



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAestrÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERIA ELECTRICA – TELECOMUNICACIONES

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE SATÉLITES DE TELECOMUNICACIONES
UTILIZANDO FORMATOS AVANZADOS EN LA BANDA KA

TESIS PROFESIONAL
Para optar por el grado de:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
EDUARDO DECLE PULIDO

DIRECTORES DE TESIS:

DR. SALVADOR LANDEROS AYALA
Facultad de Ingeniería UNAM.

DRA. FATIMA MOUMTADI
DIE, FI, UNAM, Depto. Electrónica

Ciudad Universitaria, México DF Diciembre 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Matías Maruri José María

Secretario: Dr. Vicente Vivas Esau

Vocal: Dr. Landeros Ayala Salvador

1er Suplente: Dr. Psenicka Bohumil

2do Suplente: Dra. Moumtadi Fatima

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, CU

TUTOR DE TESIS:
Dr. Salvador Landeros Ayala

FIRMA

TUTOR DE TESIS:
Dra. Fátima Moumtadi

FIRMA

Las comunicaciones por satélite en México se han venido usando a lo largo de la historia reciente, desde los lanzamientos de los satélites Morelos hasta la actualidad, sin embargo la creciente demanda de estos servicios han venido exigiendo una mayor capacidad del segmento espacial.

En este trabajo se pretende cambiar la forma en que se piensa respecto al uso de la banda Ka en México, en las comunicaciones por satélite, debido a la alta atenuación por lluvia y su costo referente a los satélites de comunicaciones de banda Ku se tiene en México una idea equívoca respecto al uso de esta banda, para esto se realizaron análisis completos respecto a las ventajas y desventajas del uso de la banda Ka en sus diversos formatos mediante simulaciones en código en matlab para realizar un presupuesto de enlace diversas áreas de la republica mexicana para así comprobar la fiabilidad de esta tecnología.

A Dios por darme la oportunidad de concluir esta etapa, permitirme la vida y la capacidad para ello.

A mis padres Ricardo Declé López y Luz del Carmen Pulido Noverola por su amor, por el apoyo incondicional a lo largo de todos estos años y por la enseñanza más grande que pude recibir en esta vida.....jamás darme por vencido, (esto lo hemos logrado juntos).

A mi tutor Dr. Salvador Landeros Ayala por su valioso tiempo, apoyo, consejos y paciencia para la realización de este trabajo.

A la Dr. Fatima Moumtadi, por su valioso tiempo, apoyo, consejos y paciencia para la realización de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM por la formación adquirida
A la Coordinación de Estudios de Posgrado (CEP) de la UNAM y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico dentro de mis estudios de maestría.

A mis hermanas Lorien y Lorena por su apoyo incondicional, su Fe hacía mí y por estar conmigo siempre en los momentos más difíciles.

A Montserrat Ruiz Domínguez por estar conmigo en todo momento, por creer en mí y apoyarme siempre, esto es el inicio del futuro soñado.

A mi familia y amigos que estuvieron conmigo apoyándome y creyendo en lo que estaba haciendo.

INDICE GENERAL**INTRODUCCION****OBJETIVO****DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA****ESTRUCTURA**

| | |
|--|----|
| CAPITULO 1: LOS SATELITES DE TELECOMUNICACIONES | 1 |
| 1.1 Evolución de los satélites de telecomunicaciones | 2 |
| 1.2 Sistemas de comunicación por satélite | 5 |
| 1.3 Descripción de un satélite de telecomunicaciones | 6 |
| | |
| CAPITULO 2: TECNOLOGÍAS ACTUALES DE LOS SATÉLITES DE TELECOMUNICACIONES | 9 |
| 2.1 Descripción de un satélite regenerativo con procesamiento a bordo | 10 |
| 2.2 Modulación en los satélites regenerativos con procesamiento a bordo | 11 |
| 2.2.1 Multiplexaje por división de frecuencia FDM | 12 |
| 2.2.2 Multiplexaje por división de tiempo TDM | 12 |
| 2.2.3 Modulación digital | 13 |
| 2.2.4 Técnicas de acceso múltiple | 15 |
| 2.2.5 Protocolos de acceso múltiple por satélite | 19 |
| 2.3 Antenas multihaz en satélites de comunicaciones | 21 |
| | |
| CAPITULO 3: SISTEMAS DE SATÉLITES REGENERATIVOS | 26 |
| 3.1 Ventajas de los satélites regenerativos en un enlace | 28 |
| 3.2 Comparación: Transpondedor transparente vs Regenerativo | 31 |
| 3.3 Partes funcionales de un transpondedor transparente | 32 |
| 3.4 Partes funcionales de un transpondedor regenerativo | 34 |
| 3.4.1 Arquitectura del transpondedor regenerativo | 35 |
| 3.5 Ventajas del uso de la banda Ka | 38 |
| 3.5.1 Ancho de banda satelital requerido | 39 |
| 3.5.2 Crecimiento por incremento en la tasa de transferencia | 39 |
| 3.6 Análisis de costo y capacidad de la banda Ka vs Ku | 41 |
| 3.7 Tendencias tecnológicas de los satélites de comunicaciones | 43 |
| 3.7.1 Telefonía satelital | 43 |
| 3.7.2 Internet de banda ancha | 44 |
| 3.7.3 Tv digital vía satélite | 48 |
| 3.8 Satélites en banda Ka operativos | 49 |
| | |
| CAPITULO 4: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS PRESUPUESTOS DE ENLACE DE SATÉLITES EN FORMÁTOS AVANZADOS | 51 |
| 4.1 Factores dentro de un enlace satelital | 52 |
| 4.1.1 Ruido de intermodulación | 53 |
| 4.1.2 Relación señal a ruido interferente | 54 |
| 4.1.3 Interferencia en sistemas adyacentes | 55 |

| | |
|--|-----|
| 4.2 Cálculos de pérdidas por propagación | 57 |
| 4.3 Definición del presupuesto de enlace ascendente | 67 |
| 4.3.1 Relación portadora densidad de ruido ascendente | 68 |
| 4.3.2 Relación portadora ruido ascendente | 69 |
| 4.3.3 Relación portadora a ruido ascendente total del sistema | 69 |
| 4.4 Definición del presupuesto de enlace descendente | 70 |
| 4.4.1 Relación portadora densidad de ruido descendente | 70 |
| 4.4.2 Relación portadora ruido descendente | 70 |
| 4.4.3 Relación portadora a ruido descendente total del sistema | 71 |
| 4.5 Relación señal a ruido total | 71 |
| 4.5.1 Relación señal a ruido requerido | 72 |
| 4.5.2 Margen del enlace | 72 |
| 4.6 Enlace ascendente y descendente en satélite regenerativo | 72 |
| 4.7 Resultados de las simulaciones | 77 |
| | |
| CAPITULO 5: CONCLUSIONES | 113 |
| 5.1 Recomendaciones y conclusiones | 114 |
| | |
| ANEXOS | |
| Anexo A | 117 |
| Anexo B | 121 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 125 |

INTRODUCCIÓN

La especie humana desde sus inicios se ha caracterizado por la necesidad de comunicarse, es decir, es de carácter social, necesita de la comunicación; pues de otra manera viviríamos completamente aislados. Así, desde los inicios de la especie, la comunicación fue evolucionando hasta llegar a la más sofisticada tecnología, para lograr acercar espacios y tener mayor velocidad en el proceso.

Los satélites de comunicaciones han evolucionado nuestra capacidad de informar y comunicar, son más que un simple canal de comunicación, son una nueva perspectiva desde donde vemos a los demás y nos vemos a nosotros mismos.

Los satélites de comunicación son también redes, en el sentido clásico del término, líneas (frecuencias) a través de las cuales se transmiten informaciones desde un punto hacia otro. Lo que resulta sorprendente es constatar cómo a través de los siglos el concepto de canal de comunicación evoluciona y al perfeccionarse se complica. Simplemente hay que observar hasta qué punto se ha incrementado la densidad de las líneas de comunicación desde el telégrafo hasta el satélite, este incremento exponencial ha sido la principal causa de que tengamos que evolucionar hacia tecnologías que nos permitan cada vez mayores capacidades y velocidades de transmisión, para cumplir a su vez la cada vez mayor demanda de la comunicación.

Ante esta disyuntiva, se ha optado por utilizar formatos avanzados que nos permitan obtener mayores capacidades en cuanto a velocidad y espacio para así satisfacer la demanda creciente de las comunicaciones actuales, lo que nos hace pensar en la inclusión de estos formatos avanzados dentro de la banda Ka en México, lo cual nos brindaría una completa satisfacción en las demandas actuales pero debido al principal problema que representa la atenuación de esta banda nos hace preguntarnos lo conveniente de la implementación de esta tecnología satelital.

Actualmente en el mundo ya se emplea la banda Ka para diversos servicios dando resultados positivos, sin embargo en México aun no se le da la confianza a esta tendencia tecnológica lo que representa un atraso tecnológico en México.

Dentro de la siguiente investigación emplearemos diversas simulaciones para así considerar las ventajas y desventajas del uso de la banda Ka y sus formatos avanzados en México y determinar la conveniencia del uso de esta misma.

OBJETIVO

Analizar las ventajas y desventajas de los satélites regenerativos con procesamiento a bordo en la banda Ka en términos de potencia, ancho de banda, eficiencia y costo, mostrando los beneficios que ofrece la implementación de estos satélites en sistemas de telecomunicaciones y dar un análisis de la tendencia tecnológica que se debe seguir a futuro inmediato.

DESCRIPCION DEL PROBLEMA.

La cada vez mayor demanda de servicios de comunicaciones por satélite exige una mayor capacidad del segmento espacial para lograr mayor flexibilidad en el diseño de redes que permitan a su vez reducir costos en el segmento terrestre, por tanto es necesario analizar la conveniencia de migrar hacia nuevas tecnologías que permitan tal capacidad y desarrollo, tomando en cuenta los riesgos y costos que esto implica para ver realmente la solución real al problema.

ESTRUCTURA

Capítulo 1. En este se realiza una reseña histórica de la evolución de los satélites de comunicaciones hasta la actualidad reciente, además se describe a grandes rasgos los sistemas que conforman el satélite de comunicaciones haciendo énfasis en las tendencias tecnológicas de los mismos a futuro.

Capítulo 2. Aquí se describe concretamente las principales características de un satélite de comunicaciones, las modulaciones y sistemas de acceso de estos y se describen las principales diferencias entre los llamados satélites de comunicaciones transparentes con los satélites de comunicaciones regenerativos con procesamiento a bordo.

Capítulo 3. Aquí se desarrolla una reseña de las principales ventajas de un satélite regenerativo con procesamiento a bordo en cuanto a su eficiencia en los cálculos de enlace y costos de los mismos además realizaremos un análisis de las tendencias tecnológicas que rigen actualmente el mundo.

Capítulo 4. Se realiza una descripción de los métodos matemáticos empleados para el diseño de un enlace satelital y se describen las principales diferencias de un satélite regenerativo con procesamiento a bordo con un satélite transparente en cuanto a los enlaces de comunicaciones, además de que se realizan cálculos de enlace para su comprobación en cuanto a su eficiencia.

Capítulo 5. Mencionaremos nuestras conclusiones a la que llegamos después de todo el análisis antes mencionado y nuestras recomendaciones y un análisis de que tendencia tecnológica se debe de seguir en un futuro inmediato.

CAPÍTULO 1

LOS SATÉLITES DE TELECOMUNICACIONES

1.1 EVOLUCIÓN DE LOS SATÉLITES DE TELECOMUNICACIONES

Las comunicaciones por satélite son el resultado de la investigación en el área de las comunicaciones y cuyo objetivo es lograr cada día incrementar los rangos y las capacidades con el menor costo posible. La segunda guerra mundial favoreció la expansión de dos tecnologías muy distintas y a su vez necesarias, los misiles y las microondas. La experiencia adquirida en el uso combinado de estos dos abrió la era de la comunicación por satélite.^[1] Mientras que varias personas en la primera parte de este siglo, reconocieron la existencia de la órbita geoestacionaria de 24 horas, es el fallecido autor de ciencia ficción Arthur C. Clarke quién realiza la primera referencia a lo que hoy son los satélites, la hizo en octubre de 1945 quién publicó en la revista británica *Wireless World* el artículo titulado *"Extra Terrestrial Relays"* en el cual incluía la propuesta de un sistema de comunicación global utilizando estaciones espaciales hechas por el hombre. Clarke es autor también de la novela *"2001: una odisea espacial"* (1968). Esta propuesta, básicamente, decía lo siguiente: *"Un satélite artificial a la distancia apropiada de la tierra puede hacer una revolución (vuelta) cada 24 horas, es decir, podría parecer estacionario sobre un punto de la superficie de la Tierra, y tendría un rango óptico de casi la mitad de la superficie terrestre. Tres estaciones repetidoras, con una separación de 120° entre sí, pueden dar cobertura de señales de radio y microondas a todo el planeta"*; dando así la idea de la órbita geoestacionaria que más adelante pasaría de ser una idea a una realidad.

Esta idea comenzó a transformarse en realidad con el desarrollo del primer satélite artificial: el SPUTNIK 1 (*compañero de viaje* en ruso), que fue lanzado por la URSS el 4 de octubre de 1957 en una órbita elíptica de baja altura. Este satélite sólo emitía un tono intermitente, y estuvo en funcionamiento durante 21 días, marcando así el inicio de la era de las comunicaciones vía satélite. Investigadores de la Universidad Johns Hopkins comprobaron la posibilidad de determinar con gran precisión la órbita del satélite a partir del desplazamiento Doppler sufrido por la señal portadora de 20 MHz de frecuencia que emitía (como consecuencia del movimiento del satélite), y del conocimiento preciso de la posición del receptor que la sintonizaba, sentando la base tecnológica de los actuales sistemas de navegación GPS. El SPUTNIK 1 era una esfera de aluminio de 58 cm de diámetro y con un peso de 83 kilogramos. Tardaba 96,2 minutos en dar la vuelta a la Tierra y describía una órbita elíptica que alcanzaba su apogeo a una altura de 946 km y su perigeo a 227 km. Contaba con instrumentos que durante 21 días enviaron información a la Tierra sobre radiación cósmica, meteoritos y sobre la densidad y temperatura de las capas superiores de la atmósfera. Al cabo de 57 días orbitando la Tierra el satélite entró en la atmósfera terrestre y se destruyó por efecto del calor debido al rozamiento

aerodinámico. El año siguiente, el 31 de enero de 1958, los Estados Unidos lanzaron desde Cabo Cañaveral el EXPLORER y crearon la NASA, en plena época de la Guerra Fría. En ese momento se encontraba en órbita el SPUTNIK 2, con la perrita Laika a bordo, que duró 162 días en órbita.

El EXPLORER era una nave cilíndrica de 14 kg de peso, 15 cm de diámetro y 2 metros de longitud, que estuvo transmitiendo mediciones de radiación cósmica y micro-meteoritos durante 112 días, y aportó los primeros datos desde un satélite que llevaron al descubrimiento de los cinturones de radiación de Van Allen.

El 17 de marzo de 1958, los Estados Unidos lanzaron su segundo satélite, el VANGUARD 2 que estuvo transmitiendo señales durante más de 6 años; a éste le siguió el satélite estadounidense EXPLORER 3, lanzado el 26 de marzo de 1958, y el soviético SPUTNIK 3, lanzado el 15 de mayo de ese mismo año. Este último, que pesaba 1.327 kg, efectuó mediciones de la radiación solar, la radiación cósmica, los campos magnéticos y otros fenómenos, hasta que dejó su órbita en abril de 1960. También, el 18 de diciembre de 1958 se lanzó el satélite SCORE, que con un peso de 70 kg puede considerarse, de alguna manera, como el primer satélite de "comunicaciones" aunque pasivo, pues disponía de un transmisor que radiaba la información contenida en un magnetófono, constituida por el mensaje de felicitación de Navidad del Presidente Eisenhower. Probablemente el primer satélite repetidor totalmente activo fue el COURIER, lanzado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos en octubre de 1960. Este transmitía conversaciones y telegrafía, pero solo duró 70 días. Fue el primer satélite de comunicaciones que usó paneles solares para obtener la energía que necesitaba. El 10 de julio de 1962 se lanzó el TELSTAR 1, el primer satélite en transmitir señales de Televisión entre Estados Unidos y Europa. El SYNCOM 3 fue el primer satélite de órbita geoestacionaria, lanzado por la NASA en 1963. Entre otras aplicaciones, se utilizó para transmitir los Juegos Olímpicos de Tokio en agosto del año 1964.

El INTELSAT 1 mejor conocido como Pájaro Madrugador o *Early Bird* fue el primer satélite internacional de órbita geosíncrona, lanzado por el consorcio internacional INTELSAT desde los Estados Unidos el 6 de abril de 1965 y que, colocado sobre el Océano Atlántico, proporcionaba una capacidad de 240 circuitos de voz para uso comercial. El sistema MONLNIYA (*relámpago* en ruso) fue la primera red satelital doméstica, y fue lanzado en 1967 por la Unión Soviética; consistía en una serie de 4 satélites en órbitas elípticas con una cobertura de 6 horas por satélite. La Agencia Espacial Europea (ESA) comenzó sus lanzamientos (programa Eutelsat) en el año 1982 desde un centro espacial en la Guayana Francesa; anteriormente, y como precursor experimental, se había lanzado en 1978 el

Orbital Test Satellite (OTS), que aportó una valiosa experiencia sobre la utilización de las bandas de frecuencias de 14 GHz y 11 GHz, estos satélites utilizando tecnología digital cubrían el servicio de televisión internacional de la Unión Europea de Radiodifusión (URE). El resto es historia reciente y en la actualidad hay satélites artificiales de comunicaciones, navegación, militares, meteorológicos, de estudio de recursos terrestres y científicos, de ayuda a la navegación, etc. cientos de ellos operativos y en distintas órbitas. ^{[1][2]}

A continuación en la figura 1.1 se presenta un calendario histórico de muchos de los eventos críticos que resaltaron dentro del área de los satélites de telecomunicaciones.

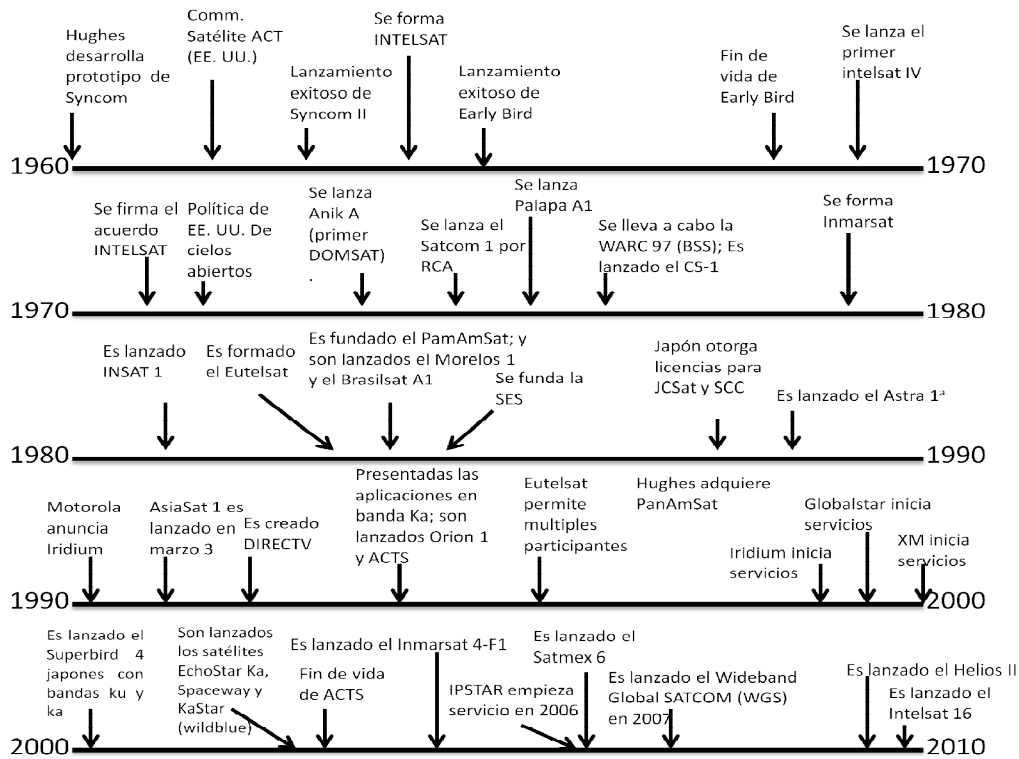


Figura 1.1 Eventos destacados en la historia de los satélites de comunicaciones ^[3]

*El satélite mexicano Quetzsat 1 fue lanzado en 2011

La banda Ka promete anchos de banda mucho mayores que las disponibles en las bandas C, X y Ku, por ejemplo un transpondedor en banda C tiene un ancho de banda de aprox. de 36 MHz, un transpondedor en banda Ku tiene un ancho de banda aprox. de 400 MHz y un transpondedor de banda Ka tiene un ancho de banda aprox. de 3500 MHz. ^[4]

NTT de Japón, en particular, fue el primero en emplear servicios en la banda Ka usando el satélite CS-1, también conocido como Sakura. Actualmente los avances tecnológicos en los satélites de comunicaciones continúan desarrollándose de una manera impresionante, Los satélites en general están teniendo mayores capacidades, mayor potencia y antenas

mejoradas para promover la reutilización de frecuencias y proveer altas capacidades de transmisión.

1.2 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN POR SATÉLITE

Un sistema de comunicaciones por satélite está formado por *estaciones terrenas*, para la transmisión y recepción de las señales, y *satélites* situados en una órbita geostacionaria, ubicados a 36.000 Km de la superficie de la Tierra, que recogen, amplifican y retransmiten las señales enviadas desde las estaciones terrenas. Se necesitan además estaciones que permitan el seguimiento del satélite, así como el control y la supervisión, tanto del satélite como de los sistemas de comunicaciones, a través de telemando y telemetría de los mismos.

La figura 1.2 muestra una visión general de un sistema de comunicación por satélite e ilustra su interconexión con las entidades terrestres. El sistema de satélite se compone de un segmento de espacial, un segmento de control y un segmento de terrestre:

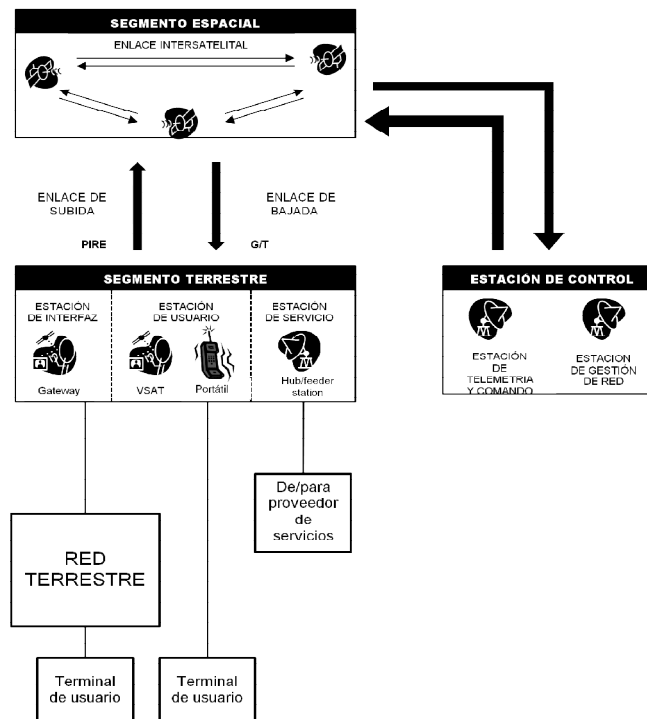


Figura 1.2 Sistema de comunicación por satélite. ^[1]

- **El segmento espacial** contiene uno o varios satélites activos y de reserva organizados en una constelación. La estación de control es parte del segmento espacial consiste de todas las instalaciones básicas para el control y seguimiento de los satélites, también llamado estaciones TTC (seguimiento, telemetría y

comando), y para la gestión del tráfico y los recursos asociados a bordo del satélite.

- **El segmento terrestre** consta de todas las estaciones de tráfico de la tierra. Dependiendo del tipo de servicio considerado, estas estaciones pueden ser de diferente tamaño, desde unos pocos centímetros hasta decenas de metros.

1.3 DESCRIPCIÓN DE UN SATÉLITE DE TELECOMUNICACIONES

Un satélite de comunicaciones comprende un conjunto de tecnologías que se agrupan para un fin (Figura 1.3): proporcionar una plataforma de retransmisión, normalmente en la órbita geoestacionaria. Cada tecnología, o varias de ellas, constituye un subsistema, y la conjunción de subsistemas formará el satélite.

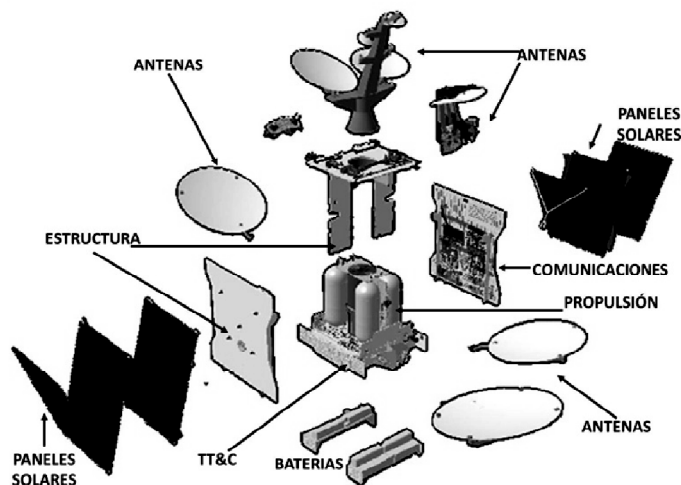


FIGURA 1.3 Breve descripción de la ubicación de cada uno de los subsistemas del satélite

Los subsistemas de los satélites de telecomunicaciones son:

- 1 Subsistema de comunicaciones
- 2 Subsistema eléctrico
- 3 Subsistema térmico
- 4 Subsistema de orientación
- 5 Subsistema de propulsión
- 6 Subsistema de Telemetría, Rastreo y comando (TTC) y manejo de datos (OBDH)
- 7 Subsistema estructural

En la tabla 1.1 se presentan los subsistemas de un satélite típico de comunicaciones, con su función y principales características cuantitativas.

Tabla 1.1 Subsistemas y funciones principales de un satélite de telecomunicaciones ^[2]

| Subsistema | Función | Principales características Cuantitativas |
|---|---|---|
| Comunicaciones (Transpondedores y Antenas) | Recibir, amplificar, procesar, y retransmitir señales; capturar y radiar señales. | Potencia del Transmisor, ancho de banda, G/T, ancho de haz, orientación, ganancia, densidad de flujo de portadora en saturación |
| Eléctrico | Proporcionan la energía necesaria para las diversas funciones del satélite | Baterías eléctricas y paneles solares, reflectores en los paneles solares |
| Estructural | Sostiene al satélite durante el lanzamiento y el entorno orbital | Frecuencias de resonancia, fuerzas estructurales |
| Control de orientación | Mantiene las antenas apuntadas a las estaciones terrenas y las celdas solares al sol | Tolerancias de role, pitch y yaw |
| Control Térmico | Mantiene los rangos de temperatura adecuados durante la vida del satélite, con y sin eclipses | Rango de temperatura media del satélite y rangos para componentes críticos |
| Propulsión | Mantiene la posición orbital, controla las correcciones de orientación, cambios orbitales y despliegue en la órbita inicial | Impulso específico, masa de propelente y aceleración |
| TT&C OBDH | Monitorea el estado del satélite sus parámetros orbitales, y controla sus operaciones | Precisión de medidas de velocidad y posición, número de puntos de telemetría y número de comandos |
| Satélite Completo | Proporcionar operaciones de comunicaciones satisfactorias en la órbita deseada | Masa, potencia primaria, tiempo de vida, fiabilidad, número de canales y tipos de señales |

A continuación se muestra en la tabla 1.2 las tecnologías que rigen cada uno de los diferentes subsistemas de un satélite de comunicaciones y subrayado se muestra a la tendencia tecnológica que se ha ido desarrollando y que domina en la actualidad cada uno de los subsistemas de un satélite.

Tabla 1.2 Tendencia tecnológica de los subsistemas de un satélite de comunicaciones ^[2]

| Subsistema | Experiencia (rojo las tendencias actuales) |
|--------------------------|---|
| 1. Comunicaciones | Coberturas. Banda C, Ku y L. Modulaciones analógicas y digitales. Reflectores duales de rejilla y en X. Arreglos de fase. Antenas perfiladas. <u>DVB-S2 ADAPTIVE CODING AND MODULATION</u> , <u>REPETIDORES REGENERATIVOS</u> , <u>BANDA Ka</u> |
| 2. Eléctrico | Celdas de silicio, baterías de Niquel-Cadmio. Celdas de Arsenurio de Galio y baterías de Niquel-Hidrógeno. <u>CELDAS DE TRIPLE CAPA</u> , <u>CELDAS DE LITIO-IÓN</u> |

| | |
|--|---|
| 3. Térmico | Tipos de superficies. Cobertores térmicos, calentadores, reflectores ópticos, Caloductos. |
| 4. Orientación | Sensores. Estabilización por giro. Estabilización triaxial. Ruedas de momento. Actuadores |
| 5. Propulsión | Monopropelente. Bipropelente. <u>PROPULSIÓN ELÉCTRICA</u> |
| 6. Telemetría, Rastreo y comando (TTC) y manejo de datos (OBDH) | Banda C, Arquitectura centralizada. Banda Ku, Arquitectura descentralizada. <u>BANDA Ka</u> |
| 7. Estructural | Materiales Compuestos. Fibra de carbón |

Nuestra área de enfoque será principalmente dentro del subsistema de comunicaciones, donde estaremos mencionando las principales ventajas del uso de la banda Ka. A continuación se muestra en la tabla 1.3 el rango de frecuencias de las diferentes bandas de comunicaciones y su ancho de banda correspondiente.

Tabla 1.3 Frecuencias de los satélites ^[4]

| BANDA | ANCHO DE BANDA | SUB BANDA RANGO DE FRECUENCIAS | SERVICIOS |
|-------|----------------|--------------------------------|----------------|
| VHF | 500 MHz | | |
| UHF | 500 MHz | L(1/2 GHz) S(1.55/3.9 GHz) | BSS – DAB- MSS |
| SHF | 500 MHz | C(6/4 GHz) | FSS |
| | 500 MHz | X (8/7 GHz) | Com. Militares |
| | 500 MHz | Ku(14/12 GHz) | FSS |
| | 500 MHz | Ku(17/12 GHz) | BSS |
| | 3.500 MHz | Ka(30/20 GHz) | FSS |
| | 3.000 MHz | Q/V(50/40(GHz) | FSS |

Los servicios son FSS (Servicio Fijo por Satélite), MSS (Servicio Móvil por Satélite), BSS (Servicio de Radio difusión por Satélite) y DAB (Radiodifusión de Audio Digital).

CAPÍTULO 2

**TECNOLOGÍAS ACTUALES DE LOS SATÉLITES DE
TELECOMUNICACIONES**

El satélite consiste en la carga útil y la plataforma. La carga útil consiste en las antenas de recepción y transmisión y todo el equipo electrónico que soporta la transmisión de los portadores. Los dos tipos de organización de la carga útil se ilustran en la figura 2.1

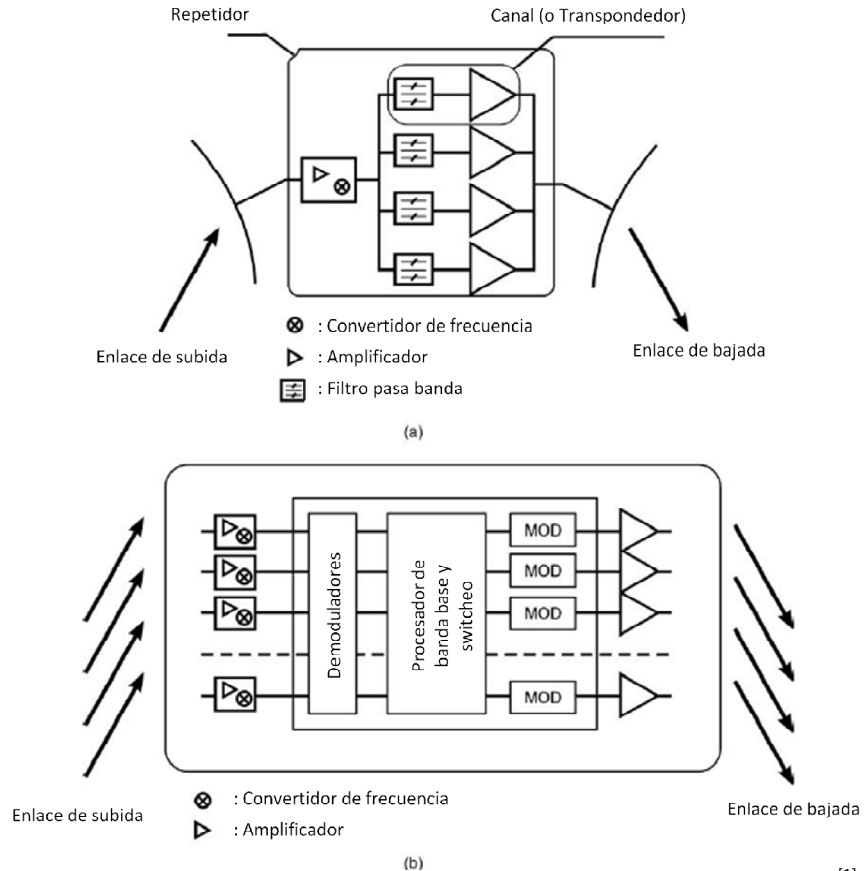


Figura 2.1 Carga de la organización: (a) ser transparentes y (b) regenerativo. [1]

2.1 DESCRIPCIÓN DE UN SATÉLITE REGENERATIVO CON PROCESAMIENTO A BORDO

Un satélite que proporciona demodulación y re-modulación a bordo de la señal portadora de información se conoce como un satélite con procesamiento a bordo (OBP por sus siglas en inglés). El satélite con procesamiento a bordo, también llamado satélite regenerativo o satélite inteligente, dispone esencialmente de dos enlaces de comunicaciones en cascada para el enlace ascendente y descendente. La figura 2.2 muestra un diagrama esquemático de bloques del transpondedor de procesamiento a bordo de satélites.

La señal de información en el enlace ascendente sobre una frecuencia portadora (FU), después de pasar a través de un receptor de bajo ruido, es demodulada, y la señal de banda base (FBB), es amplificada y reforzada por una o más técnicas de procesamiento de

señales. La señal de banda procesada es entonces re-modulada en el enlace descendente, con la frecuencia portadora (FD), para su transmisión a la terminal de tierra de enlace descendente. Las degradaciones en el enlace ascendente pueden ser compensadas por el procesamiento a bordo, y no se transfiere al enlace descendente.

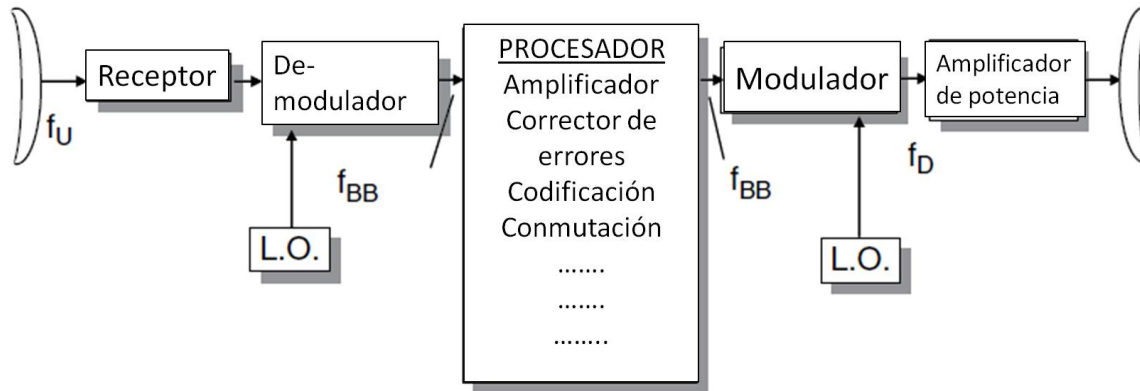


Figura 2.2 Transpondedor de satélite con procesamiento a bordo (OBP). ^[6]

Los satélites emplean procesamiento a bordo esencialmente para separar el enlace ascendente y el enlace descendente, y permite diseñar técnicas para mejorar las señales de uno o ambos enlaces en el satélite. Satélites con procesamiento a bordo emplean técnicas de transmisión digital, y puede utilizar una amplia gama de formatos de modulación o esquemas de acceso. ^{[1][6]}

2.2 MULTIPLEXAJE, MODULACIÓN Y TÉCNICAS DE ACCESO AL MEDIO

Las señales digitales dominan los sistemas de comunicaciones por satélite, para voz y datos, imágenes y aplicaciones de vídeo. Los sistemas digitales ofrecen conmutación más eficiente y flexible, además de opciones de procesamiento que los sistemas analógicos no ofrecen. Las señales digitales son más fáciles de conseguir, y proporcionan un mejor rendimiento del sistema con mayor potencia y eficiencia de ancho de banda. Las señales de formato digital permitirán utilizar las capacidades de procesamiento más amplios con respecto a la codificación, detección y corrección de errores y de cambio de formato de datos. ^[1]

Las señales digitalizadas una vez comprimidas pasan por un proceso de transformación para poder ser transmitidas. El primer proceso de transformación es el multiplexaje que, como se mencionó anteriormente, consiste básicamente en la combinación de dos señales mediante diversas técnicas. ^[4]

2.2.1 MULTIPLEXAJE POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA (FDM)

Esta técnica, considerada la más simple, consiste en asignar una frecuencia a cada una de las señales que va a ser transmitida hacia el satélite dentro de su ancho de banda disponible sin importar su naturaleza (digital o analógica). De esta forma, se tienen bloques de señales limitadas en ancho de banda colocadas una al lado de otra. Un esquema representativo de esta técnica se puede observar en la figura 2.3

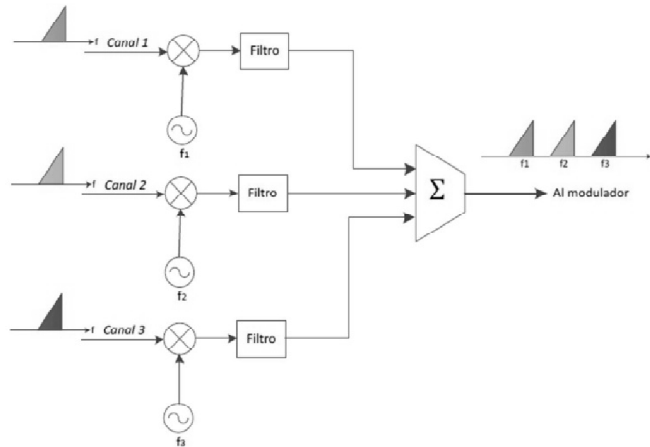


Figura 2.3 Multiplexaje por división de frecuencia (FDM). ^[1]

2.2.2 MULTIPLEXAJE POR DIVISIÓN DE TIEMPO (TDM)

Esta técnica junto con la anterior es de las más habituales en comunicaciones satelitales y se puede utilizar en diversas etapas de la transmisión dependiendo del tipo de información. Está limitada a señales digitales. El conjunto de las señales de origen (consistente en trenes de pulsos binarios) es intercalado siguiendo una determinada secuencia. El intercalado puede ser bit a bit, palabra por palabra (agrupación de bits) o mediante una secuencia predefinida (figura 2.4). Como resultado se obtiene una señal digital con mayor cantidad de información. Las señales multiplexadas ocupan la totalidad del ancho de banda disponible a diferencia de FDM. ^{[1][4]}

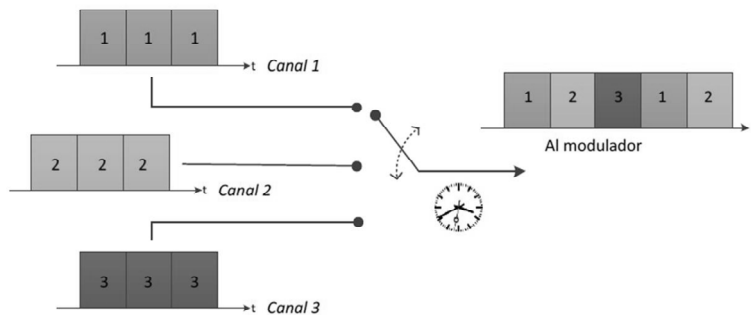


Figura 2.4 Multiplexaje por división de tiempo (TDM). ^[7]

2.2.3 MODULACIÓN DIGITAL

Para que los datos se puedan propagar a través de la atmósfera en un enlace satelital (canal paso banda) se requiere de técnicas que transporten la información en banda base a través del canal adaptándose a las características del medio, por lo general se hace un traslado en frecuencia del espectro de la señal original. Esto se logra modificando parámetros de la onda como amplitud, frecuencia y fase. Al proceso de recuperar la información del canal paso banda se le denomina demodulación. ^[10]

La modulación por desplazamiento de fase o PSK (Phase Shift Keying): La modulación digital de fase fue desarrollada en los primeros días de los programas espaciales. Ahora es la modulación más usada en aplicaciones comerciales y militares por satélite.

La expresión analítica para PSK es:

$$s_i(t) = A \cos[\omega_0 t + \phi_i(t) + \theta] \quad \begin{array}{l} 0 \leq t \leq T \\ i = 1, \dots, M \end{array}$$

Donde A es la amplitud de la señal, T es el tiempo que dura un símbolo en ser transmitido, ω_0 es la frecuencia angular de la señal, θ es la fase de referencia de la señal transmitida y $\phi_i(t)$ es el término que define al símbolo mediante el cambio de fase, y tiene M valores discretos dados por la expresión ^[11]:

$$\phi_i(t) = \frac{2\pi i}{M} \quad i = 1, \dots, M$$

La modulación por desplazamiento de fase binaria o BPSK (Binary Phase Shift Keying) es en el caso de $M=2$ donde cada una de las señales representa un dígito binario (0 ó 1). La modulación es alcanzada cuando la fase de la portadora cambia en 0 y π dependiendo del dígito binario, los cambios de polaridad de la señal binaria se utilizan para producir cambios de 180 ° en la fase de la portadora. (figura 2.5).

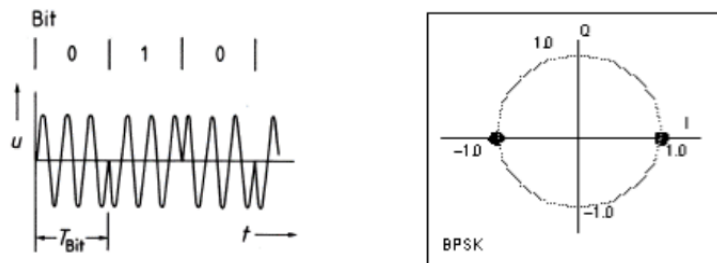


Figura 2.5 Representación temporal y fasorial de una señal BPSK. ^[1]

La modulación por desplazamiento de fase en cuadratura o QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Es una señal phase-shift keying para una forma de onda de $M=4$ símbolos, la fase adyacente se desplaza siendo equidistantes en 90° , entonces tendremos 4 formas de onda correspondientes a una modulación. Cada símbolo (00, 01, 10 y 11) estará representado por una fase dependiendo del valor de $\varphi_i(t)$.

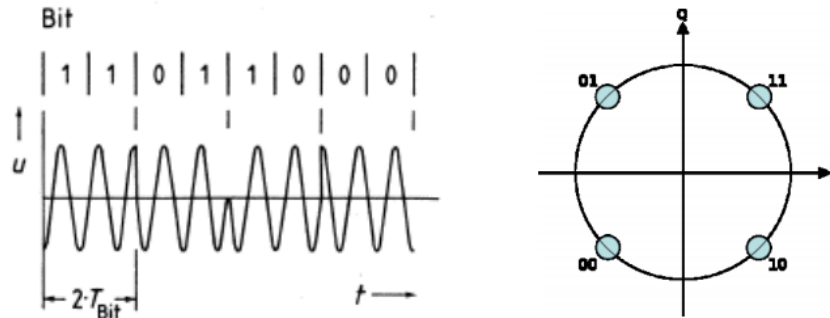


Figura 2.6 Representación temporal y fasorial de una señal QPSK. [1]

Otro esquema de modulación digital es el APSK que la señal de datos tanto en amplitud como en fase. Esto incrementa el grupo de símbolos y la tasa de transmisión. Uno de los esquemas más utilizados es QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Cuando un sistema presenta problemas en su implementación con sistemas de modulación como 8-PSK, lo más habitual es cambiarse a esquemas duales como QAM, pues así se alcanzan mayores distancias con mayor fiabilidad y eficiencia espectral. Algunos estándares de transmisión de televisión digital usan esquemas como 16APSK, 16-QAM o 64-QAM, difiriendo en el número de símbolos y ubicación de éstos en el diagrama fasorial (figura 2.7).

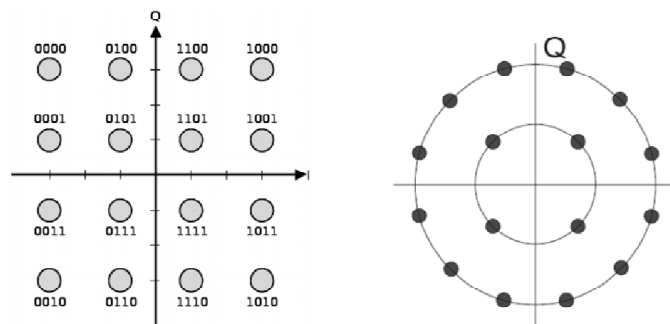


Figura 2.7 Representación fasorial de señales moduladas en 16-QAM y 16 APSK. [7]

Cada señal se transmite de forma natural por un período de símbolo de cuatro períodos de bits, de modo que el ancho de banda requerido es sólo un cuarto del ancho de banda del sistema BPSK equivalente. [10][11]

2.2.4 TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE

Un transpondedor a bordo de un satélite puede llenarse por completo por una sola transmisión de una estación de tierra. Esto se conoce como un modo de acceso único de operación.^[9] El acceso múltiple es la posibilidad de que varias estaciones terrenas transmitan sus respectivas portadoras al mismo tiempo a través del mismo transpondedor del satélite permitiendo a cualquier estación de tierra situada en el área de cobertura correspondiente, recibir portadoras originarias de varias estaciones terrenas. A la inversa, la portadora transmitida por la estación de tierra a través de un transpondedor dado, puede ser recibida por cualquier estación de tierra situado en el área de cobertura correspondiente. Esto permite a una estación de tierra transmitir varios grupos de señales en una sola portadora multidestino.

Existen diversas técnicas que permiten compartir el medio de transmisión denominadas de acceso múltiple. En el caso de satélite, las técnicas de acceso múltiple principales son FDMA, TDMA, CDMA, SDMA, entre otras. A continuación se describirán los principios de funcionamiento.^[9]

ACCESO FDMA: A esto se le conoce como acceso múltiple por división de frecuencia o FDMA (Frequency Division Multiple Access). a (figura 2.8). Las portadoras de televisión en los servicios FSS y BSS utilizan este esquema de acceso.

Esta técnica es la más usada por su sencillez. Cada estación terrena transmite una o más portadoras a frecuencias centrales distintas con un ancho de banda limitado mediante filtros pasa banda para evitar que se traslapen una con otra en el dominio de la frecuencia.

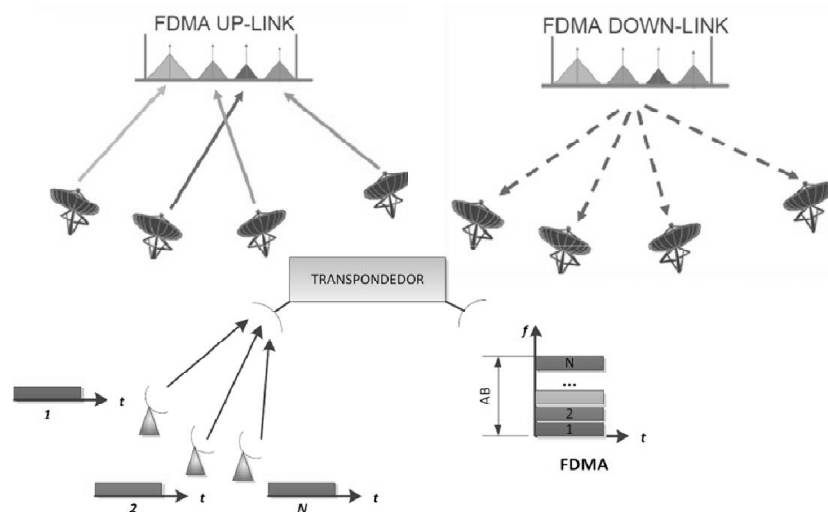


FIGURA 2.8 Acceso múltiple por división de frecuencia

El mayor problema de operación de los sistemas que funcionan con el esquema de acceso FDMA es la presencia de ruido de intermodulación que ocurre por las características de amplificación no lineales que presentan los amplificadores de microondas. Debido a esto, cuando un transpondedor opera con múltiples portadoras FDMA, la potencia de salida tiene que estar limitada a un punto de trabajo (*back-off*) donde la operación del amplificador del satélite sea lo más lineal posible. ^[1]

Sus características principales son ^[8]:

- Ancho de banda preasignado según el tráfico
- Portadoras con menor ancho de banda (menor tráfico)
- Transmisión simultánea de varias frecuencias con espectros no superpuestos.
- Asignación de portadoras bajo demanda centralizada o distribuida

ACCESO TDMA ^[1]: Acceso mediante multiplexaje por división de tiempo (*Time Division Multiple Access*). El acceso se da entre un grupo de estaciones terrenas asociadas a una sola red que utilizan una portadora para transmitir bajo los principios de división de tiempo (figura 2.9). Este sistema requiere de una alta sincronización, de manera que las ráfagas de información no se traslapen de manera temporal una con otra.

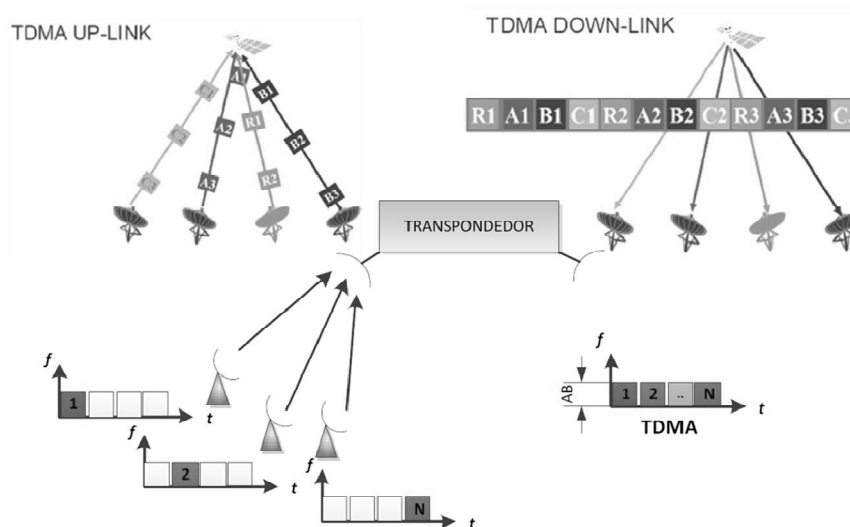


FIGURA 2.9 Acceso múltiple por división de tiempo

TDMA es una tecnología inalámbrica de segunda generación que brinda servicios de alta calidad de voz y datos. El esquema TDMA se utiliza principalmente para transmisión de datos, voz y servicios basados en paquetes, es el método principal de acceso múltiple que se usa en la actualidad. Proporciona la forma más eficiente de transmitir portadoras moduladas digitalmente (PSK).

Sus características principales son^[8]:

- Una portadora por estación.
- Cada estación transmite sólo durante un intervalo de tiempo, una ráfaga de datos
- Ocupa total ancho de banda del transpondedor por una sola portadora
- TDMA se adapta mucho mejor a la transmisión de información digital que el FDMA
- Proporciona mayor eficiencia que FDMA
- No requiere control de potencia de las portadoras

ACCESO CDMA^[1]: Acceso Múltiple por División de Código (Code Division Multiple Access) es otro esquema de acceso al medio utilizado en diversos sistemas de comunicación. Como su nombre lo indica, basa su funcionamiento en la división por código. Cada estación de la red transmite continuamente y en la misma banda de frecuencias del canal del satélite (figura 14). La interferencia entre las señales se resuelve en el receptor mediante una operación lógica entre la señal recibida y un código binario identificado con el transmisor. El ancho de banda necesario para llevar a cabo la comunicación mediante esta técnica es mucho mayor al requerido por esquemas como TDMA y FDMA.

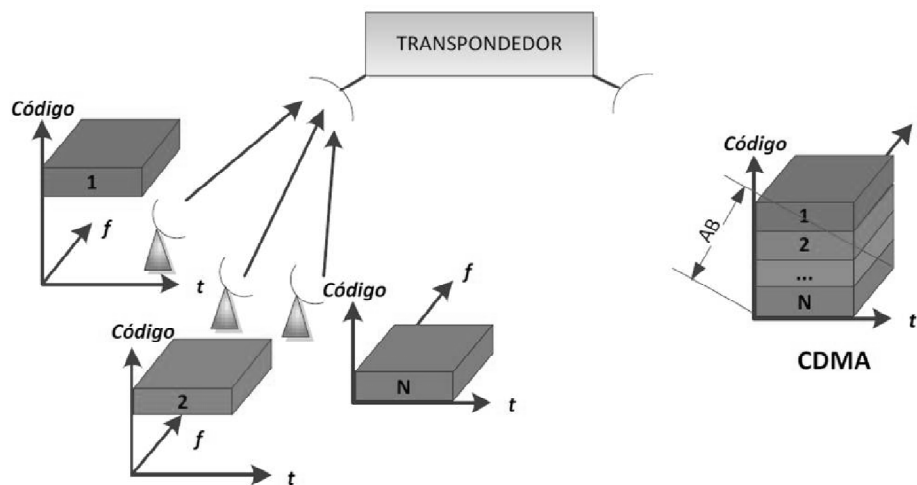


FIGURA 2.10 Acceso múltiple por división de código

La capacidad del sistema dependerá de muchos factores. Cada dispositivo que utiliza CDMA está programado con un pseudocódigo, la estación base utiliza el mismo código en forma invertida (los ceros son unos y los unos son ceros) para des-extender y reconstruir la señal original. Los otros códigos permanecen extendidos, distinguibles del ruido de fondo. A CDMA se le caracteriza por su alta capacidad y celdas de radio pequeño, que

emplea espectro extendido y un esquema de codificación especial y, lo mejor de todo es muy eficiente en potencia.

- Se basa en técnicas de espectro ensanchado
- A cada estación se asigna un código que permite identificar la transmisión de dicha estación. El código se basa en una secuencia pseudoaleatoria (PN)

Existen dos posibilidades

- Secuencia directa (DS)
- Salto en frecuencia (FH)

Los diferentes códigos deben tener alta autocorrelación y casi nula correlación cruzada para que el sistema funcione eficientemente.

COMPARACIÓN DE EFICIENCIA

En la figura 2.11 se compara los tres métodos de acceso al satélite haciendo una grafica eficiencia vs número de estaciones terrenas. Donde se puede observar que:

- La eficiencia de FDMA es baja puesto que con pocas estaciones, esta decrece rápidamente con el aumento del número de estaciones terrenas
- La eficiencia de TDMA es alta debido a que esta se ve muy poco afectada con relación al aumento número de estaciones terrenas
- La eficiencia de CDMA es extremadamente baja para este tipo de aplicación con satélites

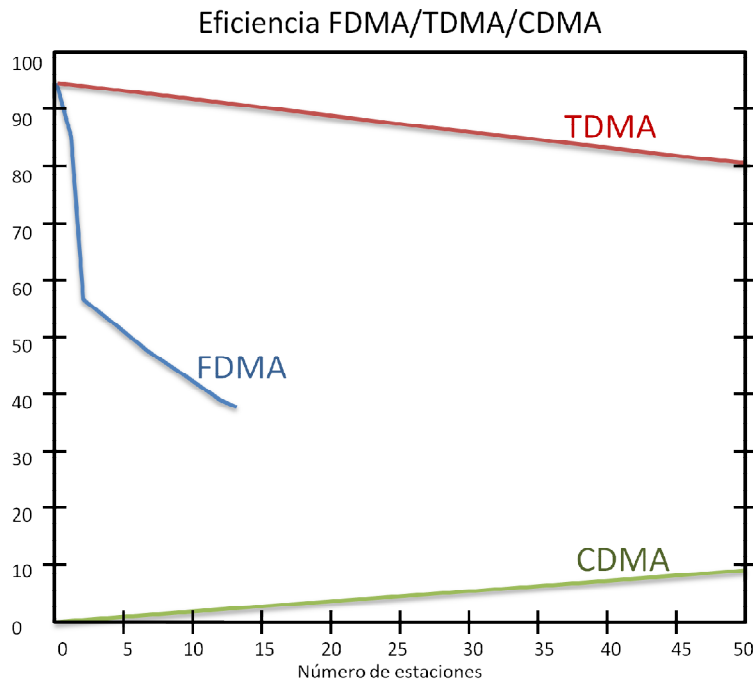


FIGURA 2.11 Gráfica de eficiencia TDMA, FDMA, CDMA ^[8]

2.2.5 PROTOCOLOS DE ACCESO MÚLTIPLE POR SATÉLITE

ALOHA: En la figura 2.12 se muestra el protocolo Aloha por medio del cual un número N de usuarios puede acceder aleatoriamente un recurso centralizado (computadora central), a través del satélite.

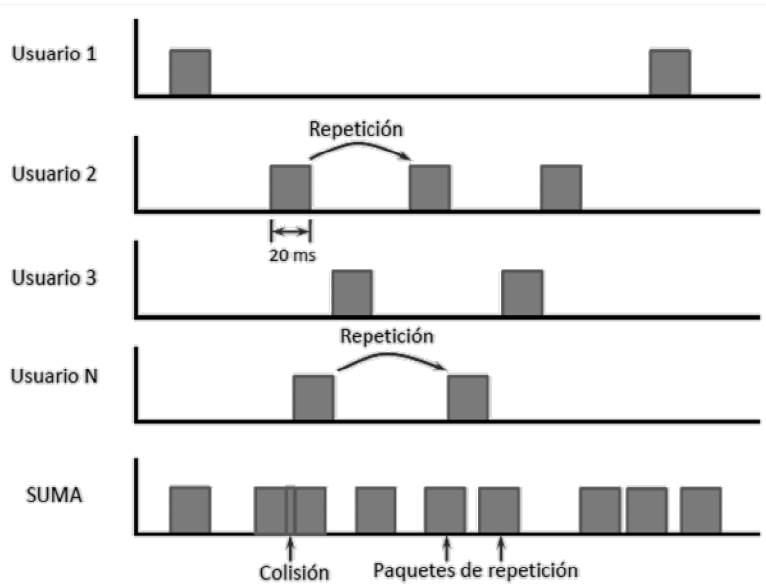


Figura 2.12 protocolo ALOHA

CARACTERÍSTICAS

- El transpondedor se comparte por un número "N" de usuarios, los cuales transmitirán aleatoriamente su información
- En caso de que suceda una colisión, las estaciones que en ella incurrieron retransmitirán el mensaje en un tiempo aleatorio

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas del protocolo Aloha

| VENTAJAS: | DESVENTAJAS: |
|---|--|
| -Se utiliza eficientemente el satélite | -No existe privacidad del usuario |
| -Flexibilidad para aumentar o disminuir la red. | -La colisión de paquetes puede retrasar aleatoriamente la transmisión de un mensaje. |
| -No requiere sincronización | - Tasa de transmisión es muy baja (18.4%) |

ALOHA RANURADO: Este protocolo decrece la probabilidad de interferencia entre paquetes al requerir que los usuarios transmitan solamente al inicio de intervalos discretos de tiempo. Fig. 2.13

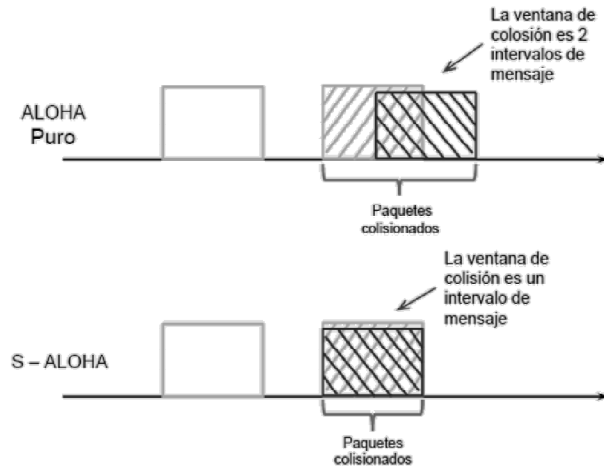


Figura 2.13 protocolo ALOHA RANURADO

CARACTERISTICAS

-Ranuración en tiempo del canal para reducir la interferencia entre canales. Los usuarios ya no transmitirán aleatoriamente, sino que lo harán al principio de cada intervalo discreto de tiempo correspondiente a la longitud de un paquete.

Tabla 2.2 Ventajas y desventajas del protocolo Aloha ranurado

| VENTAJAS: | DESVENTAJAS: |
|--|--|
| -Posibilidad de utilizar captura | -Desperdicio del recurso del satélite |
| -Aumento en la utilización de la capacidad del canal al doble en la de un sistema aloha simple | -Complejidad de las estaciones terminales para sincronizar la referencia de tiempo y para compensar las variaciones de la distancia entre cada estación y el satélite. |

COMPARACIÓN DE EFICIENCIA DE ALOHA Y ALOHA RANURADO

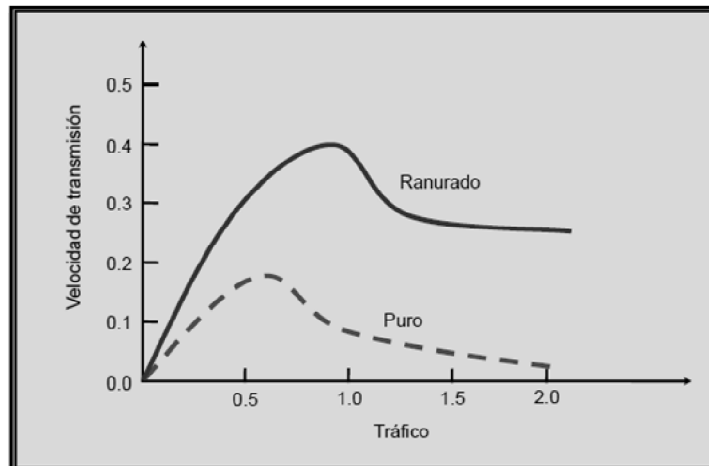


Figura 2.14 Comparación de eficiencias

2.3 ANTENAS MULTHAZ EN SATÉLITES DE COMUNICACIONES

Excepto en los primeros satélites, las antenas satelitales son direccionales. Algunos apuntan hacia la Tierra como un todo, estas se llaman las antenas de haz global e implican un ancho de haz de 3 dB, igual al ángulo que subtiende las de la Tierra, que es aproximadamente 17°. Muchas antenas de satélite cubren un ángulo más pequeño, con miras a una porción de la Tierra.

El patrón de radiación de la antena puede ser configurado de manera que los contornos de la señal en la Tierra sigan la forma del país o el área que se va a cubrir. También se utilizan antenas altamente direccionales, que cubren porciones muy pequeñas de la Tierra. Estos haces relativamente estrechos se llaman haces puntuales.

En el caso de satélites que trabajan con un solo haz se presentan desventajas respecto al caso de operar con varios haces de forma simultánea. Si se debe dar servicio a toda la región terrestre visible desde el satélite la ganancia de la antena quedará limitada por el ancho de haz necesario para cubrir la zona de servicio. Por otra parte, si la cobertura requerida abarca una región menor necesitaremos un haz más estrecho por lo que mejoraremos la ganancia de la antena pero el sistema sólo podrá conectarse mediante enlaces terrestres o enlaces entre satélites con estaciones situadas fuera de su zona de servicio.

Por lo tanto, en satélites que operan con un haz habrá que elegir entre gran cobertura (y posible interconexión entre gran número de estaciones terrestres) con poca ganancia de la antena y gran ganancia a costa de tener una cobertura reducida. Los satélites con múltiples haces simultáneos nos permiten conseguir las ventajas de cada caso: gran cobertura y ganancias elevadas.

Los satélites multihaz hacen posible que un único satélite se pueda comunicar con un gran número de estaciones terrestres mejorando así la capacidad de comunicación, la eficacia en la utilización de satélites y el tamaño de las antenas de las estaciones terrenas. Como resultado se consigue una reducción de costos.^{[1][14][12]}

2.3.1 IMPACTO EN EL SEGMENTO DE TIERRA

Comparamos las dos situaciones mostradas en la figura 2.15

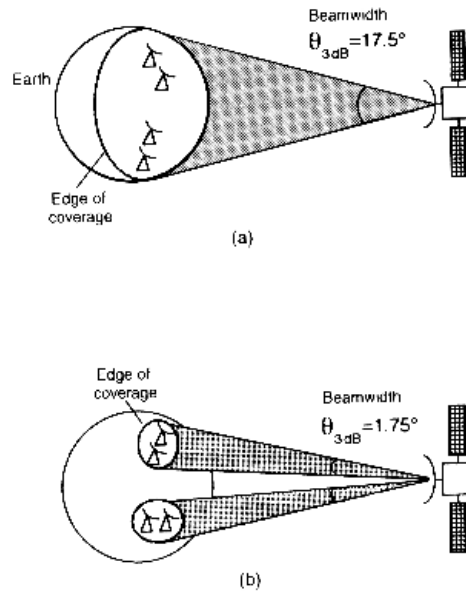


Figura 2.15 (a) Antena un solo haz. 23 (b) Antena multihaz

La reutilización de frecuencias consiste en utilizar la misma banda de frecuencias varias veces de manera que sea posible aumentar la capacidad del sistema para un determinado ancho de banda. Puede llevarse a cabo utilizando **polarizaciones ortogonales** o utilizando la misma banda de frecuencias en distintos haces siempre que la **separación angular** sea suficiente. El **factor de reutilización de frecuencias** se define como el número de veces que el ancho de banda se utiliza Figura 2.16 (b).

En el caso de reutilización por polarizaciones ortogonales el factor sería dos y si utilizamos la misma banda de frecuencias en distintos haces podría ser reutilizado este ancho de banda para tantos haces como el nivel de interferencia nos permitiera. Ambas técnicas pueden ser combinadas.

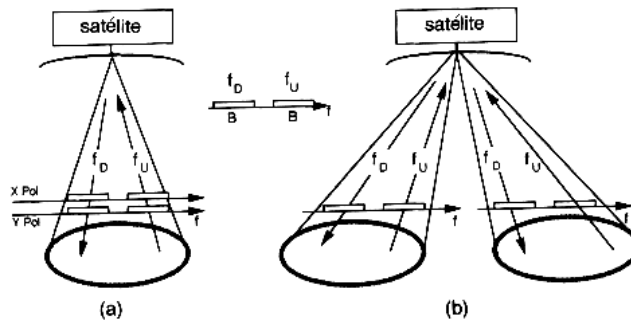


FIGURA 2.16 Reutilización de frecuencias ^[15]

2.3.2 COBERTURA

A diferencia de las coberturas vistas que utilizan un único haz a una determinada frecuencia y con una polarización dada, la cobertura con varios haces implica la generación de haces que pueden estar en diferentes bandas de frecuencia y tener distintas polarizaciones

HACES SEPARADOS: En este caso la zona de servicio consiste en un conjunto de regiones geográficas separadas entre sí. Estas regiones son iluminadas por haces estrechos de sección transversal circular que pueden compartir la misma banda de frecuencias siempre que la separación angular sea suficiente. La utilización de polarizaciones ortogonales permite un mayor aislamiento entre enlaces aunque la separación angular sea pequeña. Figura 2.17

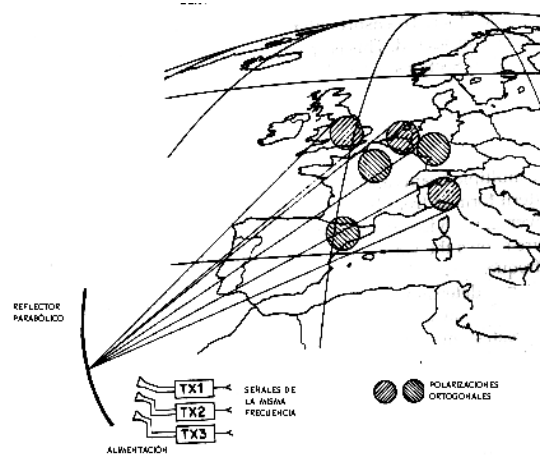


Figura 2.17 Haces separados^[12]

HACES CONTIGUOS: Utilizando un conjunto de haces contiguos estrechos se consigue una *mejor ajuste a la zona de servicio* respecto al caso de un único haz.

En el caso de un único haz, la ganancia de la antena embarcada en el satélite está limitada por el ancho de haz que impone la zona de servicio. Al ser el diámetro de cada uno de los haces necesarios más estrecho que el haz único que cubriría la misma región, la ganancia correspondiente es mayor. Será posible utilizar en las estaciones terrestres antenas de pequeño diámetro. Figura 2.18

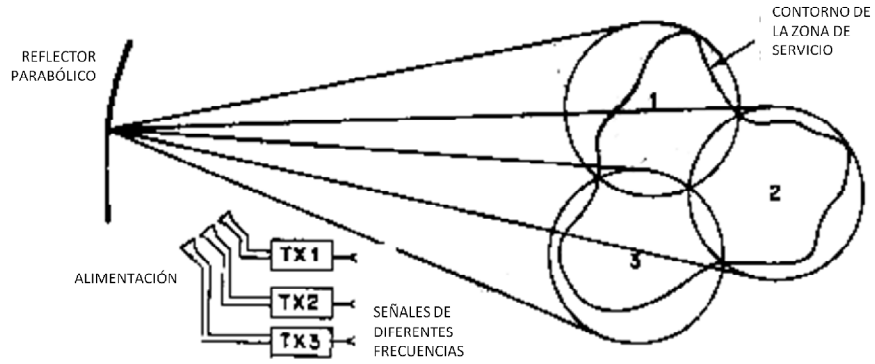


Figura 2.18 Haces Contiguos ^[15]

Los haces se solapan de forma parcial por lo que las frecuencias utilizadas en cada uno deben diferir entre sí. Estos haces comparten el total del ancho de banda disponible del sistema condicionados por las regulaciones de radiocomunicaciones. Está por tanto limitada la capacidad de cada haz. Para asegurar la interconexión de haces hay que considerar el encaminamiento de las portadoras entre los haces.

MALLADO DE HACES: Combinando varios haces y la reutilización de frecuencias conseguimos una cobertura por mallado de haces cuyo patrón básico está formado por haces que utilizan un conjunto de frecuencias que se repiten de forma ordenada sobre la zona de servicio. Figura 2.19

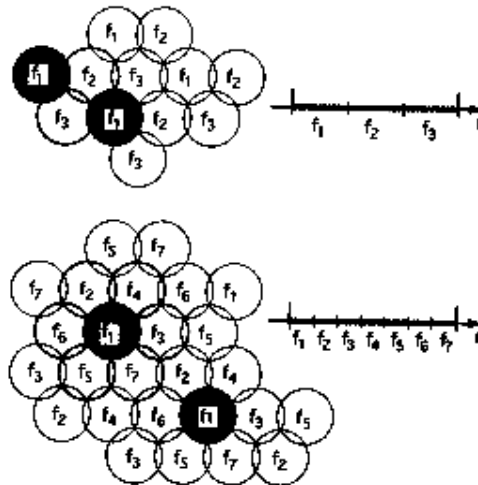


Figura 2.19 Mallado de haces ^[12]

La distancia angular entre haces que reutilizan la misma banda de frecuencias determina el nivel de la interferencia co-canal. Las mayores interferencias se producen en el borde de la zona cubierta por un haz pues es donde el nivel de la señal es menor, debido a la reducción de ganancia que experimenta, y donde el nivel de la interferencia es mayor.

Cuanto mayor sea el número de haces (y frecuencias) utilizados en el patrón básico mayor distancia angular tendremos entre haces que usan la misma frecuencia y por tanto menos interferencia en el sistema. Por otra parte, el ancho de banda que quedaría disponible para cada haz sería menor. [12]

2.3.4 INTERFERENCIAS ENTRE HACES

En el *enlace ascendente*, la **interferencia co-canal (CCI)** se produce cuando la contribución de densidad espectral de potencia del enlace descendente de un haz que emplea una determinada banda de frecuencias se superpone al espectro del enlace descendente que mantiene otro haz que opera en la misma banda de frecuencias adyacente. Figura 2.20

En el *enlace descendente*, (Figura 2.21) las interferencias se producen cuando las siguientes contribuciones de densidad espectral de potencia se superponen con el espectro de la portadora de este enlace:

- El espectro de la interferencia co-canal y del canal adyacente del enlace ascendente es retransmitido por el satélite
- El espectro de la portadora de la misma frecuencia emitida por otro haz (interferencia de canal adicional).

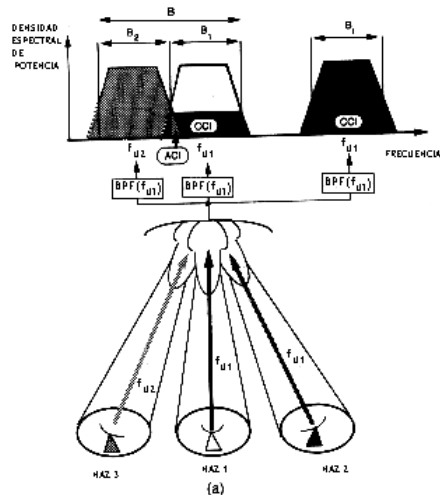


Figura 2.20 Interferencia de canal adyacente Ascendente

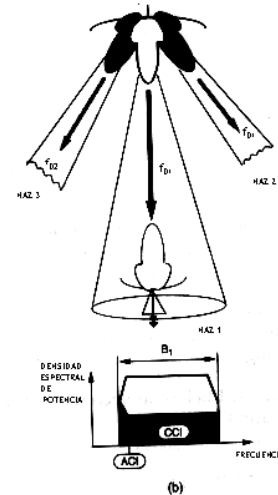


Figura 2.21 Interferencia de canal adyacente Descendente [12]

*Una estimación típica de la contribución del ruido de interferencia en un enlace de un satélite multihaz es de un 40% del ruido total. [14]

CAPÍTULO 3

SISTEMAS DE SATÉLITES REGENERATIVOS

Los sistemas de Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA por sus siglas en inglés) han sido utilizados por su alta flexibilidad y capacidad de servicio de comunicación digital vía satélite. Por ejemplo, el satélite Intelsat-V en un modo totalmente digital TDMA puede transmitir más de mil millones de bits de información por segundo (1 Gb/s) de capacidad suficiente para permitir que la Enciclopedia Británica se envíe desde, por ejemplo, los Estados Unidos a Italia seis veces por minuto. El satélite Intelsat VI-está previsto que alcance su máxima capacidad en el modo "satellite-switched" (SS-TDMA). En este modo se utiliza un par de 6 x 6 conmutadores de RF dinámicos y se espera que tenga una capacidad operativa de 35.000 circuitos de voz digitalizada o el equivalente de 2,5 a 3,0 Gb / s (10^9 bits / s).

La extraordinaria tasa de crecimiento en la demanda de circuitos y servicios por satélite junto con el aumento en el número de satélites de comunicaciones digitales y su mayor capacidad exige una revisión detallada de las transmisiones y procedimientos de modulación. Uno de los principales factores que contribuyen a los costos de TDMA y de los sistemas relacionados con los satélites es la generación de alta potencia de transmisión, tanto en la estación terrena como en el satélite. Para lograr esta alta potencia de salida que compensa las grandes pérdidas de propagación, grandes antenas de transmisión y recepción también son requeridas por razones económicas. Para un sistema económico-eficiente, los dispositivos de amplificación deben ser operados en un modo no lineal (es decir, cerca de la saturación). Estas no linealidades degradan la calidad de las señales con modulación digital de banda limitada.

La operación no lineal del amplificador de potencia se extiende al espectro de la señal modulada previamente filtrada. Para reducir efectos colaterales en los canales adyacentes, es necesario un filtro de RF. Esta limitación en banda AM / AM y AM / PM convertida (distorsionada) en la señal se ve degradada por varios componentes del satélite, incluyendo el filtro de entrada múltiple de transpondedor, el TWT de salida, y el filtro de salida múltiple. La degradación del satélite principal se debe a la interacción provocada por dos limitaciones de banda no lineales en cascada. Enlaces entre satélites pueden tener más de dos no linealidades en cascada, en cuyo caso incluso se podría esperar aun mas degradaciones. En una serie de operaciones de alta velocidad del sistema digital por satélite (que operan en el rango de 100 Mb / s por transpondedor), una degradación significativa del rendimiento teórico es de medición (por ejemplo, 5 dB). Esto tiene un impacto económico drástico si se considera que varios dB en el PIRE adicional supone un gasto considerable en las estaciones de satélite o terrestre.

Otros métodos de modulación espectral pueden ser empleados con el fin de utilizar mejor al espectro. Estos factores agravan el problema de la energía de enlace ascendente. Métodos de conservación de espectro también incluyen la reutilización de frecuencias y antenas de haces múltiples, con estos cambios sofisticados, la interferencia co-canal se convierte en un importante factor limitante de rendimiento.

3.1 VENTAJAS DE LOS SATÉLITES REGENERATIVOS EN UN ENLACE

Una solución innovadora a estos problemas es el uso de procesamiento de señal a bordo en repetidores de satélites regenerativos en lugar de los repetidores transparentes convencionales. El "satélite regenerativo" demodula las señales de datos del enlace ascendente en banda base y luego las re-modula para su retransmisión, y dividir así el total del enlace por satélite en dos partes distintas, de esta manera, la regeneración a bordo ofrece el mismo rendimiento con el satélite con los niveles reducidos de potencia en las estaciones terrenas. También se adquieren capacidades del sistema más allá de las que se obtienen con los simples satélites transparentes. Estos incluyen la protección considerable a interferencia, y la interconexión entre los diferentes tipos de terminales.

La regeneración impide la acumulación de ruido co-canal, y la interferencia de canal adyacente. Cualquier efecto del ruido o distorsión en el enlace ascendente se quita en el satélite y sólo errores de secuencia de bits se propagan en el enlace descendente, por lo que en lugar de que el ruido en los dos enlaces se sumen, sólo los errores en los bits del sector de alcance se agregan (dobles errores, y errores de compensación se suponen despreciable).

La ventaja del transpondedor regenerativo aumenta significativamente cuando están incluidas las no linealidades inherentes del canal de satélite; las no linealidades son introducidas principalmente en las salidas de la estación terrena y el transmisor del satélite. Son posibles entre 2 y 5 dB de ganancias, incluso en presencia de portadora del enlace ascendente a alta densidad de ruido. La ventaja en el margen de enlace se les puede ceder contra interferencias en una situación de interferencia limitada y, por lo tanto, los transpondedores regenerativos se pueden utilizar para aumentar la capacidad del sistema en un entorno.

La propiedad de desacoplamiento de los transpondedores regenerativos ofrece resistencia al desvanecimiento de enlace ascendente o descendente de la señal. Además, los enlaces ascendentes y los enlaces descendentes se pueden adaptar por separado dando una ventaja de varios decibelios en la potencia resultando en un incremento de la capacidad

global del sistema. Las principales ventajas y desventajas de los transpondedores regenerativo se resumen en la siguiente tabla.

Se ha calculado que, en condiciones normales de operación, son posibles mejoras del orden de 8 dB por transpondedores regenerativos sobre transpondedores convencionales en presencia de desvanecimiento por lluvia en el enlace ascendente.

Un transpondedor regenerativo realiza esencialmente el procesamiento de señales, tales como la demodulación, la modulación, así como el procesamiento avanzado de corrección de errores/codificación, formateo de datos, interferencia, reducción, compensación de atenuación por lluvia, la conmutación de paquetes, etc.

El rendimiento global de la conexión por satélite total, depende del enlace ascendente, el enlace descendente, los efectos no lineales en el transpondedor y la interferencia.

En un transpondedor convencional La portadora total de ruido para un transpondedor lineal cuando no hay interferencia se considera está dado por:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_T^{-1} = \left(\frac{C}{N}\right)_U^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)_D^{-1}$$

La relación entre enlace ascendente y descendente de portadora a ruido para un BER específico dado por una valor constante del total de portadora a ruido se muestra en la ecuación anterior, suponiendo un factor de eficiencia de ancho de banda RIB igual a 2 b/s Hz (o 3dB) y sin la codificación ($r = 1$).

Para un transpondedor regenerativo es necesario determinar el BER en el enlace ascendente y descendente por separado. Como la probabilidad general de error, P_e , está dada por:

$$\begin{aligned} (P_e)_T &= (P_e)_U[1 - (P_e)_D] + (P_e)_D[1 - (P_e)_U] \\ &\approx (P_e)_U + (P_e)_D \end{aligned}$$

La tasa de error total se expresa como:

$$(BER)_T \approx (BER)_U + (BER)_D$$

La figura 3.1 ilustra los resultados obtenidos a partir de la expresión anterior, considerando un canal lineal, el mismo factor de eficiencia de ancho de banda, la codificación y un BER de 10^{-4} . Una ligera diferencia entre los valores de enlace ascendente y descendente de C / N lleva a una tasa de error de bits total igual a la del enlace con la tasa de bits más grande de error.

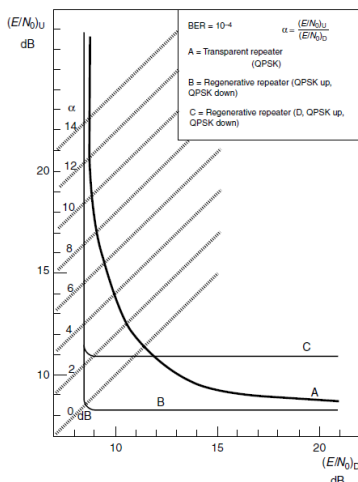


Figura 3.1 Enlace ascendente, enlace descendente y rendimiento de enlace total; enlace intersatelital [1]

La señal de enlace ascendente se convierte en descendente para FI y después demodulada en banda base. En un satélite regenerativo el enlace de subida y de bajada están desconectados y por lo tanto el ruido y la interferencia de ambos enlaces no se añaden. Como resultado, cada enlace se puede optimizar por separado.

Las ventajas y desventajas de un transpondedor Regenerativo se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Ventajas y desventajas de un transpondedor regenerativo

| VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|---|--|
| Se pueden usar en cada enlace modulación y formatos de codificación diferentes. | Disminución de confiabilidad debido al incremento de complejidad |
| Procesamiento a bordo. | Exceso de peso |
| Posibilidad de usar conmutación de banda base a bordo. | Costos |
| Tasa de errores mejorada. | Disipación de potencia |
| Terminales de tierra más baratas. | |
| Mejora la calidad del canal | |
| Mayor capacidad de resistencia a las interferencias | |
| Acceso de seguridad | |

Si el repetidor del satélite es de tipo regenerativo, la información digital se recupera y procesa en el satélite antes de ser transmitida hacia Tierra. Con este tipo de repetidores, los enlaces son más robustos frente a las interferencias, proporcionando la misma tasa de error con menor E_b/N_0 figura 3.2 Pero el precio que se paga por esta mejora de prestaciones es una mayor complejidad, dada por la implementación de circuitos y hardware muy rápidos, que consumen mucha potencia.

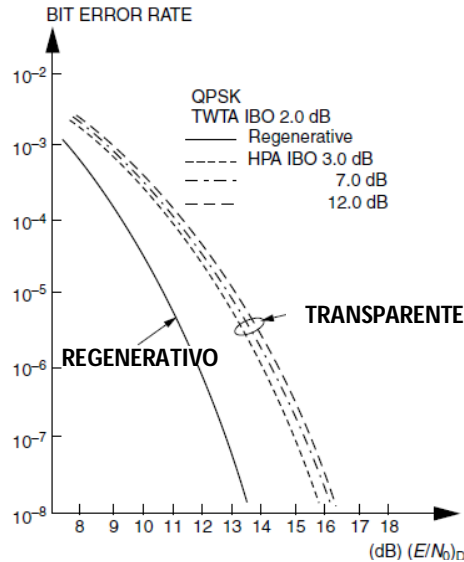


FIGURA 3.2 Rendimiento de enlace total con satélite regenerativo ^[1]

3.2 COMPARACIÓN: TRANSPONDEDOR TRANSPARENTE VS REGENERATIVO

Las funcionalidades y prestaciones requeridas por las nuevas redes de satélite de telecomunicaciones se consigue por medio de arquitecturas de haces múltiples, con conmutación y procesamiento a bordo (OBP), a bajo nivel de gestión de la información de ancho de banda, con una flexibilidad total de recursos, de tal manera que será posible cumplir cualquier distribución, enrutamiento avanzado y requerimiento de servicios de telecomunicaciones, para la cobertura selectiva de las regiones de gran extensión.

En la figura 3.3 se muestra un diagrama de bloques de la arquitectura de la carga útil de un satélite clásico transparente, y la parte diferencial de una arquitectura con procesamiento a bordo (OBP).

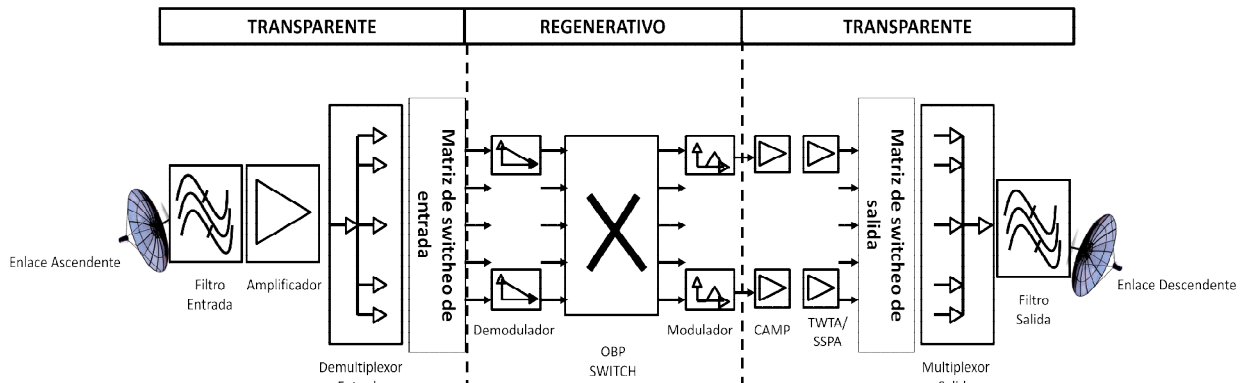


Figura 3.3 Transpondedor transparente vs Regenerativo ^[16]

La parte diferencial, situada entre el receptor de bajo ruido y el amplificador de canal son los siguientes:

- Conversión de frecuencia
- Demultiplexación de frecuencia, con procesamiento de señal digital
- Demodulación del canal digital
- Conmutación de banda base
- Modulación digital
- Transmisión digital de la frecuencia de modulación

Dentro de la topología del segmento terrestre se consideran los siguientes tipos de unidades: las estaciones y terminales de usuario por satélite, estaciones de servicio y terminales de satélites, estaciones y terminales de puerta de enlace por satélite, y el control de la red y centro de servicio, que tiene la vista general del sistema, y será capaz de realizar las funciones de control y gestión de los elementos de la red entera.

Un repetidor regenerativo ofrece la posibilidad de enrutamiento de tráfico, distribución y procesamiento a bordo y por lo tanto el nombre del satélite "inteligente" o "conmutación en el cielo".

3.3 PARTES FUNCIONALES DE UN TRANSPONDEDOR TRANSPARENTE

El diagrama de bloques típico de un transponedor transparente es el que se muestra a continuación en la figura 3.4

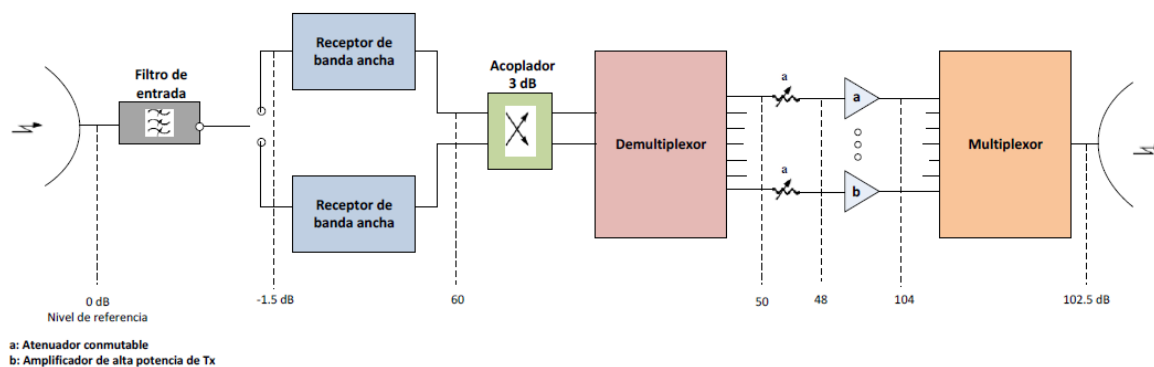


Figura 3.4 transponedor transparente ^[7]

- **El receptor de banda ancha.** Un receptor duplicado se proporciona de modo que si uno falla, el otro se conecta automáticamente. La combinación se denomina como receptor redundante, lo que significa que aunque dos se proporcionan, sólo uno está en uso en un momento dado. La primera etapa en el receptor es un amplificador de bajo ruido (LNA). Este amplificador, añade poco ruido a la portadora que se amplifica, y al mismo tiempo

proporciona una amplificación suficiente a la portadora para anular el ruido presentando nivel más alto en la etapa mezcladora siguiente.

- **El demultiplexor de entrada** separa la entrada de la banda ancha (la señal), que cubre la gama de frecuencias de 3,7 a 4,2 GHz, en los canales de frecuencia de transpondedor. Los canales están generalmente organizados en grupos de números pares e impares numerados. Esto proporciona una mayor separación de frecuencia entre canales adyacentes en un grupo, lo que reduce la interferencia de canal adyacente.
- **Un amplificador de potencia** separado proporciona la potencia de salida para cada canal de transpondedor, cada amplificador de potencia está precedido por un atenuador de entrada. Esto es necesario para permitir que la unidad de entrada de cada amplificador de potencia se ajusta al nivel deseado. El atenuador tiene una sección fija y una sección variable. La atenuación fija es necesaria para equilibrar las variaciones en la atenuación de entrada de manera que cada canal de transpondedor tiene la misma atenuación nominal, La atenuación variable es necesaria para establecer el nivel requerido para diferentes tipos de servicio (un ejemplo es el requisito de potencia de entrada de retardo de envío).
- **El multiplexor de salida** agrupa la señal para ser enviada.

A continuación se presenta un ejemplo de diagrama funcional de un transpondedor transparente en la figura 3.5

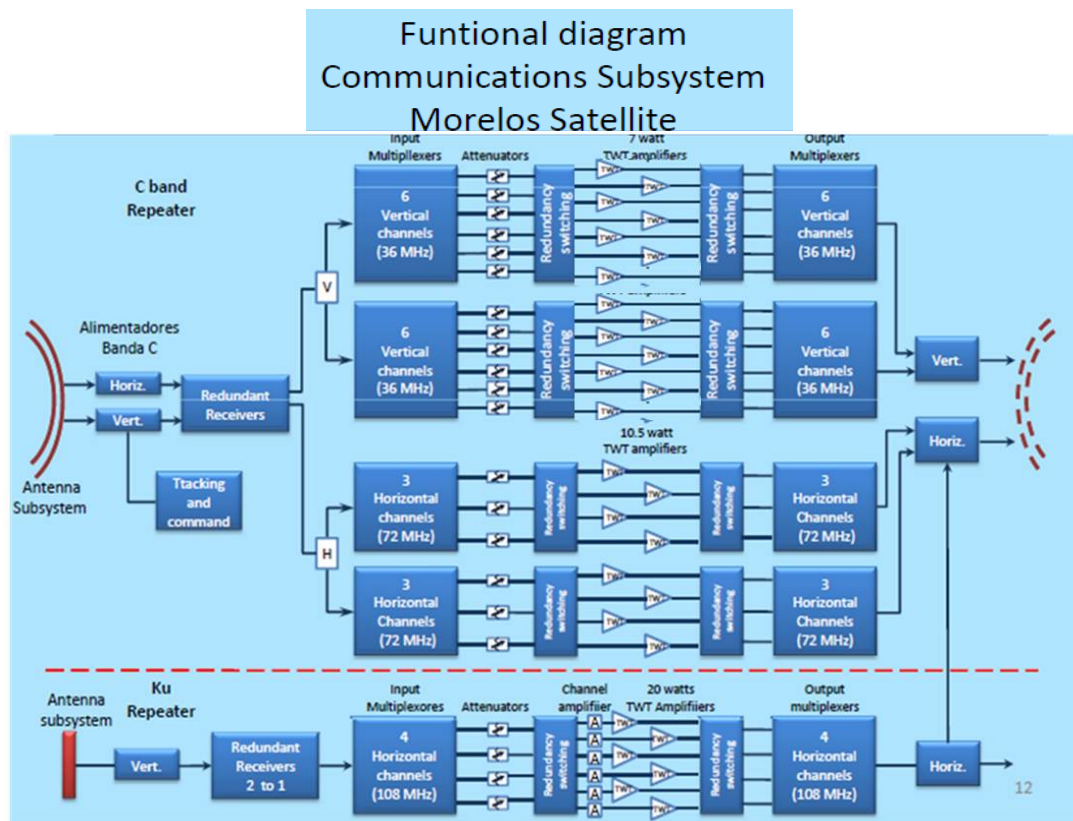


Figura 3.5 Transpondedores del satélite mexicano morelos ^[17]

3.4 PARTES FUNCIONALES DE UN TRANSPONDEDOR REGENERATIVO

El repetidor regenerativo es un transponedor donde la señal RF recibida es demodulada totalmente en el satélite, después de filtrarse, el procesamiento de esta señal demodulada es una vez más re-modulada sobre la portadora de RF del enlace descendente. El procesamiento de la señal incluye el filtrado de ruido, la eliminación de la distorsión y la interferencia causada por el enlace ascendente y la re-modulación de la señal. En este esquema, el enlace ascendente y el enlace descendente son totalmente independientes en términos de ruido, interferencia y distorsión. Así, el enlace ascendente y el enlace descendente pueden ser diseñados de forma independiente. Puesto que se trata de demodulación, el canal de telemetría, seguimiento y comando pueden ser integrados en el canal de comunicación. Las señales de control pueden ser recibidos por el transponedor del satélite, demoduladas y recibidas en los subsistemas asignados del satélite. Las señales de telemetría, que son generadas a bordo, se pueden transmitir para controlar la estación de tierra mediante la adición de estas señales en unas partes pequeñas del canal de comunicaciones. Por lo tanto, no es necesario un canal separado para la telemetría, rastreo y comando en este tipo de esquema. En otros tres esquemas, un canal separado se requiere para este propósito. Este repetidor regenerativo es más adecuado para sistemas de comunicaciones digitales ya que la regeneración de la señal a bordo se realiza eficientemente figura 3.6

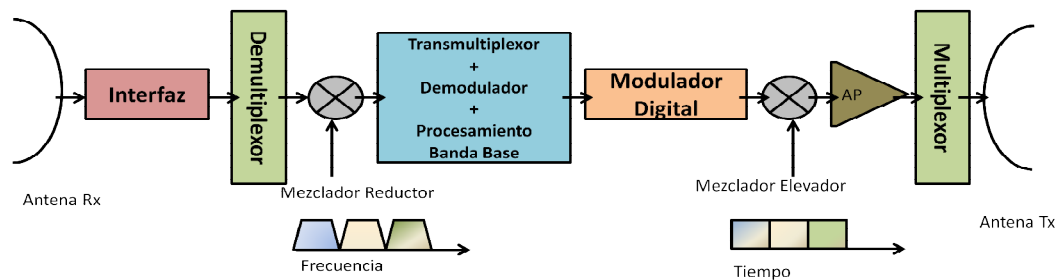


Figura 3.6 Transponedor regenerativo ^[7]

La tecnología del repetidor regenerativo es relativamente nueva, lo que explica su uso limitado hasta ahora. Sin embargo, muchas generaciones siguientes de satélites con servicios MSS y FSS, planean implementar dichos transponedores.

A conjunto de requisitos generales para el equipo se resume como sigue:

- Ligero de peso para minimizar la penalización
- Reforzados a la radiación, fiable y compacto

- Demanda con las especificaciones de rendimiento, tales como la velocidad, la precisión, la fiabilidad, inmunidad al ruido, rendimiento del BER, la estabilidad de nivel, etc
- Disposición de los controles autónomos para asegurar el funcionamiento correcto
- Tolerancia a fallos de hardware y software para minimizar la ocurrencia de fallos / errores

La arquitectura del procesador de banda base se puede implementar de varias maneras. Los principales bloques funcionales comprenden modulador/de-modulador, codificador/decodificador, Convertidores analógico digitales, llamados procesando/control y conmutado.

En este tipo de configuraciones, las portadoras del enlace ascendente son demoduladas, procesadas a bordo y enrutadas hacia el enlace descendente de manera inteligente. La frecuencia de bajada se logra mediante la re-modulación de las señales procesadas en banda base. Con esta disposición se hace más factible y eficiente el uso de haces puntuales que concentren la potencia en puntos de interés para los enlaces, pudiendo minimizar los efectos debidos a la lluvia. El costo de implementación y complejidad de esta tecnología limita a muchos operadores en la utilización de estas técnicas.

3.4.1 ARQUITECTURA DEL TRANSPONDEDOR REGENERATIVO

La función del procesador a bordo de banda base es interconectar de manera eficiente el tráfico en los haces del enlace ascendente a los haces de destino del enlace descendente. En este contexto, las funciones básicas realizadas por el procesador a bordo incluyen:

- Multiplexación y demodulación en portadoras de enlace ascendente
- Procesamiento de los datos demodulados
- Conmutación de datos de banda base a sus puertos de destino
- El procesamiento de los datos conmutados por re-modulación de portadoras del enlace descendente
- Re-modulación y multiplexado de la portadora del enlace descendente
- Control de la red autónoma incluyendo monitoreo y control de los subsistemas del procesador, petición de canal de procesamiento seguido por la asignación de tiempo o slots de frecuencia a las terminales de usuario.

La figura 3.7 muestra un diagrama de bloques funcional de la configuración del procesador a bordo de banda base. Este diagrama de bloques incluye demodulador, procesador de entrada, switch de banda base, procesador de salida, re-modulador del enlace descendente, y el subsistema de control de la red autónoma. El procesador a bordo de banda base interconecta "M" haces de enlace ascendente a "N" haces de enlace descendente. Para cada haz de enlace ascendente y de enlace descendente podría haber un número de estos bloques funcionales que todos alimentarán al procesador de banda base.^[18]

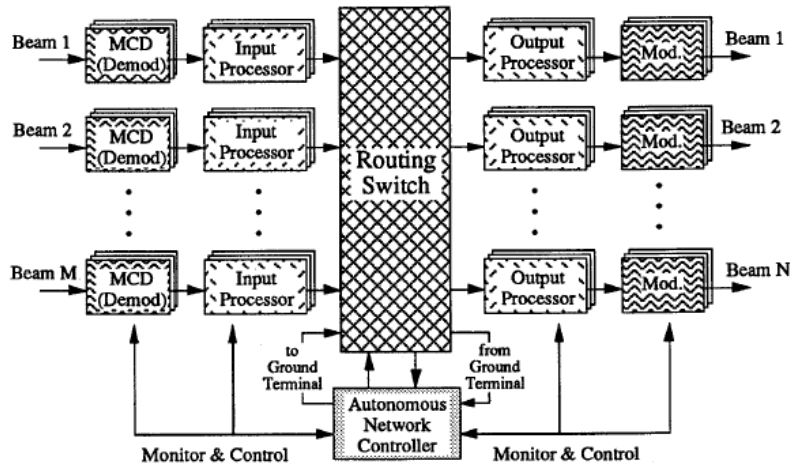


Figura 3.7 Diagrama de bloques funcional de un transpondedor regenerativo ^[18]

Consideraciones de diseño

Las consideraciones generales un de diseño relacionado con el procesador a bordo (OBP) se examinan de acuerdo a lo siguiente:

➤ Demodulador Multiportadora

El demodulador multiportadora (MCD) según consideraciones de diseño, incluyen la tecnología de implementación, velocidad de bits portadora de entrada, y los tiempos y los problemas de sincronización.

➤ Sistema síncrono de bits

Otra consideración en el diseño del procesador a bordo es la posibilidad de aplicar el funcionamiento síncrono de bits o de usar los relojes de usuario asíncronos. En un sistema síncrono de bits, todos los relojes de usuario están sincronizados con el reloj de a bordo lo que no hay necesidad de realizar la recuperación de temporización de bits a bordo del satélite, la ventaja es que no requiere ajustes de temporización para cada portadora figura 3.8

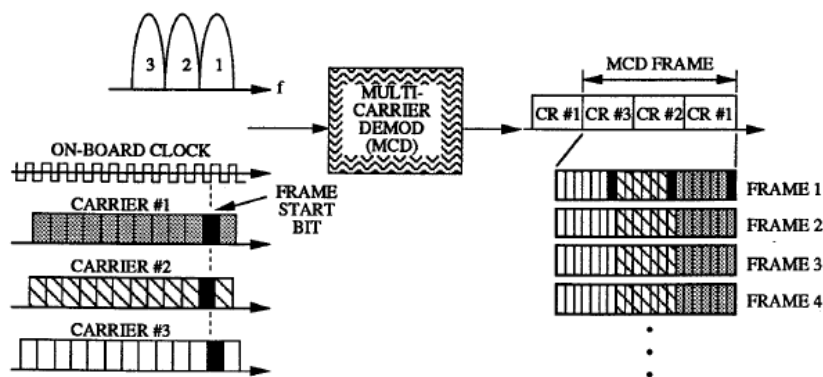


Figura 3.8 Sistema síncrono de bits ^[18]

➤ Resolución de ambigüedad de fase

Un sistema síncrono de bits proporciona temporización de bits adecuado a bordo del satélite para el proceso de demodulación. Sin embargo, hay necesidad de realizar también la sincronización de fase de la portadora para la demodulación correcta.

La estimación de fase de la portadora se puede realizar a través de un patrón de preámbulo que incluye una única detección de la palabra y algoritmo de resolución de ambigüedad de fase.

➤ Procesamiento de entrada multiportadora

Procesamiento de la señal de entrada al conmutador de banda base implica realizar lo siguiente:

Ajuste de bits de temporización

- TDMA o TDM generación de temporización de trama y sincronizaciones
- La decodificación
- Corrección de errores de decodificación
- Canal o mensaje de demultiplexación de la de portadora TDMA o TDM

➤ Conexiones punto a multipunto

El requisito para dar cabida a conexiones punto a multipunto se hace a través de dos aproximaciones básicas:

- Transmisión Copia múltiple

Consiste en establecer múltiples conexiones de destino para cada enlace que es parte de un grupo multidestino

- Enrutamiento multipunto a bordo

Constará de una sola retransmisión que se encamina a múltiples destinos.

Un ejemplo de un diagrama funcional de un transpondedor regenerativo es el que se muestra a continuación en la figura 3.9

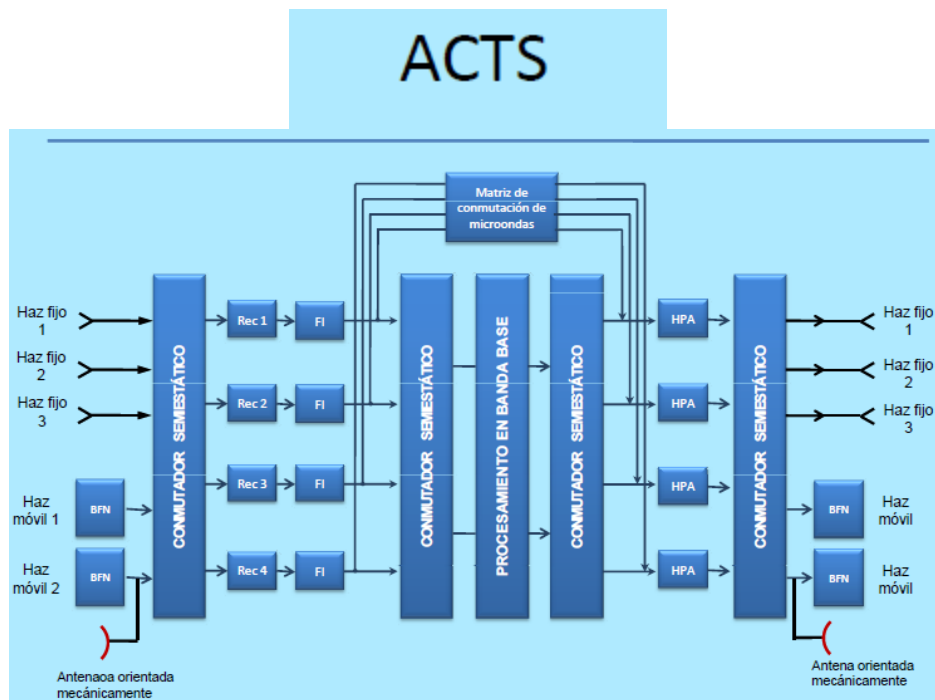


Fig. 3.9 Estructura del transpondedor del satélite regenerativo ACTS ^[17]

La banda Ka nos brinda un mayor ancho de banda, sin embargo en la actualidad sólo existe un satélite de banda Ka funcionando en los Estados Unidos. Se trata del Advanced Communications Technology Satellite ("ACTS") (Satélite de tecnología avanzada de telecomunicaciones) de la NASA, lanzado en septiembre de 1993 y ubicado en los 100° L.O. El programa ACTS ha demostrado que los satélites pueden interfuncionar con, y en algunos casos hasta competir con, los cables de fibra óptica. El uso de frecuencias de la banda Ka y transpondedores con ancho de banda amplio da a ACTS una capacidad que ningún otro satélite anterior ha tenido – la capacidad de transportar señales digitales de comunicaciones, de emisión y recepción, a velocidades estándares de datos de comunicaciones ópticas (por ejemplo, 155 millones de bits por segundo y superiores). ACTS transmite tráfico a alta velocidad con calidad similar de servicio (aunque con un tiempo de espera ligeramente más grande) que los cables de fibra óptica y a menudo con ventajas económicas y de desempeño.

Dentro de la topología del segmento terreno, se consideran los siguientes tipos de unidades: las estaciones y terminales de usuario por satélite, estaciones de servicio y terminales de satélites, estaciones y terminales de puerta de enlace por satélite, y el control de la red y centro de servicio, que tiene la vista general del sistema, y será capaz de realizar las funciones de control y gestión de los elementos de la red entera.

3.5 VENTAJAS DEL USO DE LA BANDA KA ^[19]

De acuerdo al informe "MEMORIA DOCUMENTAL Banda Ka (Noviembre de 2012)" de telecomunicaciones de México obtenemos el siguiente comparativo para observar las ventajas de la Banda Ka

En 2012, de acuerdo a la Coordinación de la Sociedad de la Información y el Conocimiento (CSIC) de la STC, se identificó un universo de 85,162 localidades rurales con necesidades de comunicación, de las cuales aproximadamente el 50% indican que podría atenderse de manera terrestre y el resto a través de comunicación satelital con servicios mediante el uso de frecuencias de la banda KA. De acuerdo con antecedentes, del inventario de los sitios que requieren conectividad digital más del 80% de los sitios son escuelas de la Secretaría de Educación Pública (SEP), el Instituto Nacional para la Educación de los Adultos (INEA) y Centros Comunitarios de Aprendizaje (CCA's) de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). El otro 20% está relacionado a servicios de salud principalmente.

La red 23 opera Telecom atiende a 5,960 sitios. Los enlaces son de una velocidad de 640 x256 kbps y cada uno es compartido por 25 sitios en promedio, cada sitio puede llegar a tener 20 PC o dispositivos conectados a internet.

La tasa de transferencia de bajada percibida por un usuario cuando la red 23 está funcionando a hora pico es: $(640 \text{ kbps} / 25 \text{ sitios} / 20 \text{ dispositivos simultáneos} = 1.28 \text{ kbps})$, es decir 160 caracteres por segundo. Ciertamente la conectividad que está ofreciendo no es de alta velocidad. Se atiende 59 sitios por cada Mhz. (5,960 sitios / 101 Mhz.)

3.5.1 ANCHO DE BANDA SATELITAL REQUERIDO

Para atender 42,500 sitios a una tasa promedio de 55 sitios por MHz. de ancho de banda satelital, se requerirán: $(42,500 \text{ sitios} / 55 \times \text{MHz.}) 772 \text{ MHz.}$ de banda satelital.

Este ancho de banda requerido es para ofrecer enlaces con una tasa de transferencia de 640 x 256 Kbps y cada enlace es compartido entre 25 sitios y posteriormente por 20 dispositivos en cada sitio. Ciertamente una velocidad muy baja.

Si sumamos el ancho de banda utilizado por la red 23, por la red 11K y los 42,500 sitios adicionales, el total de ancho de banda entre las tres redes es de: $(101 + 132 + 772) 1,005 \text{ MHz.}$

Para poner este requerimiento en perspectiva: un satélite que tenga Banda Ku con toda la carga útil habilitada (48 Transpondedores de 36 MHz. c/u=24 polarización vertical y 24 polarización horizontal) el ancho de banda total es de 1,728 MHz. Los 1,005 MHz. requeridos ocuparían el 58% de satélite.

Esto tomando en cuenta que se está brindando a la población una tasa de transferencia (640 x 256 kbps) compartida con una sobresuscripción de 25:1 y que hay 20 dispositivos en cada sitio. La experiencia de los usuarios en una hora pico no es la más adecuada porque perciben que el servicio es lento.

3.5.2 CRECIMIENTO POR INCREMENTO EN LA TASA DE TRANSFERENCIA

Ahora, cuando las aplicaciones y los usuarios requieren un rendimiento superior, por ejemplo el doble de la tasa de transferencia (1280 x 512 kbps), la banda completa de Ku de un solo satélite no será suficiente. La transferencia por dispositivo será de tan sólo 2.56 kbps, es decir 320 caracteres por segundo. Fig 3.10

Mas sin embargo no estamos considerando que la gran aceptación de la internet es la variedad del contenido multimedia como diseño gráfico, fotos, grabaciones, videos animaciones, tutoriales, redes sociales, etc. y que requieren la experiencia del usuario al

navegar, por lo que en la medida que se requiera incrementar la tasa de transferencia, por ejemplo a 2 Mbits se requerirán más de 4 satélites de Banda Ku.

Para resolver la problemática la industria satelital ha venido implementando lo que se conoce como reutilización de frecuencias en haces más pequeños (diámetro de 600 kms) y mediante una separación geográfica para evitar transferencias.

Las frecuencias de la Banda Ka se prestan hacer utilizadas en haces muy pequeños capaces de repetirse varias veces. En vez de utilizar un haz que cubra a todo el país con 48 transponders (1,728 MHz.) se puede diseñar un satélite con más de 30 haces que cubran el país reutilizando frecuencias (cada haz podría ser de 500 MHz. en cada polarización) lo que permitiría cubrir el país con 30,000 MHz. Figura 3.12

Este ancho de Banda Ka adicional permitiría incrementar, mínimo 15 veces, la transferencia de los enlaces, permitiendo incrementar mínimo 15 veces para poder en un futuro 9.6 Mbits de bajada a un universo de 55,190 sitios (42,500 + 5960+ 6730) con una sobresuscripción de 25:1 para que cada dispositivo pueda tener 38.4 kbps (4,800 caracteres por segundo). Figura 3.11

Aquí podemos ver mejor la superioridad de la banda Ka en cuanto a su capacidad

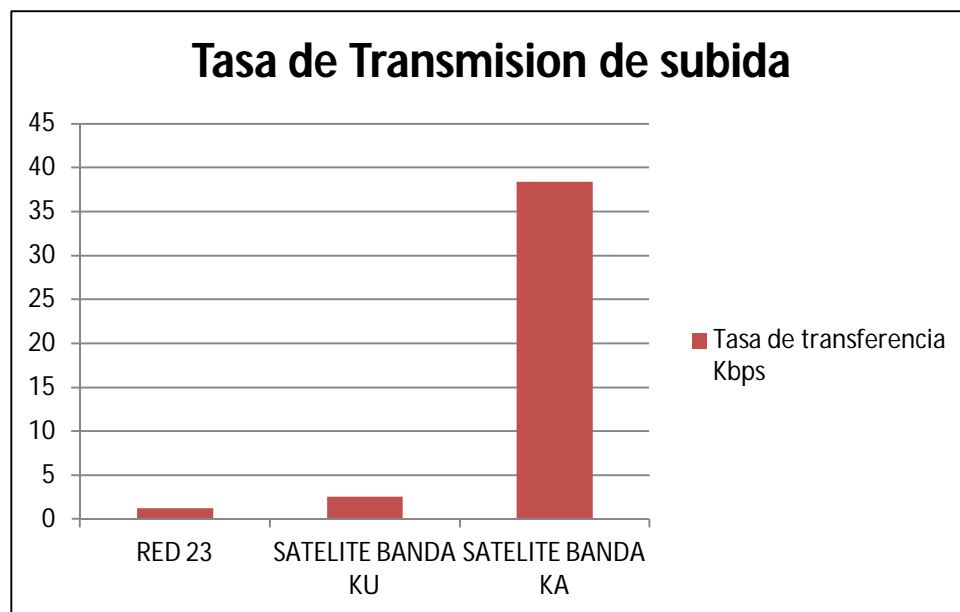


Figura 3.10 Tasa de transferencia en kbps

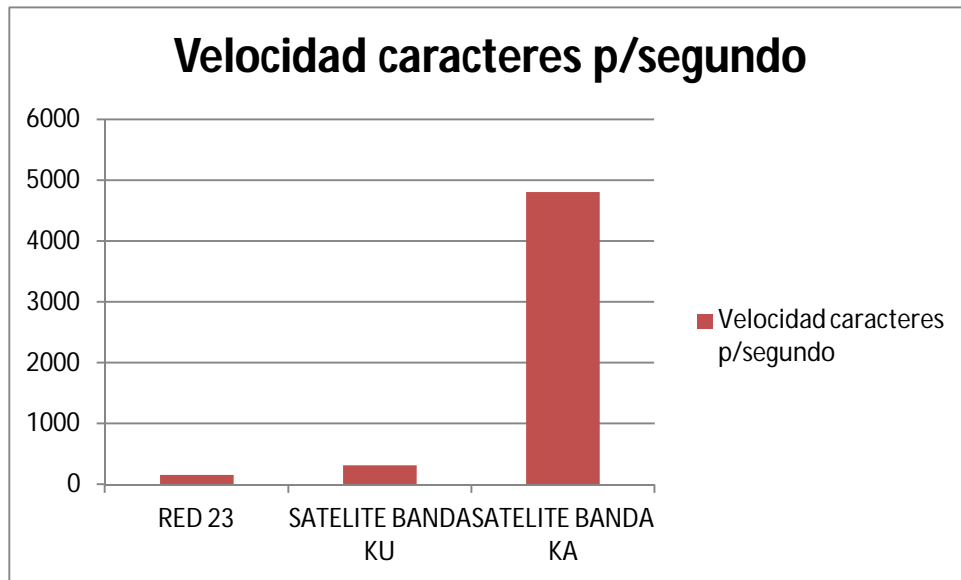


Figura 3.11 Velocidad de caracteres/segundo

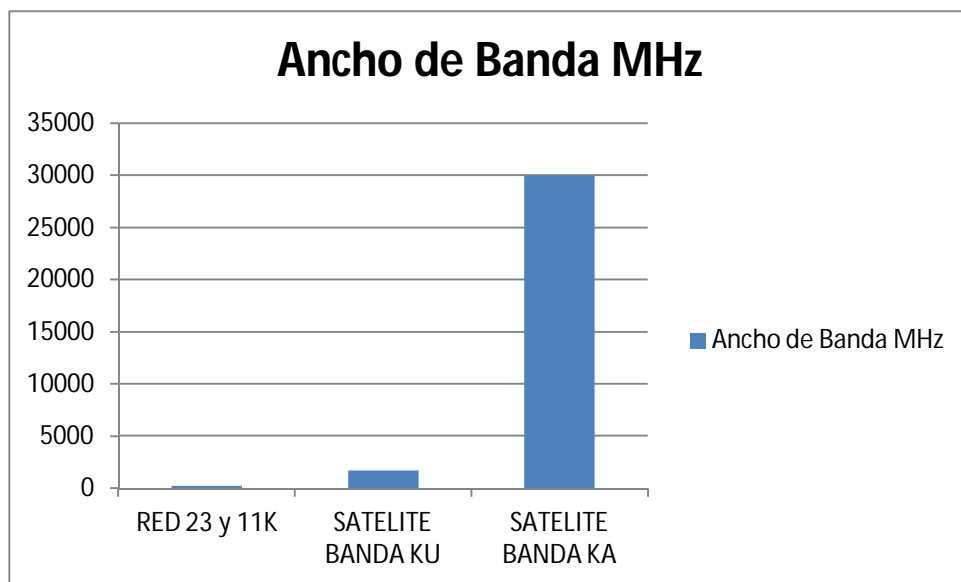


Fig 3.12 Ancho de banda en MHz

3.6 ANÁLISIS DE COSTO Y CAPACIDAD DE LA BANDA KA VS KU

Un satélite cuesta \$ 300 millones para construir, lanzar y operar y cuenta con alrededor de 15 transpondedores. Alrededor de 10 años el costo es entonces aprox. \$2 millones por año, por transpondedor.

A continuación se muestra una tabla comparativa de los costos totales de las generaciones de los satélites Mexicanos:

Tabla 3.2 Costos de las diferentes generaciones de satélites mexicanos

| | Peso (Kgs.) | Transpondedores | Potencia (Watts) | Vida Útil (Años) | Costo (M USD) |
|-----------------------|----------------|----------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| Morelos I y II | 666 | 18 C 4 Ku | 777 | 9 | 150 |
| Solidaridad I y II | 2773 | 18 C 16 Ku 2 L | 3370 | 14 | 330 |
| Satmex 5 | 4100 | 24 C 24 Ku | 8000 | 15 | 220 |
| Satmex 6 | 5600 | 36 C 24 Ku | 12200 | 15 | 350 |
| Satmex 8 | 5474 | 24 C 40 Ku | 15000 | 15 | 300 |
| Quetzsat | 5514 | 32 Ku | 20000 | 15 | 250 |

En julio de 2003, SATMEX 5 publicitaba en Phoenix Teleport, un ancho de banda de la banda C en \$ 3,500 por MHz al mes. (Equivalente a \$ 1, 512,000 por año para un ancho de banda 36 MHz) lo que en las estimaciones anteriores no están lejos, pero se debe tener en cuenta las grandes variaciones debidas a la energía, la banda de frecuencia, la duración del contrato de alquileramiento, la prioridad en el raro caso de que falle un transpondedor, etc. Pero, si uno requiere comprar capacidad de un satélite de banda ku de un "carrier" particular el precio es de alrededor de 7.000 dólares por MHz por mes. Esto se aplica al servicio de NSS7 de banda Ku por satélite en Europa, África del Norte y Oriente Medio y operación de la banda Ku en las zonas del Caribe).^[32]

Más sin embargo el ancho de banda total de un satélite FSS de banda KU es de 500 MHz por los \$7000 por mes, estaríamos hablando de \$42,000,000 por año. Ahora bien tomando en cuenta este parámetro en un satélite de banda Ka que contiene 3,500 MHz de ancho de banda por año se tendría un costo de \$294,000,000 por año lo que supone un costo total de beneficio de 7 veces mayor que la banda Ku.

3.7 TENDENCIAS TECNOLÓGICAS DE LOS SATÉLITES DE COMUNICACIONES

3.7.1 TELEFONÍA SATÉLITAL

Los satélites han sido usados durante décadas, para la predicción meteorológica, navegación, reconocimiento y comunicaciones, entre otras cosas. Las comunicaciones móviles se están convirtiendo en un mercado importante de las comunicaciones vías satélite, impulsando el desarrollo tecnológico en esta área.

El objetivo de los MSSs (Mobile Satellite System) es el establecimiento de comunicaciones móviles, mediante satélites en órbita, entre estaciones terrenas fijas y estaciones terrenas móviles.

La necesidad de este servicio se basa en el hecho de que a finales de siglo pasado, los sistemas de comunicaciones móviles terrestres tales como GSM o PCS, dieron servicio al 50 % de la población, pero sólo al 15 % de la superficie terrestre, limitando la utilidad de estos servicios a las zonas desarrolladas. Incluso un pequeño desplazamiento puede dar lugar a problemas de incompatibilidad de sistemas, ya que a pesar del esfuerzo de estandarización, existen 13 o 14 sistemas distintos.

La solución a estos problemas puede ser la creación de un sistema global de comunicaciones móviles por satélite (GMSS: Global Mobile Satellite Services) que permita el acceso a los lugares más remotos sin necesidad de grandes infraestructuras terrestres adicionales.

Como se puede comprender fácilmente, los sistemas de comunicaciones móviles vía satélite permitirán que un mundo cada vez más pequeño lo sea aún más, siendo de gran utilidad en infinidad de aplicaciones, como pueden ser las comunicaciones personales, la gestión del transporte, el periodismo internacional o las operaciones de búsqueda y rescate, etc., pero no podemos simplemente aventurarnos a hablar de comunicaciones a través de satélite sin tener en cuenta que para este desarrollo se necesitará ancho de banda para que un satélite pueda a su vez cubrir a gran cantidad de usuarios, sin ningún tipo de problema al acceder a este, teniendo que ser un satélite en banda Ka, de preferencia regenerativo para así poder combatir el ruido y las atenuaciones producidas por los diversos tipos de clima en el mundo.

Los organismos regulatorios están buscando un estándar que permita el uso de los terminales de comunicaciones móviles por satélite en cualquier lugar del mundo. Las redes que ofrecen dichos servicios reciben el nombre de Redes de Comunicaciones Personales por Satélite (SPCN: Satellite Personal Communications Networks).

Aquellos que viajen a cualquier lugar del planeta, podrán usar el mismo terminal móvil con el mismo conjunto de servicios a los que estén suscritos, sin necesidad de familiarizarse con los distintos equipos.

El objetivo es que el número marcado por el usuario llegue a su destino con éxito, evitando los problemas debidos a las barreras regulatorias de los distintos países. Así, existen una serie de acuerdos establecidos por el sector de estándares de la Unión Internacional de Telecomunicaciones para respetar el formato de las numeraciones telefónicas usadas actualmente (se asigna oficialmente el código 881 a los GMSS). Con

esto se está facilitando la definición y lanzamiento de los sistemas de comunicaciones móviles mundiales.

El estándar de telefonía del sistema de comunicaciones móviles por satélite, será similar al proporcionado por las redes de comunicaciones móviles digitales según el estándar GSM. Además de los servicios de voz, los usuarios del sistema tendrán acceso a otros servicios como fax o transmisión de datos en cualquier momento y en cualquier lugar de la Tierra. De todas formas vemos como en este momento, el desarrollo de SPCN choca directamente con la existencia de redes celulares terrestres:

De momento, la telefonía móvil vía satélite con terminales de bolsillo es sólo un proyecto (Iridium, Inmarsat-P, GlobaStar, . . .), no pudiendo competir por ahora en precio y tamaño con las redes celulares terrestres.

3.7.2 INTERNET BANDA ANCHA

Los satélites han sido de gran utilidad para los mercados tradicionales, como la telefonía y la radiodifusión, gracias a la cobertura de extensas zonas geográficas mediante la transmisión con haces únicos. Hoy en día, existe una demanda de servicios de banda ancha bidireccional en amplias zonas no cubiertas por la infraestructura de las telecomunicaciones. Según un informe publicado por la UIT titulado "Regulación de las comunicaciones por satélite en banda ancha mundiales",^[33] los proveedores de servicios por satélite pueden prestar servicios de bucle local en estas zonas, y su huella es prácticamente ilimitada, el cual sería el principal factor de que la tecnología de banda ancha por satélite es fundamental para la expansión de los servicios y las aplicaciones multimedia en todo el mundo.

Ya existen las tecnologías para crear una profusión de redes de banda ancha interconectadas en el espacio, con un vibrante y competitivo mercado listo para ofrecerlas. No obstante, para conseguir todo su potencial, el sector de satélites necesita solidez reglamentaria y liberalización a escala mundial. El uso del espectro de frecuencias radioeléctricas se ve cada más restringido, de manera que es preciso suprimir las barreras que permiten combinar las redes terrenales y satelitales. Como cada vez más países lanzan satélites y reivindican posiciones orbitales, se debería dar mayor apertura a la concesión de licencias y al acceso a mercados nacionales.

En los últimos años, los costos se han reducido a un punto en que la banda ancha por satélite ya puede competir con otras opciones de banda ancha. En la actualidad, ha surgido una nueva generación de aplicaciones con requisitos de caudal elevado, y los

satélites cumplen con estos requisitos. Los sistemas de satélite son óptimos para los servicios tales como, el acceso a Internet, las redes privadas virtuales y el acceso personal. Mundialmente, se espera que el número de abonados a servicios de banda ancha por satélite aumente de 1,5 millones en 2011 a 6 millones en 2020 (Figura 3.13). Desde un punto de vista regional, el crecimiento anticipado en cantidad de abonados se concentra en América del Norte y Europa Occidental.

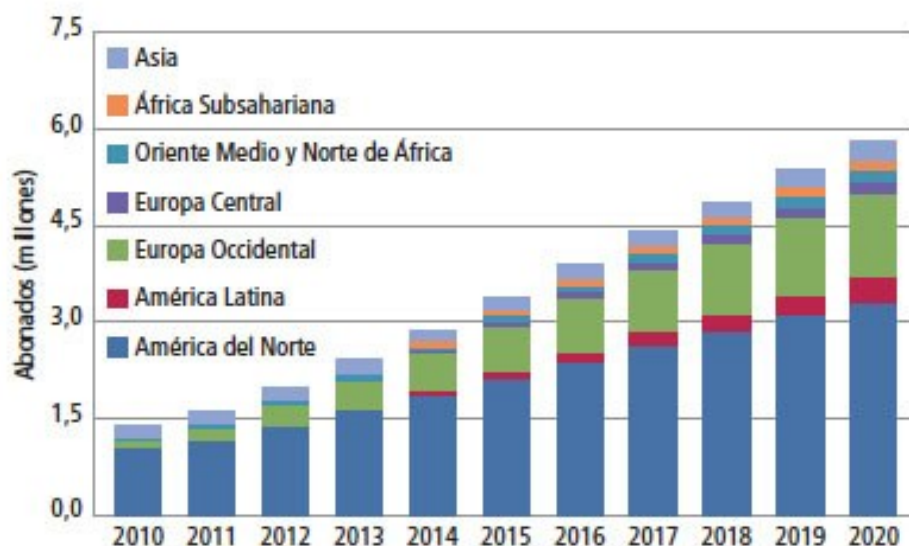


Figura 3.13 Crecimiento anticipado de la banda ancha satelital ^[33]

Sin embargo, el comportamiento de los consumidores es inconstante, y hace falta superar dos desventajas. La primera es el período de latencia (el tiempo necesario para enviar y recibir un mensaje). Esto depende de la distancia entre el satélite y la Tierra. La segunda es que las señales satelitales pueden verse atenuadas por la lluvia o las condiciones atmosféricas. Este problema ocurre con más frecuencia en las zonas tropicales, y afecta especialmente a las bandas de frecuencias superiores.

La banda ancha por satélite de primera generación de finales de los años noventa empleó servicios fijos por satélite para proporcionar conexiones bidireccionales mediante un único haz. Su éxito fue limitado a causa del alto costo del segmento espacial y de las terminales de abonado, además de que el rendimiento operacional y el caudal de la red resultaron insatisfactorios.

Los sistemas de banda ancha de nueva generación en banda Ka emplean la tecnología de haces puntuales: el haz de enlace descendente del satélite ilumina una zona de alrededor de cientos (en vez de miles) de kilómetros. La cobertura se parece a un panel o a una configuración celular. Esto permite la reutilización de las frecuencias y, como resultado, un

espectacular aumento de la capacidad total del satélite. La banda ancha por satélite de nueva generación se está personalizando para cada mercado a fin de reducir costos de anchura de banda y aumentar la capacidad para seguir el ritmo del crecimiento del número de abonados. La capacidad de este sistema es de 30 a 60 veces superior al enfoque de los servicios fijos por satélite en la banda Ku.

Los efectos de atenuación y centelleo por gases atmosféricos, nubes y lluvia, que provocan el desvanecimiento de la señal, se acentúan con el aumento de la frecuencia superior a 1 GHz, y afectan especialmente las bandas Ka y superiores. No obstante, existen técnicas de reducción del desvanecimiento para superar el problema. Existen soluciones tecnológicas para estas desventajas relacionadas con las órbitas de los satélites y el espectro de frecuencias disponible: dos elementos clave para los sistemas de satélites.

Intelsat opera una flota de más de 50 satélites de comunicaciones, y gestiona su red de clientes con múltiples satélites en varias regiones con el uso de una sola estación central. Este plan soporta un número de aplicaciones, entre otras, la navegación por Internet, la transmisión multimedia digital, el correo electrónico, la multidifusión, la transferencia de archivos, los puntos de acceso Wi-Fi, las redes privadas virtuales, la transmisión de la voz por el protocolo Internet (VoIP), las redes extranet e intranet, el comercio electrónico, las videoconferencias y la educación a distancia. Inmarsat cuenta actualmente con una flota de 11 satélites y presta servicios móviles de comunicación de voz y datos en todo el mundo: en tierra, mar o aire. Los tres satélites que constituyen la red Inmarsat-4 constituyen la Red de área mundial de banda ancha de Inmarsat que presta servicios de voz y datos. La velocidad de transmisión de datos de hasta 0,5 Mbits/s es adecuada para aplicaciones de correo electrónico, Internet e Intranet.

Europa y Oriente Medio

El satélite KA-SAT de Eutelsat presta servicios de acceso a Internet de banda ancha en toda Europa y en una pequeña zona de Oriente Medio. Es un ejemplo de sistema de banda ancha por satélite para servicios de protocolo de Internet que utiliza la tecnología de haces puntuales. Posicionado en su órbita geoestacionaria a 9° Este, el satélite KA-SAT cuenta con un alto nivel de reutilización de las frecuencias permitiendo al sistema una capacidad total de más de 70 Gbit/s. Posee una estructura de 82 haces, y cada haz puntual genera una zona de conectividad de alrededor de 250 kilómetros con una capacidad de 900 Mbit/s.

KA-SAT es un satélite de alto rendimiento que puede proporcionar velocidades de descarga de hasta 18 Mbit/s y velocidades de telecarga de 6 Mbit/s, según Eutelsat. Esto

permite la puesta en marcha del servicio de banda ancha de nueva generación de la empresa, llamado "Tooway" (bidireccional). Hughes, una rama de Hughes Network Systems LLC, utiliza el satélite SPACEWAY en banda Ka para proporcionar acceso a Internet en Brasil, sobre todo en las comunidades rurales (también en el bosque amazónico). Hughes ha estado colaborando con la Junta de Educación del Amazonas para facilitar material educativo a través de Internet por satélite a alrededor de 10.000 estudiantes de comunidades rurales.

En México, La secretaría de Comunicaciones y Transportes seleccionó a Hughes para que respalde el programa de conectividad del Gobierno de México destinado a ampliar el acceso a la banda ancha a las zonas rurales del país. Las terminales de satélite de Hughes proporcionarán acceso a Internet de banda ancha a las escuelas públicas, los hospitales, las bibliotecas y las oficinas de gobierno.

(América Latina) Media Networks, filial de Telefónica Digital, ofrecerá Internet satelital con Banda Ka. Esta nueva tecnología, demandará una importante inversión en Latinoamérica, permitirá ofrecer servicios residenciales de banda ancha satelital en zonas donde hasta ahora no era factible a precios competitivos.

México es el primer país en la región. "Estamos muy satisfechos de ser los primeros en Latinoamérica en introducir el uso de la Banda Ka que permite ofrecer internet satelital a los hogares", afirmó Gustavo Arditti, director comercial de Media Networks.

"El uso de esta tecnología ofrece un enorme potencial para elevar el acceso y la penetración de la banda ancha en la región, además indicó que en 2013 extenderán la cobertura de su servicio mayorista de Internet satelital con Banda Ka a otros países de la región.

Media Networks es el proveedor de Telefónica de México, es uno de los principales proveedores satelitales en Banda Ku en la región y hoy se convierte en pionero en el uso de Banda Ka en América Latina.

3.7.3 TELEVISION DIGITAL VIA SATÉLITE

En los últimos años, el mercado de las telecomunicaciones, en especial el mercado de la televisión, ha tenido grandes cambios conforme la transición de sistemas analógicos a digitales ha ido avanzando alrededor del mundo. Estos cambios se dan tanto en tecnología como en los negocios de telecomunicaciones.

Como era de esperarse, cada país siguió un proceso diferente de transición. Se han establecido fechas para el cambio de la televisión analógica a digital dependiendo del desarrollo tecnológico.

En América, Estados Unidos fue el primero que completó la transición. Cuando la FCC ordenó el apagón analógico en junio del 2009, cerca del 98% de la población estaba lista para realizarlo. Por otro lado, en Europa, cada país tomó una fecha diferente de acuerdo a sus intereses para realizar el cambio. El primer país en realizarlo fue Holanda, en diciembre del 2006.

El cambio a la televisión digital se dio por tres principales vertientes. La siguiente gráfica en la figura 3.14 muestra la migración a la televisión digital en Estados Unidos. La forma más difundida fue por medio de sintonizadores externos (74.3 % de la población norteamericana). El 18.2% lo realizó a través de televisión por cable y un 7.5% por medio de televisión por satélite

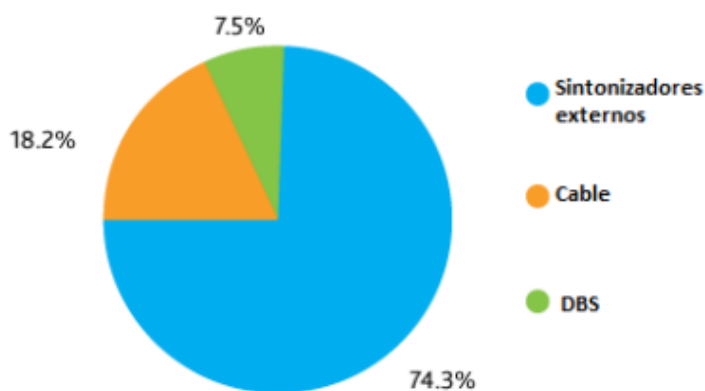


Figura 3.14 Principales métodos de difusión de TV (2009)

Las compañías del sector satelital encontraron un gran negocio en la cobranza por los servicios de televisión digital. En la figura 3.15 se muestra como desde el año 2004 la televisión de paga satelital ha ido ganando terreno sobre la televisión de paga por cable.

En el 2012 el 58.8% del mercado de televisión de pago sea entregado por cable, el 31.3% vía satelital y el 9.9% por operadores de redes de datos que también se han introducido a la competencia.

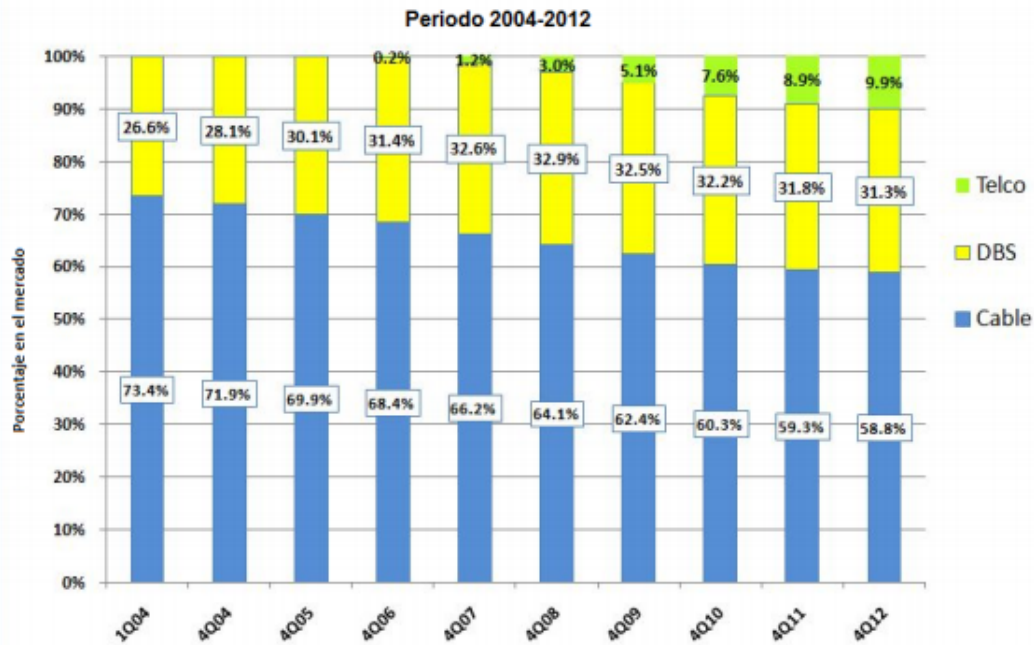


Figura 3.15 evolución de la televisión satelital

En nuestro país, la guerra entre la televisión de paga de cable y la satelital también se ha ido haciendo más notable. Se puede decir que el número de suscriptores por cable y los suscriptores de las dos compañías de televisión DTH (Direct To Home) Sky y Dish a inicios del 2011 eran los mismos. Pero a finales de año habrá mayor número de suscriptores satelitales.

Este gran avance en el número de suscriptores se le atribuye a las agresivas ofertas de la compañía Dish, lo cual impulso a la única compañía de ese momento: SKY a introducir paquetes de bajo costo. Por otro lado, hay expectativas altas ante la entrada de nuevos operadores de televisión restringida con tecnología DTH, como Telefónica y Axtel.

Siguiendo la tendencia actual, para el 2016 se esperan que los servicios de DTH concentren el 70.8% de los suscriptores de televisión de paga del país.

3.8 SATÉLITES EN BANDA KA OPERATIVOS

La siguiente tabla 3.3 muestra las características principales de varias redes que entraron en servicio en el periodo 2003-2007, que prometen mejoras importantes en cuanto a capacidad y flexibilidad en comparación con las redes actuales.

Tabla 3.3

| RED | SATÉLITE | BANDA | VELOCIDAD ASCEND/DESCEND |
|-----------------------|----------|-------|--------------------------|
| Astrolink | 9 GEO | Ka | 20 / 155 Mbits/s |
| Euro SkyWay | 3 GEO | Ka | 2 / 32 Mbits/s |
| Skybridge | 80 LEO | Ku | 2 / 20 Mbits/s |
| Spaceway | 8 GEO | Ka | 16 / 16 Mbits/s |
| Teledesic | 30 MEO | Ka | 2 / 64 Mbits/s |
| West Early Bird (WEB) | 2 GEO | Ka | 6 / ? Mbits/s |

Tabla 3.4 Actuales y próximos satélites en banda Ka

| NOMBRE | POSICIÓN | FECHA | CARACTERÍSTICAS |
|--------------------|------------|----------|---|
| Ka sat 9A | 9°E | 26/12/10 | 82 Ka-band spot beams |
| Amazonas 3 | 61.0°W | 07/02/13 | 33 en la banda Ku y 19 en banda C, así como 9 haces en banda Ka |
| Express-AM5 | 140° E | | 30 C-band, 40 Ku-band, 12 Ka-band, 2 L-band |
| Express AM6 | 53.0°E | 01/03/13 | 14 C-band, 44 Ku-band, 12 Ka-band, 2 L-band |
| Eutelsat 3B | 3° E | 2014 | 12 C-band, 30 ku-band, 9 Ka-band |
| Astra 2E | 28.2° East | 03/13 | Ku-band, Ka-band |
| Express AT2 | 140.0°E | 2013 | 14 ku-band, 2 ka-band |

En la tabla anterior podemos encontrar que en la actualidad se están lanzando satélites con banda Ka en todo el mundo, debido a las ventajas como el alto ancho de banda que nos proporciona es muy viable para las demandas actuales y el hecho de que en México aun no se estén lanzando satélites con esta tecnología implica un atraso significativo.

CAPÍTULO 4

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS SATÉLITES
REGENERATIVOS**

En este capítulo describiremos los diversos factores que influyen en un enlace de comunicación satelital en las bandas de frecuencia Ku y Ka al igual que el proceso del mismo dentro de un satélite transparente y un satélite regenerativo para posteriormente mostrar los resultados y determinar la eficiencia dentro del territorio Nacional.

4.1 FACTORES DENTRO DE UN ENLACE SATELITAL

Una herramienta fundamental al momento de determinar el diseño de un sistema de comunicaciones por satélite ha sido el cálculo de enlace. Este se refiere al proceso matemático para calcular los niveles de un canal satelital tomando en cuenta los niveles de potencia, amplificadores, los diversos factores de atenuación de la señal, entre otros parámetros. El objetivo de este proceso matemático es obtener los niveles de potencia necesarios para que nuestro enlace satelital pueda efectuarse correctamente. Para ello intervienen diferentes factores como aquellos procesos aplicados a la señal tanto en las estaciones terrenas como en el satélite, así como la ubicación geográfica de las estaciones figura 4.1

Para su análisis un enlace satelital se divide en 3 partes:

- **Enlace ascendente** (Uplink): Mediante el cual la señal transmisora corresponde a la estación terrena E/T y el receptor al satélite.
- **Enlace descendente** (Downlink): Referida a la señal cuyo transmisor es el satélite y el receptor la estación terrena E/T
- **Evaluación total del enlace** (Margen de implementación): Esta parte consiste en determinar la calidad del enlace tomando en cuenta las dos partes anteriores.

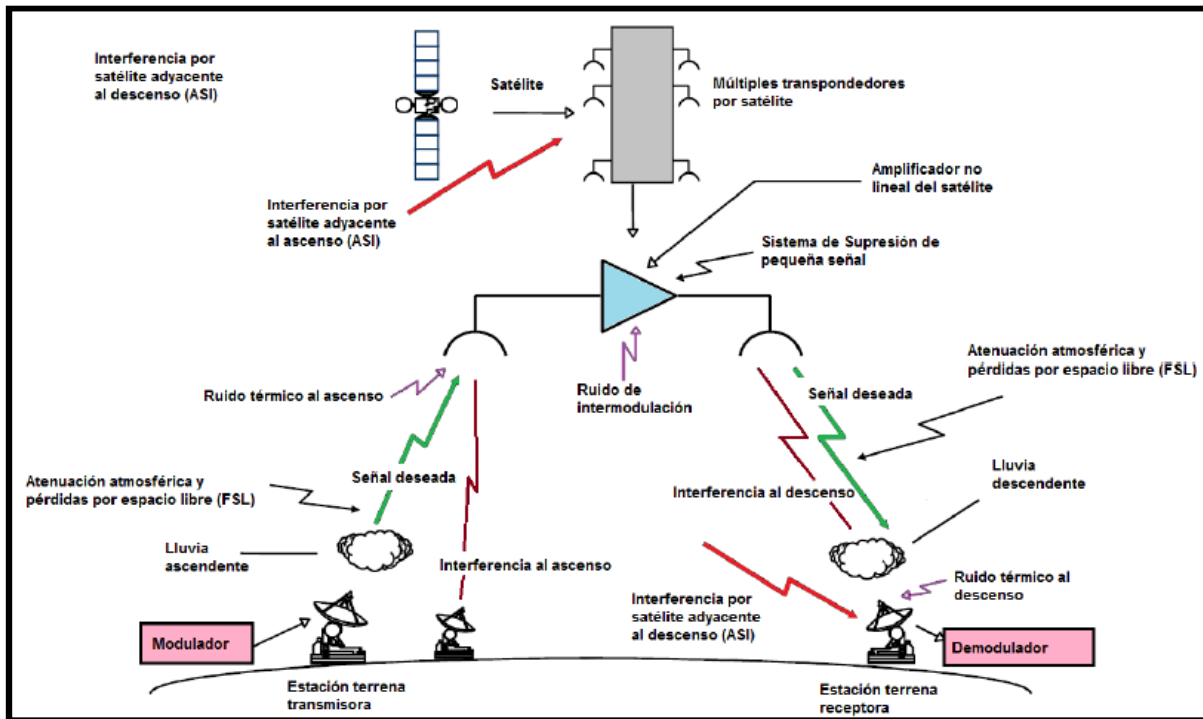


Figura 4.1 Diversos factores en una transmisión satelital

En cuanto a la E/T transmisora los parámetros de importancia son:

- Velocidad de Información, índice de modulación, factor de corrección de errores y *Roll-Off* de la señal a transmitir.
- La potencia nominal de transmisión y Back-off del HPA (*High Power Amplifier*).
- La ganancia proporcionada por la antena.

En cuanto satélite los parámetros empleados en el cálculo de enlace son:

- La Densidad de Flujo de Saturación (DFS), Figura de Mérito del satélite (G/T), PIRE de saturación, entre otros.

Por último en la E/T receptora:

- La ganancia de recepción de la antena.
- La temperatura de ruido que se obtiene del sistema incluyendo el LNA (*Low Noise Amplifier*).
- Valor de E_b/N_0 necesario para la correcta recepción.

Uno de los factores que siempre estará presente en las comunicaciones de RF es la degradación de la señal o atenuación. Por lo anterior en los diferentes métodos de cálculo de enlace siempre interviene una relación entre la señal o portadora y el ruido. El método que se explicará en este documento es el de "Relación de portadora a Ruido" C/N.

Las pérdidas que generalmente se toman en cuenta son:

- **Pérdidas por espacio libre.** Este parámetro va enfocado a la propagación de la señal en un medio sin pérdidas que en la UIT-R se define como un medio dieléctrico, homogéneo e isótropo infinito en todas las direcciones. Por obvias razones este medio es ideal, pero este modelo permite conocer las pérdidas de propagación debidas solamente a la distancia del radioenlace.
- **La atenuación atmosférica.** Este tipo de atenuación es muy importante para las comunicaciones satelitales debido a que dependiendo de la frecuencia de la señal, la señal se verá afectada en diferentes medidas por la lluvia y otros elementos que componen la atmósfera como oxígeno y vapor de agua.
- **Otras pérdidas misceláneas.** Como las pérdidas por conexiones, apuntamiento y polarización, entre otros fenómenos.

4.1.1 RUIDO DE INTERMODULACIÓN

La intermodulación ocurre cuando existen múltiples portadoras en un dispositivo con características no lineales. En sistemas de comunicación satelital esto sucede con mayor frecuencia en los TWT, que se ubican a bordo del satélite. Cuando un gran número de portadoras están presentes en un transpondedor, los productos de intermodulación no son distinguibles por separado; sin embargo, se aprecian como una especie de ruido llamado ruido de intermodulación.

La razón portadora ruido de intermodulación es un parámetro que usualmente es calculado de manera experimental, o en algunos casos con herramientas de cómputo. Además, debido a su complejidad de cálculo, es un parámetro proporcionado por el fabricante del satélite.

Para reducir el ruido de intermodulación, los TWT deben operar con un back off, la figura 4.2 muestra como la relación $(C/N_0)_i$ mejora conforme el back off de entrada se incrementa. Al mismo tiempo, el incrementar el back off decrementa a las relaciones $(C/N_0)_{subida}$ y $(C/N_0)_{bajada}$. El resultado es la existencia de un valor óptimo de back off donde la relación portadora a ruido total es máxima, como se muestra en la figura 4.3

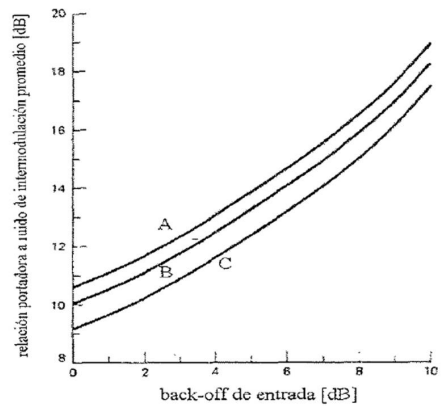


Figura 4.2 Curvas típicas de $(C/N_0)_i$ de un TWT para 6, 12 y 500 portadoras; A, B y C respectivamente

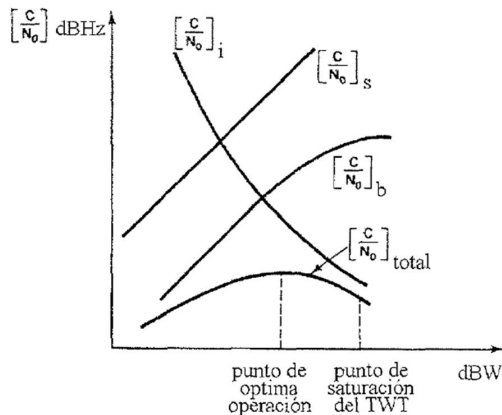


Figura 4.3 Curvas de $(C/N_0)_s$, $(C/N_0)_b$, $(C/N_0)_i$ y $(C/N_0)_i$ en función del back-off de entrada

4.1.2 RELACIÓN SEÑAL A RUIDO INTERFERENTE

Un factor muy importante que se ha de tener en cuenta en un enlace satelital es el ruido, ya que se puede suponer que todas las señales interferentes incluyendo el ruido gaussiano, son estadísticamente independientes; de esta manera es posible generalizar el efecto de la interferencia y del ruido teniendo en cuenta la relación señal a ruido total, se sabe que una señal de ruido en el canal de comunicación es aditivo, lo que implica que la señal transmitida tendrá una variación en su amplitud lo que generará error en la decisión. Generalmente el ruido es muy difícil de tratar ya que se considera como un vector que se suma a la señal con cualquier fase lo que genera que la portadora resultante

tiene amplitud y fase variable es por ello que es importante considerar este fenómeno dentro de la interferencia.

Habiendo considerado la importancia el ruido y cómo influye este en el sistema se considera la interferencia y la ecuación de la relación señal a ruido total (1), se convierte en la relación señal a ruido más interferencia total (2).

$$(C/N)_T = [(C/N)_s^{-1} + (C/N)_b^{-1}]^{-1} \dots\dots\dots(1)$$

$$(C/NI)_T = [(C/N)_s^{-1} + (C/N)_b^{-1} + (C/I)_s^{-1} + (C/I)_b^{-1}]^{-1} \quad (C/NI)_T = [(C/N)_T^{-1} + (C/I)_T^{-1}]^{-1}$$

$$(C/NI)_T = [(C/NI)_s^{-1} + (C/NI)_b^{-1}]^{-1} \dots\dots\dots(2)$$

La relación portadora a ruido más interferencia total es muy utilizada en el diseño de los sistemas satelitales ya que una vez que se selecciona el tipo de modulación, dicha relación puede predecir el desempeño del enlace. En sistemas satelitales digitales, el desempeño es evaluado en términos de probabilidad promedio de error Pb, la cual es una relación portadora a ruido del enlace, asumiendo que la señal está contaminada solamente por ruido blanco gaussiano.

4.1.3 INTERFERENCIA EN SISTEMAS SATELITALES ADYACENTES

La interferencia generada por una estación terrena hacia un satélite adyacente proviene de los lóbulos laterales de la antena, para encontrar la interferencia generada por o recibida desde los lóbulos laterales de la antena de la estación terrena hacia o desde un satélite adyacente es necesario conocer la separación angular entre los dos satélites geoestacionarios adyacentes tal y como es vista por la estación terrena. Para todos los casos ya sea ruido o interferencia el efecto que se genera se define como portadora de ruido y portadora de interferencia, la relación que define la portadora de interferencia de satélite adyacente se muestra en la a continuación.

$$(C/I)_{Sady} = (P_s/L_{Sady}N)$$

Donde:

L son las pérdidas de bajada del sistema

P_s es la potencia de salida del satélite

N_{sady} Satélites adyacentes

Interferencia terrestre

La interferencia mutua entre una estación terrena y un sistema de microondas terrestre depende de: potencia de la portadora, densidad espectral de la portadora y la separación de frecuencia entre las dos portadoras. La relación señal a ruido interferente C/I para

prevenir interferencias desde sistemas de microondas terrestres se ha establecido que sea de 25 dB como mínimo: la potencia de la portadora satelital 25 dB como mínimo por encima de la potencia de la portadora (portadoras) de sistemas de microondas terrestres $(C/I) \geq 25$ dB

Al igual que el apartado anterior se define una portadora, en este caso a interferencia terrestre que está dada por la ecuación que se muestra a continuación

$$(C/I)_{\text{Terr}} = (P_s/L N_T)$$

Donde:

N_T son los ruidos terrestres producidos por otros enlaces o por interferencia industriales

Interferencia por polarización cruzada

Los sistemas de comunicaciones satelitales reutilizan frecuencia empleando polarizaciones lineales ortogonales (polarización lineal horizontal y vertical) o polarizaciones circulares ortogonales (polarización circular a derechas y polarización circular a izquierdas), siendo esto otra fuente de interferencia, como resultado del acoplamiento de energía desde un estado de polarización al otro estado de polarización ortogonal. Esto en consecuencia al factor de discriminación de polarización cruzada que se define como la relación entre la potencia recibida en la polarización principal (co-polar) con respecto a la potencia recibida en la polarización ortogonal (cruzada) desde la misma señal incidente, y por lo tanto, representa la relación portadora a interferencia por polarización cruzada cuando las dos señales polarizadas tienen la misma potencia. La discriminación de polarización cruzada neta de un enlace satelital resulta del efecto combinado de las antenas de la estación terrena y del satélite para ambos el enlace ascendente y el enlace descendente.

A continuación se presenta la portadora a interferencia de polarización cruzada que está dada por:

$$(C/I)_{\text{cp}} = (P_s/L N_{\text{cp}})$$

Donde:

N_{cp} es la polarización cruzada

Interferencia canal adyacente

Esta interferencia se origina cuando una parte de la energía de las señales limitadas en banda cae dentro del canal adyacente producto del solapamiento de la característica de amplitud de los filtros de canal. La situación empeora cuando el amplificador de alta potencia de la estación terrena y/o del satélite opera cerca o en saturación ya que el comportamiento no lineal de estos amplificadores contribuye a un aumento de la interferencia canal adyacente.

Interferencia intersímbolo

Un canal de transmisión siempre tiene un ancho de banda limitado, y por este motivo, dispersa o extiende los pulsos digitales que pasan a través del mismo. Cuando el ancho de banda del canal es muy superior que el ancho de banda de los pulsos, la dispersión va a ser mínima. Si el ancho de banda del canal es cercano al de la señal, la dispersión excederá la duración del símbolo y va a causar que los pulsos se traslapen. Este traslape es llamado interferencia intersímbolo (ISI). Como toda fuente de interferencia, el ISI causa una degradación al rendimiento del sistema, especialmente a velocidades de transmisión altas. Es una forma impredecible de interferencia ya que el amplificar el nivel de la señal en el transmisor no garantiza disminuir los errores producidos por el ISI.

4.2 CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR PROPAGACIÓN.

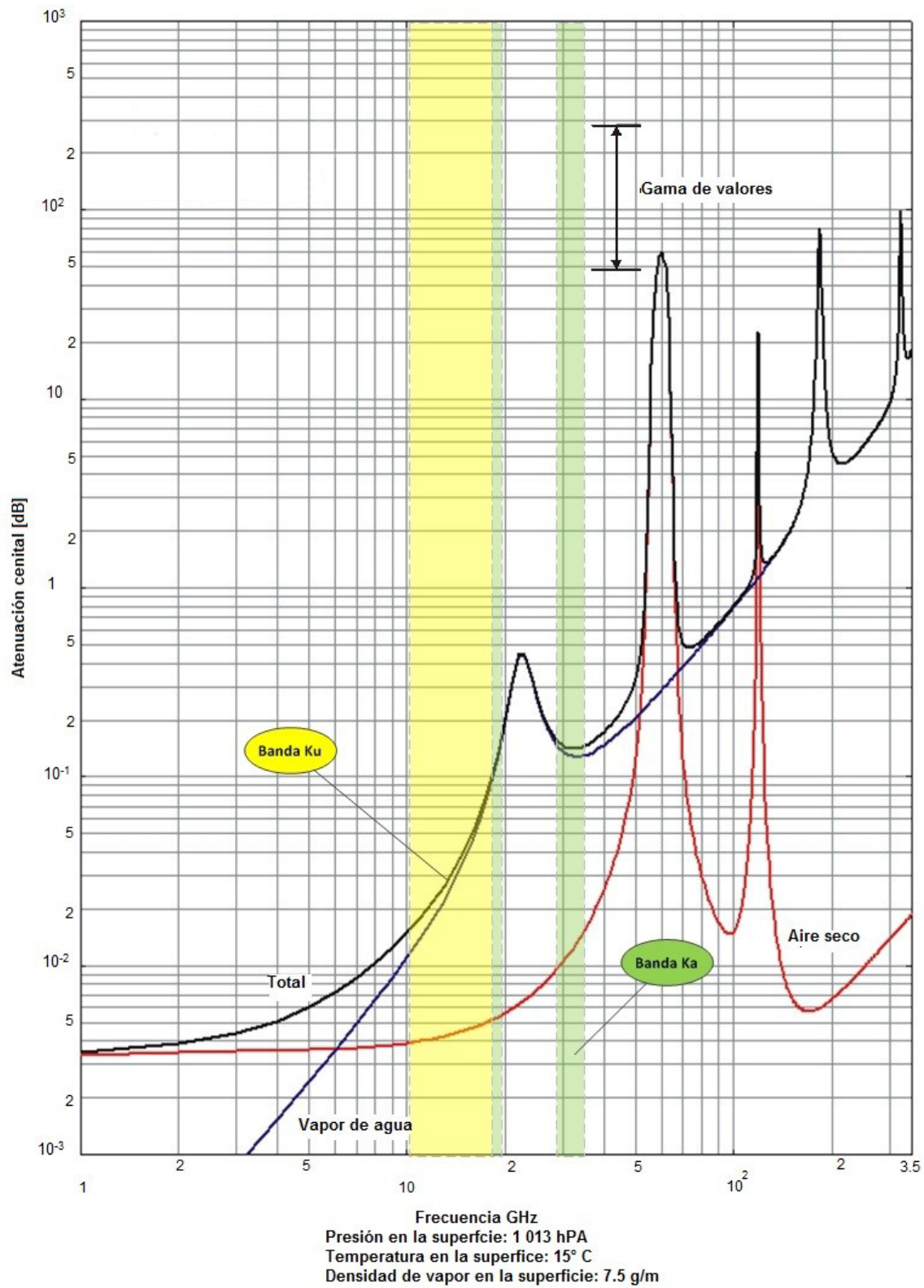
Las pérdidas de propagación en un trayecto Tierra-espacio con relación a las pérdidas en el espacio libre, son la suma de distintas aportaciones como: ^[21]

- Atenuación debida a los gases atmosféricos;
- Atenuación debida a la lluvia, a otras precipitaciones y a las nubes;
- Apuntamiento y desapuntamiento;
- Disminución de la ganancia de antena debida a la incoherencia del frente de onda;
- Centelleo y efectos debidos a la propagación por multitrayectorias;
- Atenuación debida a las tormentas de arena y polvo.

Cada una de estas aportaciones tiene sus propias características en función de la frecuencia, la ubicación geográfica y el ángulo de elevación. En general, para ángulos de elevación por encima de 10°, únicamente la atenuación gaseosa, la atenuación debida a la lluvia y las nubes y posiblemente el centelleo tendrá importancia, dependiendo de las condiciones de propagación.

La atenuación debida a los gases atmosféricos, que es enteramente causada por la absorción, depende principalmente de la frecuencia, del ángulo de elevación, de la altura sobre el nivel del mar y de la densidad de vapor de agua (humedad absoluta). A frecuencias por debajo de 10 GHz, normalmente puede ignorarse. Su importancia aumenta con la frecuencia por encima de 10 GHz, especialmente para ángulos de elevación bajos. En el caso de la banda Ku la atenuación máxima es de alrededor de 0.02dB/Km. Para banda Ka el valor máximo se incrementa a 0.1dB/Km. Normalmente, la máxima atenuación gaseosa se produce en la estación de mayores lluvias.

En la figura 4.4 se muestra una gráfica del efecto de la atenuación cenital en las diferentes bandas de frecuencias



Como podemos ver en la figura 4.4 en la banda Ka se incrementan algunos fenómenos de atenuación de las ondas electromagnéticas con respecto a otras de menor frecuencia. La atenuación por lluvia es mayor que en el caso de un enlace en banda Ku. Esto conlleva a que los sistemas necesitan un cálculo y predicción más preciso con la finalidad de hacerlos más eficientes tanto en funcionamiento como en costo.

El uso de la banda Ka de frecuencias implica que se tengan que entender nuevos problemas y retos: los fenómenos de propagación afectan más fuerte a las señales que son transmitidas y es necesario el desarrollo de nueva tecnología. Por otra parte, para garantizar la alta capacidad y disponibilidad de los enlaces de transmisión, es necesario utilizar modulaciones y codificaciones adaptivas. Suponiendo un diseño de sistemas de satélites convencionales, la PIRE se determina teniendo en cuenta los requisitos del margen del enlace para alcanzar los objetivos de disponibilidad.

La PIRE necesaria podría ser demasiado grande para que el sistema de satélites fuera factible.

Dadas las condiciones de propagación, puede que sea necesario aplicar las adecuadas técnicas de reducción de la atenuación debida a la lluvia para poner en funcionamiento sistemas factibles en las bandas de frecuencias más elevadas.

En base a experimentos con el satélite ACTS (Advanced Communication Technology Satellite) y los resultados arrojados por estos, fue posible la comparación de varios modelos teóricos de cálculo de la atenuación. El resultado del estudio comparativo de estos modelos mostró que el método descrito por la UIT en la recomendación UIT-R 618-5 de 1997 no arrojaba predicciones aceptables.

El modelo de cálculo de atenuación que tuvo mejores aproximaciones a los experimentos del ACTS fue una variante extendida del método UIT-R, el modelo DAH (Dissanyake, Allnutt, Haidaral).

Actualmente, y desde 1999, la recomendación UIT-R 618-10 (aprobada en 2009) ya toma en cuenta las consideraciones del modelo DAH. ^[22]

El método que se desarrolla a continuación proporciona estimaciones a largo plazo de las estadísticas que facilitan el cálculo de la atenuación debida a la lluvia sobre en un determinado punto para frecuencias de hasta 55 GHz.

Se precisan conocer los parámetros siguientes, algunos de ellos se muestran en la figura 4.5

- $R_{0.01}$: Intensidad de la lluvia en el punto de que se trate, para el 0,01% de un año medio (mm/h)
- h_s : Altura de la estación terrena sobre el nivel medio del mar (km)

- θ : Ángulo de elevación (grados)
- ϕ : Latitud de la estación terrena (grados)
- f : Frecuencia (GHz)
- R_e : Radio efectivo de la Tierra (8 500 km)

(Si no se dispone de datos locales de la altura de la estación terrena sobre el nivel medio del mar, se puede obtener una estimación a partir de los mapas de altitud topográfica de la UIT.)

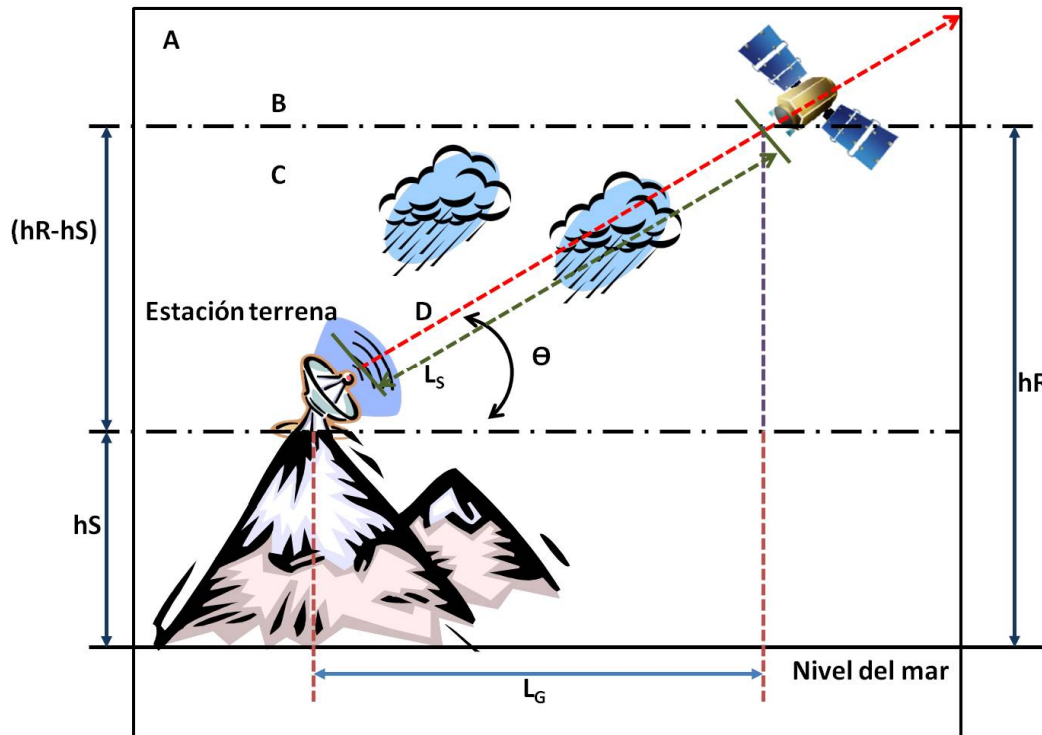


Figura 4.5 parámetros para el cálculo de atenuación por lluvia

- A. Precipitación de hielo
- B. Altura de la lluvia
- C. Precipitación líquida
- D. Trayecto Tierra-espacio

Paso 1: Se determina la altura de la lluvia, hR , indicada en la Recomendación UIT-R P.839-3 [23].

Para obtener este valor se utiliza un archivo de datos (proporcionado por la UIT) con los datos de la altura isoterma de 0°C por encima del nivel del mar (h_0) y se aplica la siguiente expresión:

$$hR = h_0 + 0.36 \text{ km}$$

Paso 2: Para $\theta \geq 5^{\circ}$, se calcula la longitud del trayecto transversal u oblicuo, L_s , en el espacio correspondiente a la altura de la lluvia mediante la fórmula:

$$L_S = \frac{(h_R - h_S)}{\text{sen } \theta} \text{ Km}$$

Para $\theta < 5^\circ$ se utiliza la fórmula siguiente:

$$L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{\left[\text{sen}^2 \theta + \frac{2(h_R - h_S)}{R_e} \right] + \text{sen } \theta} \text{ Km}$$

Si $h_R - h_S$ es menor o igual a cero, la atenuación debida a la lluvia prevista para cualquier porcentaje de tiempo es cero y no son necesarios los pasos siguientes.

Paso 3: Se determina la proyección horizontal, LG , de la longitud del trayecto oblicuo aplicando la siguiente ecuación:

$$LG = LS \cos \theta \quad \text{Km}$$

Paso 4: Se obtiene la intensidad de la lluvia, $R_{0.01}$, rebasada durante el 0.01% de un año medio (con un tiempo de integración de 1 min). Si no pueden obtenerse datos estadísticos a largo plazo a partir de fuentes locales de información, puede hacerse una estimación utilizando los mapas de intensidad de lluvia que aparecen en la Recomendación UIT-R P.837-5 [24]. Si $R_{0.01}$ es cero, la atenuación debida a la lluvia prevista para cualquier porcentaje de tiempo es cero y no son necesarios los pasos siguientes.

Paso 5: Se halla la atenuación específica, $R \gamma$, utilizando los coeficientes dependientes de la frecuencia y polarización (k, α) que aparecen en la Recomendación UIT-R P.838-3 [25] y el índice de intensidad de la lluvia, $R_{0.01}$, determinado según el Paso 4, aplicando la ecuación:

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha \text{ dB/Km}$$

Los valores de los coeficientes k y α se determinan en función de la frecuencia, f (GHz), en la gama de 1 a 1 000 GHz, a partir de ecuaciones y tablas definidas en la recomendación.

Paso 6: Se calcula el factor de reducción horizontal, $r_{0.01}$, para el 0.01% del tiempo:

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

Paso 7: Se calcula el factor de ajuste vertical, $v_{0.01}$, para 0.01% del tiempo:

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0.01}} \right) \text{ grados}$$

para $\zeta > \theta$,

$$L_R = \left(\frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \right) \text{ Km}$$

De otro modo,

$$L_R = \frac{(h_R - h_S)}{\text{sen } \theta} \text{ Km}$$

Si $|\varphi| < 36^\circ$, $\chi = 36 - |\varphi|$ grados

De otro modo, $\chi = 0$ grados

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\text{sen } \theta \left[31 (1 - e^{-(\theta/(1+x))}) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0.45 \right]}}$$

Paso 8: La longitud de trayecto efectiva es:

$$L_E = L_R v_{0.01} \text{ Km}$$

Paso 9: La atenuación de rebasamiento prevista para el 0.01% de un año medio $A_{0.01}$ se obtiene mediante:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \text{ dB}$$

Paso 10: La atenuación de rebasamiento estimada para otros porcentajes de un año medio, en el margen del 0.001% al 5%, se determina a partir de la atenuación de rebasamiento para el 0.01% de un año medio:

Si $p \geq 1\%$ ó $|\varphi| \geq 36^\circ$: $\beta = 0$

Si $p < 1\%$ y $|\varphi| < 36^\circ$ y $\theta \geq 25^\circ$: $\beta = -0.005(|\varphi| - 36)$

De otro modo: $\beta = -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \text{ sen } \theta$

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \text{sen } \theta)}$$

Hay que tener en cuenta la importante variación anual que registran las estadísticas de intensidad de lluvia. El valor obtenido de atenuación por lluvia se obtiene tanto para el enlace ascendente como para el descendente. Figura 4.6 y figura 4.7

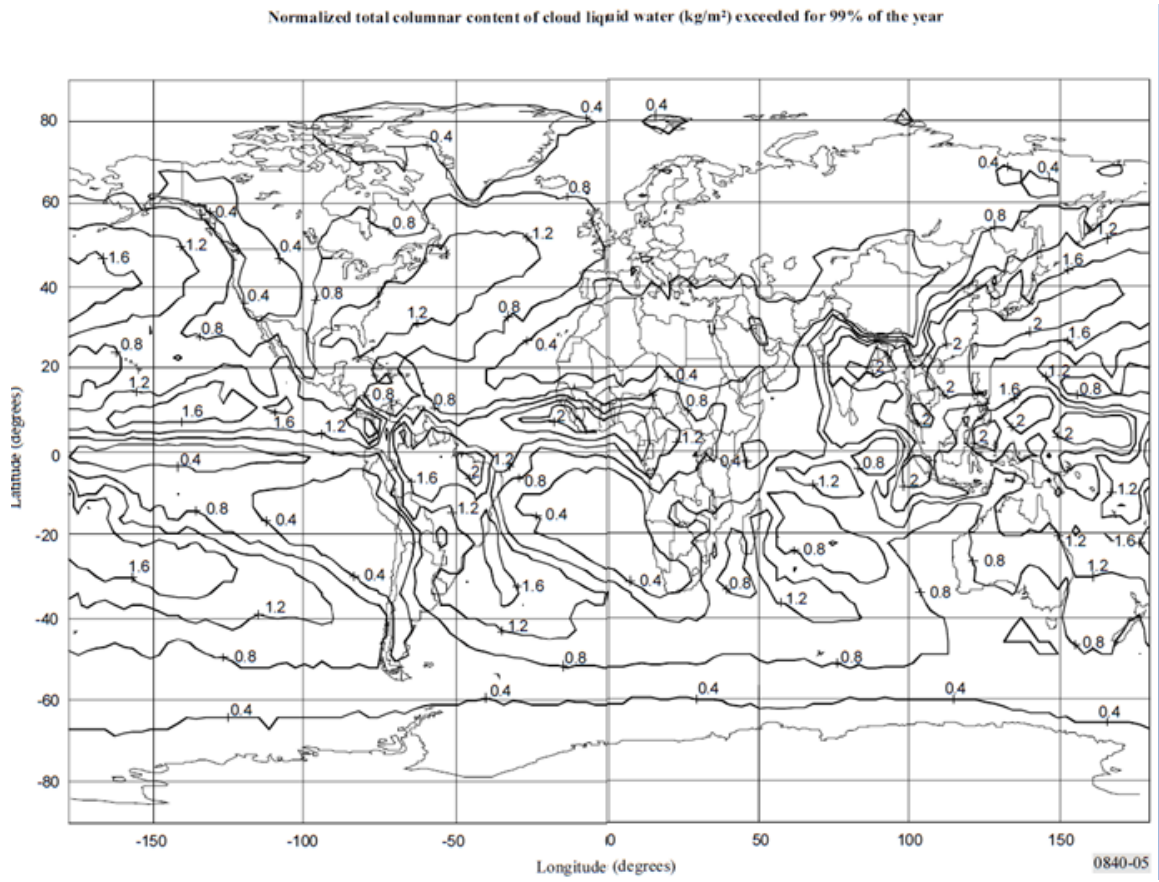


Figura 4.6 Mapa del mundo para calculo de atenuación por lluvia

| Frecuencia GHz | Polarización Horizontal | | Polarización Vertical | |
|-------------------|-------------------------|----------|-----------------------|----------|
| | K | α | K | α |
| 1 | 0.0000387 | 0.912 | 0.0000352 | 0.880 |
| 2 | 0.000154 | 0.963 | 0.000138 | 0.923 |
| 4 | 0.000650 | 1.121 | 0.000591 | 1.075 |
| 6 | 0.00175 | 1.308 | 0.00155 | 1.265 |
| 7 | 0.00301 | 1.332 | 0.00265 | 1.312 |
| 8 | 0.00454 | 1.327 | 0.00395 | 1.310 |
| 10 | 0.0101 | 1.276 | 0.00887 | 1.264 |
| 12 | 0.0188 | 1.217 | 0.0168 | 1.200 |
| 15 | 0.0367 | 1.154 | 0.0335 | 1.128 |
| 20 | 0.0751 | 1.099 | 0.0601 | 1.065 |
| 25 | 0.124 | 1.061 | 0.113 | 1.030 |
| 30 | 0.187 | 1.021 | 0.167 | 1.000 |
| 35 | 0.263 | 0.979 | 0.233 | 0.963 |
| 40 | 0.350 | 0.939 | 0.310 | 0.929 |

Tabla 4.1 Coeficientes de atenuación específicos.

A continuación se mostrarán algunos de los resultados de los cálculos de atenuación por lluvia en las regiones específicas de interés en el desarrollo de este trabajo, mostrando la gran diferencia entre las atenuaciones que sufren las frecuencias de las bandas Ku y Ka

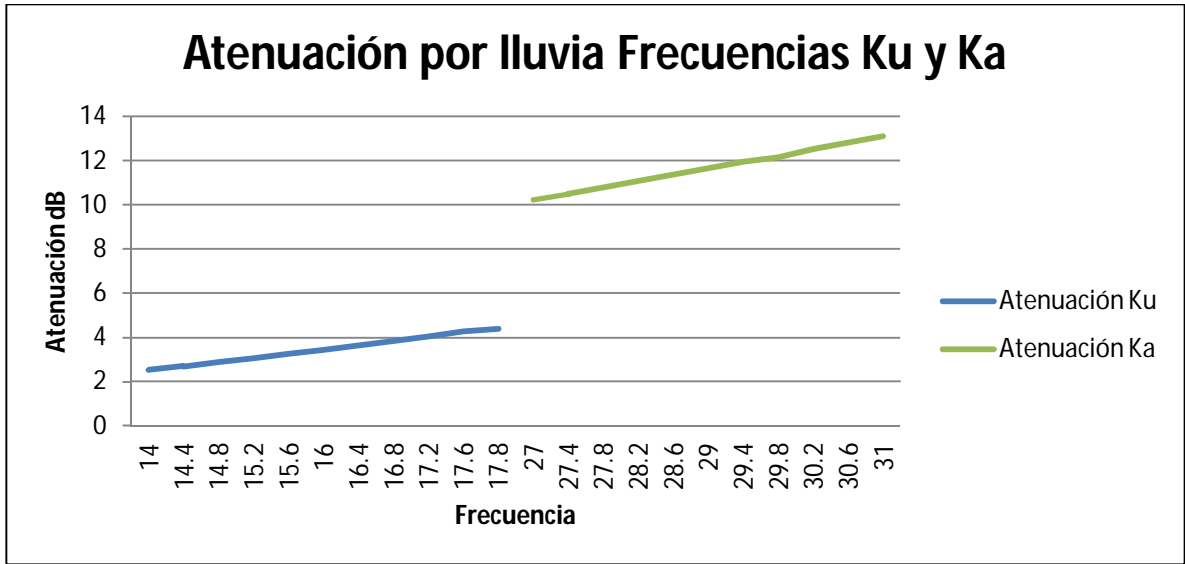


Figura 4.8 Gráfica de margen de atenuación por lluvia en Villahermosa, Tabasco

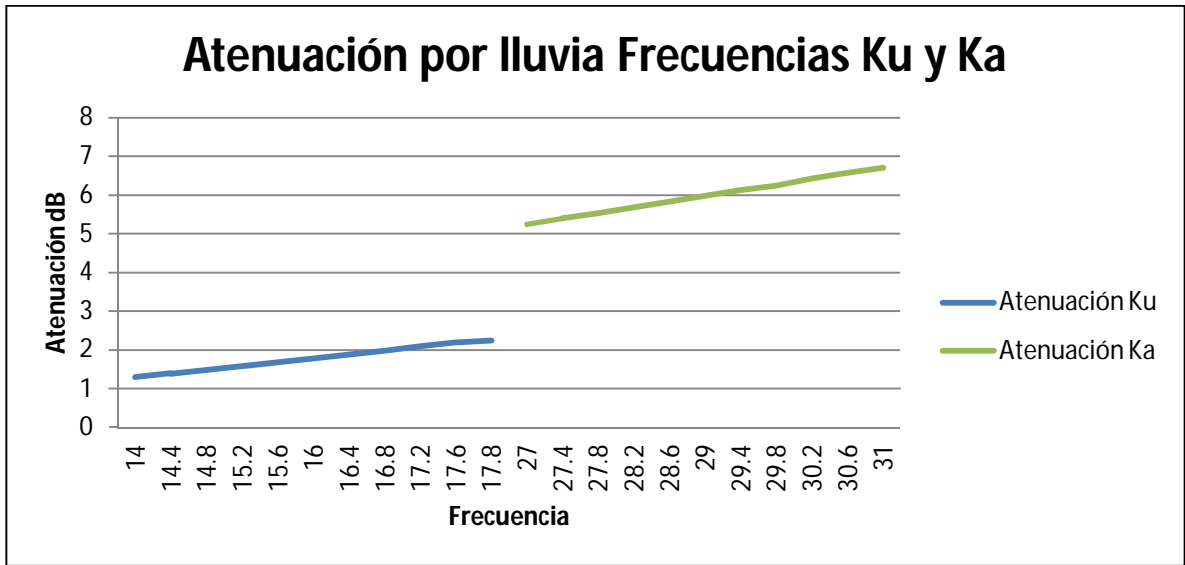


Figura 4.9 Gráfica de margen de atenuación por lluvia en Ciudad de México

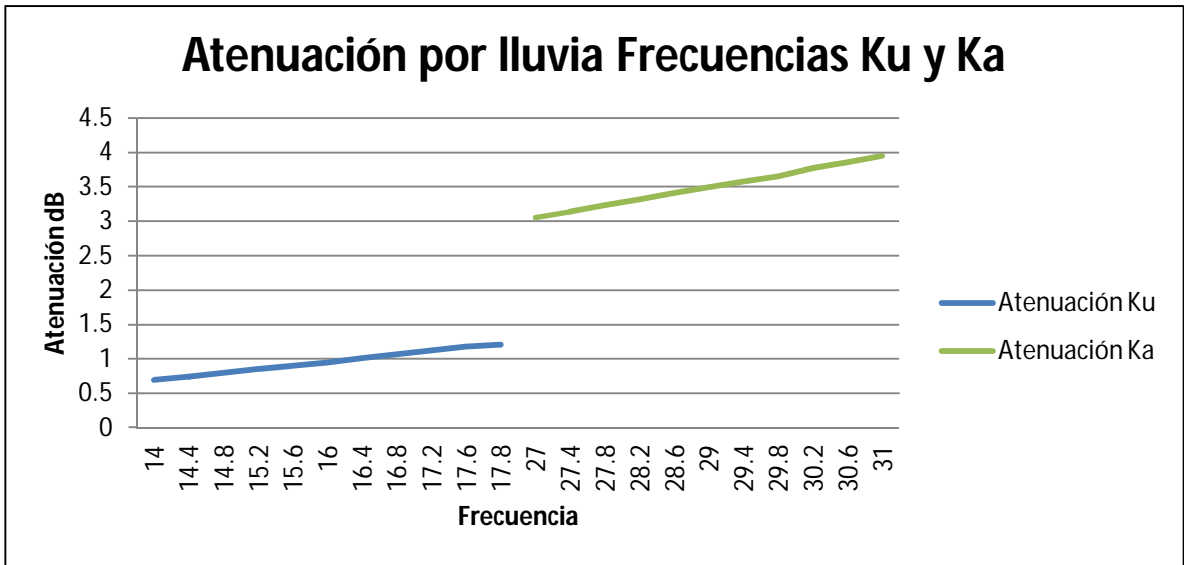


Figura 4.10 Gráfica de margen de atenuación por lluvia en Baja California

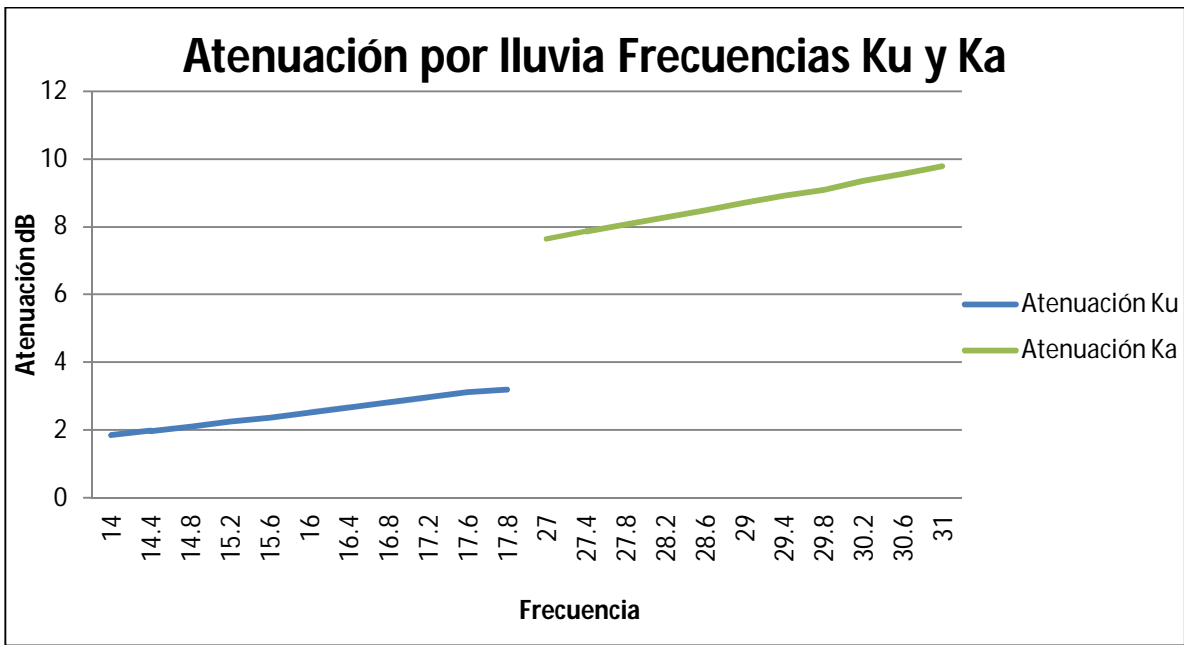


Figura 4.11 Gráfica de margen de atenuación por lluvia en Baja California

4.3 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO DEL PRESUPUESTO DE ENLACE ASCENDENTE

En esta sección, serán definidos los parámetros que intervienen en las ecuaciones para el cálculo del presupuesto de enlace ascendente de nuestra propuesta.

Azimut

Es el ángulo medido sobre el plano, tomando como referencia el norte geográfico y en sentido de las manecillas del reloj, desde 0° hasta 360°, este ángulo es utilizado para orientar las antenas con respecto al satélite sobre el eje del ecuador.

El Azimut se calcula como sigue:

$$Az = 180^\circ + \left[\tan^{-1} \left(\frac{\tan(Long_{Sat} - Long_{ET})}{\text{sen}(Lat_{ET})} \right) \right] \text{ [Grados]}$$

Donde:

- Lat_{ET} = Latitud geográfica de la estación terrea (Transmisor).
- $Long_{Sat}$ = Longitud geográfica del Satélite.
- $Long_{ET}$ = Longitud geográfica de la estación terrea (Transmisor).

Elevación

Es el ángulo formado entre el plano horizontal (horizonte) y la línea de vista formada por la estación terrea y el satélite, desde 0° hasta 90° y es utilizado para apuntar la antena de la estación terrea hacia el satélite seleccionado.

Se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$\cos \delta = [\cos(Lat_{ET})] [\cos(Long_{Sat} - Long_{ET})] \quad \Lambda = \tan^{-1} \left[\frac{HCS - (R \cos(\delta))}{R \text{sen}(\delta)} \right]$$

Donde:

HCS = Distancia del centro de la Tierra al satélite 42,164.2 km.

R = Radio de la Tierra 6,378.155 km.

Por lo tanto la Elevación se calcula de la siguiente manera:

$$E = \Lambda - \delta \text{ [Grados].}$$

Distancia al satélite

Es la distancia que existe entre la estación terrena y el satélite medida en kilómetros. La distancia al satélite se calcula:

$$D = \sqrt{HCS^2 + R^2 - \left[2HCS \times R \left(\sin \left(E + \sin^{-1} \left(\frac{R}{HCS} \times \cos E \right) \right) \right) \right]} \text{ [km]}$$

Donde: E = Angulo de Elevación [Grados]

4.3.1 RELACIÓN PORTADORA DENSIDAD DE RUIDO ASCENDENTE

La ecuación que se muestra a continuación considera los factores principales o de mayor importancia para el enlace satelital.

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{asc} = PIRE_{E/T} + \left(\frac{G}{T} \right)_{SAT} - K - L_{Sasc} - \mu_{asc} - L\Delta_{asc} [dB]$$

PIRE E/T.

Este valor corresponde a la de potencia isotrópica radiada efectiva de la E/T y se puede calcular como el producto de la potencia de transmisión PTx y la Ganancia de transmisión GTx.

$$PIRE_{E/T} = 10 \cdot \text{Log} (P_{tx}) + G_{tx}$$

G/T SAT.

Se refiere a la figura de mérito o factor de calidad del satélite. Es un valor especificado en cada satélite.

K: Es la constante de Boltzman cuyo valor corresponde aproximadamente a -228 (dBJ/K)

LS asc (pérdida en el espacio libre)

Es la pérdida de potencia que sufre una onda de radio o una señal en el espacio, este valor corresponde a las pérdidas de potencia más grandes de un enlace satelital debido alas enormes distancias que recorre el enlace, se calcula con la siguiente ecuación.

$$L_{Sasc} = 20 \cdot \text{Log} \left(\frac{4\pi \cdot f_{asc} \cdot D}{C} \right)$$

Dónde:

f= frecuencia ascendente en Hz.

D= distancia entre la E/T y el satélite.

C= velocidad de la luz.

La distancia entre la E/T y el satélite también es conocida como Rango satelital.

μ_{asc}

Corresponde a las pérdidas por lluvia o margen de atenuación por lluvia ascendente. Este parámetro está completamente comprometido con la zona geográfica de la E/T terrena. Este fenómeno atmosférico, como ya se comentó, representa un problema para las comunicaciones satelitales y ha sido objeto de estudio durante casi medio siglo.

$L\Delta_{asc}$

Este valor corresponde a las pérdidas misceláneas alusivas a efectos atmosféricos, pérdidas por apuntamiento y por polarización. Su valor aproximado es de 1dB.

4.3.2 RELACIÓN PORTADORA A RUIDO ASCENDENTE

Una vez obtenido el valor de C/N_0 asc se obtiene el valor de C/N_{asc} con la siguiente relación:

$$(C/N)_{asc} = (C/N_0)_{asc} - 10\text{Log}(AB)$$

En donde AB corresponde al ancho de banda del enlace y se obtiene por medio de diferentes factores dependiendo del tipo de información transportada. Una vez evaluado el valor de $(C/N)_{asc}$ es necesario considerar otras relaciones de portadora a ruido existentes en la realidad. Se toman en cuenta el ruido de intermodulación, el ruido producido por las señales de polarización cruzada y el ruido debido a la inducción de señales debido a satélites adyacentes. Promediadas todas las relaciones se obtiene la relación de portadora a ruido ascendente total $(C/N)_{ascT}$ que se usará en la evaluación del enlace final.

4.3.3 RELACIÓN PORTADORA A RUIDO ASCENDENTE TOTAL DEL SISTEMA

Es la relación de la potencia total del sistema de comunicación satelital de una portadora digital con respecto a la potencia de ruido en el ancho de banda que ocupa en el enlace ascendente (*uplink*):

$$(C/N)_{ASCTOTAL} = 10\log \left[\frac{1}{\frac{1}{10^{\left(\frac{(C/N)_{asc}}{10}\right)}} + \frac{1}{10^{\left(\frac{(C/I)_{asc}}{10}\right)}} + \frac{1}{10^{\left(\frac{(C/X)_{polAsc}}{10}\right)}} + \frac{1}{10^{\left(\frac{(C/X)_{satAdyAsc}}{10}\right)}}} \right]$$

Donde:

C/N_{Asc} = Relación portadora a ruido ascendente [dB].

C/I = Relación portadora a ruido de intermodulación ascendente (30 dB cuando existe reuso de frecuencia en voz y datos) [dB].

C/X_{Pol} = Relación portadora a ruido de polarización cruzada ascendente (27 dB de interferencia por polarización cruzada) [dB].

$C/X_{Sat Ady}$ = Relación portadora a ruido de satélite adyacente ascendente [dB].

4.4 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO DEL PRESUPUESTO DE ENLACE DESCENDENTE

En esta sección, serán definidos los parámetros que intervienen en las ecuaciones para el cálculo del presupuesto de enlace descendente de nuestra propuesta.

4.4.1 RELACIÓN PORTADORA DENSIDAD DE RUIDO DESCENDENTE

Siguiendo un proceso similar, es necesario realizar un balance de pérdidas y ganancias para obtener una relación portadora a ruido en el enlace del satélite a la terminal receptora. La siguiente ecuación representa los principales factores tomados cuenta para el cálculo de esta relación.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{desc} = PIRE_{SAT} + \left(\frac{G}{T}\right)_{E/T} - K - LS_{desc} - \mu_{asc} - L\Delta_{desc} [dB]$$

PIRE SAT.

Este valor corresponde a la de potencia isotrópica radiada efectiva del satélite hacia un punto de la Tierra. Se requiere realizar un balance de la señal recibida por el satélite y las diferentes etapas de amplificación y pérdidas dentro del satélite.

(G/T)_{E/T}.

Se refiere a la figura de mérito de la estación terrena del satélite. Este valor se calcula mediante la siguiente expresión:

$$(G/T)_{E/T} = G_{RX} - 10\text{Log}(T_s)$$

Siendo:

GRX = Ganancia de la antena receptora.

Ts= Temperatura de ruido total del sistema receptor.

K

Es la constante de Boltzman cuyo valor corresponde a -228 (dBJ/K)

LS_{desc}

Se refiere a las pérdidas en el espacio libre descendentes. Este valor es menor al caso del enlace de subida debido a que por lo general la frecuencia de transmisión es menor. Se calcula mediante la expresión:

$$LS_{desc} = 20 \cdot \text{Log} \left(\frac{4\pi \cdot f_{desc} \cdot D}{C} \right)$$

μ_{desc}

Corresponde a las pérdidas por lluvia o margen de atenuación por lluvia descendente. Al existir una relación de proporcionalidad con la frecuencia, también son menores las pérdidas para este caso comparando con el enlace ascendente.

L_{Δdesc}

Este valor corresponde a las pérdidas misceláneas que conllevan las pérdidas atmosféricas, por apuntamiento y por polarización. Su valor aproximado es de 1dB.

4.4.2 RELACIÓN PORTADORA A RUIDO DESCENDENTE

Una vez realizado el balance, la relación portadora ruido en el enlace descendente se obtiene mediante la expresión:

$$(C/N)_{desc} = (C/N_0)_{desc} - 10Log(AB)$$

4.4.3 RELACIÓN PORTADORA A RUIDO DESCENDENTE TOTAL DEL SISTEMA

Una vez evaluado el valor de C/Ndesc es necesario considerar otras relaciones de portadora a ruido existentes en la realidad. Se toman en cuenta el ruido de intermodulación, el ruido producido por las señales de la polarización cruzada y el ruido debido a la inducción de señales debido a satélites adyacentes pero esta vez en el enlace de bajada. Promediadas todas las relaciones se obtiene la relación de portadora a ruido descendente total C/NdescT que se usará en la evaluación del enlace final.

$$(C/N)_{DESCTOTAL} = 10log \left[\frac{1}{\frac{1}{10^{\left(\frac{(C/N)_{desc}}{10}\right)}} + \frac{1}{10^{\left(\frac{(C/I)_{desc}}{10}\right)}} + \frac{1}{10^{\left(\frac{(C/X)_{polDesc}}{10}\right)}} + \frac{1}{10^{\left(\frac{(C/X)_{satAdyDesc}}{10}\right)}}} \right]$$

4.5 RELACIÓN SEÑAL A RUIDO TOTAL

En este punto se calcula la relación C/NTOTAL resultante de la combinación entre el enlace ascendente total y el enlace descendente total. Además, se calcula la relación C/NREQUERIDA que depende de las características del módem y de la señal. Al comparar a la C/NTOTAL con la C/NREQUERIDA, obtenemos el valor del Margen del enlace que nos indicará finalmente si nuestro enlace cumple o no con la calidad deseada en el diseño y es factible su implementación. La C/NTOTAL se calcula mediante la siguiente expresión:

$$(C/N)_{TOTAL} = 10log \left[\frac{1}{\frac{1}{10^{\left(\frac{(C/N)_{ASCTOTAL}}{10}\right)}} + \frac{1}{10^{\left(\frac{(C/N)_{DESCTOTAL}}{10}\right)}}} \right]$$

4.5.1 RELACIÓN SEÑAL A RUIDO REQUERIDO

La relación portadora a ruido requerida para que el enlace sea factible se calcula mediante la siguiente expresión:

$$(C/N)_{REQ} = \frac{E_b}{N_0} + 10\log(V_{inf}) - 10\log(AB)$$

4.5.2 MARGEN DEL ENLACE

Finalmente, el margen que nos permite conocer si nuestro enlace funcionará se obtiene con la siguiente fórmula:

$$ME = (C/N)_{TOTAL} - (C/N)_{REQ}$$

Si el margen del enlace es mayor o igual a 0dB se considera que el enlace tiene las condiciones técnicas para operar. Sin embargo, como se observó en este procedimiento, existen muchos factores variables en el balance, por lo que los valores óptimos son aquellos en los que se consideren los peores casos como, por ejemplo el caso de que esté lloviendo en la localidad del sitio transmisor y el receptor al mismo tiempo.

Por otro lado, hay que considerar un porcentaje de operatividad o disponibilidad del enlace bajo estas condiciones, pues existen limitaciones económicas, técnicas y naturales que impiden que ésta sea del 100%. Los porcentajes de disponibilidad recomendados por la UIT deben de ser mayores al 99.5%, pero esto depende del tipo de información que se transmita.

4.6 ENLACES ASCENDENTE Y DESCENDENTE EN SATÉLITES REGENERATIVOS

Satélites regenerativos ofrecen varias ventajas sobre el satélite convencional. El rendimiento del enlace ascendente y descendente se puede mejorar por separado con la codificación de corrección de errores u otras técnicas. El ruido inducido en el enlace ascendente no degrada el enlace descendente porque la forma de onda es reducida a banda base y regenerada para la transmisión del enlace descendente. El enlace descendente puede emplear TDMA, de modo que los amplificadores de potencia pueden operar cerca de la saturación para optimizar la eficiencia de energía en el enlace descendente. Por ejemplo un satélite puede emplear varias portadoras FDMA en el enlace ascendente para minimizar la complejidad de las estaciones terrenas en el enlace, demodulación en el satélite, códigos de corrección de errores, re-modulación, y luego

combinarse en un enlace descendente TDMA para proporcionar la máxima eficiencia de energía para el enlace descendente.

4.6.1 ENLACE ASCENDENTE Y DESCENDENTE

La razón señal a ruido en el enlace descendente $(c/n)_D$ o energía por bit sobre densidad de ruido $(e_b/n_o)_D$, para un sistema de satélite con procesamiento a bordo es esencialmente independiente de la razón señal a ruido del enlace ascendente sobre el rango operativo del transpondedor. Las ecuaciones para un $(c/n)_u$ y $(c/n)_D$ anteriormente descrito, son aplicables para los enlaces de ascendente y descendente del satélite con procesamiento a bordo.

ENLACE ASCENDENTE

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{asc} \Big|_{OBP} = \frac{P_{GT} G_{GT} G_{SR}}{L_{S_{asc}} L\Delta_{asc} k \left[t_{asc} \left(1 - \frac{1}{L\Delta_{asc}} \right) + t_{SA} + 290(n f_{SR} - 1) \right] b_{asc}}$$

Donde:

t_{asc} = temperatura de la trayectoria del enlace ascendente

$L\Delta_{asc}$ = pérdidas en el trayecto misceláneas

$L_{S_{asc}}$ = Pérdidas en el espacio libre ascendente

t_{SA} = Temperatura de la antena de recepción

$n f_{SR}$ = figura de ruido del receptor del satélite

b_{asc} = ancho de banda de información en enlace ascendente

ENLACE DESCENDENTE

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{desc} \Big|_{OBP} = \frac{P_{GT} G_{GT} G_{SR}}{L_{S_{desc}} L\Delta_{desc} k \left[t_{desc} \left(1 - \frac{1}{L\Delta_{desc}} \right) + t_{GA} + 290(n f_{GR} - 1) \right] b_{desc}}$$

t_{desc} = temperatura de la trayectoria del enlace descendente

$L\Delta_{desc}$ = pérdidas en el trayecto misceláneas

$L_{S_{desc}}$ = Pérdidas en el espacio libre descendente

t_{GA} = Temperatura de la antena de recepción terrena

$n f_{GR}$ = figura de ruido del receptor terrestre

b_{desc} = ancho de banda de información en enlace descendente

Y donde:

P_{GT} = potencia de transmisor

G_{GT} = Ganancia de transmisor

G_{SR} = ganancia de la antena

Puesto que los satélites regenerativos con procesamiento a bordo emplean transmisión digital, un parámetro más apropiado es la razón de energía por bit sobre densidad de ruido expresada como:

ENLACE ASCENDENTE

$$\left(\frac{e_b}{N_0}\right)_{asc} \Big|_{OBP} = \frac{1}{r_u} \frac{P_{GT} G_{GT} G_{SR}}{L S_{asc} L \Delta_{asc} k \left[t_{asc} \left(1 - \frac{1}{L \Delta_{asc}}\right) + t_{SA} + 290(n f_{SR} - 1) \right]}$$

ENLACE DESCENDENTE

$$\left(\frac{e_b}{N_0}\right)_{desc} \Big|_{OBP} = \frac{1}{r_D} \frac{P_{GT} G_{GT} G_{SR}}{L S_{desc} L \Delta_{desc} k \left[t_{desc} \left(1 - \frac{1}{L \Delta_{desc}}\right) + t_{GA} + 290(n f_{GR} - 1) \right]}$$

Donde:

$\frac{1}{r_u}$ = La velocidad de datos para el enlace ascendente

$\frac{1}{r_D}$ = La velocidad de datos para el enlace descendente

Cada enlace se puede evaluar directamente de las ecuaciones anteriores y el rendimiento del resultante total generalmente será impulsado por el más débil de los dos enlaces. El procesamiento a bordo podría mejorar los enlaces, sin embargo, debe ser incluido en las conclusiones finales del rendimiento.

RETOMANDO LA EXPRESIÓN:

$$(C/N)^{-1} = (C/N)_{asc}^{-1} + (C/N)_{desc}^{-1}$$

Donde (C/N) es la relación portadora a ruido integral de todo el enlace, $(C/N)_{asc}$ es la relación portadora a ruido en el enlace ascendente y $(C/N)_{desc}$ es la relación portadora a ruido en el enlace descendente.

En general se tiene que para un sistema digital se cumple que:

$$(C/N) = \left(\frac{E_b}{N_o}\right) \frac{R_b}{B}$$

Del cual podemos deducir que:

$$(C / N) = \left(\frac{E_b}{N_o}\right) + 10 \log BR + MF$$

Donde

$\frac{E_b}{N_o}$ = Energía de bit sobre densidad de ruido

BR = Tasa de bit

Mf = Margen de implementación

Como R_b se mantiene constante a través de todo el enlace y existen pocas diferencias entre el ancho de banda del receptor (B) y el ancho de banda del radiocanal (B_T), entonces:

$$(E_b / N_o)^{-1} = (E_b / N_o)_u^{-1} + (E_b / N_o)_d^{-1}$$

Por lo tanto para un transpondedor regenerativo, donde existe un proceso de demodulación – remodelación, consideremos el gráfico de la figura 4.12 correspondiente al canal binario de banda base del transpondedor regenerativo.

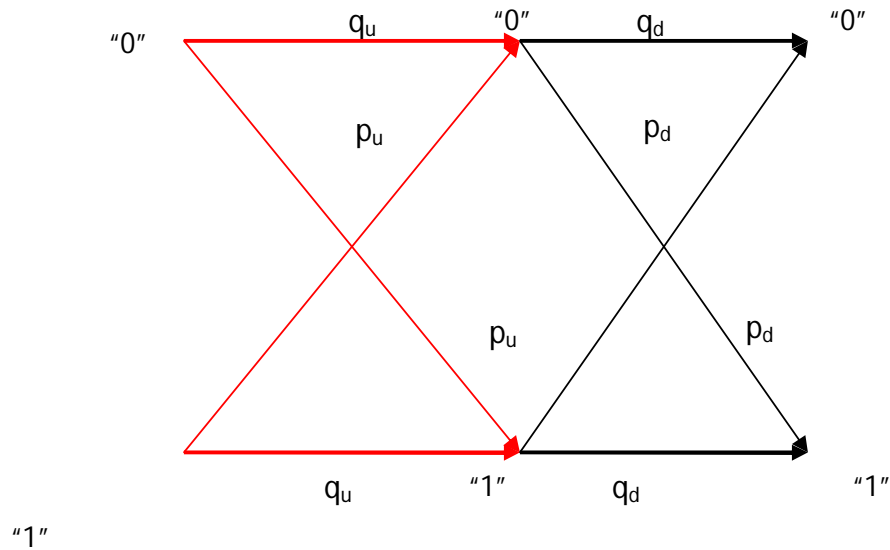


Figura 4.12 Canal binario simétrico con repetidor demodulador/re-modulador Intermedio.

La probabilidad de que no exista error dado que uno fue transmitido es:

$$p(C/1) = q_u q_d + p_u p_d$$

Donde

$$q_u = 1 - p_u$$

Representa la probabilidad de que no exista error en un bit en el enlace ascendente

$$q_u = 1 - p_u$$

Es la probabilidad de que no exista error en un bit en el enlace descendente.

Por la simetría del canal es posible escribir

$$p(c/0) = q_u q_d + p_u p_d = p(c/1)$$

Entonces la probabilidad de que haya recepción correcta es:

$$p(c) = p(c/0)p(0) + p(c/1)p(1)$$

Si el "0" y el "1" son equiprobables ($p(0) = p(1) = 0,5$), entonces

$$p(c) = p(c/0) = p(c/1)$$

La probabilidad de recibir un bit erróneo (p_B) será entonces:

$$p_B = 1 - p(c)$$

Substituyendo, se obtiene

$$p_B = 1 - (q_u q_d + p_u p_d)$$

$$p_B = 1 - ((1 - p_u)(1 - p_d) + p_u p_d)$$

$$p_B = 1 - ((1 - p_u - p_d + p_u p_d) + p_u p_d)$$

$$p_B = 1 - 1 + p_u + p_d - p_u p_d + p_u p_d$$

$$p_B = p_u + p_d + 2p_u p_d$$

Si se admite que el sistema opera adecuadamente $p_u \ll 1$ y $p_d \ll 1$, luego el producto luego tiende a cero

$$p_B = p_u + p_d$$

Obteniendo así la ecuación de enlace ascendente que puede ser utilizada para describir la relación entre los parámetros del enlace ascendente cuando se utiliza un transpondedor regenerativo.

$$M_F = (PIRE)_i + (G/T)_S - L_b - \sum L - R_{bi} - \{(E_b / N_o)\}_i + 228,6 \quad (i=1, \dots, N)$$

Donde:

- $(PIRE)_i$ representa la potencia isotropica radiada efectiva correspondiente al radiodifusor i-esimo, dBW
- $(G/T)_s$ representa el factor de merito de la sección receptora a bordo del satélite, dB/K
- R_{bi} representa la velocidad de la información comprimida(sin codificar), dBbps correspondiente a la estación terrena i-ésima.
- $\{(E_b / N_o)\}_i$ representa el valor de (E_b/N_o) requerido para la entrada de cada demodulador a bordo del satélite para el canal i-ésimo de la señal FDMA, para garantizar una calidad determinada para el enlace ascendente (p_u) , dB.

Y la ecuación de enlace descendente para este caso se puede adaptar, sin tomar en cuenta el término Δn_u . Así:

$$M_F = (PIRE) + (G/T) - L_b - \sum L - R_b + G_c - \{(E_b / N_o)\}_d + 228,6 \text{ , dB} \quad (4.23)$$

Donde:

- PIRE representa la potencia isotropica radiada efectiva del satélite correspondiente al haz descendente, dBW
- (G/T) es el factor de merito de la estación terrena receptora(móvil), dB/K.
- $\{(E_b / N_o)\}_u$ representa el valor requerido (E_b/N_o) para el enlace descendente. Si p_u es mucho menor que p_d , entonces $(E_b/N_o)_o$ puede ser tomado a partir del comportamiento integral del enlace, dB

4.7 RESULTADOS DE ENLACES EN BANDA Ku Y Ka

A continuación se mostrarán los resultados de simulaciones realizadas en matlab en diversas partes de la republica mexicana con el uso de la banda ku y ka en diversas frecuencias y distintos formatos, con los que confirmaremos la viabilidad del uso de la banda Ka y las diferencias entre las mismas con sus respectivas ventajas.

Nota: Los siguientes ejemplos de enlaces están basados en parámetros similares a los reales y en satélites supuestos en una misma posición orbital como referencia. El cálculo de la atenuación por lluvia está realizado conforme a la recomendación UIT-R P.618-10

Banda Ku

| DATOS DE LA PORTADORA | | |
|--------------------------------------|-------------------|--------------------|
| Symbol Rate | 30000KBaud | |
| Modulación | 8PSK | |
| F.E.C. | 2/3 | |
| Tasa de Datos | 56032.0 Kbps | |
| Roll-Off | 20% | |
| Eb/No | 3.75 dB | |
| BER | 1e-7 | |
| Ancho de banda requerido | 36000.00 KHz | |
| Ancho de banda Asignado | 36000.00 KHz | |
| DATOS DEL SATÉLITE | | |
| Posición del satélite | 116.80° W | |
| Banda de operación | 14 – 14.5 GHz | 11.7 – 12.2 GHz |
| Frecuencia Central del TP | 14.04 GHz | 11.74 GHz |
| Polaridad | Horizontal | Vertical |
| DATOS DE ESTACIÓN TERRENA | | |
| Localidad | México DF. México | Villahermosa, Tab. |
| Latitud | 19° 24' 0'' | 17°59'26'' |
| Longitud | 99° 9' 0'' | 92°55'41'' |
| Disponibilidad Ascendente | 99.8% | 99.8% |
| Disponibilidad Descendente | 99.8% | 99.8% |
| Diámetro de Antena | 7 m | 0.90 m |
| Ganancia de Antena Tx | 58.0 dBi | 40.2 dBi |
| Ganancia de Antena Rx | 56.5 dBi | 38.7 dBi |
| Temperatura total del sistema | 190 k | 152 k |
| Figura de Mérito Satélite | 3.36 dB/K | 3.88 dB/K |
| PIRE en saturación del Transpondedor | 51.02 dBW | 50.58 dBW |

TABLA 4.2 escenario enlace Mexico-Vhsa en banda Ku

Transparente

(99.8%)

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimut E/T Transmisora: | 223.77 | 223.77 | 223.77 | 223.77 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 59.62 | 59.62 | 59.62 | 59.62 |
| Disponibilidad: | 99.8 | 99.8 | 99.8 | 99.8 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 206.65 | 206.65 | 206.65 | 206.65 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 2.41 | 0.00 | 2.41 |
| C/NO Ascendente: | 104.31 | 101.90 | 104.31 | 101.90 |
| C/N Ascendente: | 28.75 | 26.34 | 28.75 | 26.34 |
| C/N Ascendente Total: | 17.04 | 16.83 | 17.04 | 16.83 |
| Azimut E/T Receptora: | 235.09 | 235.09 | 235.09 | 235.09 |
| Elevacion E/T Receptora: | 55.52 | 55.52 | 55.52 | 55.52 |
| Disponibilidad: | 99.8 | 99.8 | 99.8 | 99.8 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 205.15 | 205.15 | 205.15 | 205.15 |
| PIRE saturacion satellite: | 50.58 | 48.17 | 50.58 | 48.17 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 2.91 | 2.91 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.88 | 16.88 | 14.59 | 14.59 |
| C/NO Descendente: | 89.91 | 87.50 | 84.71 | 82.30 |
| C/N Descendente: | 14.35 | 11.94 | 9.15 | 6.74 |
| C/N Descendente Total: | 14.15 | 11.83 | 9.09 | 6.71 |
| C/NO Total: | 89.76 | 87.35 | 84.67 | 82.26 |
| C/N Total: | 12.35 | 10.63 | 8.44 | 6.30 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 6.52 | 4.81 | 2.62 | 0.48 |

Tabla 4.3 Resultados del escenario enlace México-Vhsa en banda Ku Transparente

Banda Ka

| DATOS DE LA PORTADORA | | |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------|
| Symbol Rate | 30000KBaud | |
| Modulación | 8PSK | |
| F.E.C. | 2/3 | |
| Tasa de Datos | 56032.0 Kbps | |
| Roll-Off | 20% | |
| Eb/No | 3.75 dB | |
| BER | 1e-7 | |
| Ancho de banda requerido | 36000.00 KHz | |
| Ancho de banda Asignado | 36000.00 KHz | |
| DATOS DEL SATÉLITE | | |
| Posición del satélite | 116.80° W | |
| Banda de operación | 27.5 – 31 GHz | 19.7 – 20.2 GHz |
| Frecuencia Central del TP | 29.7 GHz | 19.9 GHz |
| Polaridad | Horizontal | Vertical |
| DATOS DE ESTACIÓN TERRENA | | |
| Localidad | México DF. México | Villahermosa, Tab. |
| Latitud | 19° 24' 0" | 17°59'26" |
| Longitud | 99° 9' 0" | 92°55'41" |
| Disponibilidad Ascendente | 99.5% | 99.5% |
| Disponibilidad Descendente | 99.5% | 99.5% |
| Diámetro de Antena | 7 m | 0.70 m |
| Ganancia de Antena Tx | 64.55 dBi | 44.55 dBi |
| Ganancia de Antena Rx | 61.07 dBi | 41.07 dBi |
| Temperatura total del sistema | 350 k | 300 k |
| Figura de Mérito Satélite | 16 dB/K | 16 dB/K |
| PIRE en saturación del Transponedor | 54 dBW | 54 dBW |

TABLA 4.4 escenario enlace Mexico-Vhsa en banda Ka

Transparente

(99.0%)

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|---|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimut E/T Transmisora: | 223.77 | 223.77 | 223.77 | 223.77 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 59.62 | 59.62 | 59.62 | 59.62 |
| Disponibilidad: | 99.0 | 99.0 | 99.0 | 99.0 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 213.16 | 213.16 | 213.16 | 213.16 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 3.52 | 0.00 | 3.52 |
| C/NO Ascendente: | 110.44 | 106.92 | 110.44 | 106.92 |
| C/N Ascendente: | 34.88 | 31.36 | 34.88 | 31.36 |
| C/N Ascendente Total: | 17.27 | 17.17 | 17.27 | 17.17 |
| Azimut E/T Receptora: | 235.09 | 235.09 | 235.09 | 235.09 |
| Elevacion E/T Receptora: | 55.52 | 55.52 | 55.52 | 55.52 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 209.73 | 209.73 | 209.73 | 209.73 |
| PIRE saturacion satellite: | 54.00 | 50.48 | 54.00 | 50.48 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 3.12 | 3.12 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.60 | 16.60 | 16.72 | 16.72 |
| C/NO Descendente: | 88.47 | 84.95 | 85.47 | 81.95 |
| C/N Descendente: | 12.90 | 9.38 | 9.91 | 6.39 |
| C/N Descendente Total: | 12.76 | 9.32 | 9.84 | 6.36 |
| C/NO Total: | 88.44 | 84.92 | 85.46 | 81.94 |
| C/N Total: | 11.44 | 8.66 | 9.12 | 6.01 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 5.62 | 2.83 | 3.29 | 0.19 |

Tabla 4.5 Resultados del escenario enlace México-Vhsa en banda Ka Transparente 99.0%

Transparente

(99.5%)

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimut E/T Transmisora: | 223.77 | 223.77 | 223.77 | 223.77 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 59.62 | 59.62 | 59.62 | 59.62 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 213.16 | 213.16 | 213.16 | 213.16 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 6.24 | 0.00 | 6.24 |
| C/NO Ascendente: | 110.44 | 104.20 | 110.44 | 104.20 |
| C/N Ascendente: | 34.88 | 28.64 | 34.88 | 28.64 |
| C/N Ascendente Total: | 17.27 | 17.03 | 17.27 | 17.03 |
| Azimut E/T Receptora: | 235.09 | 235.09 | 235.09 | 235.09 |
| Elevacion E/T Receptora: | 55.52 | 55.52 | 55.52 | 55.52 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 209.73 | 209.73 | 209.73 | 209.73 |
| PIRE saturacion satelite: | 54.00 | 47.76 | 54.00 | 47.76 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 5.59 | 5.59 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.60 | 16.60 | 16.09 | 16.09 |
| C/NO Descendente: | 88.47 | 82.23 | 82.37 | 76.13 |
| C/N Descendente: | 12.90 | 6.66 | 6.80 | 0.56 |
| C/N Descendente Total: | 12.76 | 6.63 | 6.77 | 0.55 |
| C/NO Total: | 88.44 | 82.20 | 82.36 | 76.12 |
| C/N Total: | 11.44 | 6.25 | 6.40 | 0.46 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 5.62 | 0.42 | 0.57 | -5.37 |

Tabla 4.6 Resultados del escenario enlace México-Vhsa en banda Ka Transparente 99.5%

Regenerativo

(99.5%)

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimut E/T Transmisora: | 223.77 | 223.77 | 223.77 | 223.77 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 59.62 | 59.62 | 59.62 | 59.62 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 213.16 | 213.16 | 213.16 | 213.16 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 6.24 | 0.00 | 6.24 |
| C/NO Ascendente: | 110.44 | 104.20 | 110.44 | 104.20 |
| C/N Ascendente: | 34.88 | 28.64 | 34.88 | 28.64 |
| C/N Ascendente Total: | 34.88 | 28.64 | 34.88 | 28.64 |
| Azimut E/T Receptora: | 235.09 | 235.09 | 235.09 | 235.09 |
| Elevacion E/T Receptora: | 55.52 | 55.52 | 55.52 | 55.52 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 209.73 | 209.73 | 209.73 | 209.73 |
| PIRE saturacion satelite: | 54.00 | 54.00 | 54.00 | 54.00 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 5.59 | 5.59 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.60 | 16.60 | 16.09 | 16.09 |
| C/NO Descendente: | 88.47 | 88.47 | 82.37 | 82.37 |
| C/N Descendente: | 12.90 | 12.90 | 6.80 | 6.80 |
| C/N Descendente Total: | 12.90 | 12.90 | 6.80 | 6.80 |
| C/NO Total: | 88.44 | 88.35 | 82.36 | 81.87 |
| C/N Total: | 12.90 | 12.90 | 6.80 | 6.80 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 7.08 | 7.08 | 0.98 | 0.98 |

Tabla 4.7 Resultados del escenario enlace México-Vhsa en banda Ka Regenerativo 99.5%

Regenerativo

(99.8%)

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimut E/T Transmisora: | 223.77 | 223.77 | 223.77 | 223.77 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 59.62 | 59.62 | 59.62 | 59.62 |
| Disponibilidad: | 99.8 | 99.8 | 99.8 | 99.8 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 213.16 | 213.16 | 213.16 | 213.16 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 10.87 | 0.00 | 10.87 |
| C/NO Ascendente: | 110.44 | 99.57 | 110.44 | 99.57 |
| C/N Ascendente: | 34.88 | 24.01 | 34.88 | 24.01 |
| C/N Ascendente Total: | 34.88 | 24.01 | 34.88 | 24.01 |
| Azimut E/T Receptora: | 235.09 | 235.09 | 235.09 | 235.09 |
| Elevacion E/T Receptora: | 55.52 | 55.52 | 55.52 | 55.52 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 209.73 | 209.73 | 209.73 | 209.73 |
| PIRE saturacion satelite: | 54.00 | 54.00 | 54.00 | 54.00 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 9.79 | 9.79 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.60 | 16.60 | 15.63 | 15.63 |
| C/NO Descendente: | 88.47 | 88.47 | 77.71 | 77.71 |
| C/N Descendente: | 12.90 | 12.90 | 2.15 | 2.15 |
| C/N Descendente Total: | 12.90 | 12.90 | 2.15 | 2.15 |
| C/NO Total: | 88.44 | 88.14 | 77.71 | 77.68 |
| C/N Total: | 12.90 | 12.90 | 2.15 | 2.15 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 7.08 | 7.08 | -3.68 | -3.68 |

Tabla 4.8 Resultados del escenario enlace México-Vhsa en banda Ka Regenerativo 99.8%

En este ejemplo de enlace entre México-Villahermosa, que será uno de los casos más extremos debido a las zonas hidrometeorológicas en que se encuentran podemos recalcar que el uso de un transpondedor regenerativo en banda Ka permite obtener márgenes positivos con menores recursos en la transmisión de Tierra y mayor disponibilidad

El enlace funcionará siempre y cuando los niveles de C/N en cada trayectoria sean los mínimos que aseguren el Eb/NO de 3.75 dB a la recepción. Hay que tomar en cuenta que no obstante los márgenes positivos en los enlaces de banda ka regenerativos (tabla 4.7), se agrega complejidad al diseño del satélite y, por otro lado la tasa de errores se puede llegar a duplicar en sistemas mal balanceados.

En un enlace con las características de la red de la (tabla 4.5) hay un aproximado de 174 horas (7.2 días) en el año que el servicio no se lograría. Debido a esto, los servicios en banda Ka tienden a ser configuraciones en que es tolerable la pérdida o falta de información por intervalos mayores de tiempo comparado con otras bandas. La alternativa de un enlace regenerativo trae consigo importantes mejoras en la disponibilidad y márgenes del enlace.

Al intentar evaluar el enlace en banda ka con una disponibilidad mayor al 99.0% como lo es 99.5% nos trae una reducción de horas en el que el servicio no se lograría, pero con las características de la red, simplemente el enlace no sería óptimo pues obtendremos márgenes negativos en nuestro enlace (tabla 4.6)

Al evaluar enlaces en banda Ka (tabla 4.6) la gran importancia de algunos parámetros tanto en el segmento espacial como en el satelital. La atenuación que se llega a sufrir en esta banda debe de ser contrarrestada con varios elementos dentro del mismo enlace. En la recomendación de la UIT BO.1659 se proponen algunos métodos de reducción del efecto de la atenuación en banda Ka y superiores. El primer método se basa en el aumento de la PIRE de manera variable o local. El segundo caso se basa en un modelo de transmisión jerárquica de la información. Por último, se plantea un modelo con sistema de almacenamiento en la recepción.

Suponiendo un diseño de sistemas de satélites convencionales, la PIRE se determina teniendo en cuenta los requisitos del margen del enlace para alcanzar los objetivos de disponibilidad. La PIRE necesaria podría ser demasiado grande para que el sistema de satélites fuera factible. Dadas las condiciones de propagación, puede que sea necesario aplicar las adecuadas técnicas de reducción de la atenuación debida a la lluvia para poner en funcionamiento sistemas factibles en las bandas de frecuencias más elevadas [26].

En la banda Ka se pueden tener ganancias de las antenas mayores en razón de 3dB en detrimento a los de la banda Ku, sin embargo, la ganancia obtenida es contrarrestada con

los efectos diversos de atenuación que son mucho más extremos para esta banda. En el ejemplo de la red mostrada anteriormente, se observa que en ciudad de México la atenuación por efecto de la lluvia en banda Ka (29.7GHz) para una disponibilidad del 99.8% es de 10.87 dB, este valor de atenuación es casi 5 veces mayor a la presente en la misma localidad a 14.04 GHz (2.41dB). Para el enlace descendente la atenuación en banda Ka resultó 2 veces mayor a la de Ku, más sin embargo a pesar de que la atenuación es mayor, es importante hacer notar que con la disponibilidad considerada (tabla 4.7), el tiempo en que el enlace estaría fuera se reduciría más de 90 horas en comparación con un transpondedor transparente (tabla 4.5) en similares condiciones. Esto es que el enlace estaría fuera unas 80 horas en total a lo largo del año.

Banda Ku

| DATOS DE LA PORTADORA | | |
|--------------------------------------|----------------|---------------------|
| Symbol Rate | 30000KBaud | |
| Modulación | 8PSK | |
| F.E.C. | 2/3 | |
| Tasa de Datos | 56032.0 Kbps | |
| Roll-Off | 20% | |
| Eb/No | 3.75 dB | |
| BER | 1e-7 | |
| Ancho de banda requerido | 36000.00 KHz | |
| Ancho de banda Asignado | 36000.00 KHz | |
| DATOS DEL SATÉLITE | | |
| Posición del satélite | 116.80° W | |
| Banda de operación | 14 – 14.5 GHz | 11.7 – 12.2 GHz |
| Frecuencia Central del TP | 14.04 GHz | 11.74 GHz |
| Polaridad | Horizontal | Vertical |
| DATOS DE ESTACIÓN TERRENA | | |
| Localidad | Puebla, Puebla | Hermosillo, Sonora. |
| Latitud | 19° 02' 36'' | 29°05'56'' |
| Longitud | 98°11'5 0'' | 110°57'15'' |
| Disponibilidad Ascendente | 99.8% | 99.8% |
| Disponibilidad Descendente | 99.8% | 99.8% |
| Diámetro de Antena | 7 m | 0.90 m |
| Ganancia de Antena Tx | 58.0 dBi | 40.2 dBi |
| Ganancia de Antena Rx | 56.5 dBi | 38.7 dBi |
| Temperatura total del sistema | 190 k | 152 k |
| Figura de Mérito Satélite | 3.36 dB/K | 3.88 dB/K |
| PIRE en saturación del Transpondedor | 51.02 dBW | 50.58 dBW |

TABLA 4.9 escenario enlace Puebla-Hermosillo en banda Ku

Transparente

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|---|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimut E/T Transmisora: | 225.91 | 225.91 | 225.91 | 225.91 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 59.17 | 59.17 | 59.17 | 59.17 |
| Disponibilidad: | 99.8 | 99.8 | 99.8 | 99.8 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 206.66 | 206.66 | 206.66 | 206.66 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 2.58 | 0.00 | 2.58 |
| C/NO Ascendente: | 104.30 | 101.72 | 104.30 | 101.72 |
| C/N Ascendente: | 28.74 | 26.16 | 28.74 | 26.16 |
| C/N Ascendente Total: | 17.04 | 16.81 | 17.04 | 16.81 |
| Azimut E/T Receptora: | 191.90 | 191.90 | 191.90 | 191.90 |
| Elevacion E/T Receptora: | 55.46 | 55.46 | 55.46 | 55.46 |
| Disponibilidad: | 99.8 | 99.8 | 99.8 | 99.8 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 205.15 | 205.15 | 205.15 | 205.15 |
| PIRE saturacion satelite: | 50.58 | 48.00 | 50.58 | 48.00 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 1.41 | 1.41 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.88 | 16.88 | 15.46 | 15.46 |
| C/NO Descendente: | 89.91 | 87.33 | 87.09 | 84.51 |
| C/N Descendente: | 14.35 | 11.77 | 11.52 | 8.94 |
| C/N Descendente Total: | 14.15 | 11.66 | 11.42 | 8.88 |
| C/NO Total: | 89.76 | 87.18 | 87.00 | 84.42 |
| C/N Total: | 12.35 | 10.50 | 10.37 | 8.24 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 6.52 | 4.68 | 4.54 | 2.41 |

Tabla 4.10 Resultados del escenario enlace Puebla-Hermosillo en banda Ku Transparente 99.8%

Banda Ka

| DATOS DE LA PORTADORA | | |
|--------------------------------------|----------------|---------------------|
| Symbol Rate | 30000KBaud | |
| Modulación | 8PSK | |
| F.E.C. | 2/3 | |
| Tasa de Datos | 56032.0 Kbps | |
| Roll-Off | 20% | |
| Eb/No | 3.75 dB | |
| BER | 1e-7 | |
| Ancho de banda requerido | 36000.00 KHz | |
| Ancho de banda Asignado | 36000.00 KHz | |
| DATOS DEL SATÉLITE | | |
| Posición del satélite | 116.80° W | |
| Banda de operación | 27.5 – 31 GHz | 19.7 – 20.2 GHz |
| Frecuencia Central del TP | 29.7 GHz | 19.9 GHz |
| Polaridad | Horizontal | Vertical |
| DATOS DE ESTACIÓN TERRENA | | |
| Localidad | Puebla, Puebla | Hermosillo, Sonora. |
| Latitud | 19° 02' 36'' | 29°05'56'' |
| Longitud | 98°11'5 0'' | 110°57'15'' |
| Disponibilidad Ascendente | 99.5% | 99.5% |
| Disponibilidad Descendente | 99.5% | 99.5% |
| Diámetro de Antena | 7 m | 0.70 m |
| Ganancia de Antena Tx | 64.55 dBi | 44.55 dBi |
| Ganancia de Antena Rx | 61.07 dBi | 41.07 dBi |
| Temperatura total del sistema | 350 k | 300 k |
| Figura de Mérito Satélite | 16 dB/K | 16 dB/K |
| PIRE en saturación del Transpondedor | 54 dBW | 54 dBW |

TABLA 4.11 escenario enlace Puebla-Hermosillo en banda Ka

Transparente

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimut E/T Transmisora: | 225.91 | 225.91 | 225.91 | 225.91 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 59.17 | 59.17 | 59.17 | 59.17 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 213.16 | 213.16 | 213.16 | 213.16 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 6.66 | 0.00 | 6.66 |
| C/NO Ascendente: | 110.44 | 103.78 | 110.44 | 103.78 |
| C/N Ascendente: | 34.87 | 28.21 | 34.87 | 28.21 |
| C/N Ascendente Total: | 17.27 | 17.00 | 17.27 | 17.00 |
| Azimut E/T Receptora: | 191.90 | 191.90 | 191.90 | 191.90 |
| Elevacion E/T Receptora: | 55.46 | 55.46 | 55.46 | 55.46 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 209.73 | 209.73 | 209.73 | 209.73 |
| PIRE saturacion satelite: | 54.00 | 47.34 | 54.00 | 47.34 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 2.76 | 2.76 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.60 | 16.60 | 16.86 | 16.86 |
| C/NO Descendente: | 88.47 | 81.81 | 85.97 | 79.31 |
| C/N Descendente: | 12.90 | 6.24 | 10.41 | 3.75 |
| C/N Descendente Total: | 12.76 | 6.21 | 10.33 | 3.73 |
| C/NO Total: | 88.44 | 81.78 | 85.96 | 79.30 |
| C/N Total: | 11.44 | 5.86 | 9.53 | 3.53 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 5.62 | 0.04 | 3.70 | -2.30 |

Tabla 4.12 Resultados del escenario enlace Puebla-Hermosillo en banda Ku Transparente 99.5%

Regenerativo

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|---|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimut E/T Transmisora: | 225.91 | 225.91 | 225.91 | 225.91 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 59.17 | 59.17 | 59.17 | 59.17 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 213.16 | 213.16 | 213.16 | 213.16 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 6.66 | 0.00 | 6.66 |
| C/NO Ascendente: | 110.44 | 103.78 | 110.44 | 103.78 |
| C/N Ascendente: | 34.87 | 28.21 | 34.87 | 28.21 |
| C/N Ascendente Total: | 34.87 | 28.21 | 34.87 | 28.21 |
| Azimut E/T Receptora: | 191.90 | 191.90 | 191.90 | 191.90 |
| Elevacion E/T Receptora: | 55.46 | 55.46 | 55.46 | 55.46 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 209.73 | 209.73 | 209.73 | 209.73 |
| PIRE saturacion satelite: | 54.00 | 54.00 | 54.00 | 54.00 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 2.76 | 2.76 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.60 | 16.60 | 16.86 | 16.86 |
| C/NO Descendente: | 88.47 | 88.47 | 85.97 | 85.97 |
| C/N Descendente: | 12.90 | 12.90 | 10.41 | 10.41 |
| C/N Descendente Total: | 12.90 | 12.90 | 10.41 | 10.41 |
| C/NO Total: | 88.44 | 88.34 | 85.96 | 85.90 |
| C/N Total: | 12.90 | 12.90 | 10.41 | 10.41 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 7.08 | 7.08 | 4.58 | 4.58 |

Tabla 4.13 Resultados del escenario enlace Puebla-Hermosillo en banda Ka Regenerativo 99.5%

Banda Ku

| DATOS DE LA PORTADORA | | |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| Symbol Rate | 30000KBaud | |
| Modulación | 8PSK | |
| F.E.C. | 2/3 | |
| Tasa de Datos | 56032.0 Kbps | |
| Roll-Off | 20% | |
| Eb/No | 3.75 dB | |
| BER | 1e-7 | |
| Ancho de banda requerido | 36000.00 KHz | |
| Ancho de banda Asignado | 36000.00 KHz | |
| DATOS DEL SATÉLITE | | |
| Posición del satélite | 116.80° W | |
| Banda de operación | 14 – 14.5 GHz | 11.7 – 12.2 GHz |
| Frecuencia Central del TP | 14.04 GHz | 11.74 GHz |
| Polaridad | Horizontal | Vertical |
| DATOS DE ESTACIÓN TERRENA | | |
| Localidad | Mérida, Yucatán | Guadalajara, Jalisco. |
| Latitud | 20° 58' 04'' | 20° 40' 35'' |
| Longitud | 89° 37' 18'' | 103° 20' 46'' |
| Disponibilidad Ascendente | 99.8% | 99.8% |
| Disponibilidad Descendente | 99.8% | 99.8% |
| Diámetro de Antena | 7 m | 0.90 m |
| Ganancia de Antena Tx | 58.0 dBi | 40.2 dBi |
| Ganancia de Antena Rx | 56.5 dBi | 38.7 dBi |
| Temperatura total del sistema | 190 k | 152 k |
| Figura de Mérito Satélite | 3.36 dB/K | 3.88 dB/K |
| PIRE en saturación del Transpondedor | 51.02 dBW | 50.58 dBW |

TABLA 4.14 escenario enlace Yucatán-Guadalajara en banda Ku

Transparente

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|---|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimut E/T Transmisora: | 235.14 | 235.14 | 235.14 | 235.14 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 50.67 | 50.67 | 50.67 | 50.67 |
| Disponibilidad: | 99.8 | 99.8 | 99.8 | 99.8 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 206.77 | 206.77 | 206.77 | 206.77 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 4.59 | 0.00 | 4.59 |
| C/NO Ascendente: | 104.19 | 99.60 | 104.19 | 99.60 |
| C/N Ascendente: | 28.63 | 24.04 | 28.63 | 24.04 |
| C/N Ascendente Total: | 17.03 | 16.50 | 17.03 | 16.50 |
| Azimut E/T Receptora: | 214.14 | 214.14 | 214.14 | 214.14 |
| Elevacion E/T Receptora: | 61.33 | 61.33 | 61.33 | 61.33 |
| Disponibilidad: | 99.8 | 99.8 | 99.8 | 99.8 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 205.08 | 205.08 | 205.08 | 205.08 |
| PIRE saturacion satelite: | 50.58 | 45.99 | 50.58 | 45.99 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 2.16 | 2.16 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.88 | 16.88 | 14.97 | 14.97 |
| C/NO Descendente: | 89.98 | 85.39 | 85.91 | 81.32 |
| C/N Descendente: | 14.42 | 9.83 | 10.35 | 5.76 |
| C/N Descendente Total: | 14.22 | 9.76 | 10.27 | 5.73 |
| C/NO Total: | 89.82 | 85.23 | 85.85 | 81.26 |
| C/N Total: | 12.39 | 8.93 | 9.44 | 5.38 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 6.57 | 3.10 | 3.61 | -0.45 |

Tabla 4.15 Resultados del escenario enlace Yucatán-Guadalajara en banda Ku Transparente 99.8%

Banda Ka

| DATOS DE LA PORTADORA | | |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| Symbol Rate | 30000KBaud | |
| Modulación | 8PSK | |
| F.E.C. | 2/3 | |
| Tasa de Datos | 56032.0 Kbps | |
| Roll-Off | 20% | |
| Eb/No | 3.75 dB | |
| BER | 1e-7 | |
| Ancho de banda requerido | 36000.00 KHz | |
| Ancho de banda Asignado | 36000.00 KHz | |
| DATOS DEL SATÉLITE | | |
| Posición del satélite | 116.80° W | |
| Banda de operación | 27.5 – 31 GHz | 19.7 – 20.2 GHz |
| Frecuencia Central del TP | 29.7 GHz | 19.9 GHz |
| Polaridad | Horizontal | Vertical |
| DATOS DE ESTACIÓN TERRENA | | |
| Localidad | Mérida, Yucatán | Guadalajara, Jalisco. |
| Latitud | 20° 58' 04'' | 20° 40' 35'' |
| Longitud | 89° 37' 18'' | 103° 20' 46'' |
| Disponibilidad Ascendente | 99.5% | 99.5% |
| Disponibilidad Descendente | 99.5% | 99.5% |
| Diámetro de Antena | 7 m | 0.70 m |
| Ganancia de Antena Tx | 64.55 dBi | 44.55 dBi |
| Ganancia de Antena Rx | 61.07 dBi | 41.07 dBi |
| Temperatura total del sistema | 350 k | 300 k |
| Figura de Mérito Satélite | 16 dB/K | 16 dB/K |
| PIRE en saturación del Transpondedor | 54 dBW | 54 dBW |

TABLA 4.16 escenario enlace Yucatán-Guadalajara en banda Ka

Transparente

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimut E/T Transmisora: | 235.14 | 235.14 | 235.14 | 235.14 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 50.67 | 50.67 | 50.67 | 50.67 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 213.28 | 213.28 | 213.28 | 213.28 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 12.21 | 0.00 | 12.21 |
| C/NO Ascendente: | 110.32 | 98.11 | 110.32 | 98.11 |
| C/N Ascendente: | 34.76 | 22.55 | 34.76 | 22.55 |
| C/N Ascendente Total: | 17.27 | 16.20 | 17.27 | 16.20 |
| Receptor | | | | |
| Azimut E/T Receptora: | 214.14 | 214.14 | 214.14 | 214.14 |
| Elevacion E/T Receptora: | 61.33 | 61.33 | 61.33 | 61.33 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 209.66 | 209.66 | 209.66 | 209.66 |
| PIRE saturacion satelite: | 54 | 41.79 | 54 | 41.70 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 4.06 | 4.06 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.60 | 16.60 | 16.43 | 16.43 |
| C/NO Descendente: | 88.54 | 76.33 | 84.31 | 72.10 |
| C/N Descendente: | 12.97 | 0.76 | 8.74 | -3.47 |
| C/N Descendente Total: | 12.83 | 0.76 | 8.69 | -3.47 |
| Totales | | | | |
| C/NO Total: | 88.51 | 76.30 | 84.29 | 72.08 |
| C/N Total: | 11.49 | 0.63 | 8.12 | -3.52 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 5.67 | -5.19 | 2.30 | -9.34 |

Tabla 4.17 Resultados del escenario enlace Yucatán-Guadalajara en banda Ka Transparente 99.5%

Regenerativo

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimet E/T Transmisora: | 235.14 | 235.14 | 235.14 | 235.14 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 50.67 | 50.67 | 50.67 | 50.67 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 213.28 | 213.28 | 213.28 | 213.28 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 12.21 | 0.00 | 12.21 |
| C/NO Ascendente: | 110.32 | 98.11 | 110.32 | 98.11 |
| C/N Ascendente: | 34.76 | 22.55 | 34.76 | 22.55 |
| C/N Ascendente Total: | 34.76 | 22.55 | 34.76 | 22.55 |
| Receptor | | | | |
| Azimet E/T Receptora: | 214.14 | 214.14 | 214.14 | 214.14 |
| Elevacion E/T Receptora: | 61.33 | 61.33 | 61.33 | 61.33 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 209.66 | 209.66 | 209.66 | 209.66 |
| PIRE saturacion satelite: | 54 | 54 | 54 | 54 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 4.06 | 4.06 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.60 | 16.60 | 16.43 | 16.43 |
| C/NO Descendente: | 88.54 | 88.54 | 84.31 | 84.31 |
| C/N Descendente: | 12.97 | 12.97 | 8.74 | 8.74 |
| C/N Descendente Total: | 12.97 | 12.97 | 8.74 | 8.74 |
| C/NO Total: | 88.51 | 88.08 | 84.29 | 84.13 |
| C/N Total: | 12.97 | 12.97 | 8.74 | 8.74 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 7.15 | 7.15 | 2.92 | 2.92 |

Tabla 4.18 Resultados del escenario enlace Yucatán-Guadalajara en banda Ka Regenerativo 99.5%

Banda Ku

| DATOS DE LA PORTADORA | | |
|--------------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Symbol Rate | 30000KBaud | |
| Modulación | 8PSK | |
| F.E.C. | 2/3 | |
| Tasa de Datos | 56032.0 Kbps | |
| Roll-Off | 20% | |
| Eb/No | 3.75 dB | |
| BER | 1e-7 | |
| Ancho de banda requerido | 36000.00 KHz | |
| Ancho de banda Asignado | 36000.00 KHz | |
| DATOS DEL SATÉLITE | | |
| Posición del satélite | 116.80° W | |
| Banda de operación | 14 – 14.5 GHz | 11.7 – 12.2 GHz |
| Frecuencia Central del TP | 14.04 GHz | 11.74 GHz |
| Polaridad | Horizontal | Vertical |
| DATOS DE ESTACIÓN TERRENA | | |
| Localidad | Monterrey, Nuevo León | México DF. México |
| Latitud | 25° 40' 16'' | 19° 24' 0'' |
| Longitud | 100° 18' 30'' | 99° 9' 0'' |
| Disponibilidad Ascendente | 99.8% | 99.8% |
| Disponibilidad Descendente | 99.8% | 99.8% |
| Diámetro de Antena | 7 m | 0.90 m |
| Ganancia de Antena Tx | 58.0 dBi | 40.2 dBi |
| Ganancia de Antena Rx | 56.5 dBi | 38.7 dBi |
| Temperatura total del sistema | 190 k | 152 k |
| Figura de Mérito Satélite | 3.36 dB/K | 3.88 dB/K |
| PIRE en saturación del Transpondedor | 51.02 dBW | 50.58 dBW |

TABLA 4.19 escenario enlace Monterrey-México en banda Ku

Transparente

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimut E/T Transmisora: | 214.36 | 214.36 | 214.36 | 214.36 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 54.79 | 54.79 | 54.79 | 54.79 |
| Disponibilidad: | 99.8 | 99.8 | 99.8 | 99.8 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 206.71 | 206.71 | 206.71 | 206.71 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 2.71 | 0.00 | 2.71 |
| C/NO Ascendente: | 104.25 | 101.54 | 104.25 | 101.54 |
| C/N Ascendente: | 28.69 | 25.98 | 28.69 | 25.98 |
| C/N Ascendente Total: | 17.04 | 16.79 | 17.04 | 16.79 |
| Azimut E/T Receptora: | 223.77 | 223.77 | 223.77 | 223.77 |
| Elevacion E/T Receptora: | 59.62 | 59.62 | 59.62 | 59.62 |
| Disponibilidad: | 99.8 | 99.8 | 99.8 | 99.8 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 205.10 | 205.10 | 205.10 | 205.10 |
| PIRE saturacion satellite: | 50.58 | 47.87 | 50.58 | 47.87 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 1.54 | 1.54 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.88 | 16.88 | 15.37 | 15.37 |
| C/NO Descendente: | 89.96 | 87.25 | 86.91 | 84.20 |
| C/N Descendente: | 14.40 | 11.69 | 11.35 | 8.64 |
| C/N Descendente Total: | 14.20 | 11.58 | 11.25 | 8.58 |
| C/NO Total: | 89.81 | 87.10 | 86.83 | 84.12 |
| C/N Total: | 12.38 | 10.44 | 10.23 | 7.97 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 6.56 | 4.61 | 4.40 | 2.15 |

Tabla 4.20 Resultados del escenario enlace Monterrey-México en banda Ku Transparente 99.8%

Banda Ka

| DATOS DE LA PORTADORA | | |
|--------------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Symbol Rate | 30000KBaud | |
| Modulación | 8PSK | |
| F.E.C. | 2/3 | |
| Tasa de Datos | 56032.0 Kbps | |
| Roll-Off | 20% | |
| Eb/No | 3.75 dB | |
| BER | 1e-7 | |
| Ancho de banda requerido | 36000.00 KHz | |
| Ancho de banda Asignado | 36000.00 KHz | |
| DATOS DEL SATÉLITE | | |
| Posición del satélite | 116.80° W | |
| Banda de operación | 27.5 – 31 GHz | 19.7 – 20.2 GHz |
| Frecuencia Central del TP | 29.7 GHz | 19.9 GHz |
| Polaridad | Horizontal | Vertical |
| DATOS DE ESTACIÓN TERRENA | | |
| Localidad | Monterrey, Nuevo León | México DF. México |
| Latitud | 25° 40' 16" | 19° 24' 0" |
| Longitud | 100° 18' 30" | 99° 9' 0" |
| Disponibilidad Ascendente | 99.5% | 99.5% |
| Disponibilidad Descendente | 99.5% | 99.5% |
| Diámetro de Antena | 7 m | 0.70 m |
| Ganancia de Antena Tx | 64.55 dBi | 44.55 dBi |
| Ganancia de Antena Rx | 61.07 dBi | 41.07 dBi |
| Temperatura total del sistema | 350 k | 300 k |
| Figura de Mérito Satélite | 16 dB/K | 16 dB/K |
| PIRE en saturación del Transpondedor | 54 dBW | 54 dBW |

TABLA 4.21 escenario enlace Monterrey-México en banda Ka

Transparente

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|---|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimut E/T Transmisora: | 214.36 | 214.36 | 214.36 | 214.36 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 54.79 | 54.79 | 54.79 | 54.79 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 213.22 | 213.22 | 213.22 | 213.22 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 7.38 | 0.00 | 7.38 |
| C/NO Ascendente: | 110.38 | 103.00 | 110.38 | 103.00 |
| C/N Ascendente: | 34.82 | 27.44 | 34.82 | 27.44 |
| C/N Ascendente Total: | 17.27 | 16.94 | 17.27 | 16.94 |
| Azimut E/T Receptora: | 223.77 | 223.77 | 223.77 | 223.77 |
| Elevacion E/T Receptora: | 59.62 | 59.62 | 59.62 | 59.62 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 209.68 | 209.68 | 209.68 | 209.68 |
| PIRE saturacion satelite: | 54 | 46.62 | 54 | 46.62 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 2.85 | 2.85 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.60 | 16.60 | 16.83 | 16.83 |
| C/NO Descendente: | 88.52 | 81.14 | 85.90 | 78.52 |
| C/N Descendente: | 12.95 | 5.57 | 10.33 | 2.95 |
| C/N Descendente Total: | 12.81 | 5.55 | 10.25 | 2.94 |
| C/NO Total: | 88.49 | 81.11 | 85.88 | 78.50 |
| C/N Total: | 11.48 | 5.24 | 9.47 | 2.77 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 5.65 | -0.58 | 3.64 | -3.06 |

Tabla 4.22 Resultados del escenario enlace Monterrey-México en banda Ka Transparente 99.5%

Regenerativo

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimet E/T Transmisora: | 214.36 | 214.36 | 214.36 | 214.36 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 54.79 | 54.79 | 54.79 | 54.79 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 213.22 | 213.22 | 213.22 | 213.22 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 7.38 | 0.00 | 7.38 |
| C/NO Ascendente: | 110.38 | 103.00 | 110.38 | 103.00 |
| C/N Ascendente: | 34.82 | 27.44 | 34.82 | 27.44 |
| C/N Ascendente Total: | 34.82 | 27.44 | 34.82 | 27.44 |
| Receptor | | | | |
| Azimet E/T Receptora: | 223.77 | 223.77 | 223.77 | 223.77 |
| Elevacion E/T Receptora: | 59.62 | 59.62 | 59.62 | 59.62 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 209.68 | 209.68 | 209.68 | 209.68 |
| PIRE saturacion satelite: | 54 | 54 | 54 | 54 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 2.85 | 2.85 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.60 | 16.60 | 16.83 | 16.83 |
| C/NO Descendente: | 88.52 | 88.52 | 85.90 | 85.90 |
| C/N Descendente: | 12.95 | 12.95 | 10.33 | 10.33 |
| C/N Descendente Total: | 12.95 | 12.95 | 10.33 | 10.33 |
| C/NO Total: | 88.49 | 88.37 | 85.88 | 85.81 |
| C/N Total: | 12.95 | 12.95 | 10.33 | 10.33 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 7.13 | 7.13 | 4.51 | 4.51 |

Tabla 4.23 Resultados del escenario enlace Monterrey-México en banda Ka Regenerativo 99.5%

Banda Ku

| DATOS DE LA PORTADORA | | |
|--------------------------------------|-------------------|-----------------|
| Symbol Rate | 30000KBaud | |
| Modulación | 8PSK | |
| F.E.C. | 2/3 | |
| Tasa de Datos | 56032.0 Kbps | |
| Roll-Off | 20% | |
| Eb/No | 3.75 dB | |
| BER | 1e-7 | |
| Ancho de banda requerido | 36000.00 KHz | |
| Ancho de banda Asignado | 36000.00 KHz | |
| DATOS DEL SATÉLITE | | |
| Posición del satélite | 116.80° W | |
| Banda de operación | 14 – 14.5 GHz | 11.7 – 12.2 GHz |
| Frecuencia Central del TP | 14.04 GHz | 11.74 GHz |
| Polaridad | Horizontal | Vertical |
| DATOS DE ESTACIÓN TERRENA | | |
| Localidad | México DF. México | Tijuana, BC |
| Latitud | 19° 24' 0" | 32° 32' 05" |
| Longitud | 99° 9' 0" | 117° 02' 37" |
| Disponibilidad Ascendente | 99.8% | 99.8% |
| Disponibilidad Descendente | 99.8% | 99.8% |
| Diámetro de Antena | 7 m | 0.90 m |
| Ganancia de Antena Tx | 58.0 dBi | 40.2 dBi |
| Ganancia de Antena Rx | 56.5 dBi | 38.7 dBi |
| Temperatura total del sistema | 190 k | 152 k |
| Figura de Mérito Satélite | 3.36 dB/K | 3.88 dB/K |
| PIRE en saturación del Transpondedor | 51.02 dBW | 50.58 dBW |

TABLA 4.24 escenario enlace México-Tijuana en banda Ku

Transparente

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimet E/T Transmisora: | 223.77 | 223.77 | 223.77 | 223.77 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 59.62 | 59.62 | 59.62 | 59.62 |
| Disponibilidad: | 99.8 | 99.8 | 99.8 | 99.8 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 206.65 | 206.65 | 206.65 | 206.65 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 2.41 | 0.00 | 2.41 |
| C/NO Ascendente: | 104.31 | 101.90 | 104.31 | 101.90 |
| C/N Ascendente: | 28.75 | 26.34 | 28.75 | 26.34 |
| C/N Ascendente Total: | 17.04 | 16.83 | 17.04 | 16.83 |
| Receptor | | | | |
| Azimet E/T Receptora: | 180.45 | 180.45 | 180.45 | 180.45 |
| Elevacion E/T Receptora: | 52.14 | 52.14 | 52.14 | 52.14 |
| Disponibilidad: | 99.8 | 99.8 | 99.8 | 99.8 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 205.19 | 205.19 | 205.19 | 205.19 |
| PIRE saturacion satelite: | 50.58 | 48.17 | 50.58 | 48.17 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 0.77 | 0.77 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.88 | 16.88 | 16.02 | 16.02 |
| C/NO Descendente: | 89.87 | 87.46 | 88.24 | 85.83 |
| C/N Descendente: | 14.31 | 11.90 | 12.68 | 10.27 |
| C/N Descendente Total: | 14.11 | 1.78 | 12.54 | 10.19 |
| Totales | | | | |
| C/NO Total: | 89.71 | 87.30 | 88.13 | 85.70 |
| C/N Total: | 12.32 | 10.60 | 11.22 | 9.34 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 6.50 | 4.77 | 5.40 | 3.51 |

Tabla 4.25 Resultados del escenario enlace México-Tijuana en banda Ku Transparente 99.8%

Banda Ka

| DATOS DE LA PORTADORA | | |
|--------------------------------------|-------------------|-----------------|
| Symbol Rate | 30000KBaud | |
| Modulación | 8PSK | |
| F.E.C. | 2/3 | |
| Tasa de Datos | 56032.0 Kbps | |
| Roll-Off | 20% | |
| Eb/No | 3.75 dB | |
| BER | 1e-7 | |
| Ancho de banda requerido | 36000.00 KHz | |
| Ancho de banda Asignado | 36000.00 KHz | |
| DATOS DEL SATÉLITE | | |
| Posición del satélite | 116.80° W | |
| Banda de operación | 27.5 – 31 GHz | 19.7 – 20.2 GHz |
| Frecuencia Central del TP | 29.7 GHz | 19.9 GHz |
| Polaridad | Horizontal | Vertical |
| DATOS DE ESTACIÓN TERRENA | | |
| Localidad | México DF. México | Tijuana, BC |
| Latitud | 19° 24' 0" | 32° 32' 05" |
| Longitud | 99° 9' 0" | 117° 02' 37" |
| Disponibilidad Ascendente | 99.5% | 99.5% |
| Disponibilidad Descendente | 99.5% | 99.5% |
| Diámetro de Antena | 7 m | 0.70 m |
| Ganancia de Antena Tx | 64.55 dBi | 44.55 dBi |
| Ganancia de Antena Rx | 61.07 dBi | 41.07 dBi |
| Temperatura total del sistema | 350 k | 300 k |
| Figura de Mérito Satélite | 16 dB/K | 16 dB/K |
| PIRE en saturación del Transpondedor | 54 dBW | 54 dBW |

TABLA 4.26 escenario enlace México-Tijuana en banda Ka

Transparente

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimet E/T Transmisora: | 223.77 | 223.77 | 223.77 | 223.77 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 59.62 | 59.62 | 59.62 | 59.62 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 213.16 | 213.16 | 213.16 | 213.16 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 6.24 | 0.00 | 6.24 |
| C/NO Ascendente: | 110.44 | 104.20 | 110.44 | 104.20 |
| C/N Ascendente: | 34.88 | 28.64 | 34.88 | 28.64 |
| C/N Ascendente Total: | 17.27 | 17.03 | 17.27 | 17.03 |
| Receptor | | | | |
| Azimet E/T Receptora: | 180.45 | 180.45 | 180.45 | 180.45 |
| Elevacion E/T Receptora: | 52.14 | 52.14 | 52.14 | 52.14 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 209.78 | 209.78 | 209.78 | 209.78 |
| PIRE saturacion satelite: | 54 | 47.76 | 54 | 47.76 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 1.63 | 1.63 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.60 | 16.60 | 17.43 | 17.43 |
| C/NO Descendente: | 88.42 | 82.18 | 87.62 | 81.38 |
| C/N Descendente: | 12.86 | 6.62 | 12.05 | 5.81 |
| C/N Descendente Total: | 12.72 | 6.58 | 11.94 | 5.79 |
| Totales | | | | |
| C/NO Total: | 88.39 | 82.15 | 87.60 | 81.36 |
| C/N Total: | 11.41 | 6.21 | 10.82 | 5.47 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 5.59 | 0.38 | 5.00 | -0.35 |

Tabla 4.27 Resultados del escenario enlace México-Tijuana en banda Ka Transparente 99.5%

Regenerativo

| | Cielo Despejado | Lluvia Ascendente | Lluvia Descendente | Lluvia Ambos lados |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Azimet E/T Transmisora: | 223.77 | 223.77 | 223.77 | 223.77 |
| Elevacion E/T Transmisora: | 59.62 | 59.62 | 59.62 | 59.62 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| PIRE E/Tx: | 80.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00 |
| Pérdidas por espacio libre Asc: | 213.16 | 213.16 | 213.16 | 213.16 |
| Pérdidas miscelaneas asc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia asc: | 0.00 | 6.24 | 0.00 | 6.24 |
| C/NO Ascendente: | 110.44 | 104.20 | 110.44 | 104.20 |
| C/N Ascendente: | 34.88 | 28.64 | 34.88 | 28.64 |
| C/N Ascendente Total: | 34.88 | 28.64 | 34.88 | 28.64 |
| Receptor | | | | |
| Azimet E/T Receptora: | 180.45 | 180.45 | 180.45 | 180.45 |
| Elevacion E/T Receptora: | 52.14 | 52.14 | 52.14 | 52.14 |
| Disponibilidad: | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| Pérdidas por espacio libre desc: | 209.78 | 209.78 | 209.78 | 209.78 |
| PIRE saturacion satelite: | 54 | 54 | 54 | 54 |
| Pérdidas miscelaneas desc: | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Margen de lluvia desc: | 0.00 | 0.00 | 1.63 | 1.63 |
| G/T de la E/T Receptora: | 16.60 | 16.60 | 17.43 | 17.43 |
| C/NO Descendente: | 88.42 | 88.42 | 87.62 | 87.62 |
| C/N Descendente: | 12.86 | 12.86 | 12.05 | 12.05 |
| C/N Descendente Total: | 12.86 | 12.86 | 12.05 | 12.05 |
| C/NO Total: | 88.39 | 88.31 | 87.60 | 87.52 |
| C/N Total: | 12.86 | 12.86 | 12.05 | 12.05 |
| C/N Requerida: | 5.83 | 5.83 | 5.83 | 5.83 |
| Margen de enlace: | 7.03 | 7.03 | 6.23 | 6.23 |

Tabla 4.28 Resultados del escenario enlace México-Tijuana en banda Ka Regenerativo 99.5%

A continuación retomaremos algunos ejemplos para identificar y comparar las diferencias marcadas entre los 3 tipos de enlaces realizados anteriormente; para poder extender estas comparaciones retomaremos 3 ejemplos en los cuales estarán incluidos las diversas intensidades de lluvia que podemos encontrar.

El primer caso de nuestros análisis realizados que consistió en el enlace México-Villahermosa observamos que fue de los enlaces más atenuados por la lluvia figura 4.13.

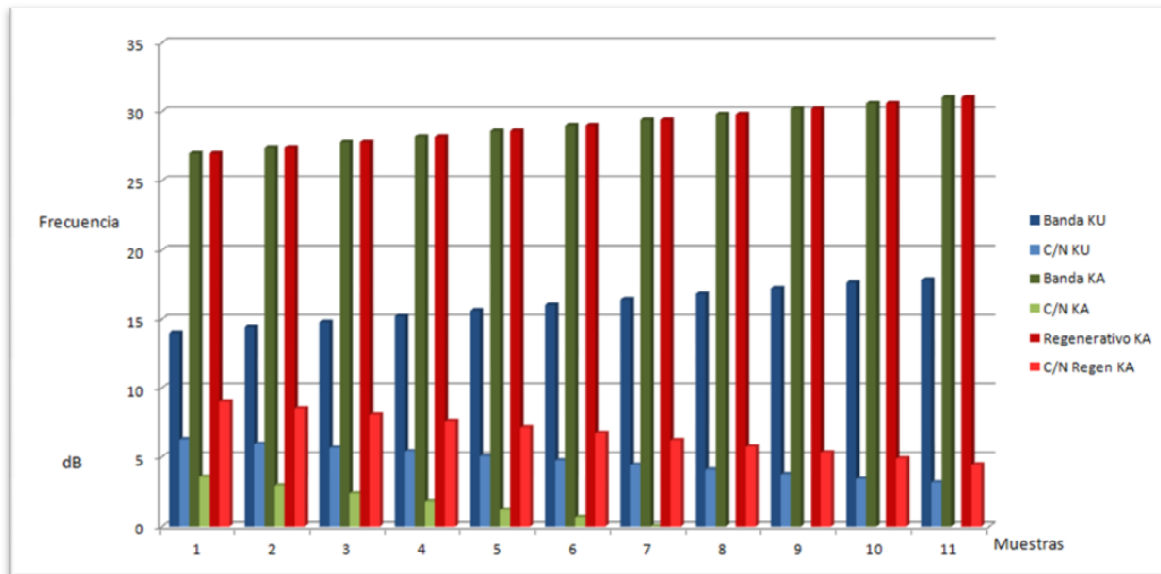


Figura 4.13 Enlace Mexico-Villahermosa

(En esta gráfica observamos las frecuencias en tonos oscuros y sus respectivos C/N totales del enlace a dicha frecuencia en tonos más bajos).

A pesar de ser uno de los enlaces en donde observamos más atenuación en todo el país, podemos observar que nuestra relación portadora ruido total en los enlaces de banda KU y el enlace en banda Ka existe una gran diferencia debido a la atenuación existente dentro de la banda Ka, sin embargo al utilizar un satélite regenerativo observamos que las C/N en la banda Ka están muy por arriba de la C/N en la Banda Ku lo que significaría una gran resistencia a la atenuación debido a la regeneración de la señal en banda base que existe dentro del satélite.

El satélite regenerativo permite que el ruido y la atenuación por lluvia se minimicen dentro del satélite debido al procesamiento a bordo de la señal.

En el enlace de Puebla a Hermosillo Figura 4.14, encontramos una actividad pluvial promedio en nuestro país, del cual analizando los resultados de nuestro cálculo de enlace podemos observar lo siguiente:

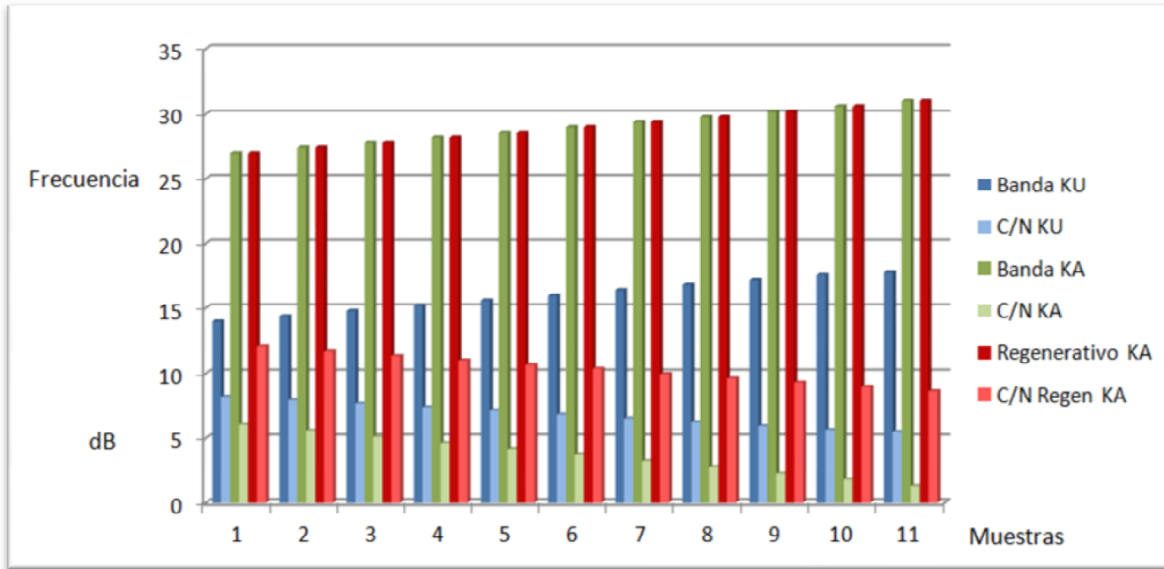


Figura 4.14 Enlace Puebla-Hermosillo

En este enlace observamos que nuestra relación portadora ruido total $(C/N)_T$ en la banda Ka no se nos degrada completamente e inclusive comparando nuestro satélite regenerativo con el enlace en banda Ku observamos incluso que es superior a éste en todas las muestras realizadas. Figura 4.14b

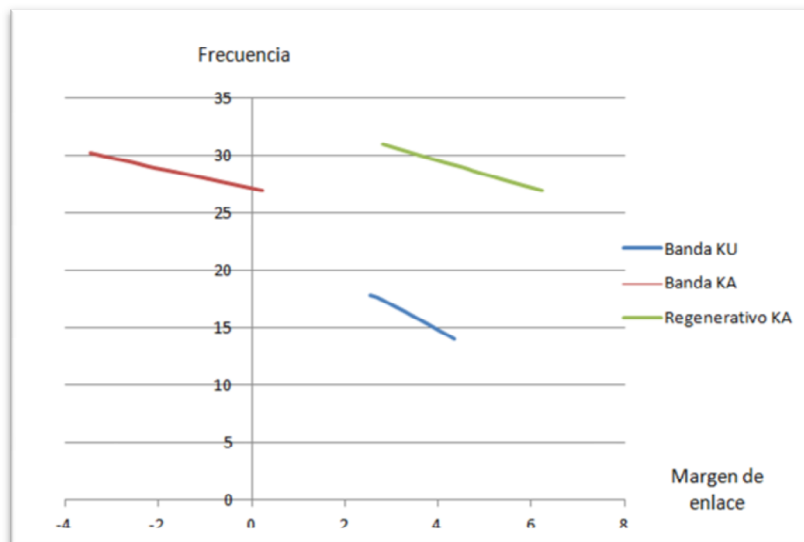


Figura 4.14b Gráfica Margen de enlace

En esta segunda gráfica estamos comparando nuestro margen de enlace con nuestra frecuencia, y observamos que aunque nuestro enlace en banda Ka transparente es positivo en la relación portadora ruido total, solo nos alcanza a a obtener un resultado positivo en la frecuencia de 27 GHz, pues al aumentar la frecuencia la señal sufre una gran atenuación y nuestro margen de enlace aparecerá negativo, no así en el enlace de satélite regenerativo, pues como se observa, a pesar de la atenuación por lluvia, nuestro margen de enlace será muy superior al enlace en banda Ku.

Este será nuestro enlace que menor índice de atenuación por lluvia registra, por lo cual observaremos lo siguiente:

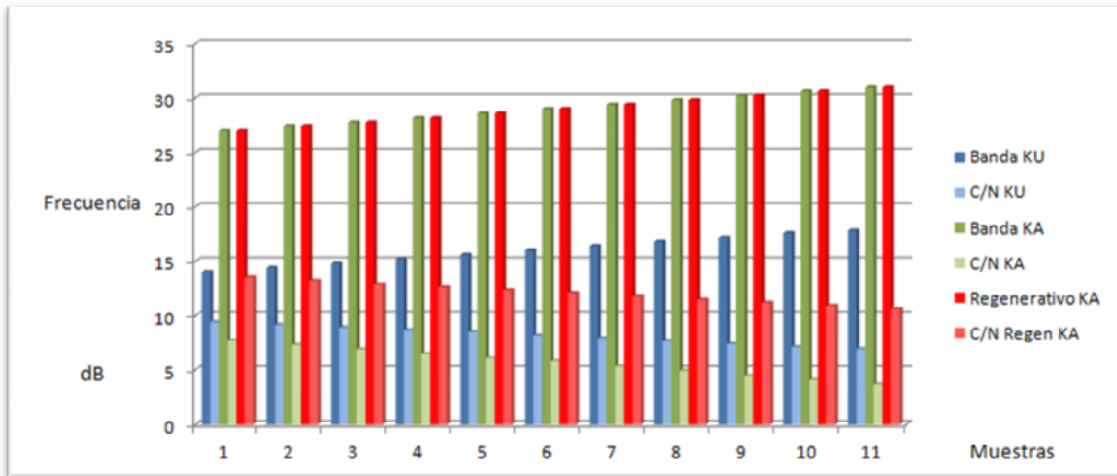


Figura 4.15 Enlace México – Tijuana

Nuestra relación portadora a ruido total en el enlace en banda Ka Transparente sigue siendo deficiente en comparación con nuestros enlaces en la banda Ku sin embargo hay una gran mejoría en comparación a los ejemplos anteriores, pues este enlace es de los que menos atenuación por lluvia registra el cual es el principal enemigo de la banda Ka, pero el enlace regenerativo en banda Ka es muy superior al enlace en banda Ku.

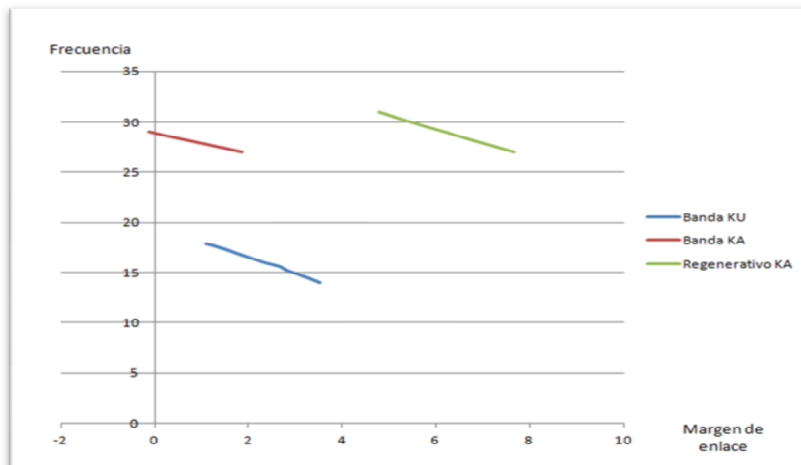
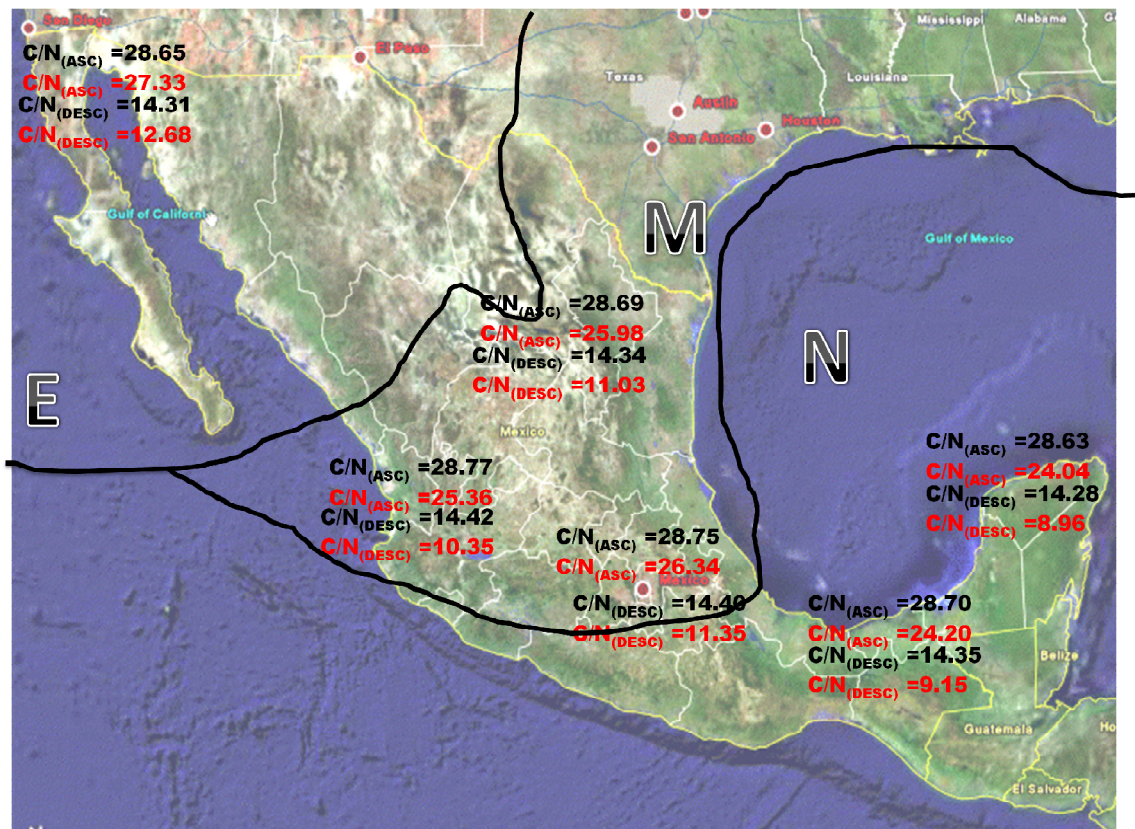


Figura 4.15(b) Grafica de margen del enlace

Podemos observar que nuestro margen de enlace del satélite regenerativo en banda Ka se fue muy superior a cualquiera de los demás enlaces, y nuestro enlace en banda Ka tiene márgenes positivos para varias frecuencias, aunque desafortunadamente, sigue atenuándose demasiado por encima de los 28 GHz de frecuencia, y nuestro enlace en banda Ku seguirá con márgenes positivos demostrando su eficiencia frente a la atenuación por lluvia.

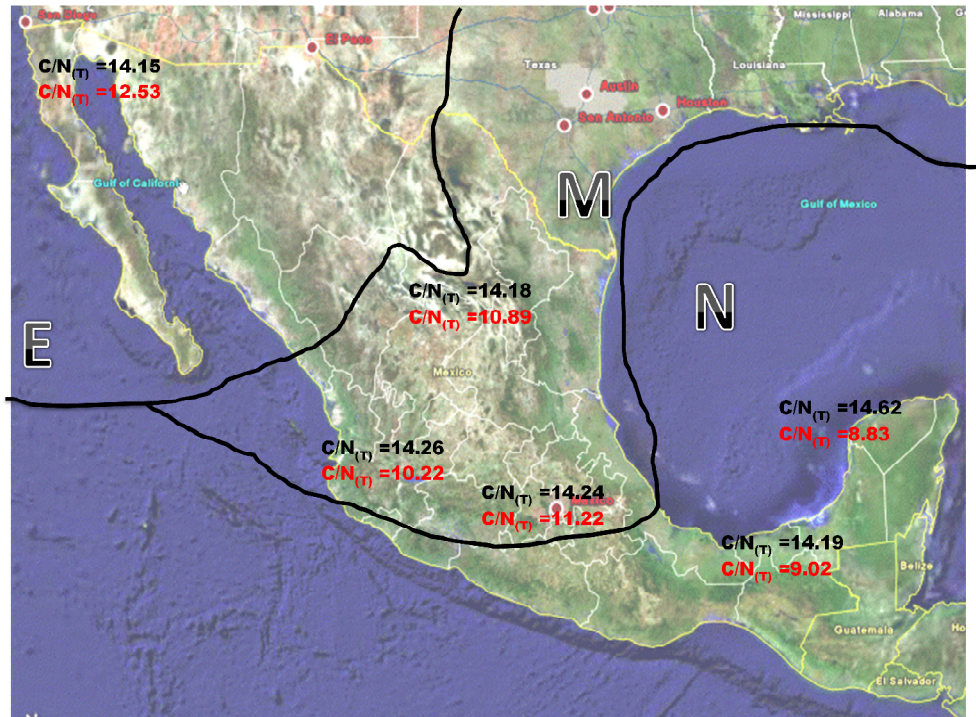
A manera de ejemplificar las diversas zonas hidrometeorológicas del país y su efecto en las bandas de frecuencia en ku y ka se ha realizado una recopilación de enlaces en donde observaremos los diversos márgenes de C/N dependiendo de la zona del país en donde se realice el enlace.

Figura 4.16 (a) Mapa de la republica Mexicana con diversos C/N dependiendo de la zona hidrometeorologica para la banda Ku



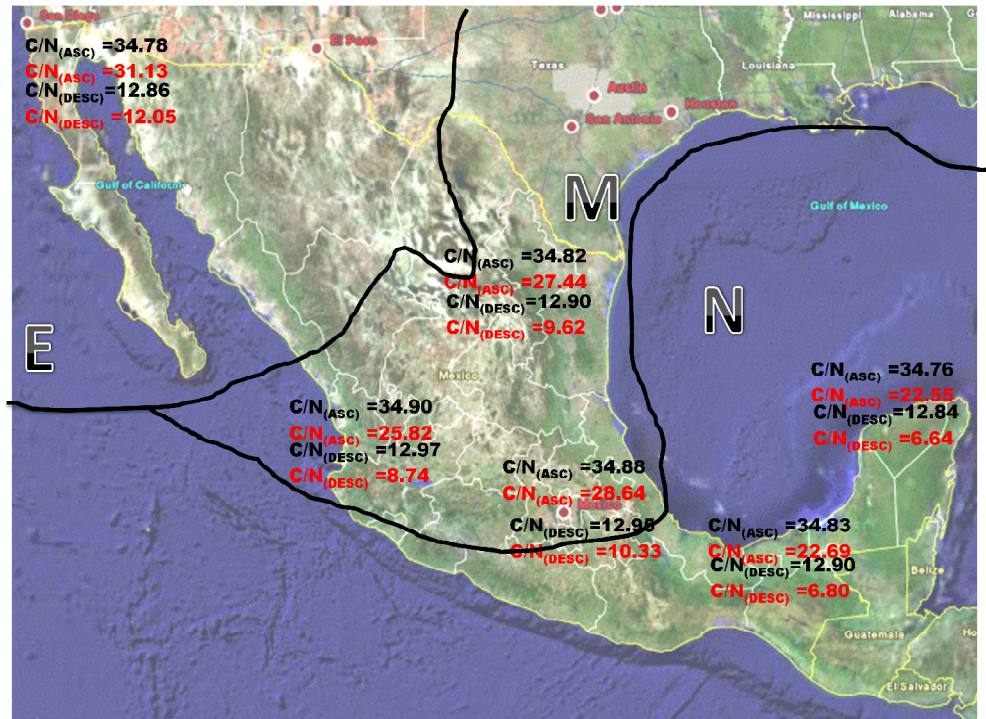
*De rojo remarcado con atenuación por lluvia y de negro cielo despejado

Figura 4.16(b) Mapa de la republica Mexicana con diversos C/N_T dependiendo de la zona hidrometeorologica para la banda Ku



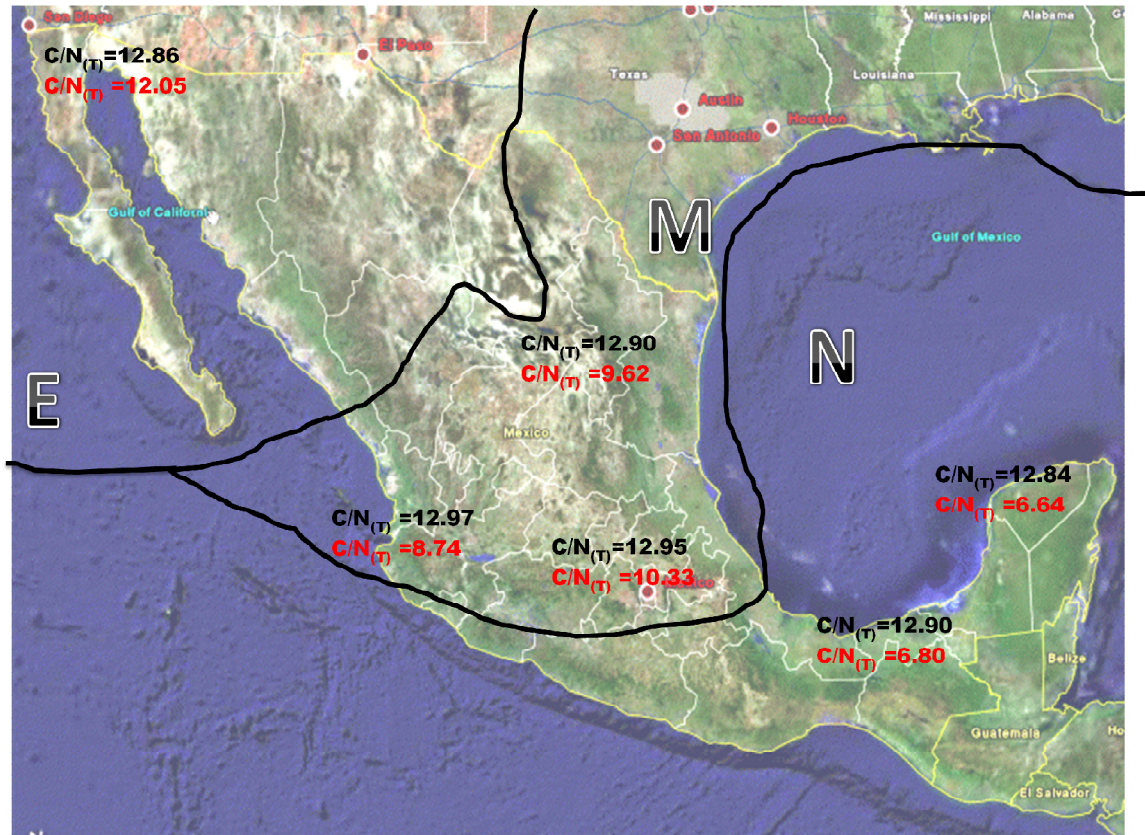
*De rojo remarcado con atenuación por lluvia y de negro cielo despejado

Figura 4.17(a) Mapa de la republica Mexicana con diversos C/N dependiendo de la zona hidrometeorologica para la banda Ka Regenerativo



*De rojo remarcado con atenuación por lluvia y de negro cielo despejado

Figura 4.17(b) Mapa de la republica Méxicana con diversos C/N_T dependiendo de la zona hidrometeorologica para la banda Ka Regenerativo



*De rojo remarcado con atenuación por lluvia y de negro cielo despejado

Podemos observar los diversos resultados obtenidos en C/N de nuestros enlaces propuestos y al igual vemos una mejora en cuanto a utilizar los transpondedores regenerativos a pesar de estar dentro de la banda Ka, pues como ya se ha visto, estos transpondedores nos regeneran la señal dentro del satélite, eliminando el ruido del enlace de subida y propiciando un mejoramiento en la señal de bajada y por ende en todo nuestro enlace.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

A lo largo de esta investigación, hemos abarcado la actualidad de las comunicaciones satelitales, desde sus principios y evolución a lo largo de la historia hasta los tiempos contemporáneos y las futuras tendencias en la transmisión de contenidos digitales.

El avance tecnológico provoca que múltiples sectores crezcan y se unan en la búsqueda de fines comunes. Un ejemplo de esta propuesta se puede observar en la industria satelital actual. Los operadores satelitales se encuentran analizando el amplio panorama de servicios que se pueden ofrecer bajo 2 principales premisas: aumentar el ancho de banda disponible y la integración de servicios.

Existen tendencias e ideas de fusionar redes terrestres cableadas, aéreas y por satélite, pues con la llegada de la alta definición y otros servicios, la capacidad tomó mayor relevancia. La migración de redes de datos por satélite en banda Ku y C a redes en banda Ka permitiría aumentar la capacidad de las redes de datos y liberaría espacio en bandas inferiores que, por sus características, son mejores para la distribución de contenidos televisivos. El impacto de la banda Ka hoy por hoy sería mayor en redes de datos que para Broadcasting.

Durante este desarrollo hemos puesto como objetivo el enmarcar las ventajas de lo que implicaría el uso de la banda Ka y sus formatos avanzados en los servicios satelitales en México, de lo cual podemos decir que cumplimos ampliamente las expectativas puestas, pues como hemos visto a lo largo del desarrollo del mismo observamos que actualmente en todo el mundo los formatos avanzados en la banda Ka se están desarrollando a tal grado que parece imprescindible que en México empecemos a desarrollar tecnología en base a tal tendencia, pues los nichos de oportunidades de los servicios que se implementan en tal frecuencia son demasiados y no podemos dejar pasar.

Se ha visto que una de las mayores preocupaciones para el uso y desarrollo de esta tecnología es la gran atenuación por lluvia que se produce en la banda ka, pero durante esta investigación se propusieron enlaces en las diversas zonas de México para que con las diversas técnicas que existen para evitar la gran atenuación por lluvia con un porcentaje de confiabilidad del 99.5% e inclusive del 99.7% en una de las zonas tropicales de México y que más atenuación por lluvia presenta, se lograran alcanzar las expectativas creadas y con las ventajas innumerables que ofrece la banda Ka en cuanto a su ancho de banda se alcanzarían mejoras en cuanto a servicios satelitales.

En cuanto a los enlaces se observa que dentro del país existen diversos ecosistemas unos que presentan mayores atenuaciones por lluvia en cuanto a la parte sur-sureste del país y la parte centro-noroeste que es prácticamente de los que menos atenuación presentan en

el ambiente, mas sin embargo en las simulaciones alcanzamos a observar que debido a las más recientes tecnologías como lo es un satélite regenerativo y diversos otros formatos avanzados en banda Ka logran reducir el efecto de este factor incluso en las zonas con mayor atenuación por lluvia que se presentaron.

En este apartado habrá que agregar que se presentaron diversas propuestas de enlaces en toda la república, en donde realmente la banda Ka tuvo una gran atenuación por lluvia y que en su formato normal, habrá que decir que logró tener resultados confiables a una disponibilidad del 99.0% pero que en un enlace satelital nos es poco confiable una disponibilidad así.

Habrà que recalcar que la atenuación por lluvia se combate con el aumento de potencia en los enlaces en los momentos de lluvia, no obstante debido a los formatos avanzados de la banda ka como lo son los satélites regenerativos obtenemos unos enlaces satelitales y un margen de enlace favorable aun en zonas de mayor atenuación por lluvia en el país, esto debido a la regeneración de la señal dentro del propio satélite lo que nos crea una mejora en el uso de la banda Ka y que nos brinda resultados favorables aun con una disponibilidad del 99.7% lo cual nos genera una confiabilidad muy alta y que nos permite reducir a su vez costos en estaciones terrenas, pues al tener mayor tecnología en el segmento espacial, el segmento terrestre se reduce en complejidad y por lo tanto en costo, a la vez que aumenta la capacidad y el ancho de banda en nuestros enlaces.

No hay que olvidar que para que evolucionen las redes de conectividad digital y de telefonía rural, se requiere un satélite con Banda Ka para poder hacerle llegar a la población más aislada del país de la comunicación que requieren. Pues con la llegada de la banda Ka se pueden brindar conectividad a las poblaciones más aisladas en el país para garantizar el acceso a internet, de telefonía y a servicios que eleven la inclusión financiera.

Las características físicas de la Banda Ka permite que se diseñen haces de cobertura con diámetro de 600 Kms con 500 MHz. de ancho de banda y pudiendo neutralizarse las frecuencias, por lo que un solo satélite se pudiera tener el equivalente de 15 satélites de Banda Ku, bajando el costo por Mbit a niveles que estuviera estar compitiendo con la tecnología terrestre de línea de abonado digital asimétrica (ADSL).

La gran capacidad que nos permite un satélite en banda Ka podría repercutir directamente en el costo, pues el hecho de que con un solo satélite en banda Ka tengamos un equivalente en ancho de banda a aprox 15 satélites en banda Ku repercute directamente en el costo, pues nos estamos ahorrando diversos lanzamientos y construcción de satélites con uno solo que se lance en banda Ka y con tecnología de haces separados y procesamiento y conmutación a bordo.

Pero dado que México como país no cuenta hoy con una asignación de Banda Ka, en Telecomm se están explorando opciones de renta comerciales de operadores de satélites como Hispasat, SES, o la inclusión comercial de una constelación de órbitas bajas, en donde debido a rentas no es conveniente, Es indispensable que México como país obtenga una asignación en banda Ka y que podamos explotar por completo las ventajas que ofrece el tener un satélite propio en banda Ka, hemos visto a lo largo de esta investigación que países de Sudamérica están adentrándose en la tecnología de la banda Ka satelital y así empezando a obtener los beneficios de esta tecnología tanto en capacidad como en lo económico, y es fundamental que México quien actualmente se encuentra en la fase de desarrollo de la agencia espacial mexicana, empiece a actualizarse para estar en la vanguardia de esta tecnología y así obtener las ventajas sin necesidad de pagar a demás carriers extranjeros.

No podemos omitir que el futuro de las comunicaciones móviles pasa por la telefonía satelital, pues aunque en la actualidad no sea viable por el elevado costo en comparación con la red de telefonía celular, el hecho de que la telefonía satelital permita que nos comuniquemos en cualquier parte del mundo sin importar los estándares que rijan el país nos dan una gran ventaja que la red celular jamás podrá darnos, y si a esto le agregamos que el internet de banda ancha nos permitirá una mayor movilidad con nuestros dispositivos y un mayor ancho de banda traducido en velocidad de conexión nos supondrá que el futuro de las comunicaciones satelitales pasa por el uso de la banda Ka y que es vital para México el empezar a manejar la banda Ka, no olvidemos que el futuro es inalámbrico.

ANEXO A) TRANSPONDEDOR TRANSPARENTE

```

%PROGRAMA DE CALCULO DE ENLACE TRANSPONDEDOR TRANSPARENTE
display('PROGRAMA DE CÁLCULO DE ENLACE CON TRANSPONDEDOR TRANSPARENTE');
display('INGENIERO EDUARDO DECLE PULIDO');
display('Presione Enter para Continuar. ');
display(' ');
pause;
%CONSTANTES DEL SATÉLITE (SATMEX 5) ASCENDENTE
CIAAsc=18; %dB
CXAAAsc=28; %dB
CXPAsc=30; %dB
%CONSTANTES DEL SATÉLITE (SATMEX 5) DESCENDENTE
CIDesc=35; %dB
CXPDesc=29; %dB
CXADesc=39; %dB
%CONSTANTES DEL PROGRAMA
R=42164.2; %km distancia del centro de la Tierra a la orbita GEO
rEarth=6378.155; %km
K=10*log10(1.3806503e-23); %dB/K
c0=299792458; %m/s
Trx=280; %Temperatura de ruido del sistema de Rx
Grx=41.07; %dB Ganancia de la antena receptora
Tant=52; %Temperatura de Antena
LongSat=deg2rad(116.8); %Satmex 5
dispo=99.0;

%ENLACE ASCENDENTE (UPLINK).
%FRECUENCIA DEL TRANSMISOR (FTx).
display('INTRODUZCA LA FRECUENCIA CENTRAL DEL TRANSMISOR (FTx): ');
ftx = input('FTx = ');
display(' ');
%FRECUENCIA DEL RECEPTOR (FRx).
display('INTRODUZCA LA FRECUENCIA CENTRAL DEL RECEPTOR (FRx): ');
frx = input('FRx = ');
display(' ');
%LATITUD DEL TRANSMISOR
display('INTRODUZCA LA LATITUD DEL TRANSMISOR. ');
lattx = input('Latitud Transmisor = ');
display(' ');
%LONGITUD DEL TRANSMISOR
display('INTRODUZCA LA LONGITUD DEL TRANSMISOR. ');
longtx = input('Longitud Transmisor = ');
display(' ');
%LATITUD DEL RECEPTOR
display('INTRODUZCA LA LATITUD DEL RECEPTOR. ');
latrx = input('Latitud Receptor = ');
display(' ');
%LONGITUD DEL RECEPTOR
display('INTRODUZCA LA LONGITUD DEL RECEPTOR. ');
longrx = input('Longitud Receptor = ');
display(' ');
%MARGEN ATENUACIÓN POR LLUVIA ASCENDENTE
display('INTRODUZCA EL MARGEN ATENUACIÓN POR LLUVIA ASCENDENTE. ');
MaAtLluvia = input('MuAsc = ');
display(' ');

```

```

%MARGEN ATENUACIÓN POR LLUVIA DESCENDENTE
display('INTRODUZCA EL MARGEN ATENUACIÓN POR LLUVIA DESCENDENTE. ');
MaAtLluvia2 = input('MuDesc = ');
display(' ');
%VELOCIDAD DE INFORMACIÓN.
display('1=VELOCIDAD TRANSMISION PROPUESTA, 2=VELOCIDAD TRANSMISIÓN
CALCULADA');
VTXmode = input('Introduzca 1 0 2 según sea el caso = ');
if VTXmode==1;
    BWport = input ('BWport= ');
    VelInfsist = input ('VelInfsis= ');
end;

if VTXmode==2;
display('Introduzca la Velocidad de Información para Cada Aplicación. ');
Video = input('Velocidad de Información de La Señal de Video: ');
Audio = input('Velocidad de Información de La Señal de Audio: ');
Datos = input('Velocidad de Información de Los Datos Adicionales: ');
Servicio = input('Velocidad de Información de Ctrol. de Servicio: ');
display(' ');
%BITS ADICIONALES.
Suma = Video + Audio + Datos + Servicio;
BitsAd = Suma * 0.15;
display('Los Bits Adicionales son: ')
display(BitsAd)
%VELOCIDAD DE LA INFORMACIÓN.
VelInfsist = Suma + BitsAd;
display('La Velocidad de la Información del Sistema es (Mbps): ');
display(VelInfsist)
%FEC
display('Introduzca el valor de FEC. ');
FEC = input('FEC = ');
%VELOCIDAD TX.
VTx = VelInfsist/FEC;
display('La velocidad de Transmisión es: ');
display(VTx)
%ÍNDICE DE MODULACIÓN Y ROLL-OFF
display('Introduzca el valor del Índice de Modulación. ')
IndMod = input('Índice de Modulación = ');
display('Introduzca el valor de (Roll-Off). ');
RollOff = input('Roll - Off = ');
%ANCHO DE BANDA DE LA PORTADORA (BWport).
BWport = (VTx)*(IndMod)*(1 + RollOff);
display('El Ancho de Banda de Portadora (BWport)es: ');
display(BWport)
end

%PIRE
display('Introduzca el PIRE de la estación terrena');
PIREet = input('PIREet = ');
display('Introduzca el PIRE del satélite');
Pires = input('PIREsat = ');
%G/T
display('Introduzca el figura de mérito del satélite');
GTsat1 = input('GTsat = ');

```

```

%Eb/No
display('Introduzca la Energia de Bit a Ruido');
EbN0 = input('Eb/No = ');

for i=1:4
%Estacion Tx
LongET1=deg2rad(longtx);
LatET1=deg2rad(lattx);
Fasc=ftx; %GHz
LdeltaAsc=1; %dB Perdidas miscelaneas
GTsat1=3.36; %dB/K

%Estacion Rx
LongET2=deg2rad(longrx);
LatET2=deg2rad(latrx);
Fdesc=frx; %GHz
LdeltaDesc=1; %dB Perdidas miscelaneas

% Calculos preliminares
%Azimuth
Azrad1=atan(tan(abs(LongSat-LongET1))/sin(LatET1));
Az1=180+rad2deg(Azrad1); %azimuth E/T Tx Atlanta
Azrad2=atan(tan(abs(LongSat-LongET2))/sin(LatET2));
Az2=180+rad2deg(Azrad2); %azimuth E/T Rx Mexico DF
w1=cos(LatET1)*cos(LongSat-LongET1);
w2=cos(LatET2)*cos(LongSat-LongET2);

%Elevacion
Elrad=atan((R-rEarth*(w1))/(rEarth*sin(acos(w1))))-acos(w1);
E2rad=atan((R-rEarth*(w2))/(rEarth*sin(acos(w2))))-acos(w2);
E1=rad2deg(E1rad);
E2=rad2deg(E2rad);

%Rango
D1=(R^2+rEarth^2-
(2*rEarth*R*sin(E1rad+asin((rEarth/R)*cos(E1rad))))^(1/2); %km TX
D2=(R^2+rEarth^2-
(2*rEarth*R*sin(E2rad+asin((rEarth/R)*cos(E2rad))))^(1/2); %km RX
if i==1 %cielo despejado
MuAsc=0;
MuDesc=0;
elseif i==2 %lluvia ascendente
MuAsc=MaAtLluvia;
MuDesc=0;
elseif i==3 %lluvia descendente
MuAsc=0;
MuDesc=MaAtLluvia2;
elseif i==4 %lluvia ambos lados
MuAsc=MaAtLluvia;
MuDesc=MaAtLluvia2;
end
LL=10^(MuDesc/10);
TantL=(Tant/LL)+280*(1-1/LL);
if MuDesc ~= 0
Trx=90+290*(1-1/1.122)+TantL/1.122; %% Tlna= 90K; Perdidas receptor=0.5dB
end

```

```

% Uplink
LsAsc=20*log10((4*pi*Fasc*D1*1000)/c0);
CN0asc=PIREet+GTsat1-K-LsAsc-MuAsc-LdeltaAsc;
CNasc=CN0asc-10*log10(BWport); %C/Nasc Total sencilla
CNascT=10*log10(1/(1/(10^(CNasc/10)) + 1/(10^(CIAsc/10)) +
1/(10^(CXPasc/10)) + 1/(10^(CXAAsc/10))));
% Downlink
PIREsat=(Pires-MuAsc); % dBW
LsDesc=20*log10((4*pi*Fdesc*D2*1000)/c0);
GTet=Grx-10*log10(Trx);
CN0desc=PIREsat+GTet-K-LsDesc-MuDesc-LdeltaDesc;
CNdesc=CN0desc-10*log10(BWport); %C/Ndesc Total sencilla
CNdescT=10*(log10(1/((1/(10^(CNdesc/10)))+(1/(10^(CIDesc/10)))+(1/(10^(CX
PDesc/10)))+(1/(10^(CXADesc/10))));
% Evaluación
CN0T=10*log10(1/(1/(10^(CN0asc/10)) + 1/(10^(CN0desc/10))));%C/N0 Total
Calculado
CNT=10*log10(1/(1/(10^(CNascT/10)) + 1/(10^(CNdescT/10))));%C/N total
calculado
CNT2=CN0T - 10*(log10(BWport));
CNR=Ebn0+10*log10(VelInfsist)-10*log10(BWport);
ME=CNT-CNR;
display(' ');
display(' ');
%% *-*-*-*-*-*-*-* Despliegue de Resultados *-*-*-*-*-*-*-* %%
fprintf('Azimut E/T Transmisora: %.2f\n',Az1);
fprintf('Elevacion E/T Transmisora: %.2f\n',E1);
fprintf('Disponibilidad: %.2f\n',dispo);
fprintf('PIRE E/Tx: %.2f\n',PIREet);
fprintf('Pérdidas por espacio libre Asc: %.2f\n',LsAsc);
fprintf('Pérdidas miscelaneas asc: %.2f\n',LdeltaAsc);
fprintf('Margen de lluvia asc: %.2f\n',MuAsc);
fprintf('C/N0 Ascendente: %.2f\n',CN0asc);
fprintf('C/N Ascendente: %.2f\n',CNasc);
fprintf('C/N Ascendente Total: %.2f\n',CNascT);
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*\n');
fprintf('Azimut E/T Receptora: %.2f\n',Az2);
fprintf('Elevacion E/T Receptora: %.2f\n',E2);
fprintf('Disponibilidad: %.2f\n',dispo);
fprintf('Pérdidas por espacio libre desc: %.2f\n',LsDesc);
fprintf('PIRE saturacion satelite: %.2f\n',PIREsat);
fprintf('Pérdidas miscelaneas desc: %.2f\n',LdeltaDesc);
fprintf('Margen de lluvia desc: %.2f\n',MuDesc);
fprintf('G/T de la E/T Receptora: %.2f\n',GTet);
fprintf('C/N0 Descendente: %.2f\n',CN0desc);
fprintf('C/N Descendente: %.2f\n',CNdesc);
fprintf('C/N Descendente Total: %.2f\n',CNdescT);
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*\n');
fprintf('C/N0 Total: %.2f\n',CN0T);
fprintf('C/N Total: %.2f\n',CNT);
fprintf('C/N Total: %.2f\n',CNT2);
fprintf('C/N Requerida: %.2f\n',CNR);
fprintf('Margen de enlace: %.2f\n',ME);
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*\n');
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*\n\n');
end

```

ANEXO B) TRANSPONDEDOR REGENERATIVO

```

%PROGRAMA DE CALCULO DE ENLACE TRANSPONDEDOR TRANSPARENTE
display('PROGRAMA DE CÁLCULO DE ENLACE CON TRANSPONDEDOR REGENERATIVO');
display('INGENIERO EDUARDO DECLE PULIDO');
display('Presione Enter para Continuar. ');
display(' ');
pause;
%CONSTANTES DEL PROGRAMA
R=42164.2; %km distancia del centro de la Tierra a la orbita GEO
rEarth=6378.155; %km
K=10*log10(1.3806503e-23); %dBJ/K
c0=299792458; %m/s
Trx=280; %Temperatura de ruido del sistema de Rx
Grx=41.07; %dB Ganancia de la antena receptora
Tant=52; %Temperatura de Antena
LongSat=deg2rad(116.8); %Satmex 5
dispo=99.0;

%ENLACE ASCENDENTE (UPLINK).
%FRECUENCIA DEL TRANSMISOR (FTx).
display('INTRODUZCA LA FRECUENCIA CENTRAL DEL TRANSMISOR (FTx): ');
ftx = input('FTx = ');
display(' ');
%FRECUENCIA DEL RECEPTOR (FRx).
display('INTRODUZCA LA FRECUENCIA CENTRAL DEL RECEPTOR (FRx): ');
frx = input('FRx = ');
c = (3)*(10^8);
display(' ');
%LATITUD DEL TRANSMISOR
display('INTRODUZCA LA LATITUD DEL TRANSMISOR. ');
lattx = input('Latitud Transmisor = ');
display(' ');
%LONGITUD DEL TRANSMISOR
display('INTRODUZCA LA LONGITUD DEL TRANSMISOR. ');
longtx = input('Longitud Transmisor = ');
display(' ');
%LATITUD DEL RECEPTOR
display('INTRODUZCA LA LATITUD DEL RECEPTOR. ');
latrx = input('Latitud Receptor = ');
display(' ');
%LONGITUD DEL RECEPTOR
display('INTRODUZCA LA LONGITUD DEL RECEPTOR. ');
longrx = input('Longitud Receptor = ');
display(' ');
%MARGEN ATENUACIÓN POR LLUVIA ASCENDENTE
display('INTRODUZCA EL MARGEN ATENUACIÓN POR LLUVIA ASCENDENTE. ');
MaAtLluvia = input('MuAsc = ');
display(' ');
%MARGEN ATENUACIÓN POR LLUVIA DESCENDENTE
display('INTRODUZCA EL MARGEN ATENUACIÓN POR LLUVIA DESCENDENTE. ');
MaAtLluvia2 = input('MuDesc = ');
display(' ');
%VELOCIDAD DE INFORMACIÓN.
display('1=VELOCIDAD TRANSMISION PROPUESTA, 2=VELOCIDAD TRANSMISIÓN
CALCULADA');

```



```

VTXmode = input('Introduzca 1 0 2 según sea el caso = ');
if VTXmode==1;
    BWport = input ('BWport= ');
    VelInfsist = input ('VelInfsis= ');
end;

if VTXmode==2;
display('Introduzca la Velocidad de Información para Cada Aplicación. ');
Video = input('Velocidad de Información de La Señal de Video: ');
Audio = input('Velocidad de Información de La Señal de Audio: ');
Datos = input('Velocidad de Información de Los Datos Adicionales: ');
Servicio = input('Velocidad de Información de Ctrol. de Servicio: ');
display('
');
%BITS ADICIONALES.
Suma = Video + Audio + Datos + Servicio;
BitsAd = Suma * 0.15;
display('Los Bits Adicionales son: ')
display(BitsAd)
%VELOCIDAD DE LA INFORMACIÓN.
VelInfsist = Suma + BitsAd;
display('La Velocidad de la Información del Sistema es (Mbps): ');
display(VelInfsist)
%FEC
display('Introduzca el valor de FEC. ');
FEC = input('FEC = ');
%VELOCIDAD TX.
VTx = VelInfsist/FEC;
display('La velocidad de Transmisión es: ');
display(VTx)
%ÍNDICE DE MODULACIÓN Y ROLL-OFF
display('Introduzca el valor del Índice de Modulación. ');
IndMod = input('Índice de Modulación = ');
display('Introduzca el valor de (Roll-Off). ');
RollOff = input('Roll - Off = ');
%ANCHO DE BANDA DE LA PORTADORA (BWport).
BWport = (VTx)*(IndMod)*(1 + RollOff);
display('El Ancho de Banda de Portadora (BWport)es: ');
display(BWport)
end
%PIRE
display('Introduzca el PIRE de la estación terrena ');
PIREet = input('PIREet = ');
display('Introduzca el PIRE del satélite ');
PIREsat = input('PIREsat = ');
%G/T
display('Introduzca el figura de mérito del satélite ');
GTsat1 = input('GTsat = ');

%Eb/No
display('Introduzca la Energia de Bit a Ruido ');
EbN0 = input('Eb/No = ');
for i=1:4
%Estacion Tx
LongET1=deg2rad(longtx);
LatET1=deg2rad(lattx);
Fasc=ftx; %GHz
LdeltaAsc=1; %dB Perdidas miscelaneas

```

```

GTsat1=3.36; %dB/K
%Estacion Rx
LongET2=deg2rad(longrx);
LatET2=deg2rad(latrx);
Fdesc=frx; %GHz
LdeltaDesc=1; %dB Perdidas miscelaneas

% Calculos preliminares
%Azimuth
Azrad1=atan(tan(abs(LongSat-LongET1))/sin(LatET1));
Az1=180+rad2deg(Azrad1); %azimuth E/T Tx Atlanta
Azrad2=atan(tan(abs(LongSat-LongET2))/sin(LatET2));
Az2=180+rad2deg(Azrad2); %azimuth E/T Rx Mexico DF
w1=cos(LatET1)*cos(LongSat-LongET1);
w2=cos(LatET2)*cos(LongSat-LongET2);

%Elevacion
Elrad=atan((R-rEarth*(w1))/(rEarth*sin(acos(w1))))-acos(w1);
E2rad=atan((R-rEarth*(w2))/(rEarth*sin(acos(w2))))-acos(w2);
E1=rad2deg(Elrad);
E2=rad2deg(E2rad);

%Rango
D1=(R^2+rEarth^2-
(2*rEarth*R*sin(Elrad+asin((rEarth/R)*cos(Elrad))))^(1/2); %km TX
D2=(R^2+rEarth^2-
(2*rEarth*R*sin(E2rad+asin((rEarth/R)*cos(E2rad))))^(1/2); %km RX

if i==1 %cielo despejado
MuAsc=0;
MuDesc=0;
elseif i==2 %lluvia ascendente
MuAsc=MaAtLluvia;
MuDesc=0;
elseif i==3 %lluvia descendente
MuAsc=0;
MuDesc=MaAtLluvia2;
elseif i==4 %lluvia ambos lados
MuAsc=MaAtLluvia;
MuDesc=MaAtLluvia2;

end
LL=10^(MuDesc/10);
TantL=(Tant/LL)+280*(1-1/LL);
if MuDesc ~= 0
Trx=90+290*(1-1/1.122)+TantL/1.122; %% Tlna= 90K; Perdidas receptor=0.5dB
end

% Uplink
LsAsc=20*log10((4*pi*Fasc*D1*1000)/c0);
CN0asc=PIREet+GTsat1-K-LsAsc-MuAsc-LdeltaAsc;
CNasc=CN0asc-10*log10(BWport); %C/Nasc Total sencilla
CNascT=CN0asc-10*log10(BWport);
% Downlink
LsDesc=20*log10((4*pi*Fdesc*D2*1000)/c0);
GTet=Grx-10*log10(Trx);

```

```

CN0desc=PIREsat+GTet-K-LsDesc-MuDesc-LdeltaDesc;
CNdesc=CN0desc-10*log10(BWport); %C/Ndesc Total sencilla
CNdescT=CN0desc-10*log10(BWport);

% Evaluación
CN0T=10*log10(1/(1/(10^(CN0asc/10)) + 1/(10^(CN0desc/10))));%C/N0 Total
Calculado
CNT=CNdescT; %C/N total calculado
CNT2=CN0T - 10*(log10(BWport));
CNR=EbN0+10*log10(VelInfsist)-10*log10(BWport);
ME=CNT-CNR;
display(' ');
display(' ');
%% *-*-*-*-*-*-*-*-*-* Despliegue de Resultados *-*-*-*-*-*-*-*-*-* %%
fprintf('Azimut E/T Transmisora: %.2f\n',Az1);
fprintf('Elevacion E/T Transmisora: %.2f\n',E1);
fprintf('Disponibilidad: %.2f\n',dispo);
fprintf('PIRE E/Tx: %.2f\n',PIREet);
fprintf('Pérdidas por espacio libre Asc: %.2f\n',LsAsc);
fprintf('Pérdidas miscelaneas asc: %.2f\n',LdeltaAsc);
fprintf('Margen de lluvia asc: %.2f\n',MuAsc);
fprintf('C/N0 Ascendente: %.2f\n',CN0asc);
fprintf('C/N Ascendente: %.2f\n',CNasc);
fprintf('C/N AscendenteTotal : %.2f\n',CNascT);
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*-*-*\n');
fprintf('Azimut E/T Receptora: %.2f\n',Az2);
fprintf('Elevacion E/T Receptora: %.2f\n',E2);
fprintf('Disponibilidad: %.2f\n',dispo);
fprintf('Pérdidas por espacio libre desc: %.2f\n',LsDesc);
fprintf('PIRE saturacion satelite: %.2f\n',PIREsat);
fprintf('Pérdidas miscelaneas desc: %.2f\n',LdeltaDesc);
fprintf('Margen de lluvia desc: %.2f\n',MuDesc);
fprintf('G/T de la E/T Receptora: %.2f\n',GTet);
fprintf('C/N0 Descendente: %.2f\n',CN0desc);
fprintf('C/N Descendente: %.2f\n',CNdesc);
fprintf('C/N Descendente Total: %.2f\n',CNdescT);
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*-*-*\n');
fprintf('C/N0 Total: %.2f\n',CN0T);
fprintf('C/N Total: %.2f\n',CNT);
fprintf('C/N Total: %.2f\n',CNT2);
fprintf('C/N Requerida: %.2f\n',CNR);
fprintf('Margen de enlace: %.2f\n',ME);
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*-*-*\n');
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*-*-*\n\n');

end

```

- [1] GÉRARD MARAL; MICHEL BOUSQUET; "SATELLITE COMMUNICATIONS SYSTEMS, TECHNIQUES AND TECHNOLOGY" WILEY 5° EDITION 2009
- [2] JOSÉ MANUEL HUIDOBRO, FRAGMENTO "QUE ÉS?" HISTORIA DE LOS SATÉLITES DE COMUNICACIONES, REVISTA BIT N°134 JULIO - AGOSTO 2002
- [3] BRUCE R. ELBERT; "INTRODUCTION TO SATELLITE COMMUNICATION" ARTECH HOUSE INC 1° EDITION 2008
- [4] RODOLFO NERI VELA; "COMUNICACIONES POR SATÉLITE" THOMSON LEARNING 2003
- [5] SALVADOR LANDEROS AYALA; PROGRAMA DE ESTUDIO DE UNAM DE TEMAS SELECTOS DE TELECOMUNICACIONES "SISTEMA DE SATÉLITES DE COMUNICACIONES" CAP. 3 2012
- [6] LOUIS J. IPPOLITO JR; "SATELLITE COMMUNICATIONS SYSTEMS ENGINEERING, ATMOSPHERIC EFFECTS, SATELLITE LINK DESIGN AND SYSTEM PERFORMANCE", WILEY 1° EDITION 2008
- [7] SERGIO ALEJANDRO CHÁVEZ CÁRDENAS; JUAN CARLOS GONZALEZ SÁNCHEZ; TESIS "PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS EN SISTEAS DE TELEVISIÓN DIGITAL POR SATÉLITE" UNAM 2011
- [8] SALVADOR LANDEROS AYALA; PROGRAMA DE ESTUDIO DE UNAM DE TEMAS SELECTOS DE TELECOMUNICACIONES "SISTEMA DE SATÉLITES DE COMUNICACIONES" CAP. 4 2012
- [9] DENNIS RODDY; "*SATELLITE COMMUNICATIONS*" MCGRAW-HILL. 4° EDITION 2006
- [10] SIMON HAYKIN; "COMMUNICATION SYSTEMS" JOHN WILEY & SONS INC. 4° EDITION 2001
- [11] BERNARD SKLAR; "DIGITAL COMMUNICATIONS" PRENTICE HALL 2° EDITION 2001
- [12] SAMIR MEDINA PERLAZA, GUSTAVO VILLALOBOS CAVIEDES "LAS TECNOLOGÍAS ASOCIADAS A LOS SISTEMAS SATELITALES DE TELECOMUNICACIONES" DOCUMENTO GENERADO EN EL MARCO DEL DESARROLLO DEL PROYECTO: "AVANZADA DE I+D EN TECNOLOGÍAS SATELITALES -AVANTES-" POR UNIVERSIDAD DEL CAUCA FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES; 2005

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [13] SALVADOR LANDEROS AYALA; PROGRAMA DE ESTUDIO DE UNAM DE TEMAS SELECTOS DE TELECOMUNICACIONES "SISTEMA DE SATÉLITES DE COMUNICACIONES" CAP. 4 2012
- [14] TRI T. HA "DIGITAL SATELLITE COMMUNICATIONS" MCGRAW-HILL, 1990 1° EDITION
- [15] TRABAJO ANTENAS EMBARCADAS EN SATÉLITES
[HTTP://WWW.UPV.ES/SATELITE/TRABAJOS/GRUPO9_99.00/HACES.HTM](http://www.upv.es/satelite/trabajos/grupo9_99.00/haces.htm) FECHA DE CONSULTA 2013-06-07
- [16] ING JAVIER DE LA PLAZA "TENDENCIAS. NEW GENERATIONS OF SATELLITE COMMUNICATIONS" FRAGMENTO REVISTA BIT N°170 AGOST-SEPT 2008
- [17] SALVADOR LANDEROS AYALA; PROGRAMA DE ESTUDIO DE UNAM DE TEMAS SELECTOS DE TELECOMUNICACIONES "SISTEMA DE SATÉLITES DE COMUNICACIONES" CAP. 4A 2013
- [18] KENT M. PRICE, ROBERT K. KWAN, "FUTURE BENEFITS AND APPLICATIONS OF INTELLIGENT ON-BOARD PROCESSING TO VSAT SERVICE, NASA CONTRACTOR REPORT 189185 SPACE SYSTEM / LORAL PREPARES FOR LEWIS RESEARCH CENTER 1992
- [19] TELECOM TELEGRAFOS MEMORIAS DOCUMENTALES BANDA KA NOVIEMBRE DE 2012 ([HTTP://WWW.TELECOMM.NET.MX/INDEX.PHP?OPTION=COM_DOCMAN&TASK=CAT_VIEW&GID=318&ITEMID=220](http://www.telecomm.net.mx/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=318&itemid=220)) FECHA DE CONSULTA 2012
- [20] D. GORDON "PRINCIPLES OF COMMUNICATIONS SATELLITE" JOHN WILE AND SONS, 1993
- [21] RECOMENDACIÓN UIT-R P.618.10: "DATOS DE PROPAGACIÓN Y MÉTODOS DE PREDICCIÓN NECESARIOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN TIERRA-ESPACIO".
- [22] LANDEROS-AYALA, SALVADOR; ET AL.; "CÁLCULO DE ATENUACIÓN POR LLUVIA USANDO EL MODELO DAH Y DIÁMETROS DE ANTENA PARA BANDA KA EN MÉXICO"; INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y TECNOLÓGICA III; 2002.
- [23] RECOMENDACIÓN UIT-R P.839-3: "MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE LA LLUVIA PARA UTILIZAR EN LOS MÉTODOS DE PREDICCIÓN"
- [24] RECOMENDACIÓN UIT-R P.837-5: "CARACTERÍSTICAS DE PRECIPITACIÓN PARA MODELO DE PROPAGACIÓN".

- [25] [HTTP://WWW.ITU.INT/PUB/R-REC](http://www.itu.int/pub/R-REC) FECHA DE CONSULTA 2012
- [26] RECOMENDACIÓN UIT-R BO.1659: "TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE LA ATENUACIÓN DEBIDA A LA LLUVIA APLICABLES A SISTEMAS DEL SERVICIO DE RADIODIFUSIÓN POR SATÉLITE EN LAS BANDAS DE FRECUENCIAS ENTRE 17,3 GHZ Y 42,5 GHZ"
- [27] K. KOGA, T. MURATANI AND A. OGAWA, 'ON BOARD REGENERATIVE REPEATERS APPLIED TO DIGITAL SATELLITE COMMUNICATIONS', *PROC. IEEE*, 65, (3), 401-410 (1977).
- [28] C. R. CARTER, 'SYNCHRONIZATION TECHNIQUES FOR A TDMA SATELLITE SWITCHED SYSTEM', *IEEE TRANS. COMM.*, COM-28,(8), 1291-1301 (1980).
- [29] R. S. DAVIES, "OPTIMIZATION OF SS/TDMA COMMUNICATION SATELLITE PAYLOAD", *5TH INT. CONF. DIGITAL SATELLITE COMMUNICATIONS, GENOA, 1981, PP. 435-439.*
- [30] DR. KAMILO FEHER; "DIGITAL COMMUNICATIONS SATELLITE/EARTH STATION ENGINEERING" PRENTICE HALL 1° EDICIÓN 1981.
- [31] [HTTPS://ITUNEWS.ITU.INT/ES/2746-LA-BANDA-ANCHA-POR-SATELITE-ALCANZA-LA-MAYORIA-DE-EDAD.NOTE.ASPX](https://ituneews.itu.int/es/2746-la-banda-ancha-por-satelite-alcanza-la-mayoria-de-edad.note.aspx) (Revisado en mayo de 2013)
- [32] [HTTP://WWW.SATSIG.NET/IVSATCOS.HTM](http://www.satsig.net/ivsaticos.htm) (Revisada en junio de 2013)
- [33] [HTTP://WWW.ITU.INT/ITU-D/TREG/EVENTS/SEMINARS/GSR/GSR11/DOCUMENTS/SESSION 3 MEHOTRA.PDF](http://www.itu.int/itu-d/treg/events/seminars/gsr/gsr11/documents/session_3_mehotra.pdf) (Revisado en mayo 2013)