continuación, en cuatro apartados diferentes [1].

4.1.1. Control de potencia para el enlace de subida

El control de potencia para el enlace de subida involucra incrementar la potencia transmitida en la estación terrena en proporción al desvanecimiento estimado previamente en el enlace de subida. Este puede ser implementado de diversas formas [1]:

- Lazo abierto (Open-loop)
- Lazo cerrado (Closed-loop)
- Lazo retroalimentado (Feedback-loop)

El esquema del lazo abierto está basado en la estimación del desvanecimiento a través de medios independientes como puede ser el monitoreo de la señal del radiofaro satelital. En implementaciones del lazo cerrado, la estación terrena transmisora usa su propia portadora para estimar el desvanecimiento en el enlace de subida. Con el esquema del lazo retroalimentado, una estación de control central envía comandos hacia cada estación terrena en la red para ajustar su potencia compensando así su propio enlace de subida [1].

En términos de complejidad en la implementación, el esquema del lazo abierto es el menos complejo, debido a que éste puede ser implementado en cada estación terrena sin necesidad de sistemas de consideraciones mayores. En el caso del lazo cerrado, éste no siempre puede ser implementado debido a que la disponibilidad de la portadora depende de la configuración de la red. El esquema del lazo retroalimentado es el más complejo ya que requiere de sistemas de consideraciones más grandes y de recursos adicionales; ambos tienen lugar en la estación terrena así como en el satélite [1].

La precisión del control de potencia tiene una amplia preocupación en sistemas propensos a interferencias de canales adyacentes. Además, la transmisión de una potencia excesiva puede causar daños al segmento espacial y también a satélites adyacentes. En el caso de sistemas con lazo cerrado y con lazo retroalimentado pueden proporcionar una exactitud en el control de potencia muy superior. En el caso de sistemas con lazo abierto, exactitudes semejantes a las de los otros dos sistemas pueden ser obtenidas usando una señal de radiofaro cercana a la frecuencia transmitida para estimar el desvanecimiento en el enlace de subida. En ausencia de una señal de radiofaro en la banda de frecuencias del enlace de subida, una señal de radiofaro dentro de la banda de frecuencias del enlace de bajada puede ser usada para estimar el desvanecimiento en el enlace de subida. Este método es menos exacto debido a que el desvanecimiento en el enlace de subida y en el enlace de bajada no están directamente correlacionados. Sin embargo, niveles exactitud aceptables pueden ser alcanzados a través de consideraciones cuidadosas en factores de propagación involucrados en el proceso de desvanecimiento [1].

4.1.2. Diversidad de sitios

La presencia de un desvanecimiento variable o distinto debido a la lluvia en diversos lugares o localidades (diversidad de sitio) tiene una ventaja significativa para el desarrollo del método de aumento de la disponibilidad del enlace. El método establece la instalación de estaciones terrenas separadas a no menos de 10 [Km] entre ellas o por lo menos, la separación de los sitios debe ser tal que dos sitios experimenten desvanecimientos no correlacionados. Dichas

estaciones deberán estar conectadas vía la infraestructura de telecomunicaciones terrestre existente en los sitios involucrados [1].

Sin embargo, en muchos casos, el costo involucrado en la instalación de dos o más estaciones terrenas y la conexión entre ellas pudiera ser demasiado comparado con los beneficios que pudieran ser obtenidos. Esto es especialmente verídico en enlaces que transportan troncales telefónicas, donde los costos son demasiado elevados como para considerar el método [1].

En contraste, aumentar las disponibilidades de los enlaces en terminales VSAT, ambas conectadas a través de la infraestructura de telecomunicaciones terrestre, puede ser una buena idea al existir un acuerdo de compartición de tráfico entre varios usuarios quienes además compartirían los costos y los beneficios involucrados [1].

4.1.3. Conformación del haz de la antena

La conformación del haz de la antena satelital puede ser usado para proporcionar ganancia adicional en regiones que experimentan lluvias muy fuertes. Esto puede ser hecho siempre y cuando se cubra el costo de disminuir la ganancia de las antenas en las áreas en donde el desvanecimiento no es considerado como excesivo. Con esta aproximación, la ganancia en exceso del orden de varios dB's puede ser proporcionada para combatir el desvanecimiento. La Figura 4.1.3.1 muestra un ejemplo del desvanecimiento experimentado en 20 [GHz] sobre los Estados Unidos de Norteamérica para un satélite localizado en 100° W considerando una disponibilidad del 99.9%. Cada contorno de color diferente corresponde a atenuaciones distintas, que pueden tener variaciones de un extremo a otro de hasta 12 dB; la conformación del haz de la antena puede ayudar a reducir esta variación a niveles controlables, debajo de los 7 u 8 [dB] [1].

Las cargas útiles convencionales para las comunicaciones satelitales comerciales en general son diseñadas de acuerdo a los requerimientos de una misión específica. Una configuración específica del haz de la antena y de la cobertura es obtenida a través de un reflector de antena conformado o de un reflector de antena de multicorneras. Un canal de potencia específico es obtenido al seleccionar apropiadamente el Amplificador de Tubo de Ondas Viajeras (TWTA) o el Amplificador de Potencia de Estado Sólido (SSPA) y de un plan de frecuencias específico que es implementado por el multiplexor de salida [3].

La naturaleza habitual en el diseño del satélite es un factor limitante en la reducción del costo y el tiempo de entrega del mismo. Esto también es consecuencia en la construcción de una carga útil con una flexibilidad mínima en órbita, la cual incrementa el riesgo asociado con el plan de negocios. Muchas cargas útiles también son limitadas en potencia por la disipación térmica disponible en el bus¹ del satélite [3].

Es bien conocido que una arquitectura de carga útil con un arreglo activo con control de fase adaptivo (APA o Active Phased Array) tiene el potencial de superar las limitaciones de flexibilidad asociadas con los satélites convencionales de comunicación. Esta arquitectura es aplicable tanto a los arreglos de recepción como en los de transmisión [3].

¹ Chasis o grupo de cables dentro del sistema espacial, a través de los cuales se transmiten señales eléctricas desde una sección funcional a otra.

El beneficio inmediato de utilizar un APA es el alto nivel de reconfiguraciones en órbita que pueden ser realizadas. Casi cualquier forma de área de cobertura y cualquier forma de área de lóbulos laterales bajos puede ser definida. Sin embargo, las restricciones primarias son que el patrón de cobertura de tamaño mínimo no puede ser más pequeño que el haz puntual de tamaño mínimo que la antena puede definir y que la región de los lóbulos laterales debe ser aproximadamente tres anchos de haz del haz puntual de tamaño mínimo [3].

Para aplicaciones de multihaz APA, la potencia por haz también es reconfigurable. Los SSPA's generan una cantidad definida de potencia de radiofrecuencia, la cual puede ser dividida arbitrariamente entre los haces al ajustar el nivel relativo de la señal asociada con cada haz. La Figura 4.1.3.1 muestra dos ejemplos de áreas de cobertura que pueden ser creadas utilizando un APA [3].

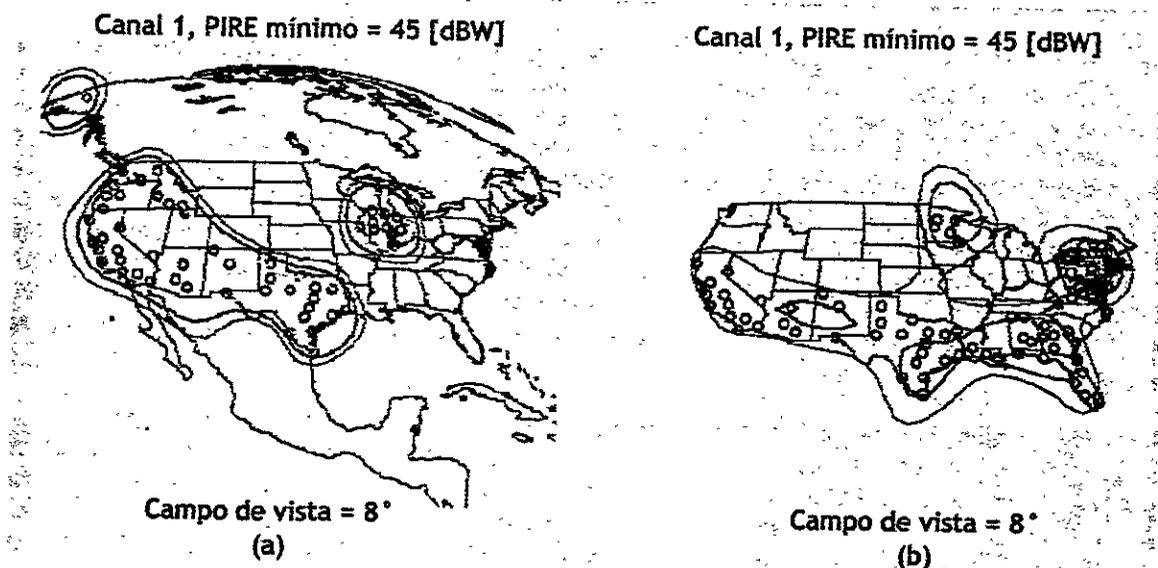


Figura 4.1.3.1 Ejemplos de áreas de cobertura que pueden ser sintetizadas utilizando un APA: (a) banco representativo, (b) cadena de almacenamiento representativa (el patrón de cobertura incluye Hawaii).

Este tipo de flexibilidad en la forma de las huellas de los haces reduce ampliamente el riesgo del plan de negocios asociado con el satélite ya que es posible reconfigurar el área de cobertura para responder a los mercados cambiantes. Esto es particularmente aplicable en satélites con un gran número de haces independientes ya que cada haz puede ser dirigido a un área de cobertura específica requerida por algún usuario [3].

En contraste con los satélites convencionales, las áreas de cobertura no son críticamente determinadas por la posición orbital satelital. Esta flexibilidad también hace posible (siempre y cuando las licencias estén disponibles) mover haces o el satélite completo para servir a mercados con altas tasas de arrendamiento, lo cual maximiza los ingresos [3].

El APA, cuando es combinado con un procesador o con un banco de filtros de conmutación a bordo, también puede ser flexible con respecto a la asignación de frecuencias de los haces. En

particular, el ancho de banda asociado con cada haz puede ser cambiado para responder a la demanda del mercado. Otro beneficio de los APA's es que el desempeño de la antena está ligado a la suma de los desempeños de muchos cientos o miles de elementos. Si cualquier elemento falla, este tiene un muy pequeño impacto en el desempeño del APA como un todo. Este atributo es conocido como una degradación agraciada resultante en una alta disponibilidad [3].

Aplicaciones del APA en funcionamiento tienen muchos otros beneficios:

- Pueden ser diseñados para radiar directamente el calor generado hacia el espacio. Esto generalmente reduce la disipación térmica dentro del bus de la aeronave, el cual es el factor primario que limita la potencia de las comunicaciones del satélite [3].
- Pueden tener aperturas más grandes en configuraciones de nadir. Esto resulta en un haz puntal de tamaño mínimo de mucho menor tamaño, lo cual significa que pueden ser creados haces mucho más precisos y relativamente pequeños. Esta característica tiene ventajas muy grandes en mercados tales como Europa, donde la demanda de usuarios está altamente localizada. Por ejemplo, es posible crear haces que sean distribuidos adecuadamente de regiones donde se hable el mismo idioma. Esos haces pueden ser sintetizados para tener lóbulos laterales pequeños, lo cual permite un nivel alto de reuso de frecuencias [3].
- Pueden general niveles altos de potencia de radiofrecuencia. Esto es alcanzado utilizando aperturas grandes, las cuales combinan la potencia de radiofrecuencia generada por muchos cientos o miles de SSPA's de relativa baja potencia [3].

A pesar de esos beneficios significativos, el uso de las antenas APA para aplicaciones espaciales han sido limitadas por mucho factores, incluyendo:

- Costo alto y conglomerado de componentes activos y conformadores de haces
- Eficiencia inadecuada de los SSPA's en una operación de multiportadoras
- Confiabilidad de los SSPA's en una operación de multiportadoras [3].

Actualmente, avances recientes en la tecnología de SSPA's, manufactura y empacamiento de componentes están reduciendo esas limitaciones [3].

Debe ser notado que una comparación directa de la eficiencia de un TWTA de una sola portadora (típicamente mayor al 50%) y la eficiencia de un SSPA multiportadoras (típicamente del 20 al 30%) no siempre es un buen indicador de la potencia relativa consumida de las cargas útiles con la misma capacidad en el enlace de bajada. Una carga útil convencional típicamente tendrá pérdidas más altas, de 1 a 2 [dB], después del TWTA, comparado con lo que tendrá un APA después de su SSPA. Contribuyentes mayores a esta pérdida incluyen las salidas del multiplexor y de la guía de ondas, los cuales conectan a los TWTA's con los alimentadores de la antena. Es común para un porcentaje significativo de los TWTA's en las comunicaciones satelitales que sean operados a una potencia de salida reducida para alcanzar una relación potencia a ruido (NPR) aceptable en una operación de multiportadoras [3].

Un factor trascendental que impacta a la potencia de radiofrecuencia utilizable es la tendencia hacia las áreas de cobertura grandes. Esto es conducido por la necesidad de minimizar el riesgo del plan de negocios pero a la vez maximizando el potencial de la estación del usuario. La finalidad de esta tendencia es que un porcentaje creciente de la potencia de radiofrecuencia incorporada en cada haz de la carga útil convencional es gastada iluminando la superficie de la Tierra en regiones donde el usuario no tiene terminales terrenas. Por el contrario, los APA's de multihaz gastan mucho menos potencia debido a que cada haz puede ser ajustado a las necesidades exactas de cada usuario [3].

Otro reto trascendental para los APA's es el requerimiento del control adecuado de la amplitud y la excitación en fase a través de la apertura del arreglo para proporcionar el aislamiento haz-contra-haz para aplicaciones con reuso de frecuencias y para apuntar adecuadamente hacia la zona de cobertura requerida [3].

Los elementos fundamentales de este tipo de antena construida en bloques es un subarreglo de multihaz, en donde cada subarreglo está conformado por:

- Puertos de entrada de la señal, el control y la potencia
- Redes de Distribución
- Conformadores de haz con atenuadores independientes y desplazadores de fase para cada haz
- SSPA's distribuidos
- Filtros de salida y elementos de antena radiadores
- Controladores digitales y Acondicionadores Electrónicos de Potencia (EPC's) [3].

El diagrama de bloques de una antena APA es mostrada en la Figura 4.1.3.2.

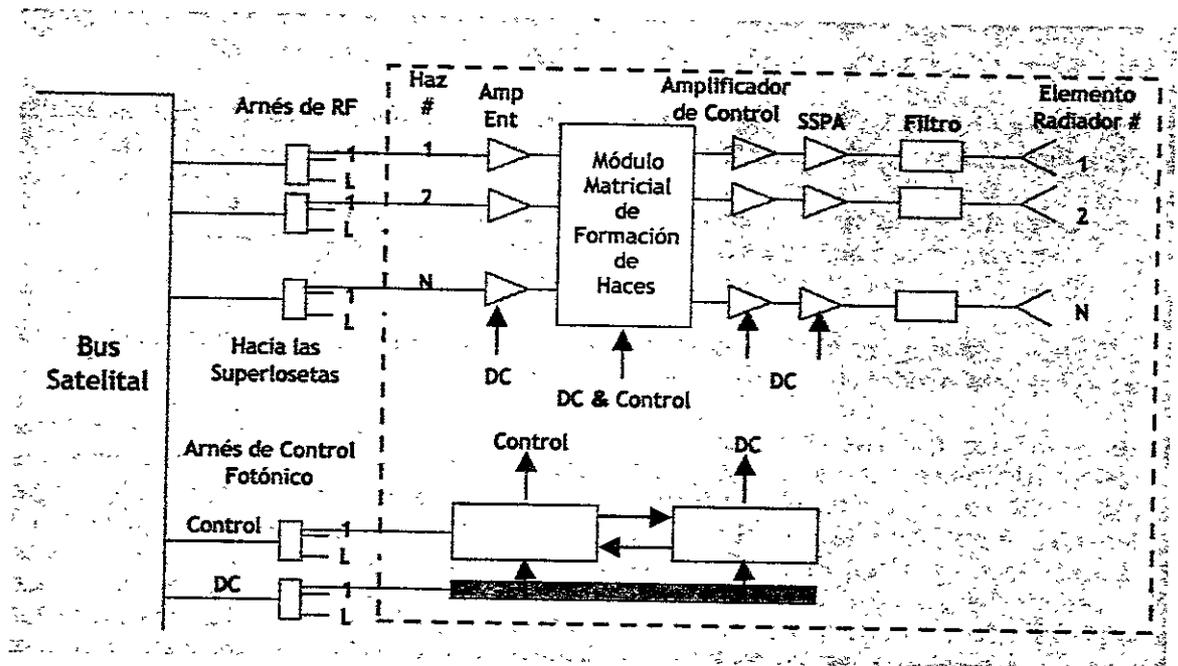


Figura 4.1.3.2 Diagrama de bloques de una antena APA.

La antena completa está formada de un número dado de estos subarreglos montados en la armadura de la antena e interconectados por dispositivos de radiofrecuencia, de control y de corriente directa. Generalmente son requeridos una unidad de control de la antena y un subsistema de calibración [3].

Cada subarreglo es configurado mecánicamente utilizando una arquitectura de losetas en el cual los amplificadores, las redes de distribución y los circuitos conformadores de radiofrecuencia son orientados en capas finas paralelas a la apertura de la antena. Esto

finalmente forma lo que se conoce como un arreglo delgado, el cual es óptimo para el enfriamiento de radiación directa (debido a que la longitud de la trayectoria térmica es minimizada). Esto también minimiza el volumen del arreglo, lo cual maximiza el área del arreglo, el cual puede ser ajustado dentro del compartimiento destinado en el vehículo de lanzamiento [3].

Finalmente, el diagrama esquemático de este tipo de antena es mostrado en la Figura 4.1.3.3. en donde se define un arreglo de losetas como una "superloseta", y mostrada a detalle en la Figura 4.1.3.4 [3].

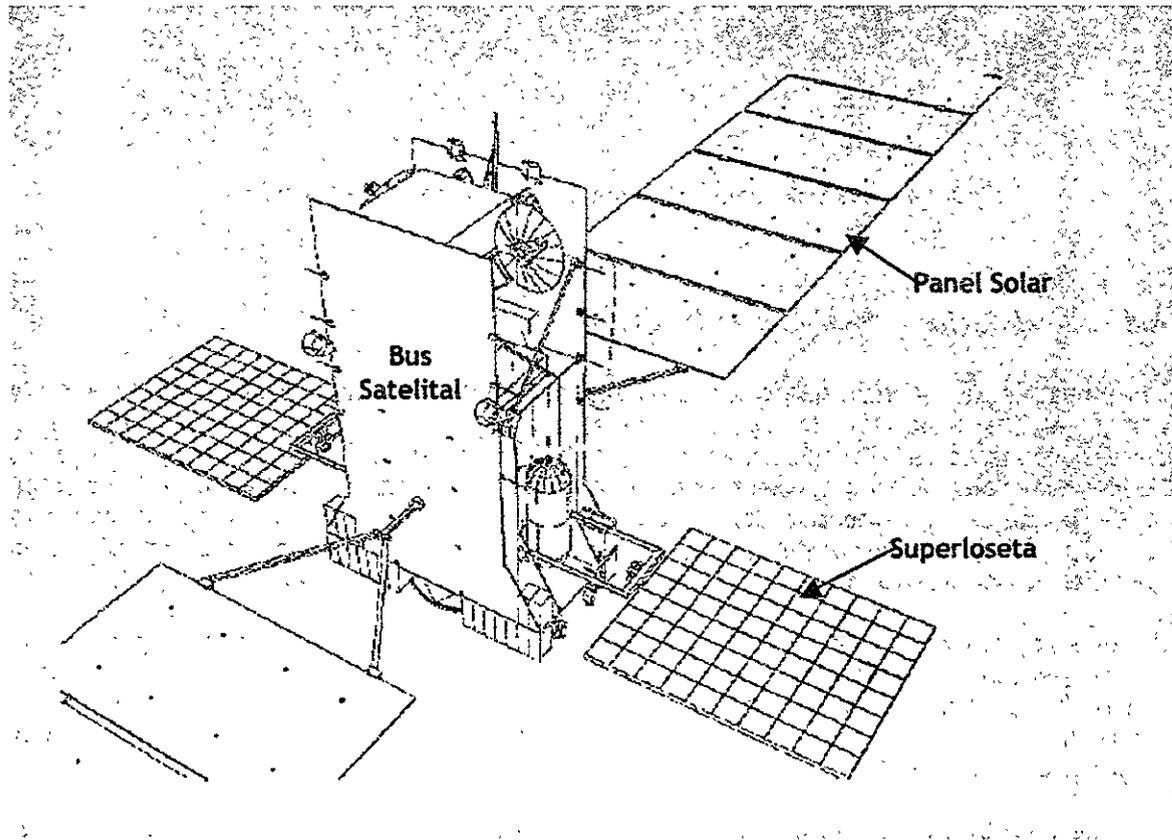


Figura 4.1.3.3 Diagrama esquemático de un satélite con antenas APA.

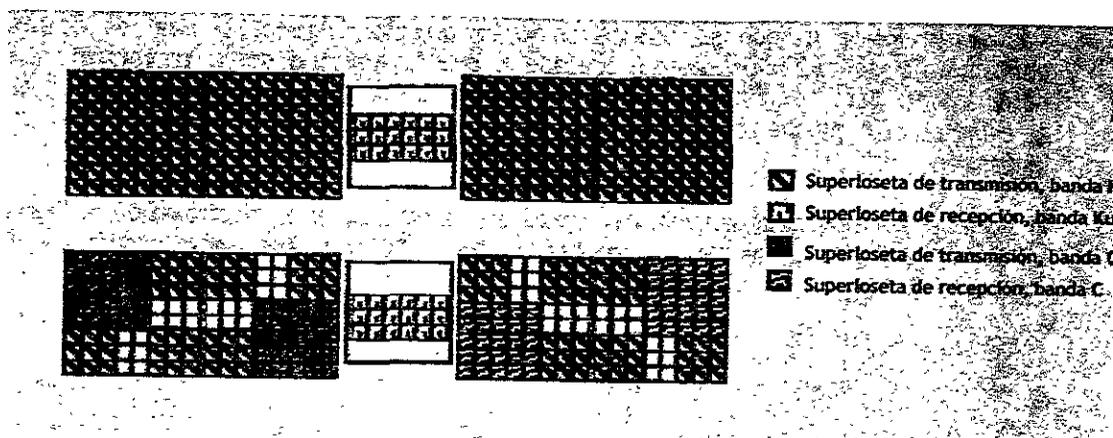


Figura 4.1.3.4 Diagrama esquemático de un arreglo de Superlosetas.

4.1.4. Modulación adaptiva y codificación

La atenuación atmosférica, particularmente aquella debida a la lluvia, es muy perjudicial en la banda Ka. Una posibilidad de superar el efecto de la lluvia es incluir márgenes fijos en el dimensionamiento del sistema. Sin embargo, dichos márgenes deben mantener, dentro de los límites razonables, los requerimientos tanto en la potencia de la terminal de usuario como en el de la carga útil satelital, por lo que esquemas de codificación poderosos con alta redundancia necesariamente deben ser implementados, aunque esto impacte directamente en la eficiencia del sistema [4].

Por otra parte, tomando en cuenta que los eventos de lluvia están ampliamente ligados en el tiempo y el espacio, adoptar márgenes de lluvia fijos no parece ser muy eficiente. Una solución alternativa es variar la tasa de modulación y codificación dinámicamente de acuerdo a las condiciones del canal de comunicación. Lo anterior es conocido como modulación y codificación adaptiva [4].

De acuerdo a este esquema, una eficiencia espectral alta puede ser proporcionada cuando el canal es bueno o cuando la capacidad de corrección de errores del código puede ser incrementado durante eventos de lluvia. Por lo que la totalidad de la tasa de transmisión en un instante dado puede ser incrementada al proporcionar un acoplamiento adecuado entre el esquema de transmisión y el canal de propagación [4].

Los esquemas de modulación y codificación adaptiva necesitan de un mecanismo que decidirá cuándo debe ser cambiada la tasa de transmisión. Dicho mecanismo se basa en la estimación de Relación Señal a Ruido (SNR) [4].

Los métodos para la estimación del SNR pueden ser divididos en dos categorías: método no-banda base y método banda base. El método no-banda base es desarrollado a través de la medición del nivel de potencia recibida de la señal del radiofaro satelital. El método banda base se desarrolla durante o después de que la señal es demodulada [4].

Generalmente, el método banda base es el más utilizado hoy día y existen cinco esquemas que han sido ampliamente desarrollados:

- Tasa de error de modulación (re-codificación)
- Propiedades estadísticas de la señal demodulada
- Métrica del decodificador Viterbi
- Seudo-error
- Método de la media (MOM)

Diversos estudios han demostrado que el método de la media tiene muchas ventajas comparado con los otros [4].

Existen varios esquemas de modulación: BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM donde la más empleada en comunicaciones satelitales digitales es la QPSK. Para la codificación existen dos tipos muy comunes: Viterbi y Secuencial. También existen varias tasas de códigos perforados referenciadas generalmente a la Corrección de Errores por Adelantado (FEC): 1/2, 1/4, 3/4, 4/5, 1/8, etc.

La determinación de las características arriba mencionadas está relacionada con el ancho de banda y potencia requeridos. A continuación se presentan las fórmulas matemáticas generales para la determinación del ancho de banda empleado.

Modulación BPSK:

$$BW_{BPSK} = \frac{t_b \times R_{off}}{FEC}$$

Modulación QPSK:

$$BW_{QPSK} = \frac{t_b \times R_{off}}{2 \times FEC}$$

Modulación 8PSK:

$$BW_{8PSK} = \frac{t_b \times R_{off}}{3 \times FEC}$$

Modulación 16QAM:

$$BW_{16QAM} = \frac{t_b \times R_{off}}{4 \times FEC}$$

donde:

- BW - Ancho de banda requerido [KHz];
- t_b - tasa de bits de información (banda base) [Kbps];
- R_{off} - Relación de caída del filtro paso bandas (Roll-off), generalmente proporcionado por el proveedor satelital; Valor típico = 1.14
- FEC - Tasa de corrección de errores por adelantado. Típico = 3/4

Ejemplo: Un usuario desea transmitir una $t_b=64$ [Kbps], con una modulación QPSK, un $FEC=3/4$, suponiendo un $R_{off}=1.14$, ¿Cuál es el BW requerido en el satélite?

$$BW_{QPSK} = \frac{t_b \times R_{off}}{2 \times FEC} [KHz]$$

$$BW_{QPSK} = \frac{64 \times 1.14}{2 \times \frac{3}{4}} [KHz]$$

$$BW_{QPSK} = 48.64 [KHz]$$

El valor mínimo requerido de la energía del bit sobre la densidad de ruido ($\frac{E_b}{N_o}$) está basado en el tipo de modulación, la Tasa de Bits en Error deseada (BER) y el FEC empleado; dicho valor generalmente es obtenido de las especificaciones del módem satelital utilizado. El valor $\frac{E_b}{N_o}$ es uno de los varios parámetros necesarios para la determinación del diámetro de la antena y la potencia del amplificador que debe ser utilizado; estos valores son obtenidos a través del cálculo del enlace.

Se puede deducir de las fórmulas mostradas anteriormente que entre más grande sea el valor del FEC, menos ancho de banda será requerido en el satélite, pero se necesitará más potencia para alcanzar el nivel de $\frac{E_b}{N_o}$ deseado para obtener una tasa de bit en error adecuada.

Generalmente se considera una tasa de bits en error (BER) menor a 1×10^{-8} en comunicaciones satelitales, aunque para los sistemas descritos en el capítulo 2 se estiman tasas de bits en error mínimas de 1×10^{-10} . En la Figura 4.1.4.1 se pueden observar las diferentes curvas de desempeño de acuerdo a la Corrección de Errores por Adelantado (FEC), la Relación de Bits en Error (BER) y la Relación de la Energía del Bit respecto del Ruido ($\frac{E_b}{N_o}$) [5].

Finalmente, cuando un existe un evento de lluvia, el FEC puede ser disminuido, lo que involucra requerir más ancho de banda en el satélite, pero menor potencia en la estación terrena, considerando la misma tasa de bits de información del usuario; lo que disminuye la eficiencia de utilización de la capacidad de manejo de información en el satélite. Sin embargo, esto garantiza que el enlace tendrá la calidad mínima requerida para el desempeño correcto de las aplicaciones de usuario.

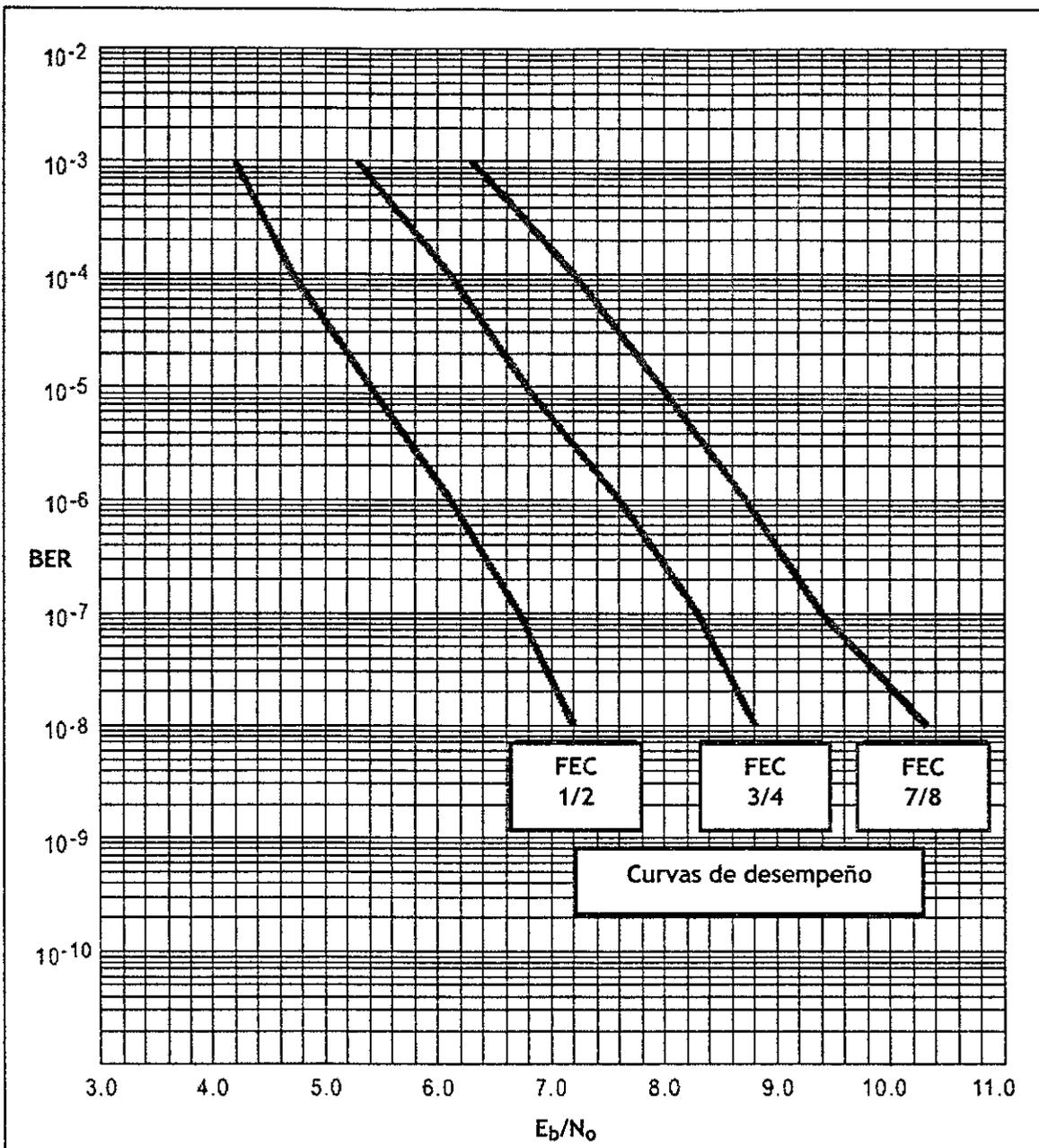


Figura 4.1.4.1 Curvas de desempeño de la Relación Bit en Error (BER) para distintas Correcciones de Error por Adelantado (FEC).

4.2. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Dissanayake, A., "Propagation modelling and fade mitigation for Ka-band satellite systems", Antennas and Propagation Society International Symposium, 2000. IEEE , Volume: 2, 2000. Page(s): 550 -553 vol.2
- [2] Czarnecki, M., "Compensation of rain attenuation for Ka-band satellite systems", Microwaves, Radar and Wireless Communications. 2000. MIKON-2000. 13th International Conference on , Volume: 2 , 2000. Page(s): 439 -442
- [3] Jacomb-Hood, A.; Lier, E., "Multibeam active phased arrays for communications satellites", IEEE Microwave Magazine , Volume: 1 Issue: 4, Dec. 2000. Page(s): 40 -47.
- [4] Rosmansyah, Y.; Valadon, C.; Evans, B.G., "Adaptive modulation and coding for ka-band satellite air interface", Broadband Satellite: The Critical Success Factors - Technology, Services and Markets (Ref. No. 2000/067), IEE Seminar on, 2000. Page(s): 19/1 -19/6.
- [5] EF DATA Corporation, "SDM-300 Satellite Modulator Installation and Operation Manual", Revision 4, 1997.

5. CONCLUSIONES

Una aplicación más de las comunicaciones satelitales consistirá en proveer a usuarios fijos y móviles de Internet con conexiones multimedia y de banda ancha. El tremendo crecimiento a nivel mundial del uso de Internet y servicios multimedia, apresuró la ambiciosa planeación y evolución de sistemas de comunicación satelital de banda ancha comerciales. Los sistemas que han sido propuestos deberán proveer servicios interactivos en ambos sentidos para poder soportar tasas de datos en el rango de 1 a 20 [Gbps] por satélite.

Debido a la congestión del espectro y con el fin de ofrecer canales de transmisión más amplios para aplicaciones multimedia, los sistemas de comunicación satelital están evolucionando hacia bandas de frecuencia mayores.

Es por eso que debido a las pobres asignaciones de las ya congestionadas bandas C y Ku, la Unión Internacional de Telecomunicaciones ha otorgado concesiones a organizaciones satelitales para operar sistemas satelitales de banda ancha en el espectro de la banda Ka (referida al rango de 20/30 [GHz]) y mayores.

La mayoría de los sistemas en banda Ka propuestos buscan proveer cobertura nacional, regional o global mediante la aplicación de constelaciones satelitales ya sea GEO, MEO o LEO.

En el primer capítulo se planteó cómo este desarrollo en las comunicaciones satelitales ha abierto una gama de oportunidades a explotar, siendo una de ellas la importante factibilidad de implementar constelaciones de satélites; siendo éstas ya no sólo en la tan explotada órbita geoestacionaria (GEO), sino ahora también en otras órbitas como lo son las órbitas bajas y medias (LEO y MEO).

Un sistema de comunicaciones global que use este tipo de órbitas, requiere de un gran número de satélites, en varias órbitas con diferentes inclinaciones. Por lo tanto, cuando un satélite que da servicio a un usuario en particular se mueve bajo el horizonte local, necesita ser capaz de hacer una transferencia de servicio ("handover") a otro satélite en la misma órbita o en una adyacente.

La cercanía terrestre de los satélites en órbita baja les permite operar con una potencia relativamente menor y con antenas en las estaciones terrenas de menor tamaño, comparadas con los sistemas en órbitas geoestacionarias, lo cual representa una gran ventaja para los servicios móviles actuales, donde se requieren transmisores y receptores ligeros y compactos.

La proximidad a la tierra significa también un menor retraso en la señal o, mejor dicho, menor latencia, lo cual es requerido para dar una calidad óptima en las comunicaciones.

Las constelaciones por tanto, conmutan señales entre sí, almacenando y enviando paquetes; cubren todo el tiempo un punto dado en la tierra reduciendo el almacenamiento considerablemente.

Asimismo, se menciona que las constelaciones pueden presentar dos tipos de arquitectura en la comunicación, siendo una de ellas la denominada "bent-pipe" y la segunda aquella que hace uso de enlaces intersatelitales.

En la primera, cada satélite actúa como un transpondedor repetidor de conexión tonta. La comunicación es establecida por medio de una ruta de salto doble: terminal de usuario / satélite / estación terrena / red terrestre / estación terrena / satélite / terminal de usuario. El

retraso del enlace se ve mejorado considerablemente respecto de los GEOs debido a las bajas altitudes satelitales, aunque todavía no son completamente aceptables en el caso extremo de una terminal de usuario a otra, además de que se requiere un gran número de estaciones terrenas para que cada satélite siempre pueda ver a una estación terrena dentro de su huella y así poder pasar llamadas a y desde usuarios móviles en su región de cobertura. Por tanto se observa que el costo de construcción de estas estaciones compensará la ventaja de satélites baratos usando tecnología probada.

El segundo enfoque, permite a los satélites comunicarse entre sí, de tal manera que una llamada desde una terminal de usuario, pase al satélite y después sea enrutada a través de satélites vecinos hasta alcanzar un satélite visible desde la terminal de usuario destino. Esto permite disminuir el retraso de propagación considerablemente, siendo esta opción preferible para llamadas interactivas en tiempo real; además de tener la ventaja de poder construir menos telepuertos. De este modo se ha permitido la evolución de comunicaciones interactivas en tiempo real, vía conmutación de paquetes, con la integración de nuevo equipo para enlaces intersatelitales, operando generalmente en la banda de los 60 [GHz] con tasas de transmisión de 1 [Gbps].

Los satélites LEO ofrecen varios beneficios con respecto a los satélites geoestacionarios (GEO) y las redes terrestres. Su baja altitud reduce la latencia (tiempo de recuperación de datos), que es un parámetro muy delicado, más aún hablando de constelaciones GEO en donde el valor es bastante alto (500 [ms]). En suma, los satélites proveen una ventaja en costo sobre los sistemas móviles terrestres porque son capaces de cubrir un área mayor y por tanto reducir el costo de abastecimiento de un sistema omnipresente. La cobertura universal de los satélites LEO permite al usuario realizar funciones más fácilmente que con redes terrestres.

Se observa entonces que las razones que abogan por la arquitectura no geoestacionaria quedan dentro de las siguientes:

- *Menor tiempo de Propagación de la señal*
- *Potencia y presupuesto del enlace*
- *Reutilización del espectro de frecuencias*
- *Cobertura amplia y global*
- *Angulo de elevación*
- *Transportación múltiple de satélites a lanzar*
- *Peso del satélite*
- *Terminales de usuario de menor tamaño, móviles y fijas con tasas de datos variables*
- *Telepuertos (Estaciones gateway) distribuidos en todo el mundo, necesarios para maniobrar toda la carga interna de la red así como para mantener conexiones con enlaces en retraso. Interfaz entre las redes terrestres y espaciales.*

No se pretende sugerir con lo antes mencionado aquí que las arquitecturas de satélite no geoestacionario concebidas concretamente para los sistemas de comunicación personal global son necesariamente superiores, en general, a las arquitecturas de los satélites geoestacionarios; se ponen más bien en relieve los atributos de estas arquitecturas que resaltan y justifican el desarrollo en ellas como nuevas comunicaciones satelitales.

Sin embargo, también vale la pena aclarar que a pesar de todas las ventajas mencionadas, este tipo de arquitectura también presenta ciertas limitaciones específicas, como lo pueden ser las que a continuación se enumeran:

- *Geometría diversa y en ocasiones compleja en diseño, por extensión de área a servir, disponibilidad requerida y carga y distribución de tráfico.*

- *Vida útil relativamente corta, lo que implica tener un cierto número adicional de satélites como respaldo para mejor y oportuno mantenimiento de la constelación*
- *Efecto Doppler significativo debido a la relativa alta velocidad de los satélites.*
- *Tecnología compleja de conmutación a bordo para el caso de la arquitectura de enlaces intersatelitales.*
- *Costos del servicio*
- *Despolarización por lluvia.*

Como ya se mencionó, otro aspecto de gran importancia en el desarrollo de las nuevas y futuras comunicaciones satelitales, es lo referente a enlaces intersatelitales. Los satélites de comunicaciones desde sus inicios han funcionado como simples repetidores en el espacio. Conforme las necesidades de las comunicaciones espaciales evolucionan, se ha desarrollado el uso de enlaces entre los mismos satélites, con la finalidad de mejorar la capacidad, cobertura y conectividad de los sistemas satelitales actuales.

Sin embargo, para establecer enlaces intersatelitales cada satélite requiere tener transmisores, receptores y antenas adicionales, lo cual incrementa el peso de la carga y el costo del satélite. Por otro lado, los satélites en un sistema con enlaces intersatelitales no tienen que ver a las estaciones gateways en tierra todo el tiempo, por lo que el sistema se hace completamente independiente de las facilidades terrestres.

Cabe destacar que los enlaces intersatelitales han sido considerados no sólo para los sistemas satelitales LEO sino también para otros sistemas en donde las diferentes órbitas se entrelazan. Algunos planteamientos para comunicaciones globales proponen una combinación de satélites en órbitas bajas, medias e incluso geoestacionarias. En dichos sistemas, por ejemplo, los satélites LEO pueden cubrir tráfico denso y locales, mientras los satélites GEO y MEO pueden actuar como gateways o estaciones de control para los satélites LEO y también cubrir áreas más amplias y tráfico más esparcidos. En dichos sistemas, los enlaces entre satélites LEO, MEO y GEO permiten el intercambio de información y datos de control entre satélites de diferente órbita.

El advenimiento de los enlaces intersatelitales, mediante los cuales los satélites se comunican directamente entre sí por línea de vista, soportan comunicaciones de una terminal móvil a otra entre diferentes huellas satelitales (a pesar de introducir complejidades adicionales, tales como handover entre satélites), y remueven el tráfico desde la parte terrestre.

Con los enlaces intersatelitales, se tiene una mayor flexibilidad en el enrutamiento de información ya se crea redundancia inherente dentro de la red, y no se requiere de la visibilidad entre ambos, el usuario y el gateway, por cada satélite en la constelación.

Retomando el interés por tener satélites que ofrezcan servicios multimedia en bandas superiores, se destaca entonces que el espectro de la banda Ka ofrece diversas ventajas en el sistema incluyendo mayores anchos de banda y equipo de menor tamaño. Sin embargo, estas ventajas conllevan también un costo, ya que las comunicaciones en estas frecuencias son más susceptibles a afectaciones en la propagación que a frecuencias más bajas.

Todo este interés inició en su momento un gran trabajo de experimentación en la banda Ka, que resultó en la ahora factibilidad de tener sistemas funcionando en estas frecuencias, como resultado de la actividad experimental realizada en sistemas como el Advanced Communications Technology Satellite (ACTS) de la NASA en 1993.

El objetivo principal de los sistemas de banda ancha o multimedia será el mercado de la computación y se enfocarán más en las capacidades de transferencia de datos de alta velocidad

que en el abastecimiento de telefonía móvil. Sin embargo, entre los servicios que cabe destacar están: la videoconferencia en tiempo real, acceso a Internet a alta velocidad, servicios de banda ancha, distribución de señal de TV, aplicaciones de telemedicina, así como toda una gama de aplicaciones multimedia.

Los primeros sistemas o constelaciones de banda ancha probablemente surgirán alrededor del 2003 y 2004. Esto incluirá a algunos de ellos tanto en órbitas LEO, como es el caso de Teledesic y Skybridge, como también en órbitas GEO, que serían los casos de Astrolink y Spaceway. Cada uno de estos sistemas está bien definido y guiado por compañías como Lockheed Martín, Alcatel/Loral y Hughes Electronics, quienes han trabajado activamente en atraer socios, así como realizado grandes inversiones técnicas como monetarias.

La promesa de sistemas en la banda Ka tales como Teledesic, Skybridge, Astrolink y Spaceway es la de proporcionar servicios (basados en datos) directamente a usuarios mediante sus satélites. El reto para el diseño de estos sistemas es el de integrar nuevas y avanzadas tecnologías de comunicación satelital dentro de nuevas y existentes infraestructuras de red. Poderosos satélites con procesamiento digital a bordo y con conmutación de haces proporcionarán la interconectividad necesaria que permitirá a los usuarios comunicarse directamente con otros utilizando terminales de apertura muy pequeña (VSAT). Esto se ha alcanzado a través del uso de haces puntuales angostos distribuidos sobre el área de servicios de interés. Los sistemas del segmento terrestre tendrán una conectividad transparente para proveer servicios IP y ATM para la distribución de grandes archivos multimedia hacia y desde múltiples ubicaciones.

Debido a los beneficios del enlace derivados del procesamiento del satélite, de las capacidades de conmutación a bordo y de la ganancia de los haces puntuales, terminales muy pequeñas pueden interactuar entre ellas a tasas de transmisión muy altas. El diseño de la mayoría de los sistemas propuestos pretende trabajar con terminales que emplearán antenas de 0.5 a 1 metro de diámetro y una potencia que no excede a los 5 watts.

En la banda Ka, sin embargo, los fenómenos meteorológicos limitan grandemente la calidad y disponibilidad de los sistemas de comunicación satelital. Las limitaciones tecnológicas y económicas de las terminales VSAT no permiten el uso de márgenes de enlace grandes y fijos, por lo que algunas técnicas de mitigación adaptiva del desvanecimiento serán utilizadas con el fin de mejorar el desempeño de los enlaces.

El diseño y planeación de futuros servicios en la banda Ka requieren de estimaciones precisas sobre el impacto de los efectos atmosféricos (absorción gaseosa, atenuación por lluvia y nubes, centelleo) sobre el desempeño del sistema.

Los deterioros en la propagación producidos por la troposfera son un factor limitante para el uso efectivo de la banda Ka (20/30 GHz). La mayoría de los sistemas propuestos en dicha banda aspiran a utilizar terminales terrenas de menor tamaño para el consumidor y para aplicaciones de negocios. En general, el tener terminales pequeñas, no permite tener márgenes de enlace suficientes para interiores con el fin de combatir pausas relacionadas con la propagación.

Así los factores que afectan a los enlaces satelitales en la banda Ka operando en ángulos de elevación moderadamente altos incluye efectos refractivos y absorbentes. La absorción de gases, la atenuación por nubes, lluvia y por fusión de capas son efectos absorbentes que producen tanto atenuación de la señal como un aumento proporcionado en el ruido térmico recibido en el puerto de la antena. Los sistemas que emplean polarización ortogonal para implementar el reuso de frecuencias, sufren de interferencia producida por la despolarización por lluvia y hielo.

Sin embargo, el centelleo troposférico es no absorbente y produce atenuación de la señal así como incrementos de la misma.

Para los problemas que se presentan en la propagación en la banda Ka, existen diversas técnicas para mitigar el problema de desvanecimiento por lluvia, siendo una de ellas el emplear control de potencia en el enlace de subida durante períodos de deterioro por lluvia. Se logra con estos cambios en el nivel de potencia dentro del rango de 5 a 10 veces, logrando de 7 a 10 dB de mejora en el enlace. Sin embargo esta opción es cara y a menos que la potencia satelital sea también incrementada, el enlace podría aún fallar.

La segunda estrategia es conmutar a tasas de bits mucho menores durante períodos de lluvia. Esta opción no es apropiada para muchas aplicaciones, pero puede ser satisfactoria para algunas, tales como el acceso a Internet.

Una tercera opción para lograr un buen desempeño involucra el uso de la codificación concatenada. Los bits de la señal son procesados por un codificador, el cual suma bits redundantes que permiten que un decodificador en el receptor detecte y corrija errores. Sin embargo, este esquema (llamado codificación convolucional) falla si más bits están en error que lo que el esquema es capaz de corregir. Una ráfaga de errores es entonces producida. Para combatir esto, los bits son leídos en las columnas de una matriz Trellis y después sacados en renglones. Esto extiende el tiempo entre los bits con error, permitiendo que un segundo codificador de bloques externo los corrija.

Por otra parte, después de haber realizado una exhaustiva investigación sobre los sistemas existentes, se llega a la conclusión de que es muy posible que existan cambios en ellos y otros sistemas, por lo que no sería asombroso el hecho de que existan fusiones como lo sucedido en el caso de Teledesic y de ICO. Aunque estos cambios, de acuerdo al avance que tienen cada uno de estos proyectos, seguramente solamente se realizarán en el campo de las inversiones y no en el campo tecnológico. Con la finalidad de brindar servicios mucho más avanzados a costos muchos menores para así atraer a un mayor mercado.

Finalmente, de los cuatro sistemas investigados comercialmente hablando, nos hemos encontrado que Skybridge es el más avanzado ya que desde mediados de este año (2001) ha aumentado su mercadotecnia en exhibiciones y eventos referidos a las comunicaciones por satélite y muy posiblemente comience a prestar servicios en Norteamérica a mediados o fines del siguiente año, fecha similar en la que será lanzado el satélite regional Anik F2 para servicio a Norteamérica en la banda Ka.