



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UNA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES DE UN
SATÉLITE GEOESTACIONARIO DE BANDA Ka PARA UTILIZAR
LA TÉCNICA DE REÚSO DE FRECUENCIAS**

TESIS

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

PRESENTAN:

**BERNAL GUTIÉRREZ RUBÉN ALBERTO
CASTAÑEDA MEDINA MARÍA FERNANDA
DE LA CRUZ TORRES DANIEL
VARGAS QUIROZ LUIS FELIPE
VILLORDO ARGUELLES JUAN PABLO**

DIRECTOR DE TESIS

M.C. EDGAR BALDEMAR AGUADO CRUZ

CIUDAD UNIVERSITARIA 11 /11/2015.



Contenido

OBJETIVO	1
CAPITULO 1 ANTECEDENTES	2
1.1 Definición de Satélite.....	2
1.2 Clasificación de los satélites.....	4
1.3 Orbitas satelitales.....	7
1.4 Bandas de frecuencia que utilizan los satélites.....	11
1.5 Arquitectura de un Satélite de comunicaciones	13
1.6 Descripción general de un satélite geoestacionario.....	20
CAPITULO 2 PANORAMA ACTUAL DE LA BANDA Ka	23
2.1 Situación de la banda Ka en el mundo.	23
2.2 Aplicaciones de la banda Ka	31
2.3 Ventajas de la Banda Ka	33
2.4 Desventajas de la banda Ka.	39
2.5 Reúso de Frecuencias.....	43
CAPITULO 3 CARACTERÍSTICAS DE UN SATÉLITE GEOESTACIONARIO	48
3.1 Transpondedores	48
3.2 Antenas	53
3.3 PIRE.....	65
3.4 G/T	67
3.5 Órbita Geoestacionaria	69
CAPITULO 4 ENLACE SATELITAL	75
4.1 Características de la señal.....	75
4.1.1 Tipo de señal	77
4.1.2 Modulación.....	87
4.1.3 Tasa de Transferencia.....	97
4.1.4 Codificación del Canal	100
4.1.5 Técnicas de acceso al medio.....	104
4.2 Características de las estaciones terrenas	128
4.2.1 Tipo y tamaño de la antena.....	128
4.2.2 Patrón de radiación.....	135
4.2.3 Amplificadores de alta potencia.....	137
4.2.4 Amplificadores de bajo ruido.....	144

CONTENIDO

4.2.5 Figura de mérito G/T	146
4.2.6 Apuntamiento de la antena.....	150
4.2.7 Rango satelital	157
4.3 Efectos atmosféricos en un enlace satelital.....	158
4.3.1 Propagación de ondas electromagnéticas por la atmósfera.....	158
4.3.2 Pérdidas por propagación	162
4.3.3 Atenuación por lluvia	164
4.4 Topología de la red.....	177
4.5 Expresiones y fórmulas para el cálculo de un enlace satelital	180
CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES.....	198
5.1 Cobertura del satélite.	203
5.2 Posicionamiento Satelital.....	235
5.3 Plan y reuso de frecuencias	237
5.4 Presupuesto de enlace.....	244
CONCLUSIONES.....	264
ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS	266
BIBLIOGRAFÍA.....	308
ARTÍCULOS O REVISTAS	308
CONSULTA EN INTERNET	309

OBJETIVO

Presentar una propuesta de comunicación satelital que optimice el ancho de banda brindado por un satélite geoestacionario que opere en la banda de frecuencias Ka, el alcance de esta propuesta se enfocará en brindar servicios de voz, datos y video para la región de México y Centroamérica tomando como referencia el estándar DVB-S2. Adoptando técnicas que permitan hacer un mejor uso del espectro radioeléctrico y contribuya a mejorar los servicios que hoy en día se tienen en nuestro país y Centroamérica, buscando reducir la brecha digital existente en estas regiones.

CAPITULO 1 ANTECEDENTES

1.1 Definición de Satélite

En el año de 1945 en la revista Wireless World se publicó un artículo titulado Extraterrestrial Relays (Retransmisión Extraterrestre) (Figura 1.1.1), en este, el autor Arthur C. Clarke propone que con sólo tener tres objetos separados entre sí 120° en el espacio desplazándose en el mismo sentido que la Tierra a una distancia tal que el tiempo que tarde en orbitar la tierra sea de 24 horas sería posible intercambiar por radio a casi la totalidad del mundo¹. Para esto se debe situar cada objeto a una distancia aproximada de 42, 000 Km del centro de la tierra, sobre un plano coincidente con el ecuador terrestre y viajar a una velocidad aproximada de 3705 m/s, de esta forma sería visto desde la tierra como un punto fijo (figura 1.1.2)

EXTRA-TERRESTRIAL RELAYS

Can Rocket Stations Give World-wide Radio Coverage?

It is possible, by a suitable choice of the orbits and heights, to provide a continuous service over any part of the earth for a large part of the time. The main difficulty is greatly hampered by the peculiarities of the atmosphere, and these are even greater when it may be necessary to use a broadcast service giving constant high strength in all times over the whole globe would be inevitable, not to say indispensable, to a world service.

The problem is equally serious when an attempt is made to link television services on different parts of the globe. A relay chain several thousand miles long would cover continents and thousands of miles would be impossible. Similar considerations apply to the provision of a high-speed telegraph service, and to high-speed telegraph service, and to high-speed telegraph service.

...the higher frequency, it is not difficult to produce beams that are as good as with such a wavelength. There would be no physical limitations on the size of the mirrors. From the space station, the size of the earth would be a little over 1 degree across. The same mirror would be used for many different transmission frequencies. These would be in the radio range, and would be used for many different transmission frequencies. These would be in the radio range, and would be used for many different transmission frequencies.

...the higher frequency, it is not difficult to produce beams that are as good as with such a wavelength. There would be no physical limitations on the size of the mirrors. From the space station, the size of the earth would be a little over 1 degree across. The same mirror would be used for many different transmission frequencies.

...the higher frequency, it is not difficult to produce beams that are as good as with such a wavelength. There would be no physical limitations on the size of the mirrors. From the space station, the size of the earth would be a little over 1 degree across. The same mirror would be used for many different transmission frequencies.

...the higher frequency, it is not difficult to produce beams that are as good as with such a wavelength. There would be no physical limitations on the size of the mirrors. From the space station, the size of the earth would be a little over 1 degree across. The same mirror would be used for many different transmission frequencies.

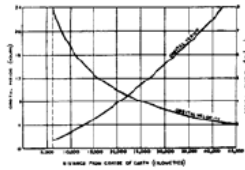


Fig. 1. Variation of orbital radius and velocity with distance from the centre of the earth.

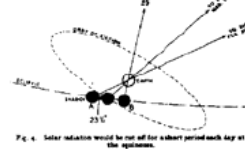


Fig. 2. Solar radiation would be off for almost period each day at the equator.

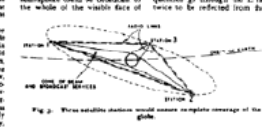


Fig. 3. Three satellite stations would cover complete coverage of the globe.

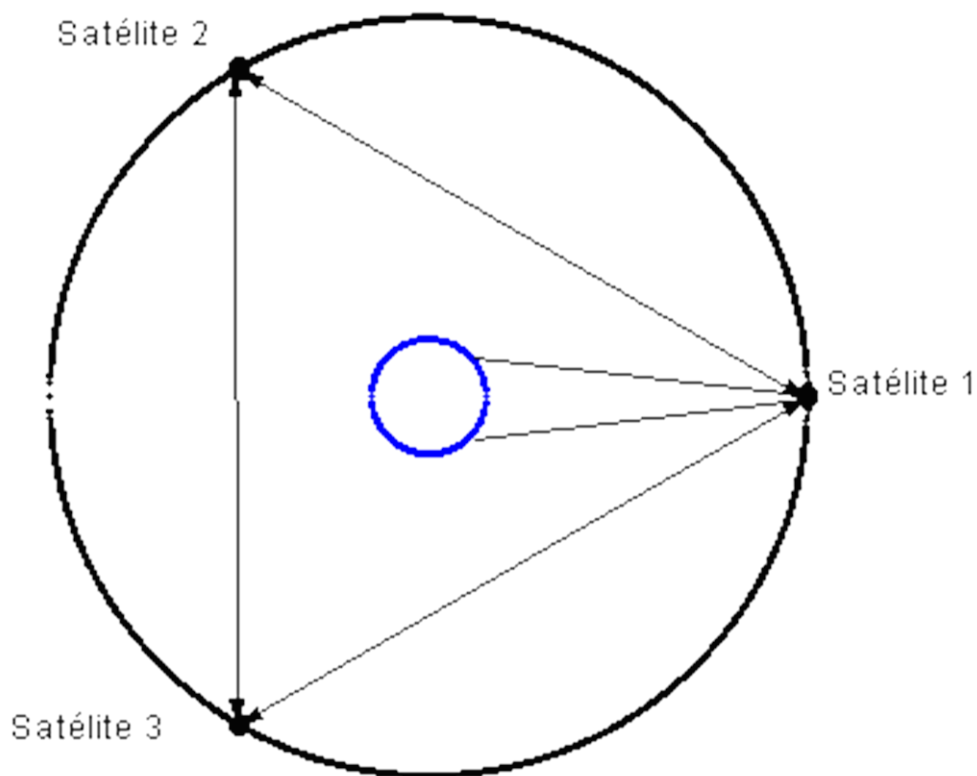


Fig. 4. A Transit satellite in orbit.

¹ The National Museum of Computing: Extra-Terrestrial Relays, (En línea). Consultado el 10 de Julio del 2015 en http://www.tnmoc.org/sites/default/files/Extra-Terrestrial%20Relays2.pdf

Figura 1.1.1. Artículo publicado por Arthur C. Clarke¹

La propuesta de Clarke estaba enfocada a las comunicaciones mediante señales de voz, puesto que el autor creía que solo se podían propagar este tipo de señales porque las condiciones atmosféricas impedirían la propagación de otro tipo de señales. A pesar de la creencia de Clarke y gracias a los avances científicos y tecnológicos, se pueden transmitir varios tipos de señales; siendo en estos días el principal uso de los satélites de comunicaciones la transmisión de señales de video a los hogares.

**Figura 1.1.2 Satélites propuestos por Arthur C. Clarke**

La palabra satélite que proviene del latín *satelles*, puede utilizarse para nombrar dos objetos astronómicos de características muy diferentes.

- Cuerpo celeste que se califica como opaco, porque solo puede brillar al reflejar la luz que llega desde alguna estrella, estos cuerpos tienen la particularidad de girar en torno a un planeta o algún otro cuerpo tales como la luna que es el satélite natural de la Tierra.
- Por otra parte es posible hablar de satélites artificiales que son dispositivos fabricados por el hombre que trazan órbitas alrededor de nuestro planeta o de otro, equipados con el objetivo de recibir y transmitir información.

El artículo de Arthur C. Clarke fue tomado en cuenta y se hizo realidad el 4 de octubre de 1957 con el lanzamiento del primer satélite artificial el cual era de origen Soviético llamado Sputnik-I, este era de forma esférica de 60 cm de diámetro y una masa de 84 Kg, con éste comenzó la carrera espacial.

1.2 Clasificación de los satélites

Existen tres aspectos a tomar en cuenta para clasificar un satélite, estos son: el tamaño del satélite, su aplicación y el tipo de órbita que describen.

La denominación de los satélites con respecto a su tamaño, se debe a un factor de escala en relación con la masa. Esto significa que por debajo de una tonelada se les denomina minisatélites, por debajo de 100 Kg microsátélites, por debajo de 10 Kg nanosatélites y por debajo de 1 Kg picosatélites.

Los picosatélites cumplen funciones básicas como medir el tiempo, enviar ondas de información a un punto específico o tomar fotos; generalmente los picosatélites son construidos en proyectos universitarios con fines científicos. Los nanosatélites usualmente se emplean para construir constelaciones que permitan realizar experimentos y monitorear fenómenos meteorológicos. Los microsátélites son

equipos que se pueden construir con bajo presupuesto y son una alternativa para llevar a cabo misiones de observación de la Tierra. Mientras tanto, los minisatélites no se mantienen fijos en el espacio debido a que están limitados en combustible por su tamaño, comúnmente se emplean para fines de vigilancia e investigación.

El mercado de las comunicaciones satelitales fijas se ha enfocado en el uso de aparatos más grandes, es por ello que se usa una denominación distinta cuando los satélites pesan más de media tonelada, entre los 500 y 1000 Kg se denominan satélites medianos mientras que los satélites que sobrepasan los 1000 Kg se denominan macrosatélites.

Clasificación	Relación a su tamaño
Picosatélites	Menor a 1 Kg
Nanosatélites	De 1 a 10 Kg
Microsatélites	De 10 a 100 Kg
Minisatélites	De 100 a 500 Kg
Satélites Medianos	De 500 a 1000 Kg
Macrosatélites	Mayor a 1000 Kg

Tabla 1.2.1 Clasificación de satélites de acuerdo a su tamaño

Otro de los aspectos que se toma en cuenta para clasificar un satélite es la aplicación de este, a continuación se explican estos tipos de aplicación:

- Científicos: Los satélites se utilizan para tomar medidas y lecturas de fenómenos de interés, algunos transportan organismos o bacterias vivas. Este tipo de satélites son equipados con sensores y procesadores que permitan obtener los datos deseados por los científicos con el propósito de entender el comportamiento del objeto de estudio.

- **Comunicaciones:** Se emplean como repetidores de señales de información para que la señal que porta dicha información pueda llegar a puntos alejados geográficamente. Gracias a este tipo de satélites se pueden comunicar personas de todo el mundo.
- **Observación de la Tierra:** Los investigadores utilizan este tipo de satélites para conocer los efectos climáticos sobre la Tierra, para monitorear huracanes, fenómenos climáticos, fronteras y objetos de interés.
- **Tecnológicos:** Este tipo de satélites sirven para realizar pruebas en el espacio a nuevos inventos, cuentan con procesadores que les permiten coleccionar y procesar los resultados de dichas pruebas para ser transmitidos a las estaciones terrenas.
- **Navegación:** Son muy populares estos satélites dado que sirven a sus usuarios a conocer su posición precisa en la tierra, son empleados para servicios GPS y de geolocalización.

El último aspecto a tomar en cuenta para la clasificar los satélites, es el tipo de órbita que describen en el espacio. Las orbitas se clasifican de acuerdo a su distancia con respecto a la Tierra, el plano orbital y la trayectoria que describen.

Tipos de Orbitas	
Parámetro	Orbita
De acuerdo a su distancia con la Tierra	Bajas, Medias, Geosíncronas y Altas
De acuerdo al Plano orbital	Polar, Ecuatorial e Inclinada
De acuerdo a su Trayectoria	Circular y Elíptica

Tabla 1.2.2 Tipos de Orbitas

1.3 Orbitas satelitales.

Las orbitas satelitales son trayectorias definidas por el giro de un cuerpo celeste respecto de otro, esto encuentra su fundamento en las propiedades de las órbitas satelitales que se basan en las 3 leyes del movimiento planetario de Kepler, quien las descubrió al observar el movimiento de Marte. Estas leyes establecen el movimiento con respecto al sol; y son aplicables a los satélites con respecto a la Tierra. Estas se pueden explicar de la siguiente manera:

- Primera Ley de Kepler: Los planetas se desplazan en trayectorias elípticas, y el sol está en uno de los focos de la Elipse.

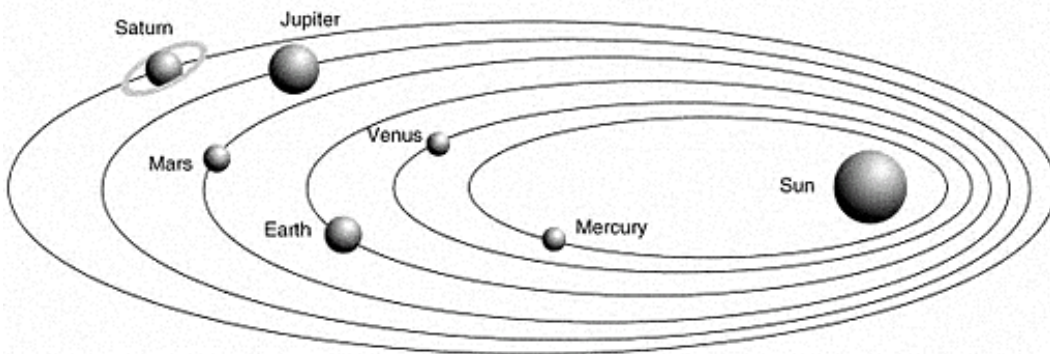


Figura 1.3.1 Primera ley de Kepler

- Segunda ley de Kepler: Cuando el planeta está más alejado del sol su velocidad es menor que cuando está más cercano al sol.

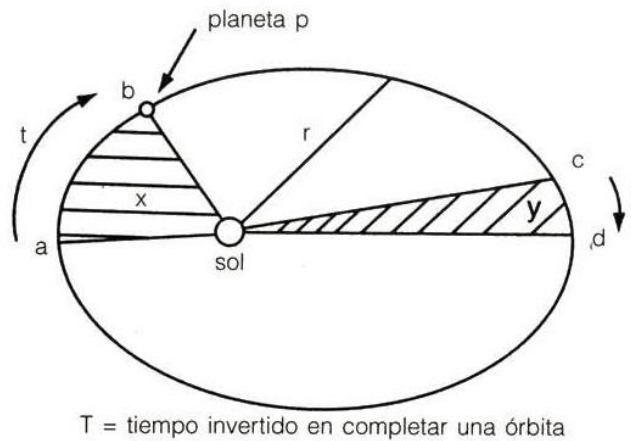


Figura 1.3.2 Segunda ley de Kepler

- Tercera ley de Kepler: El cuadrado del periodo orbital es proporcional al cubo de su eje mayor.

$$\frac{T^2}{R^2} = K \text{ (CONSTANTE) donde}$$

T = periodo orbital

R = semieje mayor de la órbita

Cabe mencionar que dos satélites en la misma órbita no pueden tener diferentes velocidades. Si a un satélite en una órbita circular se le incrementa su velocidad por un impulso, no podrá moverse más rápido en esa órbita, sino que la órbita se convertirá en elíptica.

Bajo este concepto se desprenden distintas formas orbitales como son:

- Órbita Baja (LEO): Situada a una altura de 500 a 2000 Km de altura. Aquí el satélite viaja a una gran velocidad y da una vuelta a la Tierra entre 1.5 a 2 horas. Los satélites con este tipo de órbita son utilizados en sistemas de comunicaciones móviles.

- **Orbita Media (MEO):** Situada a una altura de 8000 a 20000 Km de altura. Aquí se describe una órbita elíptica con un periodo de 6 horas. Los satélites que operan en esta orbita son muy utilizados para comunicaciones móviles.
- **Órbita Geoestacionaria (GEO):** Situada a una altura de 35786 Km de altura y ubicada sobre el ecuador, circula con un periodo de rotación de 24 horas, igual que el de la Tierra, por lo que un satélite geoestacionario aparenta estar en la misma posición relativa respecto a un punto sobre la superficie de la Tierra, este escenario lo hace apto para comunicaciones.
- **Orbita muy Elíptica (HEO):** con un perigeo situado a unos 500 Km y con un apogeo a 50000 km se describe un periodo que varía de 8 a 24 horas.

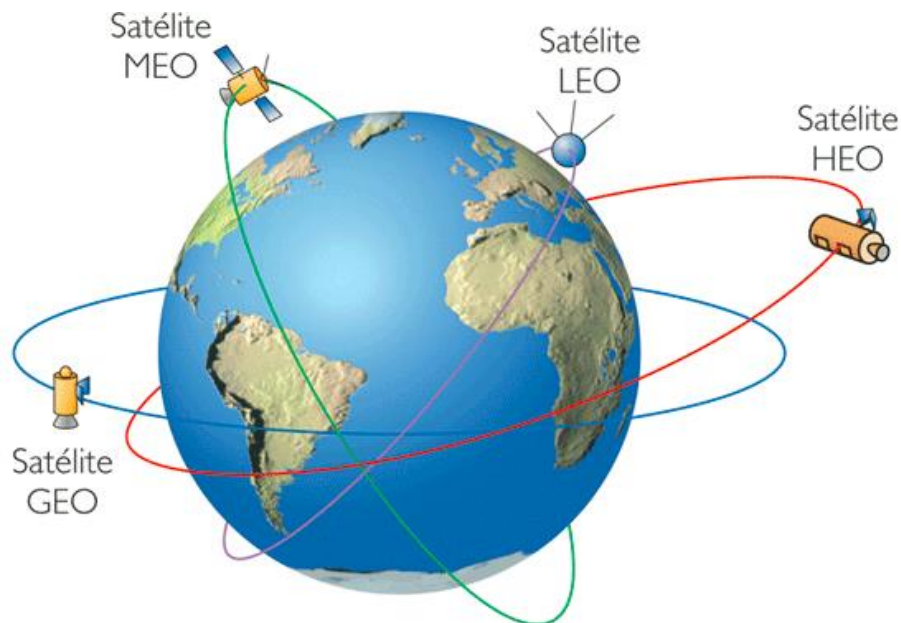


Figura 1.3.3 Órbitas satelitales

A su vez las Órbitas también se pueden identificar y clasificar de acuerdo a su ángulo de inclinación donde el ángulo es aquel comprendido entre el plano ecuatorial y el plano de la órbita satelital, al entrar el satélite en el hemisferio Norte,

por lo tanto, según el plano orbital con respecto al ecuador, las orbitas de los satélites artificiales pueden clasificarse en:

- **Orbita Ecuatorial:** En este tipo de órbita la trayectoria del satélite sigue un plano paralelo al ecuador por lo que tiene un ángulo de inclinación de 0 grados.
- **Orbita Inclinada:** En su curso, la trayectoria del satélite sigue un plano con un cierto ángulo de inclinación respecto al ecuador.
- **Orbita Polar:** Esta orbita sigue un plano paralelo al eje de rotación de la tierra, pasando sobre los polos norte y sur. Es perpendicular al ecuador.

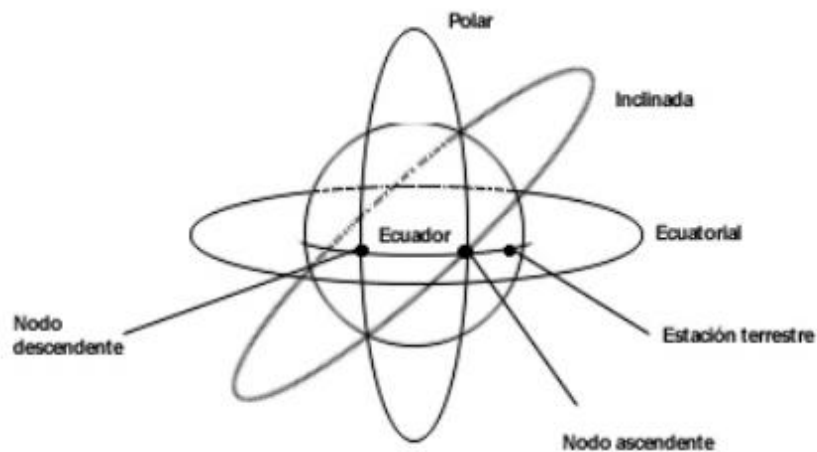


Figura 1.3.4 Ángulos Orbitales

Las orbitas satelitales tienen múltiples diferencias que se deben a su uso y aplicación entre otros, sin embargo existe otro factor que influye en la razón de la existencias de las orbitas satelitales.

Esta razón es debido a la alta concentración de partículas ionizadas provocadas por el campo electromagnético de la Tierra, estos campos tienen una forma toroidal y son denominados como cinturones de Van Allen, existen uno interior y uno exterior.

El cinturón interior se encuentra entre 1500 y 5000 Km por encima de la superficie terrestre, por lo que es importante que los satélites LEO se encuentren por debajo de los 1500 Km para que no entren en contacto con la radiación de este cinturón, ya que puede ser muy perjudicial, incluso los puede destruir.

El cinturón exterior se extiende entre los 15000 y 20000 Km. Este cinturón en concreto no afecta a los satélites MEO y GEO.

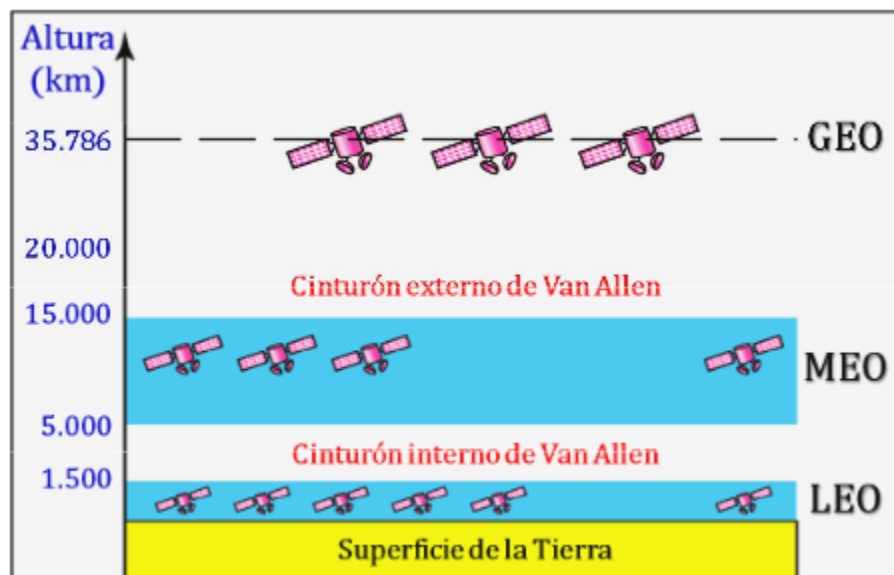


Figura 1.3.5 Cinturones de Van Allen

1.4 Bandas de frecuencia que utilizan los satélites.

Los sistemas de telecomunicaciones utilizan el espectro radioeléctrico, el cual corresponde a una porción del espectro electromagnético y es esta porción en

donde operan los distintos servicios de telecomunicación tales como: las emisoras de radio (AM y FM), las de televisión abierta (por aire) y microondas, de telefonía celular, los sistemas satelitales, los radioaficionados, las comunicaciones vía Internet, los radiomensajes (*paggers*), las comunicaciones de aeronaves, buques, transporte terrestre, entre otros

Debido a la gran cantidad de servicios que pueden prestarse por medio del espectro radioeléctrico, su organización y regulación resulta indispensable para permitir el desarrollo del mismo, de eso se encarga la UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT), el control y gestión del espectro se da principalmente por medio de tratados y/o acuerdos internacionales que fijan los lineamientos que habrán de adoptarse posteriormente al interior de cada país.

En lo que concierne a la administración del espectro, éste se subdivide en bandas de frecuencia, que corresponden a una porción del espectro radioeléctrico y cuya división se realiza atendiendo a criterios técnicos relacionados con los servicios que, por las características propias de la porción designada, resultan mayormente viables en determinada banda.

Para las comunicaciones satelitales, se utilizan las bandas de frecuencia que se presentan en la tabla 1.4.1.

BANDA	FRECUENCIAS	TIPO DE SERVICIO	USOS PRINCIPALES
VHF	145 MHz	Fijo	Televisión
UHF	435 MHz	Móvil	Telefonía celular
L	1.6 a 1.4 GHz	Móvil	GPS
S	2.7 a 2.5 GHz	Móvil	Navegación

C	6 a 4 GHz	Fijo	Televisión, voz y datos
X	8 a 7.5 GHz	Militar	Televisión Satelital
Ku	14 a 11 GHz	Fijo	Voz, datos, imagen.
Ka	29 a 19 GHz	Fijo	COMUNICACIÓN SATÉLITAL

Tabla 1.4.1 Frecuencias utilizadas en satélites.

Actualmente los satélites operan principalmente en tres bandas, las cuales son la banda C, Ku y Ka; de estas tres bandas la banda Ka alberga con más facilidad grandes anchos de banda y por ende tiene un amplio índice de transmisión de datos.

1.5 Arquitectura de un Satélite de comunicaciones

Un satélite artificial, no es otra cosa más que el vehículo para alguna aplicación específica que se quiere usar en el espacio, por lo que este vehículo deberá proveer todas las facilidades para que dicha aplicación se lleve a cabo de forma adecuada en un medio hostil como lo es el espacio. Independientemente de la aplicación de un satélite, este siempre contara con una configuración básica formada por diversos subsistemas. Tales subsistemas tienen distintas características dependiendo del tipo de satélite que se trate, sin embargo para la mayoría de los satélites los subsistemas son los mismos. Estos subsistemas son, estructura, control térmico, energía eléctrica, computadora de control, sistema de comunicaciones, control de posición y carga útil.

A continuación la descripción de cada uno de ellos:

- Sistema de estructura: El sistema de estructura es el encargado de delimitar el espacio que será utilizado para conformar el satélite. Debe ser capaz de albergar a cada uno de los distintos subsistemas sin que estos interfieran entre sí. Además, da el soporte necesario para que cada subsistema se encuentre en una posición específica antes y después de ser lanzado.

Debido a que se tienen limitaciones en cuanto al peso que un cohete puede llevar al espacio, se busca que la estructura sea lo más ligera posible, pero a su vez se busca que sea lo más resistente posible, ya que cuando el satélite se encuentre en órbita no se verá afectado por grandes esfuerzos mecánicos, durante el despegue en el cohete si lo hará. Al momento del despegue, el cohete genera grandes vibraciones y aceleraciones que son transmitidas al objeto que se pretende poner en el espacio. Por tal motivo, la estructura juega un papel muy importante, Ya que en este se buscará acomodar cada uno de los subsistemas de la forma más segura, también se realiza el estudio del centro de masa para procurar que en el centro de masas se localice lo más cercano al centro del satélite. Ver figura 1.5.1.

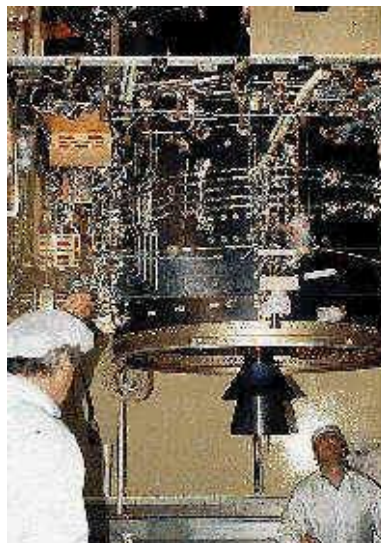


Figura 1.5.1 Sistema de estructura de un satélite.

- Sistema de suministro de energía: El subsistema de energía eléctrica se conforma por las baterías, los circuitos que regulan y distribuyen la energía eléctrica y los paneles solares. Existen diversos tipos de baterías y paneles solares. En satélites pequeños, dichas baterías suelen ser de Níquel-Cadmio y los paneles solares de Arseniuro de Galio, esto por sus altas eficiencias. Por lo general en todos los satélites el sistema de regulación y distribución de energía eléctrica está hecho con fuentes conmutadas DC-DC que son más eficientes que los reguladores en línea porque tienen altas pérdidas por calor. Este subsistema se encarga de proveer la energía eléctrica necesaria a otros subsistemas para que éstos funcionen. Los paneles solares transforman la energía solar en energía eléctrica, la cual es almacenada en las baterías para después ser regulada y distribuida a los otros sistemas.

En misiones de muy larga duración (como la exploración de los planetas gigantes) el sistema de energía se ve también apoyado por pequeñas baterías atómicas. Éstas sólo son permitidas en misiones muy particulares debido al riesgo que representa una falla en el lanzamiento y por lo tanto la contaminación que esta podría provocar a la tierra. Ver figura 1.5.2.



Figura 1.5.2 Sistema de energía de un satélite.

- Sistema de control: La computadora principal es la encargada de coordinar las tareas de cada subsistema, está programada de tal forma que permite al satélite tener cierto grado de autonomía. Comúnmente utiliza microprocesadores endurecidos a la radiación y memorias con detección y corrección de errores. Este tipo de componentes son altamente requeridos sobre todo en los satélites que cruzan los cinturones de radiación alrededor de la tierra también conocidos como cinturones de Van Allen. Existen estudios que revelan que los componentes electrónicos ordinarios sometidos a esta radiación sufren un rápido deterioro, por tal motivo los componentes de tipo digital como memorias o microprocesadores pueden sufrir la alteración de la información almacenada o el cambio de algunos bits en su estructura interna lo cual ocasionaría la pérdida del satélite. Ver figura 1.5.3.



Figura 1.5.3 Sistema de control alimentado por baterías en un satélite.

- Sistema de comunicaciones: El sistema de comando y telemetría comúnmente está formado por un transmisor, un receptor, sus respectivas antenas y diverso sensores de temperatura, corrientes, voltajes entre otros distribuidos en puntos estratégicos del satélite. Dado que el canal de transmisión en la mayoría de los casos es el espacio libre, se utilizan las

ondas electromagnéticas para realizar la comunicación, sin embargo existen sistemas experimentales que utilizan el espectro visible de las ondas electromagnéticas y se les conoce como comunicaciones ópticas. Existen bandas en el espectro electromagnético que están reservadas para el uso de los satélites.

En la mayoría de los casos, este sistema cuenta con redundancia, es decir existen más de un transmisor y receptor en el satélite que podrán ser usados en el caso de que alguno de ellos fallara. Este sistema de comunicación permite conocer en tierra como se encuentra el satélite en algún momento determinado, además de comandarlo enviando instrucciones para que se realice alguna tarea específica y de conocer el estado del satélite. Véase figura 1.5.4.

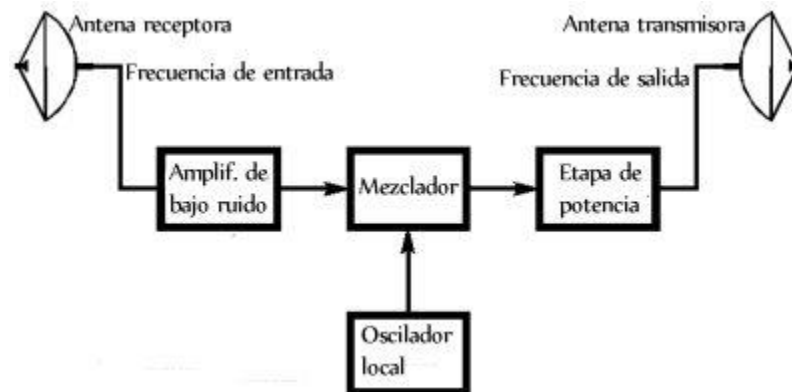


Figura 1.5.4 Sistema general de comunicaciones en un satélite.

- Sistema de posicionamiento: El sistema de posicionamiento se encarga de mantener al satélite en una posición específica. Un objeto en el espacio se ve sometido a distintas perturbaciones gravitacionales y de arrastre (Drag), Las perturbaciones gravitacionales son debidas principalmente a los grandes cuerpos celestes como son la luna, el sol, Júpiter y las irregularidades del campo gravitacional terrestre. Adicional a estas perturbaciones existe el arrastre o fuerzas de fricción que modifica la posición de un cuerpo en el

espacio y que son provocadas principalmente por el viento solar y las partículas materiales que son emitidas por otros cuerpos.

Existen distintos tipos de control de posición dependiendo de la precisión que se requiera para mantenerlo en esta. Hay dos formas de llevar a cabo dicho control, de forma pasiva o de forma activa. De la manera pasiva existe la estabilización por gradiente de gravedad, el cual consiste en colocar al satélite un brazo con una masa en su extremo, funciona debido a las diferencias de masas entre el satélite y dicha masa, como si fuera una boya en el mar provocando que el satélite mantenga un relativo apuntamiento hacia la tierra. Otra forma pasiva es con imanes permanentes en el cuerpo del satélite, lo cual provocará una posición relativa del satélite con respecto al campo magnético de la tierra ya que los imanes tenderán a alinearse con este.

Entre los controles activos tenemos los volantes de inercia, magnéticas y pequeños motores de gas a chorro. Los volantes de inercia son discos de cierta masa que giran en ciertos ejes y debido a la ley de conservación del movimiento provocan cambios en la posición del satélite. Las magnéticas son usadas en satélites de órbita baja, para poder sentir en gran intensidad del campo magnético de la tierra. Generalmente se utilizan junto con un magnetómetro (Aparato que permite conocer la intensidad del campo magnético en ejes específicos). Una vez que el magnetómetro indica dicho campo en distintos ejes, las magnetorcas actúan como electroimanes para generar campos magnéticos que le permitan interactuar con el campo magnético de la tierra y así provocar el cambio de posición del satélite. Los motores de gas o líquido a chorro trabajan arrojando pequeños chorros de fluido a través de una tubería, lo que da al satélite un cambio en su posición. Existen también los motores de iones que funcionan acelerando partículas cargadas de masas pequeñas que son expulsados por un extremo haciendo que el satélite se mueva al extremo contrario de donde están siendo expulsadas, la ventaja de este tipo de motores es que utilizan pequeños

tanques de gas Xenón que son mucho más pequeños comparados con los tanques para motores de fluidos a chorro empleados más comúnmente. Véase figura 1.5.5.

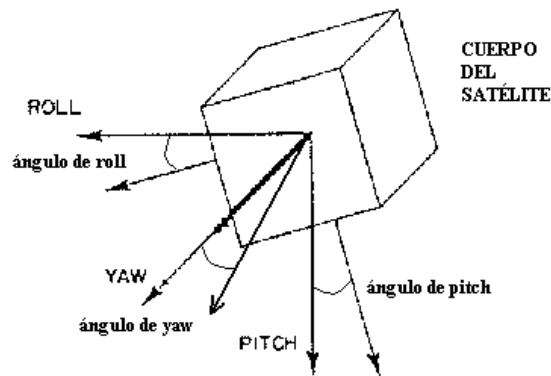


Figura 1.5.5 Sistema de posicionamiento del satélite.

- Blindaje térmico: Como ya se mencionó anteriormente, existen cambios bruscos de temperatura que dependerán del hecho de que el satélite este en presencia de luz solar o no. El hecho de no existir aire en el espacio (a diferencia de la tierra) para usarlo como enfriador nos lleva a desarrollar otras técnicas para lograr mantener la temperatura de operación dentro de ciertos rangos (comúnmente van de -40°C a 60°C).

El control de temperatura puede ser activo o pasivo. Cuando un giro constante sobre uno de sus ejes es provocado al satélite, este mantiene una temperatura uniforme y el control de temperatura es relativamente sencillo, pero cuando no se le pueden dar este giro y debe permanecer en una posición específica, este control se vuelve más complejo, utilizando dispositivos de refrigeración y calefacción como pueden ser tubos conductores, los cuales reducen o aumenta la temperatura en distintas partes del satélite según sea el caso con el objeto de mantenerlo dentro del intervalo especificado de temperaturas. En la gran mayoría de los casos el aislante es la que da el color dorado característico de muchos satélites. Véase figura 1.5.6.

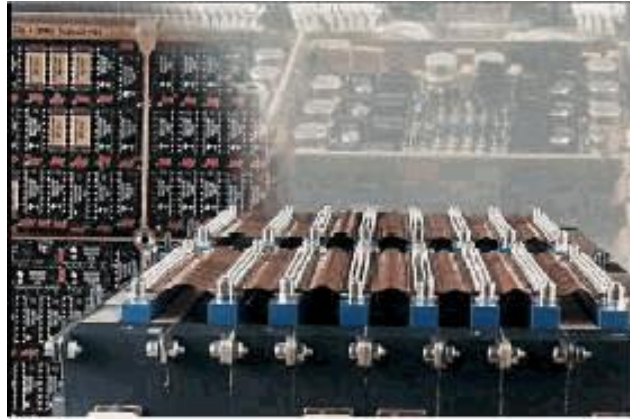


Figura 1.5.6 Calentadores térmicos del satélite.

- **Carga útil:** Por último la carga útil es la que definen la aplicación del satélite. Ésta puede ser desde un nuevo tipo de sensor que se quiere probar en el espacio hasta un sistema de comunicación de aplicación específica. Por lo tanto la carga útil definirá mucho de los parámetros de los subsistemas empezando por el tamaño, presupuesto energético, tipos de subsistemas de control térmico y de orientación, tipo de orbita en el cual debe ser colocado, etc. Véase figura 1.5.7.



Figura 1.5.7 Carga útil en un sistema solar.

1.6 Descripción general de un satélite geoestacionario

Los satelites geoestacionarios se ubican en la orbita Geoestacionaria cumpliendo la caracteristica de un periodo orbital de 24 horas aproximadamente el cual es el tiempo que la Tierra tarda en dar una vuelta sobre su propio eje haciendolo ver desde la Tierra como un punto fijo en el cielo, esta caracteristica tiene una ventaja en cuanto al efecto Doppler que es casi nulo. Los satelites geoestacionarios tiene el perigeo (punto de la orbita mas cercano a la Tierra) y apogeo (punto de la orbita mas lejano de la Tierra) iguales, es decir, una orbita circular a diferencia de otros tipos de satelites que tiene perigeo y apogeo distintos.

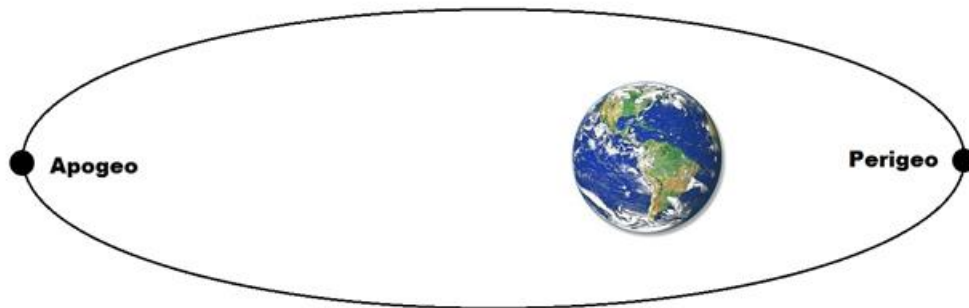


Figura 1.6.1 Perigeo y apogeo

El plano orbital del satelite geoestacionario corresponde con el plano ecuatorial de la Tierra que representa una inclinación de 0° con respecto al plano ecuatorial. La altura en la que operan los satelites geoestacionarios es de 35,786 km teniendo así una velocidad orbital de 3,075 Km/s, cumpliendo esto, el satelite logra escapar de la atracción de la Tierra, si llegase a reducir la velocidad lo haría caer hacia ella y si llegase a aumentar la velocidad se saldría de órbita. Como lo mencionó Arthur C. Clarke, la Tierra podría tener cobertura global con solo 3 satelites, sin embargo, tienen mala cobertura en los polos.

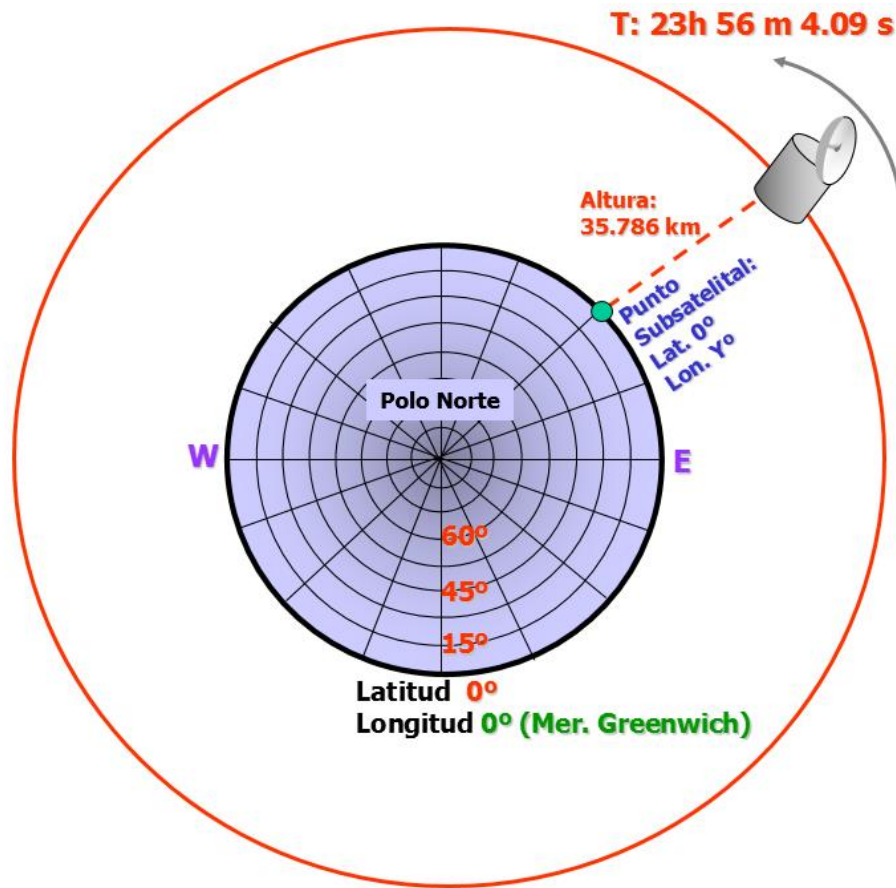


Figura 1.6.2 Satélite Geoestacionario

Los satélites Geoestacionarios requieren antenas parabólicas de gran sensibilidad ya que la señal viaja una gran distancia (35,786 Km) y en el viaje a través de la atmósfera se va atenuando, por la misma razón son necesarios amplificadores de bajo ruido además que la señal tendrá retardos superiores a los 240 ms. Todos estos factores hacen que sea un satélite muy costoso por el viaje que tiene que hacer el sistema de transporte de la tierra hasta los 35,786 km de altura que se logra en un proceso de varias etapas.

CAPITULO 2 PANORAMA ACTUAL DE LA BANDA Ka

2.1 Situación de la banda Ka en el mundo.

A medida que la tecnología espacial avanza, cada vez más satélites son puestos en órbita para fines militares, comerciales y científicos. El costo de poner en órbita o elevar a la atmosfera un satélite ha caído de los miles de millones a unos pocos millones de dólares o incluso mucho menos en el caso de satélites pequeños. Esto pone la puesta en órbita de satélites al alcance de la economía de muchos países y compañías internacionales. Actualmente existen aproximadamente 3000 satélites operando alrededor de la Tierra y un aproximado de 8000 satélites orbitando sin operar.

De los satélites de comunicaciones que se encuentran orbitando la Tierra la gran mayoría opera en las bandas C, Ku y Ka. Como podemos ver en la figura 2.1.1 podemos notar que la banda Ka cuenta con mayor ancho de banda.

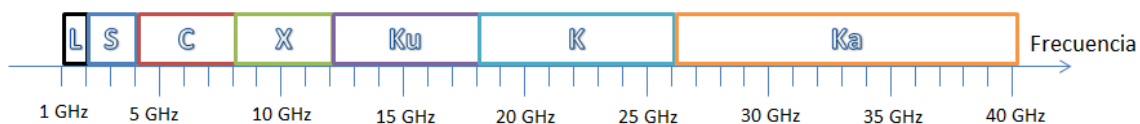


Figura 2.1.1 Bandas de frecuencia usadas por satélites.

Cabe señalar que específicamente los rangos de frecuencia de los enlaces de subida, no pertenecen al rango de frecuencia Ka sino al rango de frecuencia K. Véase figura 2.1.2.

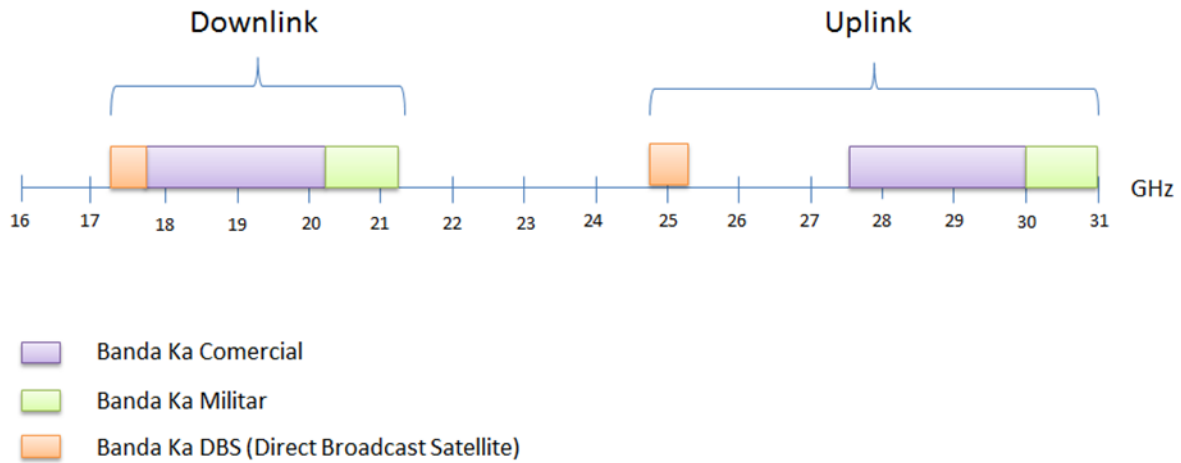


Figura 2.1.2 Subdivisión de la banda de frecuencia Ka de acuerdo a su uso.

En la industria, convencionalmente a las redes cuyos enlaces de subida operan en banda K y los de bajada operan en banda Ka, se le denomina redes en banda Ka. Esta asignación permite tener un eficiente desempeño y evitar interferencias entre las redes. A continuación, en la tabla 2.1.1 se muestra esta división:

Nombre	Rango de Subida [GHz]	Rango de Bajada [GHz]	Ancho de Banda [GHz]
Banda Ka Comercial	17.7 – 20.2	27.5 – 30	2.5
Banda Ka Militar	20.2 – 21.2	30 – 31	1
Banda Ka DBS	17.3 – 17.8	24.75 – 25.25	0.5

Tabla 2.1.1 Subdivisión de la banda de frecuencia Ka.

Para el uso comercial, se mantiene la ventaja de disponer de mayor ancho de banda que en las bandas C y Ku que cuentan con un ancho de banda de 0.5 GHz, que es pequeño a comparación de los 2.5 GHz en banda Ka.

A continuación se enlistan los operadores satelitales de mayor presencia y reputación en el mundo. Estas empresas cuentan con grandes flotas satelitales que se encargan de comunicar al mundo. La mayoría de las siguientes empresas implementan constantemente nuevas tecnologías para mantenerse a la vanguardia y ofrecer mejores servicios a sus usuarios. Ver tabla 2.1.2.

Operador	Descripción
Intelsat	International Telecommunications Satellite Organization, actualmente cuenta con una flota de 61 satélites situados en órbita geoestacionaria, es la flota de más grande en el mundo.
Eutelsat	European Telecommunications Satellite, es el mayor operador de satélites en Europa, con sede en París, Francia. Actualmente opera 29 satélites con cobertura en Europa, África, Asia y una parte de América.
Inmarsat	La International Maritime Satellite Organization fue creada en 1979 y cuenta con 11 satélites geoestacionarios que dan cobertura a prácticamente todo el mundo. Ofrece la retransmisión de voz, datos y comunicaciones IP.
American SES	Es uno de los principales operadores satelitales en el mundo, cuenta con una flota de 52 satélites geoestacionarios.
Telesat	Es una compañía canadiense de comunicaciones por satélite; su sede se encuentra en Ottawa y cuenta con una flota de 13 satélites.
Hispasat	Es un operador de satélites espaciales español que ofrece coberturas en América, Europa y Norte de África. Constituido en 1989.
Star One	Compañía Brasileña que cuenta con una flota de siete satélites, cuenta con una cobertura en Sudamérica centrándose en Brasil.
Satmex / Eutelsat Americas	Satélites Mexicanos fue comprado por Eutelsat para incluir la flota de satélites de Satmex a Eutelsat Americas. Cuenta con tres satélites en operación que ofrecen cobertura local, regional y continental.

Tabla 2.1.2 Principales operadores satelitales en el mundo.

La gran mayoría de los satélites de comunicaciones operan en las bandas de frecuencia L, C y Ku; por ser bandas que se vienen utilizando desde hace varios años y la tecnología que se ha desarrollado en los últimos años permite implementar redes eficientes. El mercado satelital de comunicaciones se acoplo para trabajar en estas bandas desarrollando dispositivos que permitan explotarlas útilmente.

El problema de utilizar las bandas convencionales, es que estas bandas se están saturando debido a que la mayoría de los operadores satelitales trabajan en ellas. Para estar a la vanguardia es necesario apostar y arriesgarse a trabajar en frecuencias poco usadas como la banda Ka.

Se sabe que en regiones como Europa se han implementado algunas redes de comunicaciones que trabajan con esta banda, la implementación en dicha región ha sido satisfactoria y económicamente redituable.

Empresas en el mundo están considerando a la banda Ka como una gran oportunidad de incrementar ganancias. Esto provoca que se estén realizando estudios, congresos e investigaciones para entender las características de esta banda y encontrar la mejor manera de explotarla. Ver figura 2.1.3.



Figura 2.1.3 Crecimiento previsto de abonados a servicios de banda ancha por satélite²

² La banda ancha por satélite alcanza la mayoría de edad (En línea). Consultado el 20 de Julio del 2015 en <https://itunews.itu.int/es/2746-La-banda-ancha-por-satelite-alcanza-la-mayoria-de-edad.note.aspx>

Actualmente, existen algunos satélites de comunicaciones con cobertura en el continente americano que utilizan la banda Ka. De acuerdo a la información de Unión Internacional de Telecomunicaciones, se tiene que los siguientes satélites cuentan con cobertura sobre el continente americano. Véase tabla 2.1.3.

Nombre	Posición	Operador	Carga
Galaxy 23	121°W	Intelsat	4 Tp's Banda Ka
Anik F3	119°W	Telesat Canada Ltd.	2 Tp's Banda Ka
ViaSat 1	115°W	ViaSat Inc.	56 Tp's Banda Ka
WildBlue 1	111.1°W	ViaSat Inc.	42 Haces Puntuales
Anik F2	111.1°W	Telesat Canada Ltd.	50 Tp's Banda Ka
Echostar 17	107.1°W	Hughes Network Systems	60 Haces Puntuales
Spaceway 1	102.8°W	Directv Inc.	72 Tp's Banda Ka
Directv 12	102.8°W	Directv Inc.	32 Tp's Banda Ka
Directv 10	102.8°W	Directv Inc.	55 Haces Puntuales
Directv 9S	101°W	Directv Inc.	2 Tp's Banda Ka
Spaceway 2	99°W	Directv Inc.	72 Tp's Banda Ka
Directv 11	99°W	Directv Inc.	32 Tp's Banda Ka
Spaceway 3	95°W	Directv Inc.	38 Haces Puntuales

Tabla 2.1.3 Satélites en banda Ka con cobertura en América.

La compañía Directv Inc. cuenta con el mayor número de satélites en América, sus satélites cuentan con gran capacidad para trabajar en banda Ka. Esta compañía ha invertido gran capital para operar estos satélites, con la visión de participar en un mercado de banda ancha.

A continuación, en la Figura 2.1.4 se muestran mapas con las coberturas en la banda de frecuencia Ka de algunos de los satélites citados en la tabla anterior:

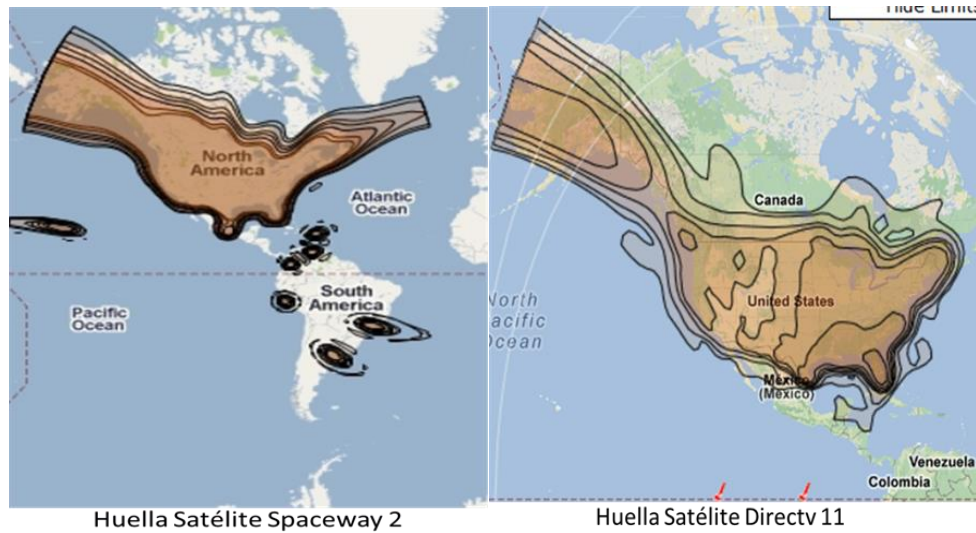


Figura 2.1.4 Coberturas de los satélites Spaceway 2 y Directv 11.

Como se puede observar en los mapas anteriores, los satélites no tienen gran cobertura en banda Ka sobre nuestro territorio. Los satélites que llegan a radiar a México, lo hacen de forma parcial dado que solo cubren la zona de la frontera norte.

De igual forma que para el continente americano, de acuerdo a la información de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, los satélites que radian en banda Ka sobre el continente Europeo son los siguientes mostrados en la tabla 2.1.4.

Nombre	Posición	Operador	Carga
Astra 4A	4.8°E	SES.	2 Tp´s Banda Ka
Eutelsat 7A	7°E	Eutelsat	Banda Ka
Eutelsat Ka-Sat 9A	9°E	Eutelsat	82 Haces Puntuales
Eutelsat Hot Bird 13A	13°E	Eutelsat	4 Tp´s Banda Ka
Astra 1L	19.2°E	SES	2 Tp´s Banda Ka
Astra 3B	23.5°E	SES	4 Tp´d Banda Ka
Intelsat 20	68.5°E	Intelsat	2 tp´s Banda Ka

Tabla 2.1.4 Satélites en banda Ka con cobertura en Europa.

Como se muestra en la tabla anterior, la mayoría de los satélites que trabajan en banda Ka cuentan con pocos transpondedores, esto se debe a que muchos de ellos son satélites experimentales, que trabajan principalmente en otras frecuencias y se les asignaron unos cuantos transpondedores para experimentar con la banda de frecuencia Ka. A continuación se ilustran las coberturas de algunos de los satélites mencionados en la tabla anterior. Véase figuras 2.1.5 y 2.1.6.

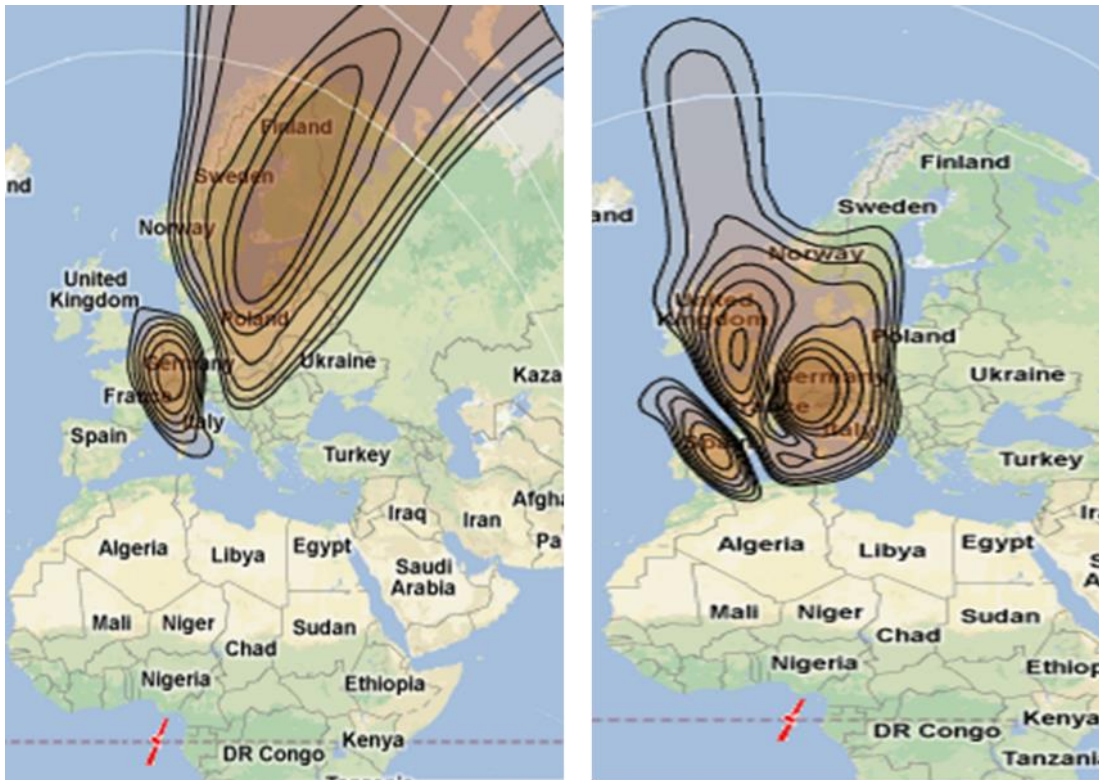


Figura 2.1.5 Cobertura del satélite Astra 4A.

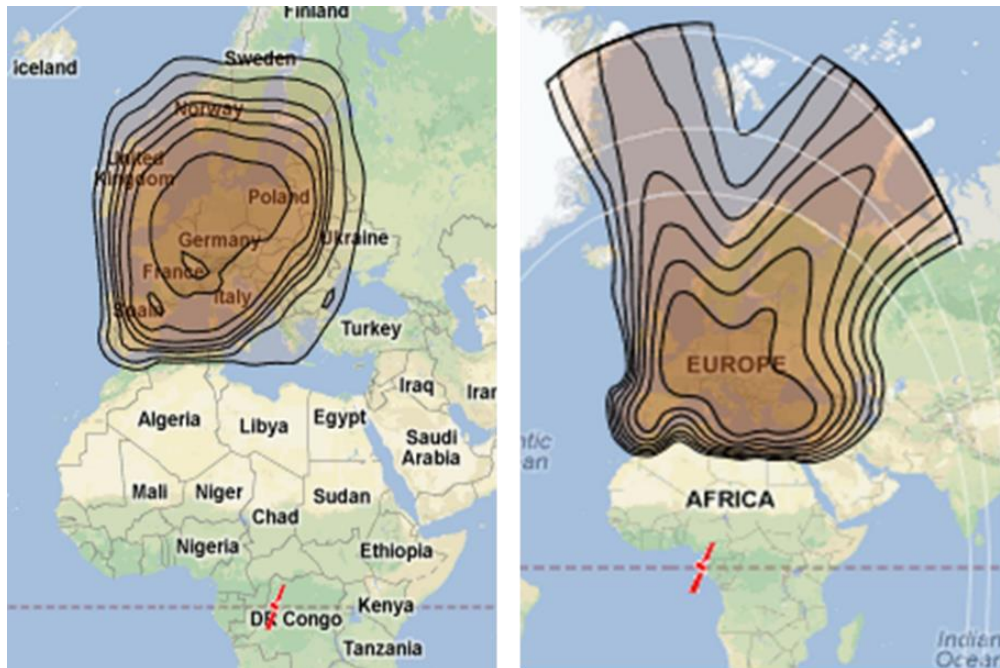


Figura 2.1.6 Cobertura satélites Astra 1L y Eutelsat 7A.

En la siguiente tabla 2.1.5, se enlistan otros satélites que trabajan en la banda Ka, los cuales principalmente tienen cobertura sobre los continentes de África y Asia.

Nombre	Posición	Operador	Carga
Arabsat 5C	20°E	Arabsat	4 Tp's Banda Ka
Badr 5	26°E	Arabsat	4 Tp's Banda Ka
Arabsat 5A	30.5°E	Arabsat	Haz Dirigible
Nigcomsat 1R	42.5°E	Nasrda	8 Tp's Banda Ka

Tabla 2.1.5 Satélites en banda Ka con cobertura en África y Asia.

2.2 Aplicaciones de la banda Ka

Como bien se sabe, los beneficios de utilizar esta banda se encuentran principalmente en la posibilidad de ofrecer comunicaciones de doble vía ya que se cuenta con un ancho de banda y frecuencias que así lo permiten, si bien los gastos de operación son elevados, las aplicaciones tienden a cubrir las necesidades de los usuarios y permiten a su vez tener una mayor penetración de los servicios en la sociedad, dándole un sentido positivo en la sociedad y en el sector privado.

Las principales aplicaciones que se pueden atribuir a esta banda son las siguientes:

1. Servicios de internet de alta velocidad.

Es posible entregar un servicio de internet asimétrico con una velocidad aproximada de 3Mb de enlace de subida, este sistema se ha implementado por la empresa española “Movistar”. Esta tasa de transferencia no se puede comparar con la obtenida en una red terrestre implementada en una zona urbana, sin embargo es de alto impacto en zonas rurales donde las redes terrestres tienen su limitante, lo que genera mejoras en diferentes áreas de desarrollo como educación e investigación.

2. Comunicación por VoIP.

Es posible mejorar la calidad de los servicios fijos por satélite, uno de los más importantes es la comunicación de voz seguido por el servicio de teleconferencia. Los usuarios pueden establecer una comunicación simultánea y bidireccional de audio y video, ampliando la calidad y mejoras de formas gráficas y transmisión de datos, dando origen a una mejora de productividad e integración entre grupos de trabajo situados en lugares geográficos completamente distintos. Es importante mencionar que cuando se habla del tema de transmisión de voz, hablamos de transmisión de datos en tiempo real,

por lo que es necesario tomar en cuenta que se cuenta con un margen pequeño en la pérdida de paquetes.

3. Distribución de contenido digital.

Esta aplicación se trata de brindarle al usuario una cartera de servicios de su agrado, por esta razón se pueden encontrar a los broadcasters situados en esta aplicación, ya que gracias al beneficio del ancho de banda, se pueden ofrecer contenidos de entretenimiento en alta definición y personalizada, logrando cautivar al usuario a la vez de que se amplía la penetración del servicio y acceso a la comunicación, tecnología y conocimiento.

4. Implementación de servicios regionales y segmentación de servicios.

Es posible generar redes privadas, gracias a que la información no pasa por el canal de internet, sino por la infraestructura de interconexión entre la estación terrena y el satélite, esto brinda la posibilidad de aislar la red y ofrecer mayor seguridad ya que se implementan canales dedicados para la transferencia de datos. Esto tiene sentido cuando se trata de un uso gubernamental, educativo, de investigación o de comercialización ya que se trata de un uso particular que puede llevar a cabo un solo sector con la necesidad de estar aislado de otros.

De esta manera se pueden establecer redes de respaldo o redundantes de acuerdo a las limitantes de recursos terrestres, la necesidad y condiciones del usuario.

2.3 Ventajas de la Banda Ka

- Gran ancho de banda disponible.

Como se comentó con anterioridad, el ancho de banda reservado para el servicio comercial en la banda de frecuencia Ka es mucho mayor que el reservado para las bandas convencionales C y Ku. La banda de frecuencias Ka, tiene un rango que va de los 25 a los 40 GHz. A pesar de que es un rango muy grande, no todo se utiliza exclusivamente para servicios satelitales; se encuentra atribuido para diferentes tipos de servicio como radionavegación, radioastronomía, radiolocalización, comunicación entre satélites, investigación espacial, exploración de la tierra y servicios fijos y móviles por satélite.

La atribución antes mencionada, se puede consultar con mayor detalle en el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias, que se basa en conformidad con la atribución mundial publicada en el artículo 5 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones.

El Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias, indica banda por banda, la forma en que se utiliza el espectro radioeléctrico en México para proporcionar una gran variedad de servicios de radiocomunicaciones. De acuerdo a estas atribuciones, los servicios fijo y móvil por satélite no ocupan todo el espectro que equivale a la banda de frecuencias Ka, pero aun así el ancho de banda atribuido es muy grande. En la siguiente tabla se indica cuáles son los rangos de frecuencia que se pueden utilizar para estos servicios.

En la tabla 2.3.1 se muestra que en México se tienen atribuidos 7 GHz para el servicio fijo por satélite y 2 GHz para el servicio móvil por satélite, estos se traslapan, por lo que en dicho traslape se puede utilizar de una u otra forma. Esta atribución coincide en la subdivisión de la banda de frecuencia Ka que se vio al principio de este capítulo, donde se indicó que la banda Ka se encuentra subdividida según su aplicación, ya sea comercial, militar o DBS.

Al coincidir estas atribuciones, con la división por aplicación, podemos decir que en el caso del uso comercial de servicios por satélite, se tienen disponibles 2.5 GHz de frecuencia, que es un ancho de banda 5 veces mayor al que se puede utilizar en las bandas C y Ku.

Servicio Fijo por Satélite	Servicio Móvil por Satélite
24.75 – 25.25 GHz	
27 – 31 GHz	29.5 – 31 GHz
37.5 – 40 GHz	39.5 – 40 GHz

Tabla 2.3.1 Frecuencias atribuidas a Mexico.

- Altas velocidades de transmisión

Como se describió en el subcapítulo anterior, los servicios que se ofrecen en redes en banda Ka cuentan con grandes tasas de transmisión, gracias a nuevas técnicas de modulación, codificación y multiplexación.

Algunas de las técnicas que se están utilizando para aprovechar con mayor eficiencia el ancho de banda son MPEG - 4, DVB – S2/ACM, OFDM y CDMA.

- Reúso de frecuencias geográfico

Existen técnicas que se utilizan para incrementar la capacidad que puede ofrecer un operador satelital. En el caso de la banda Ka, podemos reusar las frecuencias asignadas por medio de dos técnicas, las cuales se describen a continuación:

La primer técnica es utilizada con haces conformados; se definen grandes coberturas que en ocasiones son continentales o cubren grandes regiones, para ser radiadas por un reflector conformado que se alimenta de una o dos cornetas si se

usan dos polarizaciones. Se debe asignar un determinado número de transpondedores para cada cobertura.

Por ejemplo en Mexico en un factor de reuso de frecuencia de 8 con un espectro disponible crudo de 1 GHz la capacidad teórica de un sistema de banda Ka podría ser de 16 veces la capacidad de un sistema en banda Ku o banda C.

Al tener dos coberturas que no se traslapan geográficamente la una a la otra, podemos trabajar con canales en la misma frecuencia, asegurando que no existirá interferencia entre estos. El secreto de esta técnica es utilizar un reflector del satélite para cada una de las coberturas.

Un ejemplo del uso de esta técnica en banda Ku, se puede analizar en el satélite Satmex 8, de la empresa Satélites Mexicanos. Véase figura 2.3.1. Este satélite cuenta con tres haces conformados en banda Ku, el primero cubre la región de Norteamérica, el segundo cubre la mayor parte del continente Americano y el tercer haz cubre la región de Sudamérica. El reuso de frecuencias se da entre las coberturas de Norteamérica y Sudamérica, utilizando el mismo ancho de banda para las dos coberturas gracias a que se cuenta con un aislamiento geográfico que impide las interferencias entre las redes que trabajan en una u otra cobertura.

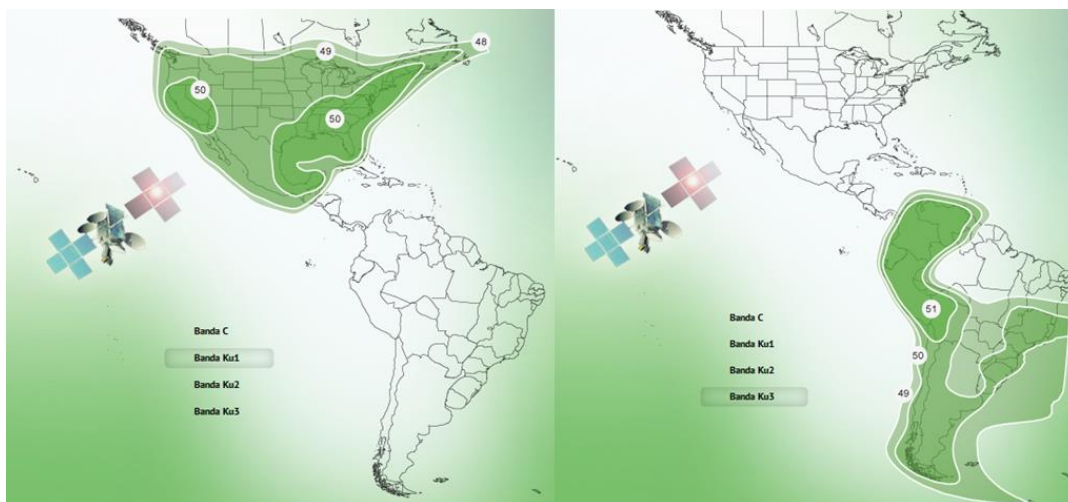


Figura 2.3.1 Haces conformados del Satmex 8, Norteamérica y Sudamérica.

Con esta técnica se duplica el ancho de banda asignado a cada cobertura; si a la cobertura de Norteamérica se le asignó un ancho de banda de 500 MHz en un cierto rango de frecuencia, en realidad la empresa está incrementando su capacidad con otros 500 MHz adicionales en el mismo rango de frecuencia; en pocas palabras utiliza el mismo ancho de banda con el mismo rango de frecuencia dos veces.

La segunda técnica se logra utilizando haces puntuales, esta técnica es la que se utiliza hoy en día en los satélites de comunicaciones que trabajan en banda Ka. Al configurar una cobertura por medio de haces puntuales, donde se aprovecha el aislamiento geográfico con la separación de frecuencias para obtener un reuso regional de frecuencias; cada haz es una cobertura aislada que soporta cualquier tipo de servicio dentro de sí mismo. Debido a la atenuación por lluvia, se necesitan haces puntuales con alta ganancia, lo que limita la zona de cobertura de cada haz.

Cada haz se logra con una corneta, cada reflector genera tantos haces como alimentadores se tengan, hasta 21 haces/corneta se pueden implementar en un mismo reflector; al ser reflectores con forma de paraboloides, los haces que se dibujan sobre la tierra son circulares o elípticos. El aislamiento entre haces con reuso de frecuencia se logra con haces separados geográficamente aunque estos se generen en el mismo reflector.

Por ejemplo, supongamos que tenemos un ancho de banda disponible de 1 GHz que va de 27.5 a 28.5 GHz; y que vamos a utilizar dos reflectores del satélite con 12 cornetas en cada reflector. Considerando el ancho de banda disponible, dividimos en cuatro partes iguales el ancho de banda para los cuatro tipos de haces, de la siguiente manera:

Haz A: 27.5 a 27.75 GHz

Haz B: 27.75 a 28 GHz

Haz C: 28 a 28.25 GHz

Haz D: 28.25 a 28.5 GHz

Estos cuatro haces necesitan 4 de las 24 cornetas disponibles; realizando un arreglo para utilizar el total de las cornetas y reutilizar los rangos de frecuencia definidos de tal manera que existan 6 haces del tipo A, otros seis del tipo B, otros seis del tipo C y los últimos 6 del tipo D y acomodándolos de tal manera que los haces idénticos se encuentren separados geográficamente, como se muestra en la figura 2.3.2.

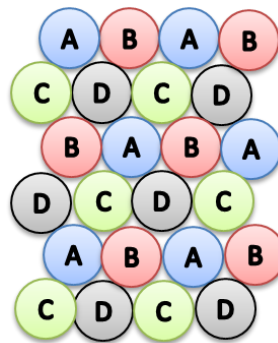


Figura 2.3.2 Reúso de frecuencias por medio de haces puntuales en un esquema de 4 divisiones.

El ancho de banda disponible se incrementa el 600%, esto significa que en lugar de tener 1 GHz se tienen 6 GHz disponibles, porque existen 24 haces con 250 MHz cada uno.

Con cualquiera de estas dos técnicas se incrementa la capacidad del satélite, cabe señalar que al utilizar haces puntuales el incremento es mayor que si se utilizan haces conformados. En el siguiente capítulo se desglosa con mayor detalle la configuración del satélite propuesto para trabajar sobre la región de México.

- Es una banda sin saturar

Se estima que existen alrededor de 320 satélites de comunicaciones operando en órbita geoestacionaria, de los cuales alrededor de 30 trabajan en la banda de frecuencia Ka, esto significa que el 9.3% de los satélites activos trabajan en banda Ka. Por esta razón el trabajar en esta banda es una gran oportunidad para incrementar la capacidad que pueden ofrecer los operadores satelitales a sus clientes.

Al existir tan pocos satélites operando en banda Ka, los acuerdos de coordinación entre operadores satelitales, se vuelve más fáciles gracias a que difícilmente se van a encontrar dos satélites en posiciones contiguas operando en banda Ka.

- Alta PIRE

La Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE), es un factor que nos ayuda a comprender con qué nivel de potencia sale la señal del transmisor; es importante tener una PIRE alta debido a que se va a presentar una mayor atenuación por lluvia. Gracias a que la tecnología ha evolucionado y desarrollado en los últimos años, nos permite tener un mayor rendimiento de potencia, con una eficiente recolección de energía por medio de los paneles solares de los satélites.

El avance de instrumentos con menos pérdidas de energía y mayor eficiencia en la amplificación, nos permite direccionar mayor potencia a las señales que manda el satélite hacia la tierra.

Todos estos avances, se traducen en una PIRE mayor, porque se va a tener mayor potencia en la señal.

$$PIRE_{lineal} = (P_{Tx})(G_{ant})[W]$$

$$PIRE = P_{Tx} + G_{ant}[W]$$

2.4 Desventajas de la banda Ka.

- Atenuación de la señal

Como ya sabemos, la banda Ka opera en frecuencias comprendidas de los 25 GHz a los 40 GHz; éstas frecuencias son muy altas, por lo que son vulnerables a los problemas de calidad en la señal causados por efectos tales como la lluvia principalmente, vapor de agua, gases, neblina, etc.

El efecto climático que influye más en la atenuación de una señal es la lluvia, además debemos tomar en cuenta que nuestra señal viaja a través de regiones específicas. La atenuación depende directamente de la longitud de onda de la señal, de la distancia recorrida por la región de lluvia y la tasa de lluvia de la región donde se encuentra el enlace.

Para nuestro enlace satelital se requiere analizar este fenómeno con datos sobre territorio nacional, debido a nuestras condiciones orográficas y climáticas especiales. También es necesario realizar un estudio profundo de dichas regiones climáticas para generar mapas de lluvia y posteriormente, mediante mediciones de propagación, realizar las comparaciones pertinentes para el óptimo funcionamiento de nuestro enlace.

Se puede definir a la atenuación como un parámetro en función de tres factores:

Atenuación = f (Frecuencia, Tasa de lluvia, Distancia bajo lluvia).

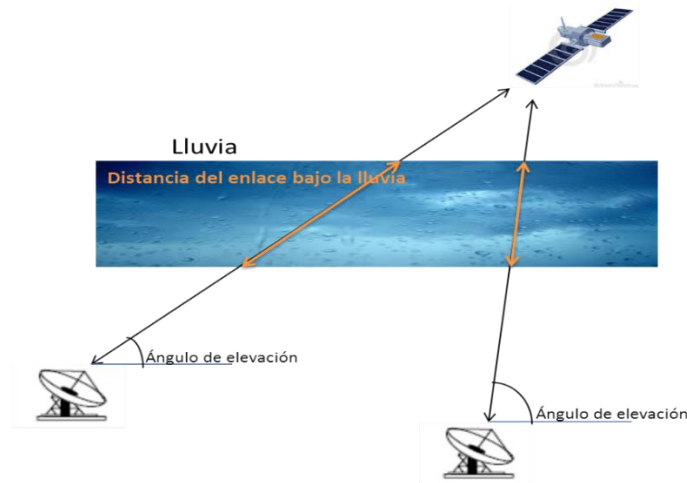


Figura 2.4.1 Distancia recorrida a través de la región de lluvia.

La distancia bajo la lluvia, depende directamente del ángulo de elevación de la estación terrena; no es la misma distancia recorrida por la señal a través de la región de lluvia cuando se tiene un ángulo de 90° a comparación de cuando se tiene un ángulo de 15° . Entre mayor sea el ángulo de elevación, menor será la distancia que se recorre y por lo tanto la afectación es menor. Véase figura 2.4.1.

De acuerdo a la recomendación R.383-1 de la UIT, se clasifican todas las zonas geográficas del mundo de acuerdo a su tasa anual de lluvia. En México existen tres tipos de regiones, la región E, M y N, siendo la región N la más susceptible a los efectos de la lluvia. Esta se ubica en el sur de México, comprendiendo los estados de Oaxaca, Chiapas, Guerrero, Yucatán, Quintana Roo, Campeche y parte de Veracruz. Véase figura 2.4.2.

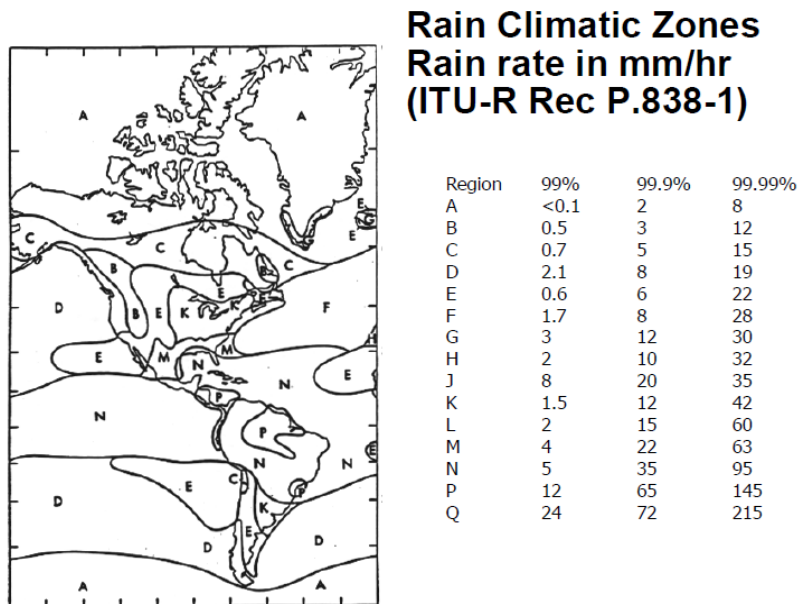


Figura 2.4.2 Clasificación de las zonas de acuerdo a su tasa anual de lluvia.

A continuación se muestra una gráfica donde se calcula la atenuación por lluvia en función de la frecuencia de la señal y de distintos ángulos de elevación, para dos casos de disponibilidad (99.5 % y 98 %). Con la finalidad de ejemplificar de qué forma se incrementa la atenuación cuando la frecuencia de la señal es mayor. Véase Figura 2.4.3.

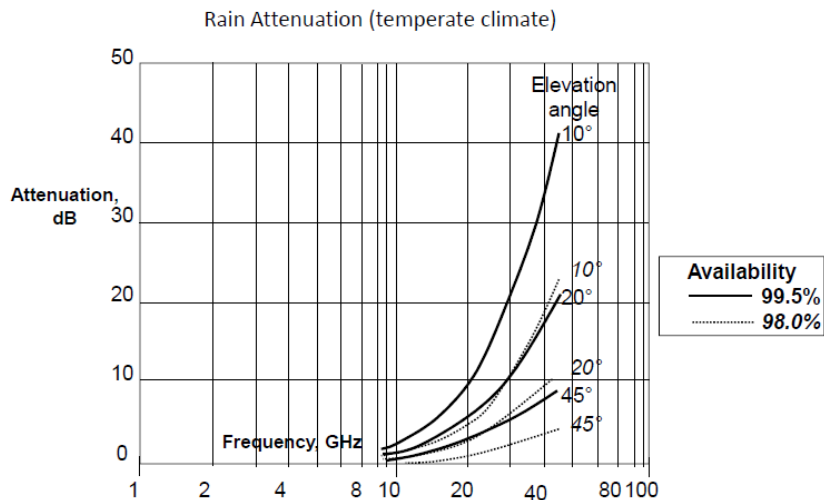


Figura 2.4.3 Atenuación por lluvia.

Cabe señalar que se necesita un nuevo modelo de atenuación por lluvia para México, porque el modelo de la UIT es viejo y el mundo ha experimentado un drástico cambio climático.

- Mayor potencia

Ya que esta banda es más susceptible a los efectos climáticos, la potencia de la señal disminuirá considerablemente por lo que será necesario utilizar una potencia mayor. El incremento de potencia se debe generar en dos sitios, en la estación terrena que transmite hacia el satélite y por otra parte en el satélite.

El incrementar la potencia de una estación terrena transmisora no es complicado, implica utilizar equipos con un precio mayor, que alcanzan a transmitir sin problemas en niveles de potencia altos. Incrementar la potencia en el satélite es más complicado porque depende de la cantidad de energía que puede capturar el satélite a través de sus celdas solares y de la eficiencia de los amplificadores de potencia con los que cuenta.

- Confiabilidad del sistema

Al ser una banda más susceptible a los efectos climáticos, la confiabilidad (porcentaje de tiempo operacional en un año) se reduce considerablemente en comparación con la confiabilidad de enlaces en banda C o Ku.

Se estima que la disponibilidad de un enlace de banda Ka es de alrededor de 99.5%.

- Retrasos en la transmisión

La señal debe viajar a través de una gran distancia, desde la estación terrena transmisora hasta el satélite y del satélite a la estación terrena receptora. Esto provoca que exista un retraso de la señal.

Este retraso existe en todos los sistemas de comunicaciones, en algunos es más considerable que en otros.

2.5 Reúso de Frecuencias

Debido a que el espectro radioeléctrico asignado a las comunicaciones inalámbricas es un recurso finito, actualmente se ha venido manejando una técnica denominada reúso de frecuencias con el propósito de usar el rango de frecuencias más de una vez. Esta técnica se puede emplear de dos formas, reúso de frecuencias por aislamiento geográfico y reúso de frecuencias por polarización.

- Reúso de frecuencias por aislamiento geográfico

El reúso de frecuencias por aislamiento geográfico es el más popular debido a que es empleado en las comunicaciones de telefonía móvil; consiste en radiar con el mismo rango de frecuencias sobre dos o más zonas aisladas geográficamente. Por ejemplo, se tiene una zona donde se radia a una frecuencia F_1 , en las zonas vecinas se debe radiar con frecuencias diferentes F_2 y F_3 para evitar interferencia; para volver a utilizar la misma frecuencia F_1 se debe hacer sobre una zona que se encuentre aislada de la primer zona; tal como se muestra en la siguiente figura 2.5.1.

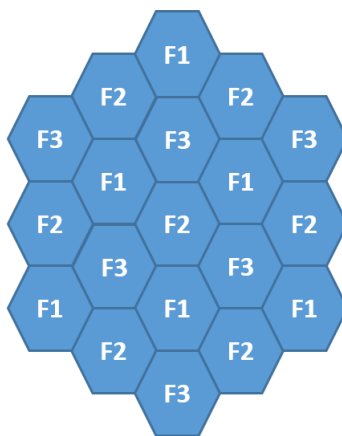


Figura 2.5.1 Reúso de frecuencias.

En el caso de las comunicaciones satelitales, el reuso de frecuencias por medio de aislamiento geográfico se torna a gran escala debido a las altas frecuencias que se manejan y a la gran distancia de los satélites hacia la tierra. Estos factores generan grandes haces de radiación sobre la tierra que son difíciles de manipular.

Los primeros satélites de comunicaciones que comenzaron a implementar este tipo de técnicas, lo lograban gracias a reflectores conformados (reflectores con superficies arrugadas para lograr una huella de radiación específica). La desventaja de esta técnica es que se tiene que utilizar un reflector por cada zona de radiación, además de que las zonas de radiación son muy grandes. Por ejemplo, el satélite Eutelsat 113W (Ver figura 2.5.2 y 2.5.3) utiliza esta técnica para radiar con el mismo rango de frecuencias (banda C) sobre Norteamérica y Sudamérica. Esto lo logra gracias a que utiliza dos reflectores, uno que radia sobre Norteamérica y otro para radiar sobre Sudamérica.

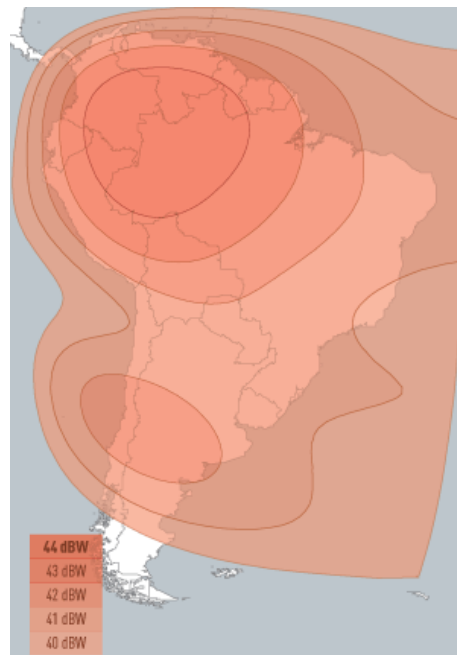


Figura 2.5.2 Huella de radiación del satélite Eutelsat 113W en banda C sobre Sudamérica.

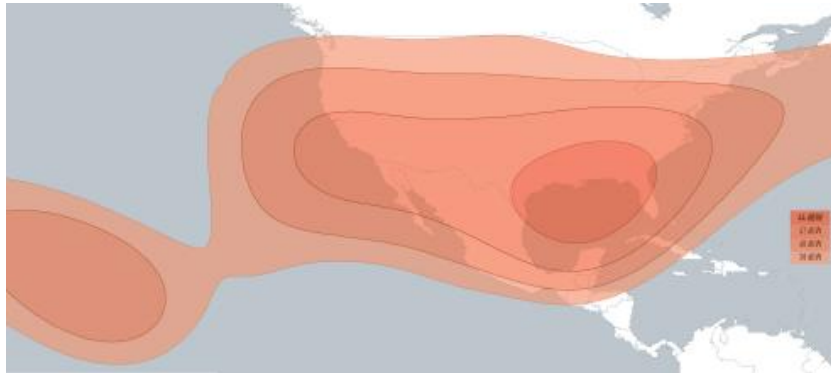


Figura 2.5.3 Huella de radiación del satélite Eutelsat 113W en banda C sobre Norteamérica.

Como resulta impráctico instalar muchos reflectores en los satélites, se diseñó una nueva técnica para el reuso de frecuencias que se denomina “Haces Puntuales”. Esta técnica consiste en utilizar reflectores parabólicos lisos y muchos alimentadores para poder generar muchos haces por medio de un solo reflector, un ejemplo gráfico de esta técnica se muestra en la figura 2.5.4.

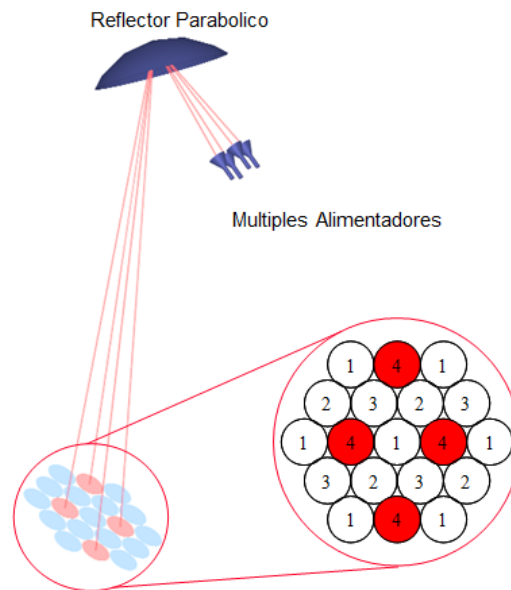


Figura 2.5.4 Técnica de Haces Puntuales.

El único inconveniente de la técnica de haces puntuales es que se necesitan muchos alimentadores lo que aumenta la complejidad del satélite. Otro punto a tomar en cuenta es el tamaño del haz, este viene dado por la frecuencia a la que se trabaja, por ejemplo, al trabajar en la banda de frecuencia C se tienen haces muy grandes para cubrir un país, pero muy pequeños para cubrir un continente. En la figura 2.5.5 se muestra una proyección de haces puntuales en banda C.

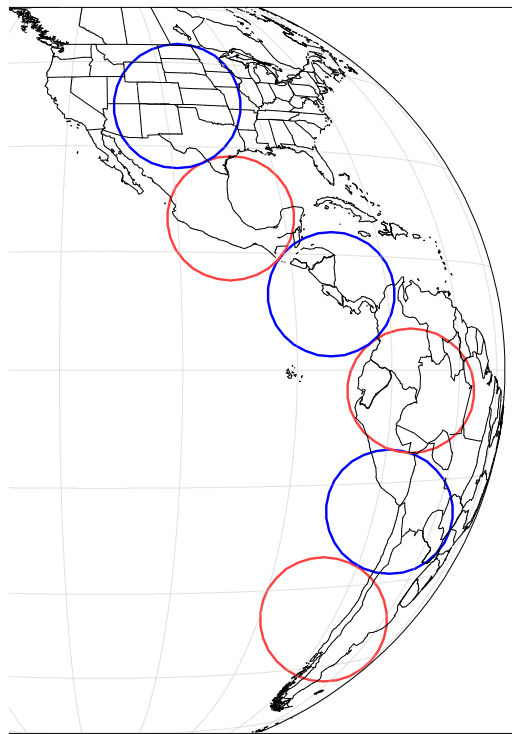


Figura 2.5.5 Proyección de haces puntuales en banda C.

El uso de haces puntuales en la banda de frecuencias Ka es práctico gracias a que el tamaño del haz es más chico y se puede posicionar en pequeños países tal como se muestra en la figura 2.5.6; de esta manera se puede usar un reuso similar al de la telefonía móvil.

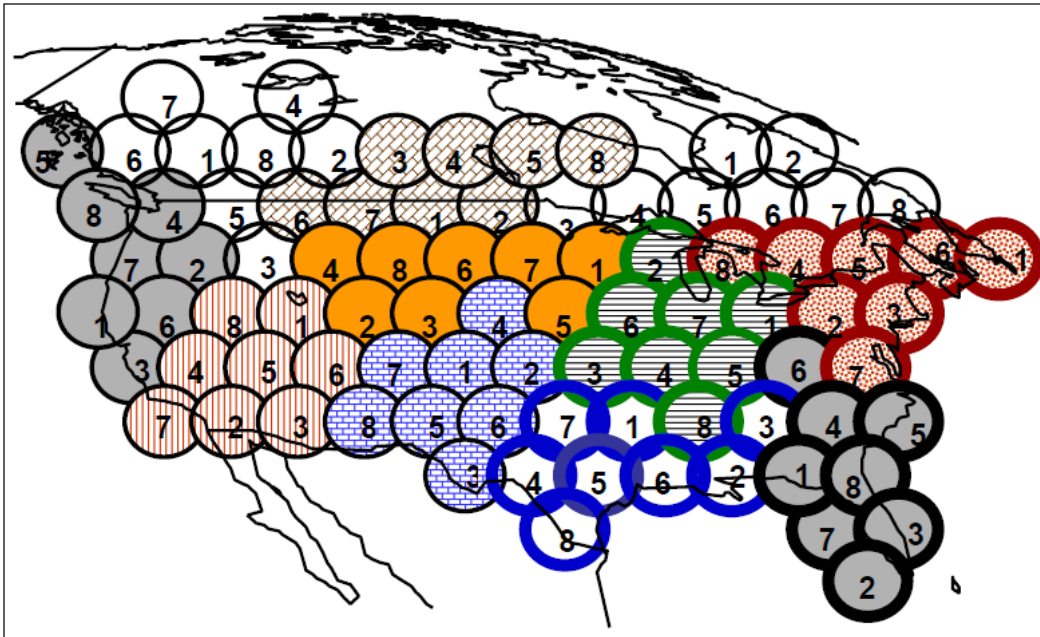


Figura 2.5.6 Proyección de haces puntuales en banda Ka.

Reúso de frecuencias por polarización

Esta técnica es frecuentemente empleada en satélites que pueden diferenciar dos polarizaciones diferentes, polarización circular derecha y polarización circular izquierda; el satélite está construido para direccionar hacia transpondedores diferentes las señales provenientes con distinta polarización.

Es decir, el transpondedor número uno va a recibir las señales que vengan con polarización circular derecha mientras que el transpondedor 2 va a recibir las señales que vengan con polarización circular izquierda. La ventaja de esta técnica es que el transpondedor 1 y el transpondedor 2 pueden trabajar en el mismo rango de frecuencias, en pocas palabras, se incrementa al doble el espectro útil

CAPITULO 3 CARACTERÍSTICAS DE UN SATÉLITE GEOESTACIONARIO

3.1 Transpondedores

Como se sabe, la parte más importante de un satélite de comunicaciones es por supuesto la carga útil. Una estación terrena toma las señales a ser transmitidas, conocidas como señales en Banda Base y modula una portadora de microondas. Las tres señales en banda base más comunes son voz, video y datos de computadora. Esos enlaces de subida son después amplificados, trasladados en frecuencia y retransmitidos en un enlace de bajada a una o más estaciones terrenas. El componente que realiza estas funciones es conocido como transpondedor. La mayoría de las comunicaciones satelitales modernas contienen por lo menos 12 transpondedores. Otros satélites más avanzados contienen muchos más. Esos transpondedores operan en el rango de frecuencias de microondas.

El propósito básico de un transpondedor es simplemente rejuvenecer la señal de subida y retransmitirla sobre un enlace de bajada. En este rol, el transpondedor realiza la función de un amplificador. Ya que al momento de que la señal del enlace de subida alcanza el satélite ésta es extremadamente débil. Por lo tanto, esta debe ser amplificada antes de que pueda ser retransmitida a la estación terrena.

Sin embargo, los transpondedores son más que solo amplificadores. Un amplificador es un circuito que toma una señal e incrementa el voltaje o los niveles de potencia de la señal sin cambiar su frecuencia o contenido. Suponiendo que se tiene un transpondedor que consiste en un receptor y un transmisor que funcionan a la misma frecuencia, por la cercanía de estos en el satélite, la alta potencia de salida del enlace de bajada afecta al receptor del satélite. Naturalmente la señal del enlace de subida sería totalmente obstruida.

Para evitar este problema, el receptor y transmisor del transpondedor del satélite son diseñados para operar en frecuencias separadas. De esta manera, ellos no

interferirán el uno contra el otro. Ese espaciamiento de frecuencia es hecho tan ancho como se pueda para minimizar el efecto de que el transmisor le quite la sensibilidad al receptor. En muchos repetidores a pesar de que las frecuencias del transmisor y receptor son diferentes, la alta potencia de salida del transmisor puede todavía afectar la sensibilidad de los circuitos de entrada del receptor y, en efecto, desensibilizarlos, haciéndolos menos sensibles a recibir las señales de subida débiles. Cuanto mayor sea el espacio de frecuencia entre transmisor y receptor habrá menor problema de desensibilización en el receptor.

En satélites típicos, las frecuencias de entrada y salida son separadas por cantidades enormes. En las frecuencias de banda C, la frecuencia de la señal de subida está en el rango de 6 GHz y el enlace de bajada está en el rango de 4 GHz. Estos 2 GHz de espacio son suficiente para eliminar la mayoría de los problemas. Sin embargo, para asegurar la máxima sensibilidad y mínima interferencia entre las señales del enlace de subida y del enlace de bajada el transpondedor contiene numerosos filtros que no solo provee canalización sino también ayuda a eliminar interferencia de señales externas independientemente de la fuente que las originen.

Tres configuraciones básicas de transpondedor son usadas en comunicaciones satelitales. Todas ellas tienen variaciones mínimas una de la otra, cada una tiene sus ventajas y desventajas. Estas son “conversión simple”, “conversión doble” y transpondedores regenerativos.

Un transpondedor de conversión simple usa un mezclador para transformar la frecuencia del enlace de subida a la frecuencia del enlace de bajada. El transpondedor de conversión doble hace la transformación de frecuencia en dos pasos con dos mezcladores. No ocurre demodulación. Un repetidor regenerativo demodula el enlace de subida después de que le transformo la frecuencia a una frecuencia intermedia más baja. La señal recuperada en banda base es entonces usada para modular la señal de enlace de bajada.

Configuraciones Multicanal.

Prácticamente todos los satélites de comunicaciones modernos contienen múltiples transpondedores. Esto permite muchas más señales para ser recibidas y transmitidas.

Un satélite comercial de comunicaciones típico contiene 12 transpondedores, 24 si se incorpora reuso de frecuencias. Los satélites militares suelen contener algunos más transpondedores. Mientras que los más nuevos, grandes satélites comerciales tienen provisión para hasta 50 canales. Cada transpondedor opera en frecuencia separada, su ancho de banda es lo suficientemente ancho para llevar múltiples canales de voz, video, e información digital.

Hay dos arquitecturas multicanal básicas en uso en comunicaciones satelitales. Uno es un sistema de banda ancha y el otro es un sistema completamente canalizado:

- **Broadband System.** Como se indicó anteriormente, un espectro de comunicación satelital típico es un ancho de 500 MHz. Esto es dividido típicamente en 12 canales separados, cada uno con un ancho de banda de 36 MHz. La frecuencia de espacio central entre los canales adyacentes es 40 MHz, de este modo brinda una separación de 4 MHz entre canales para minimizar la interferencia entre canales adyacentes. Ver figura 3.1.1 para más detalles. Un repetidor de banda ancha (figura 3.1.2) está diseñado para recibir cualquier señal transmitida entre un total de ancho de banda de 500 MHz.

La antena receptora está conectada a un amplificador de bajo ruido (LNA) como en todo transpondedor. Se utilizan circuitos muy sintonizados en ancho de banda de modo que los 500 MHz de ancho de banda sean recibidos y amplificados. Un amplificador de bajo ruido usualmente un FET de GaAs, nos brinda ganancia. Un mezclador transforma todas las señales entrantes a sus equivalentes en frecuencias más bajas para el enlace de bajada. En un satélite de comunicaciones en banda C, las señales de entrada están

CAPITULO 3 CARACTERÍSTICAS DE UN SATÉLITE GEOESTACIONARIO

localizadas entre 5.925 y 6.425 MHz. Un oscilador local operando en frecuencias de 2.225 GHz es usado para transformar las entradas al rango de 3.7 a 4.2 GHz. Un amplificador de banda ancha después del mezclador amplifica el espectro entero.

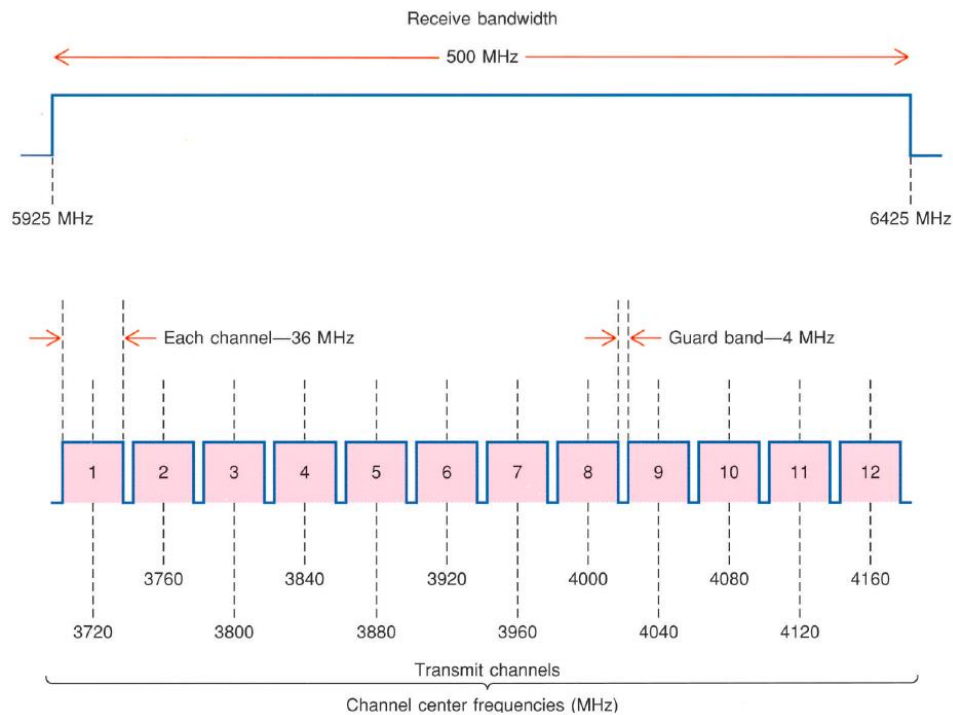


Figura 3.1.1 Anchos de banda de transmisión y recepción de comunicaciones satelitales en banda C.

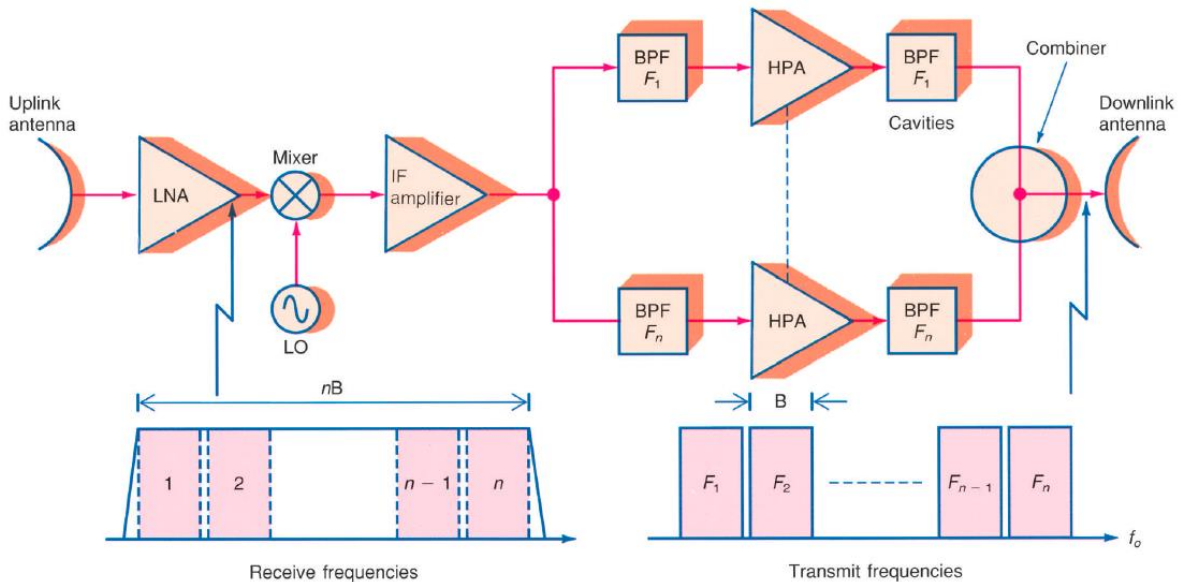


Figura 3.1.2 Repetidor multicanal de banda ancha.

- Channelization Process. El proceso de canalización ocurre en el resto del transpondedor. Por ejemplo en un satélite de 12 canales, 12 filtros paso banda, cada uno centrado en uno de los 12 canales, son usados para separar toda la variedad de señales recibidas, la figura 3.1.1 nos muestra los 12 canales básicos con su frecuencia central, cada uno tiene un ancho de banda de 36 MHz. Los filtros paso banda separan las señales no deseadas de salida del mezclador y retiene solo las señales diferenciales. Después los amplificadores individuales de alta potencia (HPAs) son usados para aumentar el nivel de la señal. Estos son comúnmente tubos de onda progresiva (TWTs). La salida de cada amplificador de onda progresiva es de nuevo filtrado para minimizar los problemas de armónicos y distorsiones por intermodulación. Esos filtros son comúnmente parte de un armado más grande conocido como multiplexor o combinador. Esto es un armado de resonador de guía de onda de cavidad que filtra y combina todas las señales para aplicación a una antena simple.

Esto es lógico de asumir si la función del receptor puede ser realizada por circuitos amplificadores de banda ancha y mezclador, entonces debe ser posible proveer la función de transmitir de la misma manera. Sin embargo, generalmente no es posible generar una potencia de salida tan alta para ese ancho de banda. El factor es que no hay componentes o circuitos que lo puedan hacer bien. Los amplificadores de alta potencia en la mayoría de los transpondedores son tubos de ondas progresivas que inherentemente tienen ancho de banda limitado. Ellos operan bien sobre un rango bajo mas no pueden con todos los 500 MHz de ancho de banda asignado al satélite. Por lo tanto para alcanzar los altos niveles de potencia, se utiliza el proceso de canalización.

3.2 Antenas

Una antena es una estructura conductora o dieléctrica que puede emitir o recibir ondas electromagnéticas, es decir, un transductor para el acoplamiento de una línea de transmisión o guía de onda con el medio circundante o viceversa.

Existen diferentes tipos de antenas como las antenas de hilos conductores que soportan corrientes eléctricas que irradiarán las ondas electromagnéticas entre las cuales se encuentran las antenas de dipolo, espiral y hélice entre otras, otro tipo de antenas son las de aperturas y reflectores cuya distribución electromagnética son excitadas a partir de guías de onda, entre este tipo de antenas se encuentran las antenas de corneta, reflectores parabólicos, reflectores de esquina entre otras y otro tipo de antenas más utilizadas en la actualidad se encuentran las agrupaciones de antenas que es la combinación de varios elementos para obtener determinados patrones de radiación que se detallarán más adelante. Véase Figura 3.2.1

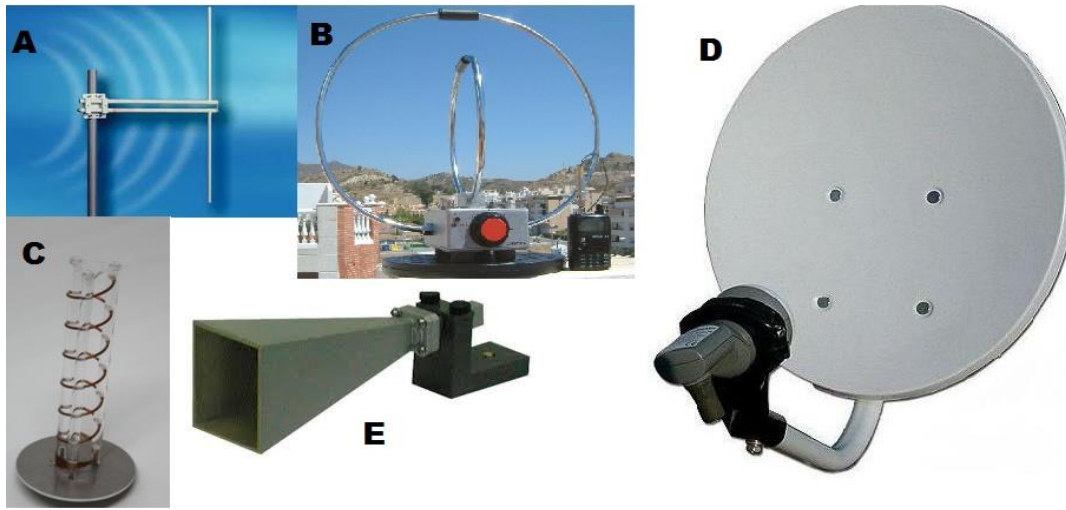


Figura 3.2.1 Diferentes tipos de antenas. Por mencionar algunos se encuentran A) Dipolo, B) de Aro, C) Hélice, D) Reflector Parabólico, E) Corneta o Bocina.

Hay que tener en cuenta que para los satélites de comunicaciones, sus antenas son de gran importancia debido a que se encuentran a una gran distancia de separación de la Tierra y entre ambos hay muchos factores que degradan la calidad de la señal y es la forma en la que entra toda la comunicación con el satélite para control y telemetría además que con ellas se van a obtener las coberturas del satélite. Las coberturas delimitan las áreas geográficas sobre las cuales es factible realizar enlaces con el satélite, tales pueden cubrir desde una pequeña región como un estado, un país, o tan grande como todo un continente.

Las antenas de cobertura global fueron utilizadas en los primeros satélites de comunicaciones, gracias a que con una antena de este tipo se puede abarcar una tercera parte del globo terráqueo. Gracias a esto se podía tener una cobertura global con tres satélites colocados a una separación de 120° entre cada satélite tal como propuso Arthur C. Clarke (Figura 3.2.2). Con el paso del tiempo y la evolución

de la tecnología se dejaron de utilizar las antenas de cobertura global porque se perdía energía en regiones donde no se podían construir estaciones terrenas.

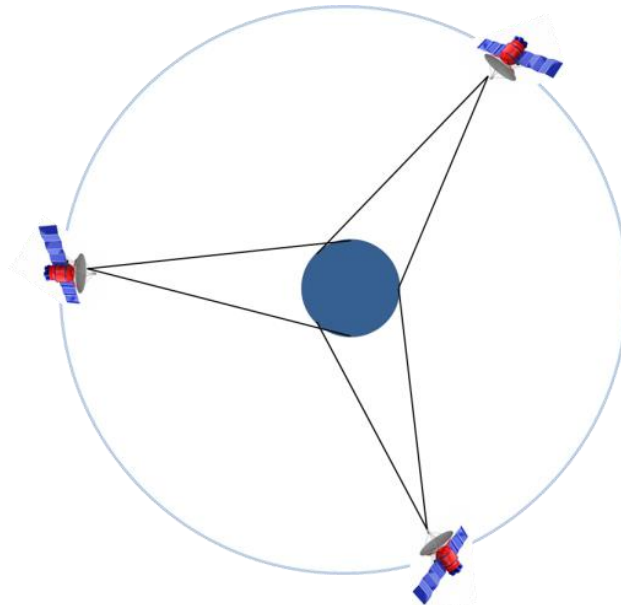


Figura 3.2.2 Cobertura Global

A lo largo del tiempo, con la evolución de la tecnología, las antenas han evolucionado y hoy en día existen varios tipos de antenas que pueden ser implementadas en satélites de comunicaciones con la única restricción de que su dimensión debe caber en la cofia de la nave lanzadora. Un satélite tiene como máximo cinco antenas, pero no todas tienen que ser iguales, estas pueden ser diferentes dependiendo de la frecuencia a la que trabajan y su aplicación.

Las antenas de tipo omnidireccional se utilizan para mantener el contacto con el centro de control en tierra, la ventaja de este tipo de antenas es que si en un momento dado el satélite sale de su órbita, el centro de control sigue en contacto con el satélite y puede comandar los propulsores del satélite para que este regrese

CAPITULO 3 CARACTERÍSTICAS DE UN SATÉLITE GEOESTACIONARIO

a su posición. Este tipo de antenas no es recomendable para servicios comerciales debido a que la mayor parte de la energía de la señal se pierde en el espacio.

Las antenas de haces conformados son las más utilizadas en la actualidad gracias a que su cobertura esta específicamente delimitada y esto permite concentrar la potencia en sus regiones de cobertura, estas regiones usualmente son continentes para poder brindar mayor cantidad de servicio. En el pasado se lograba conformar estos haces con reflectores parabólicos los cuales tenían varios alimentadores de corneta, posicionados de tal forma que el haz final iluminara las zonas requeridas. En la actualidad este tipo de haces se logran con un solo alimentador que radia sobre una superficie modificada con rugosidades, esto significa que los reflectores que se utilizan no tienen una superficie lisa, sino que su superficie es rugosa. Un ejemplo de las coberturas que se logran con antenas de haces conformados se muestra en la figura 3.2.3.

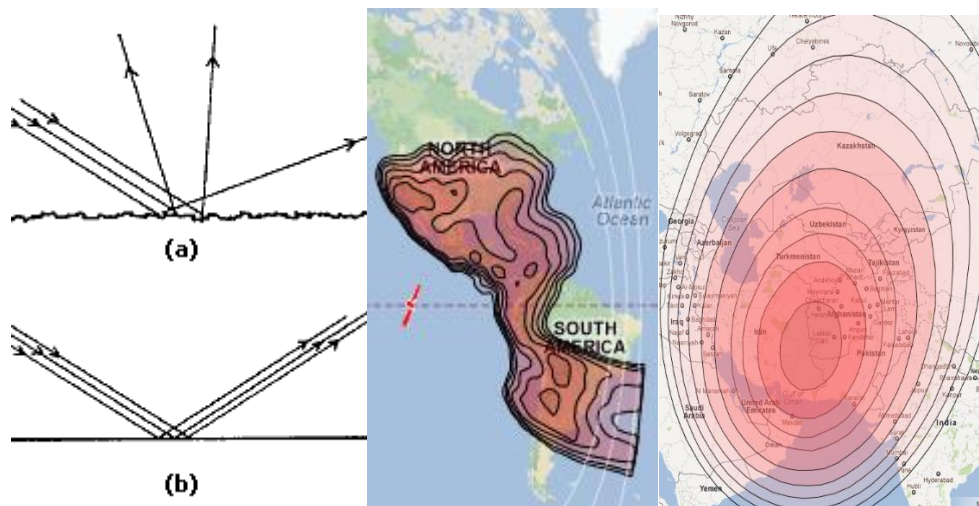


Figura 3.2.3 Cobertura de una antena con reflector con a) rugosidad y b) liso

CAPITULO 3 CARACTERÍSTICAS DE UN SATÉLITE GEOESTACIONARIO

Por último las antenas de haces puntuales son reflectores que están alimentados por varias cornetas las cuales se encuentran separadas estratégicamente para que no iluminen la misma región en el reflector y asegurar el aislamiento entre las señales de cada corneta. Este tipo de antenas se utiliza para concentrar altas potencias sobre zonas pequeñas y se usan frecuentemente en satélites que trabajan en altas frecuencias como la banda Ka; el diámetro de los haces que se logran con reflectores cuyo diámetro es de 1.9 m, es de aproximadamente 500 km. Véase figura 3.2.4

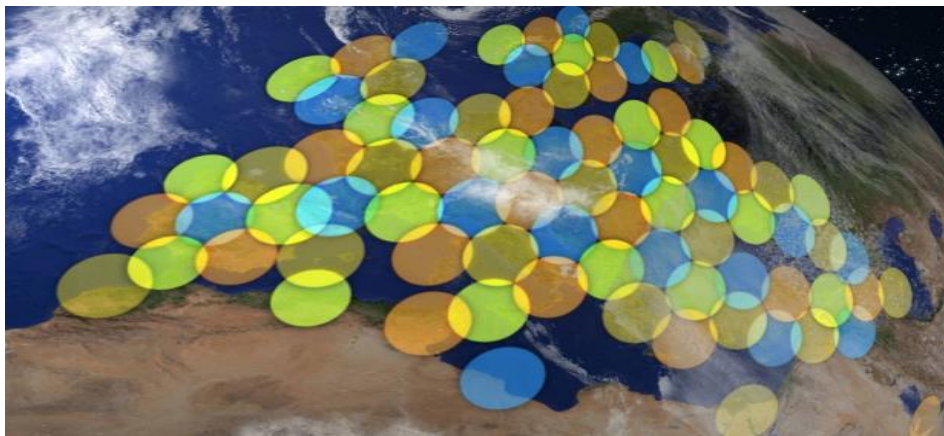


Figura 3.2.4 Haces puntuales de un satélite

Diámetro del reflector

En el momento en que se integra el satélite al cohete, sus antenas y paneles solares se encuentran plegados para que quepan en la cofia de la nave lanzadora; es por esto que el diámetro de los reflectores de un satélite oscila entre los 0.9 y 2.4 metros.

El diseño de antenas de haces puntuales es complejo debido a que el reflector debe ser alimentado por antenas con arreglos de fase; al trabajar en la banda de frecuencias Ka esta complejidad aumenta aún más porque las antenas necesitan

dimensiones muy pequeñas y sus pérdidas aumentan, lo que propicia el aumento del costo de este tipo de antenas. Véase Figura 3.2.5



Figura 3.2.5

Ganancia

La característica más importante de una antena es la ganancia. La ganancia de potencia de una antena se define como la proporción de la densidad de potencia a una cierta distancia en la dirección de máxima intensidad de radiación en relación con la densidad de potencia a la misma distancia generada por una antena isotrópica, siendo ambas antenas alimentadas con la misma potencia. Esto viene a ser la potencia de amplificación de la señal. Cuanto mayor es la ganancia, mejor es la antena.

La ganancia de una antena se entiende como la capacidad de concentrar la energía que se radia en una cierta dirección, dando como resultado una densidad de potencia mayor en una dirección específica en comparación de la densidad de potencia lograda con una antena isotrópica.

El valor de la ganancia en la dirección de máxima radiación está dada por:

$$G_{max} = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right) A_{eff}$$

Donde λ es la longitud de onda, es decir, $\lambda = \frac{c}{f}$

c es la velocidad de la luz, $c = 3 \times 10^8$ m/s,

f es la frecuencia de la onda electromagnética

A_{eff} es el área efectiva de apertura de la antena.

Para una antena de apertura circular o un reflector de diámetro D , el área efectiva esta dada por $A_{eff} = \eta \pi D^2 / 4$ donde η es la eficiencia de la antena.

Por lo tanto:

$$G_{max} = \eta (\pi D / \lambda)^2 = \eta \left(\frac{\pi D f}{c}\right)^2$$

$$G_{max \text{ dBi}} = 10 \log \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 = 10 \log \eta \left(\frac{\pi D f}{c}\right)^2 \quad (\text{dBi})$$

La figura 3.2.6 nos muestra los valores de ganancia máxima en dBi en función del diámetro del reflector de la antena, graficado para diferentes frecuencias de operación y una eficiencia de operación constante de 0.6. Al observar detenidamente la siguiente figura, podemos ver que para una antena con un reflector de 1.8 metros de diámetro, la ganancia oscila entre los 50 y 54 dBi para la banda de frecuencias Ka. Esto es una gran ventaja que contrarresta las pérdidas por atenuación causadas por la lluvia.

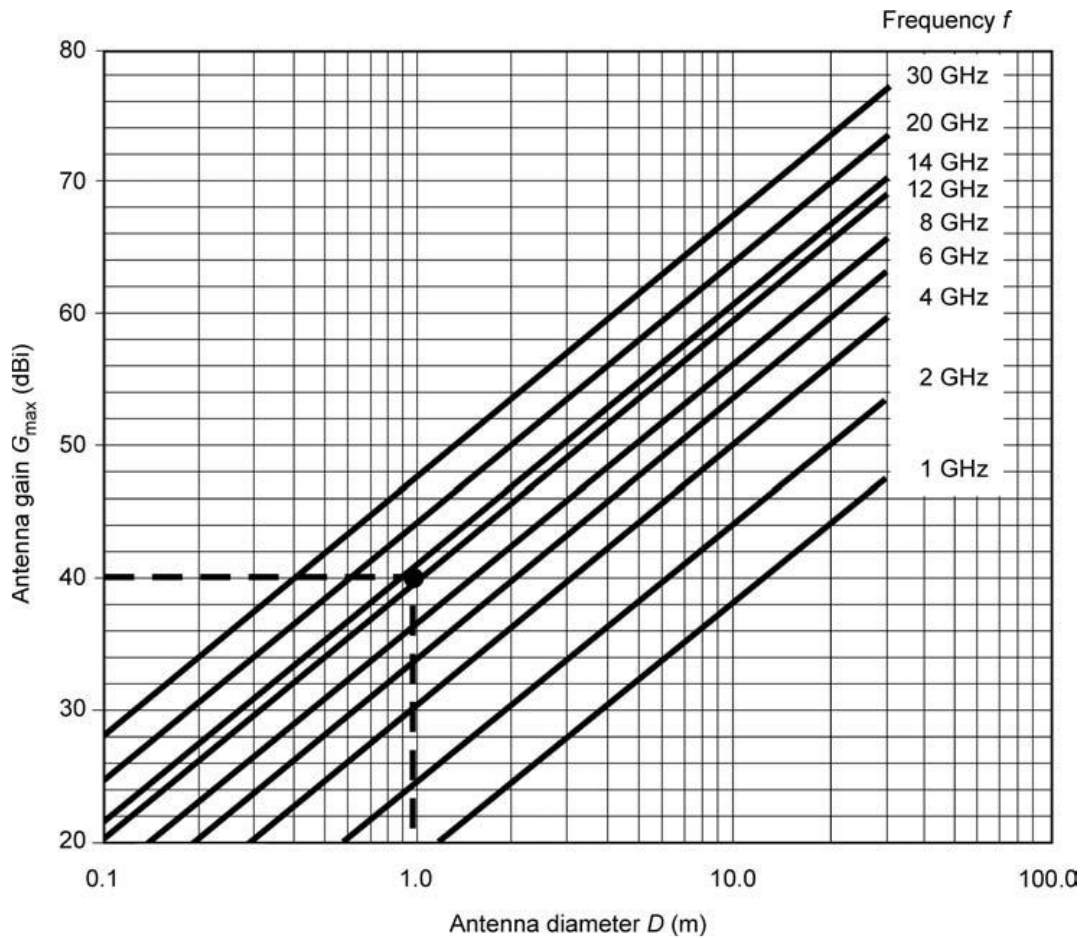


Figura 3.2.6 Ganancia máxima en función del diámetro de reflector para diferentes frecuencias de operación y una eficiencia constante de 0.6

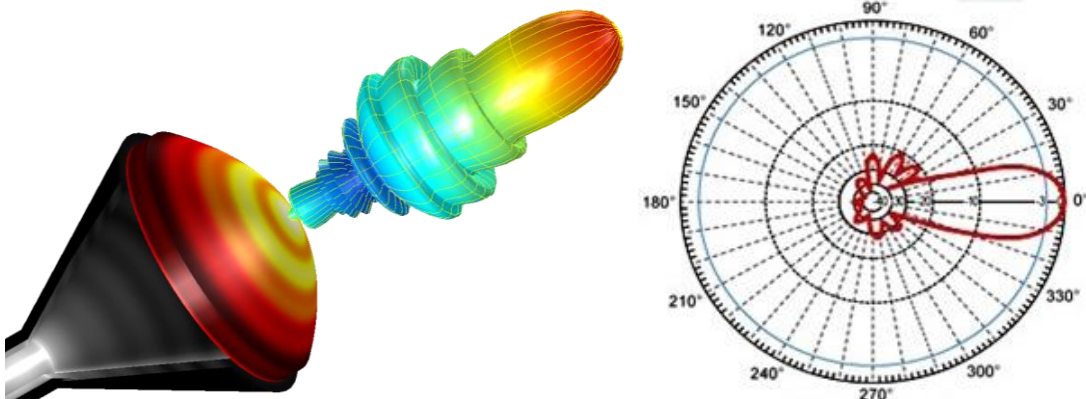
Para una antena de reflector su patrón de radiación tiene simetría rotacional y se puede representar completamente en un solo plano, el ancho de haz angular es el ángulo definido por la separación entre los puntos que corresponden a la caída de la mitad de potencia con respecto al valor máximo.

Patrón de radiación.

El patrón de radiación es un gráfico o diagrama polar sobre el que se representa la variación de la ganancia con respecto a una cierta dirección, es decir, la fuerza de los campos electromagnéticos emitidos por una antena. Este patrón varía en función del diseño de la antena.

Existen modelos de gráficos que representan este patrón: Representación 3D para darle presentación visual, Representación en Coordenadas polares desde vista de elevación (Vertical) y Azimut (Horizontal), representación rectangular en grados o en radianes que describe la apertura del haz, que representa la separación angular entre los dos puntos del lóbulo principal del patrón de radiación.

Para una antena de reflector su patrón de radiación tiene simetría rotacional y se puede representar completamente en un solo plano ya sea con un plano en coordenadas polares o en coordenadas cartesianas. El lóbulo principal contiene la dirección de máxima radiación y los lóbulos laterales deben de mantenerse en un nivel bajo de radiación. Véase figura 3.2.7



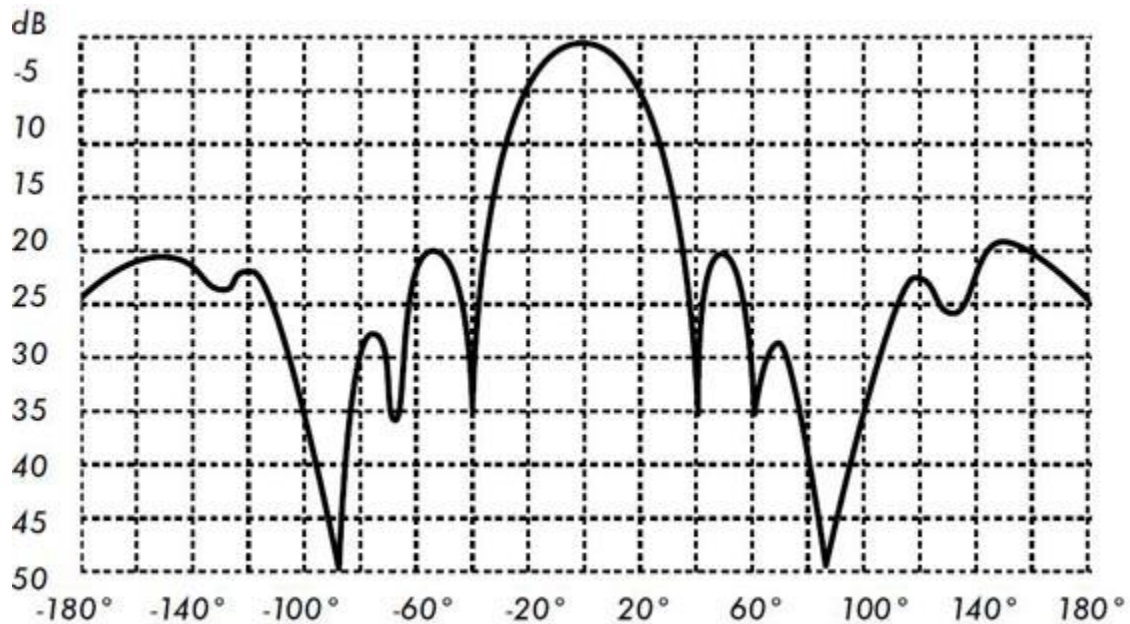


Figura 3.2.7 Patrón de Radiación. Arriba izquierda: representación en 3D para representación visual, Arriba derecha: Representación polar (horizontal o vertical), Abajo: representación rectangular en grados.

Polarización

Las ondas electromagnéticas tienen dos campos, uno eléctrico que se desplaza en sentido vertical y otro magnético que lo hace en sentido horizontal. Para determinar la polarización tomamos como referencia el campo eléctrico. Véase figura 3.2.8

Cuando hablamos de polarización cruzada nos referimos a la componente ortogonal de la polarización con la que se está trabajando. Una antena bien diseñada debe tener una componente de polarización ortogonal de al menos 20 dB por debajo de la polarización utilizada en la dirección del lóbulo principal y 10 dB por debajo de la polarización utilizada en la dirección de los lóbulos laterales.

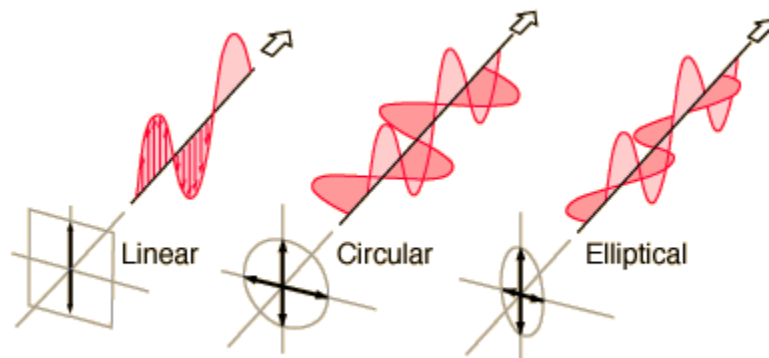


Figura 3.2.8 Diferentes tipos de polarización

Revisando el estándar técnico de operación de la empresa Satélites Mexicanos S.A. de C.V. se observa que fijan el valor de 30 dB como el mínimo nivel de aislamiento por polarización cruzada que deben cumplir los usuarios que radián hacia sus satélites. Esto con la finalidad de evitar interferencias a las redes configuradas en la polarización ortogonal.

Ancho de banda

Es el rango de frecuencias en el cual los parámetros de la antena cumplen ciertas características.

Eficiencia

La eficiencia de una antena se representa por convención por la letra griega Eta " η ". La eficiencia es el producto de varios factores que toman en cuenta la ley de iluminación, pérdidas por derrame de potencia, impedimentos de fuente y pérdidas por el desacoplamiento de impedancias.

La eficiencia de iluminación η_i especifica la relación entre la iluminación que proporciona el alimentador sobre la superficie del reflector con respecto a una iluminación uniforme. Una iluminación uniforme ($\eta_i = 1$) permite que los lóbulos secundarios adquieran niveles altos de potencia. Para evitar que los lóbulos

secundarios radian con alta potencia se atenúa la iluminación en los límites del reflector, al ser atenuada la iluminación su eficiencia es menor a una iluminación uniforme ($\eta_i < 1$).

La eficiencia de derrame η_d se define como la relación de la energía radiada por la fuente primaria la cual es interceptada por el reflector en comparación con la energía total radiada por la fuente primaria. La diferencia constituye la energía que se derrama. Si el ancho del haz de la fuente es muy grande provoca derrame de potencia, produciendo una respuesta no deseada de la antena en la dirección en que se encuentra apuntando la fuente; por otra parte si el ancho del haz es muy estrecho, solo una porción del reflector se iluminará lo que dará como resultado un haz mayor y consecuentemente menor ganancia.

La eficiencia de la superficie η_s toma en cuenta el efecto de la rugosidad en la superficie del reflector sobre la ganancia. En la práctica la ganancia teórica de un reflector difiere de la teórica. El efecto sobre la ganancia se expresa de la forma:

$$\eta_s = \Delta G = e^{[-B\left(\frac{4\pi\epsilon}{\lambda}\right)^2]}$$

Donde ϵ es la raíz cuadrada media del error de fuente (la desviación entre los perfiles reales y teóricos medidos perpendicularmente a la cara cóncava), B es un factor menor o igual a uno que depende del radio de curvatura del reflector. El factor B incrementa al reducir el radio de curvatura. Otras pérdidas incluyendo las causadas por el desacoplamiento de impedancias son de menor importancia.

La eficiencia total η es el producto de las deficiencias descritas con anterioridad, típicamente la eficiencia total varía en un rango entre 0.55 y 0.75.

$$\eta_{total} = \eta_i \eta_d \eta_s$$

3.3 PIRE

La PIRE o Potencia Isotrópica Radiada Efectiva se entiende como la potencia de entrada que sería necesaria para que una antena isotrópica radie con la misma intensidad de potencia que radia una antena real a un cierto punto en la dirección de máxima ganancia de dicha antena real.

Cuando hablamos de PIRE nos estamos refiriendo a la capacidad de radiar potencia de un equipo transmisor conformado por una fuente de alimentación y una antena. En este caso la PIRE se refiere a la capacidad de radiación del equipo transmisor del satélite conformado por amplificadores TWT y las antenas parabólicas.

La potencia radiada por unidad de ángulo sólido de una antena isotrópica alimentada por una fuente de radio frecuencia de potencia P_T está dada por:

$$PIRE = \frac{P_T}{4\pi} \left(\frac{W}{\text{Esteroradian}} \right)$$

En una dirección donde el valor de la ganancia de transmisión es G_T , cualquier antena radia una potencia por unidad de ángulo igual a:

$$PIRE = \frac{P_T G_T}{4\pi} \left(\frac{W}{\text{Esteroradian}} \right)$$

El producto $P_T G_T$ es la PIRE que se define como el producto de la potencia de transmisión por la ganancia de la antena transmisora. También el PIRE lo podemos calcular de la siguiente forma en dBW:

$$PIRE (dBW) = 10 \log P_T(W) + G_T(dBi)$$

La PIRE es de fundamental importancia para los diseñadores y operadores de sistemas de comunicaciones por satélite, porque la magnitud y distribución de la PIRE del satélite sobre las áreas de cobertura es la mayor determinante para el diseño de estaciones terrenas.

La cobertura dada por un satélite en cierta región se suele denominar huella satelital o huella de potencia y corresponde al área en tierra que cubren sus transponedores, y determina el diámetro requerido por las antenas satelitales para que puedan recibir eficientemente la señal de dicho satélite. Es posible que existan diferentes mapas para cada transponedor (o grupo de transponedores) ya que pueden estar orientados para cubrir diferentes porciones de la tierra.

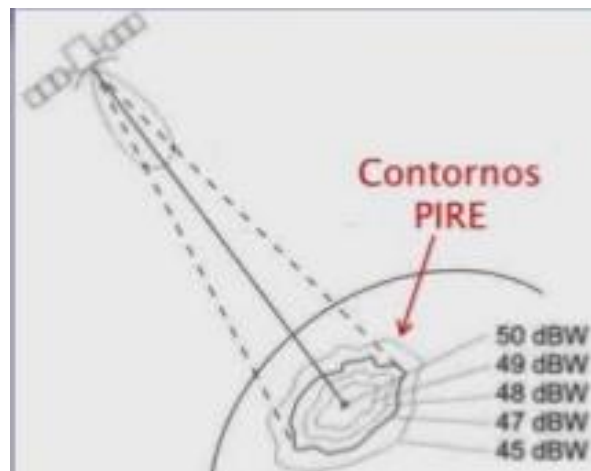


Figura 3.3.1 Contornos PIRE

El valor de PIRE máximo, es decir, de potencia máxima es el que va dirigido a la zona central; alrededor hay contornos PIRE constantes y el valor disminuye conforme abarca mayor área. Como ejemplo se mostrara en la imagen 3.3.1 la huella satelital que provee el satélite DirectTV 10 el cual opera en banda Ka.

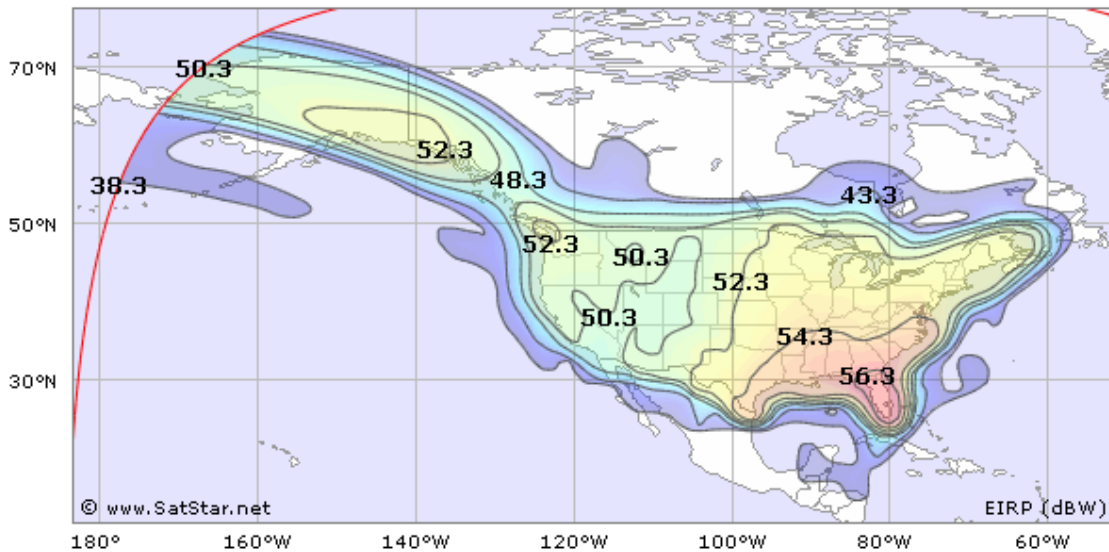


Imagen 3.3.1 Contornos PIRE del satélite DirecTV 10³

3.4 G/T

Conocido como factor de mérito G/T, es la medida del rendimiento de los equipos en la recepción; en otras palabras es un indicador de la sensibilidad del sistema de recepción. El factor de mérito se define como la relación entre la ganancia de la antena receptora con respecto a la temperatura de ruido del sistema de recepción, sus unidades son dBi/K.

$$\frac{G}{T} = G_{ant} - 10\log_{10}(T_{sys}) \quad \left(\frac{dBi}{K}\right)$$

En la imagen 3.4.1 se muestra un sistema de recepción, donde la antena se conecta a un alimentador que se conecta al receptor. Tomaremos en cuenta este sistema para explicar cómo se obtiene el factor de mérito.

³ Imagen consultada en http://satstar.net/beams/dtv10_conus.html

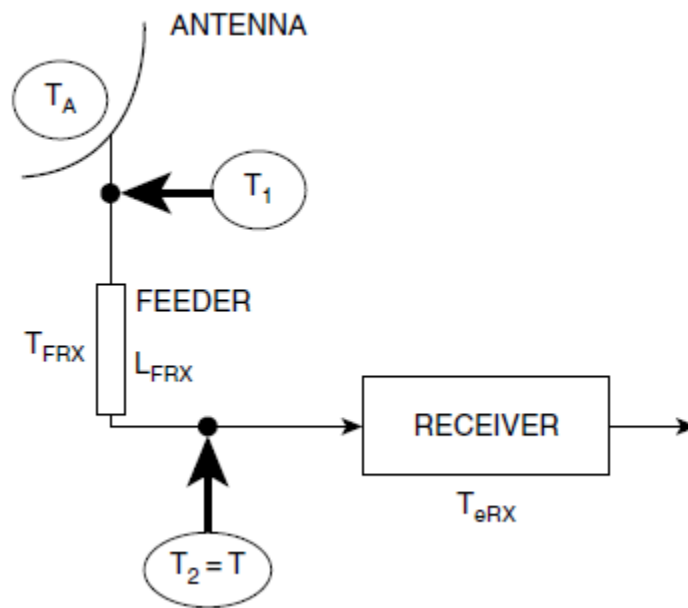


Imagen 3.4.1 Sistema de Recepción

Considerando que la temperatura de ruido del sistema T_{sys} toma en cuenta todas las fuentes de ruido dentro del equipo de recepción, entonces la temperatura de ruido del sistema T_{sys} está en función de la temperatura de ruido de la antena T_A , de las pérdidas del alimentador L_{FRX} , de la temperatura termodinámica del alimentador T_F y de la temperatura de ruido efectiva en el receptor T_{eRX} .

La conexión al alimentador se considera una pérdida que se encuentra a una temperatura termodinámica T_F ; esta conexión introduce al sistema una atenuación o pérdida L_{FRX} que corresponde a una ganancia $G_{FRX} = 1/L_{FRX}$ que es menor a 1.

La temperatura de ruido T_1 a la salida de la antena es la suma de la temperatura de ruido de la antena T_A y la temperatura de ruido generada por el alimentador y el receptor conectados en cascada. La temperatura de ruido efectiva T_e en el receptor es T_{eRX}

$$T_1 = T_A + (L_{FRX} - 1)T_F + \frac{T_{eRX}}{G_{FRX}} \quad (K)$$

Al considerar la entrada en el receptor, el ruido debe estar atenuado por el factor L_{FRX} . Sustituyendo en la ecuación anterior G_{FRX} por $1/L_{FRX}$, se obtiene la temperatura de ruido T_2 a la entrada del receptor:

$$T_2 = \frac{T_1}{L_{FRX}} \quad (K)$$

$$T_2 = \frac{T_A}{L_{FRX}} + T_F \left(1 - \frac{1}{L_{FRX}}\right) + T_{eRX} \quad (K)$$

La temperatura de ruido T_2 la cual toma en cuenta el ruido generado por la antena y el alimentador junto con el ruido del receptor se le conoce como temperatura de ruido del sistema T_{sys} a la entrada del receptor.

$$T_{sys} = T_2$$

$$T_{sys} = \frac{T_A}{L_{FRX}} + T_F \left(1 - \frac{1}{L_{FRX}}\right) + T_{eRX} \quad (K)$$

Teniendo el cálculo de la temperatura del sistema T_{sys} , y la ganancia de la antena receptora. Se puede calcular el factor de mérito sustituyendo estos datos en la siguiente ecuación:

$$\frac{G}{T} = G_{ant} - 10 \log_{10}(T_{sys}) \quad \left(\frac{dB_i}{K}\right)$$

3.5 Órbita Geoestacionaria

Cuando se habla de la manera en la que la Tierra y los demás planetas se mueven alrededor del sol, se hace referencia a que están en órbita alrededor del sol. De manera similar la Luna está en órbita alrededor de la Tierra, por lo tanto los satélites

CAPITULO 3 CARACTERÍSTICAS DE UN SATÉLITE GEOESTACIONARIO

también están en órbita alrededor de la Tierra. De esta manera es posible elegir una órbita que pase sobre los polos Norte y Sur o cualquier otra posibilidad intermedia.

La atención entonces se pone sobre los satélites de órbita Geoestacionaria cuyas características principales son:

1. Se le sitúa exactamente sobre el ecuador de la Tierra a una altura de 35,786 Km.
2. Se mueve a una velocidad equivalente al giro de la tierra sobre su propio eje, es decir, tiene una duración de 23 horas y 56 minutos.
3. El satélite tiene el mismo sentido de rotación de la Tierra sobre su eje.

Para este caso en particular, la órbita geoestacionaria permite a un satélite artificial aparentemente quedarse inmóvil respecto a cualquier punto de la superficie de la Tierra, este fenómeno se debe a que su inclinación con respecto al plano ecuatorial de la Tierra es igual a cero y su movimiento de rotación es síncrono.

Esta orbita es comúnmente utilizada para satélites con propósitos de teledifusión, de observación y meteorología. Véase figura 3.5.1.

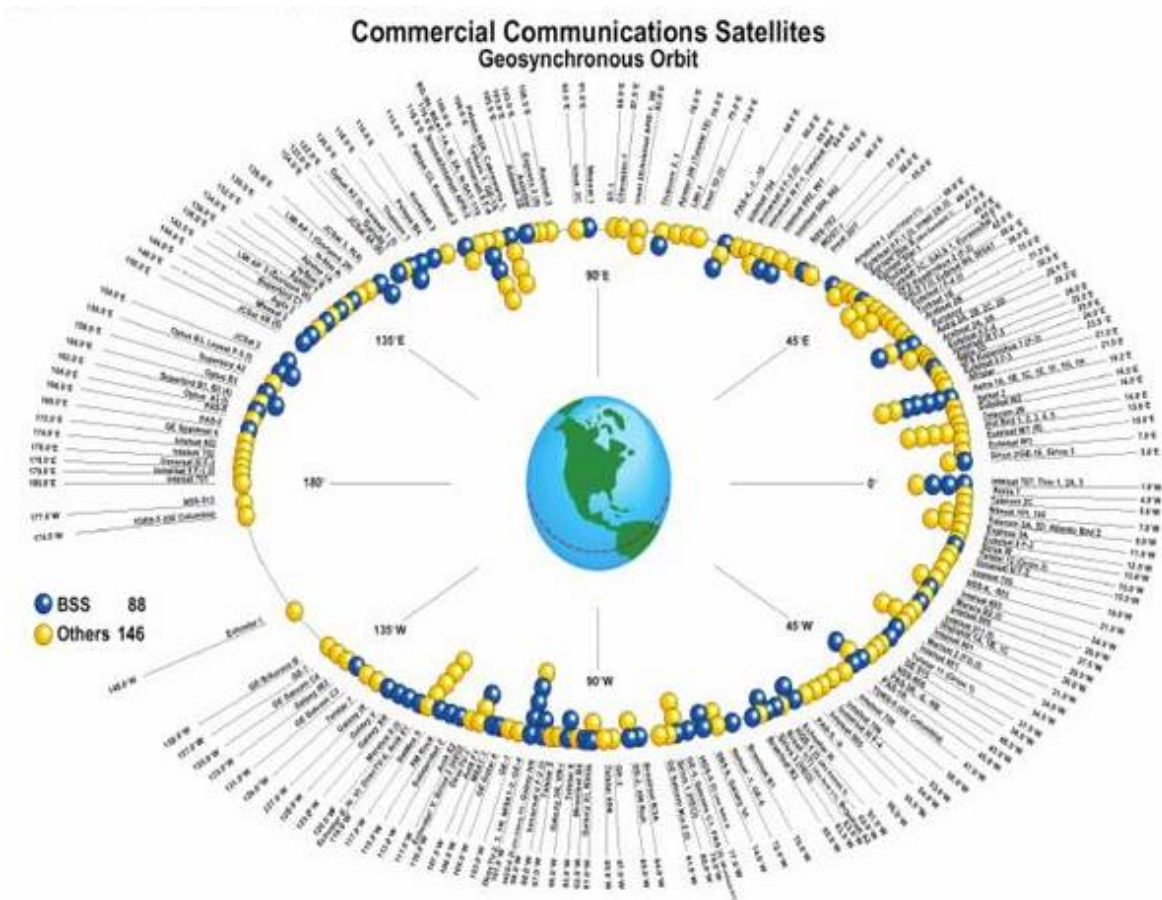


Figura 3.5.1 Satélites de órbita geoestacionaria

Otro aspecto importante es que desde esta ubicación el satélite tiene una cobertura de más de una tercera parte del planeta, por lo que bastarían tres satélites para tener una cobertura casi total a excepción de los polos.

Calculo de la órbita geoestacionaria.

La órbita geoestacionaria se puede calcular utilizando la segunda ley de Newton y la ley de gravitación universal dadas por:

$$F = G \frac{m M}{(r + R)^2}$$

$$a = \omega^2 (r + R)$$

$$\omega = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$$

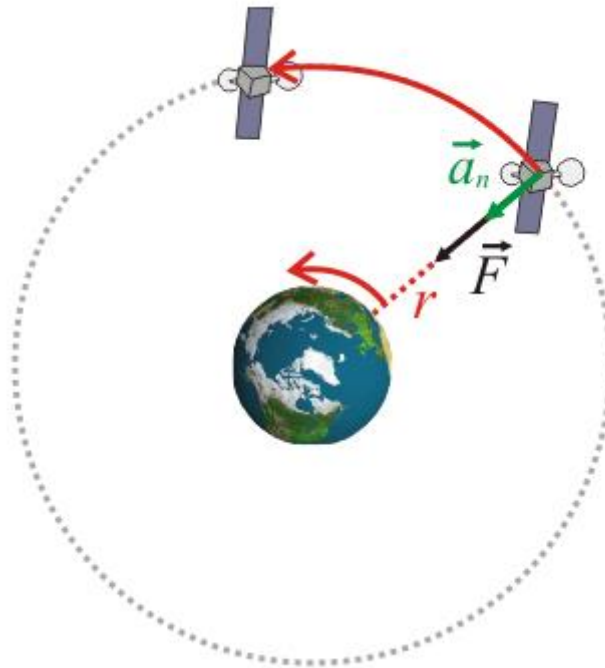


Figura 3.5.2 Cálculo de órbita geoestacionaria

La fuerza que la Tierra ejerce sobre el satélite es la fuerza gravitatoria:

Masa de la Tierra	M	5,973610 10 ²⁴ kg
Masa del satélite	m	
Radio de la Tierra	R	6,378 10 ⁶ m
Constante de Gravitación universal	G	6,67 10 ⁻¹¹ N m ² kg ⁻²

Tabla 3.5.1 valores para cálculo de órbita geoestacionaria

CAPITULO 3 CARACTERÍSTICAS DE UN SATÉLITE GEOESTACIONARIO

Como la velocidad angular es constante, la única aceleración que tiene el satélite es aceleración normal, paralela a la fuerza gravitatoria.

Aplicando la segunda ley de Newton se tiene:

$$F = ma$$
$$G \frac{m M}{(r + R)^2} = m \omega^2 (r + R)$$
$$r = \sqrt[3]{\frac{GM}{\omega^2}} - R$$

Por lo tanto, el valor de r para la órbita geoestacionaria es:

$$r = 35\,780 \text{ Km}$$

Derecho Internacional

Dado que esta órbita es única, no puede ofrecer un espacio ilimitado a cuantos satélites pretendan ser colocados en ella, por lo que a medida que aumente el número de satélites el espacio se irá reduciendo hasta producir un cierto grado de saturación generando problemas de interferencias radioeléctricas al momento de estar en operación. Por esta razón los satélites deben de tener una separación mínima de 36 Km, además de que al momento de llegar el término de su vida útil se deben de retirar de su ubicación para poder hacer uso de ésta con un nuevo satélite.

Esta administración del espacio y posicionamiento de satélites está regulada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), ellos prevén las circunstancias y condiciones de los recursos en materia de telecomunicaciones para hacer las

CAPITULO 3 CARACTERÍSTICAS DE UN SATÉLITE GEOESTACIONARIO

recomendaciones necesarias para contar con una buena regulación, uso y aprovechamiento adecuado de los servicios de la humanidad.

Esta órbita es comúnmente utilizada para satélites con propósitos de teledifusión, de observación y meteorología.

La siguiente tabla enlista las ventajas y desventajas de los satélites en órbita geoestacionaria:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Permanecen casi estacionarios con respecto a la estación terrena, por lo que no necesita equipos de rastreo.	Requieren a bordo dispositivos complicados y pesados de propulsión para mantenerlos en órbita fija.
Están disponibles para todas las estaciones terrenas dentro de su huella el 100% del tiempo	Poseen retardos de propagación debido a su gran altura. El retardo es de ida y vuelta entre dos estaciones terrenas (Aprox. 500 a 600ms)
No hay interrupción de transmisión porque no se hace cambio de satélite.	Requieren mayor potencia de transmisión y receptores más sensibles, debido a las distancias y las pérdidas de trayectoria.
Son despreciables los efectos de desplazamiento Doppler.	Requieren artificios espaciales de gran precisión para ponerlos y mantenerlos en órbita. También requieren motores de propulsión a bordo para mantenerlos en su órbita respectiva.

Tabla 3.5.2 comparativa de ventajas y desventajas de la órbita geoestacionaria

CAPITULO 4 ENLACE SATELITAL

4.1 Características de la señal.

Las ondas electromagnéticas se generan a partir de la aceleración de los electrones. El campo eléctrico originado por la carga acelerada depende de la distancia a la carga, la aceleración de la carga y del seno del ángulo que forma la dirección de aceleración de la carga y a la dirección al punto en que medimos el campo. El campo eléctrico que varía en el tiempo genera un campo magnético y viceversa.

De esta forma, la onda se auto propaga indefinidamente a través del espacio, con campos magnéticos y eléctricos generándose continuamente. Véase figura 4.1.1

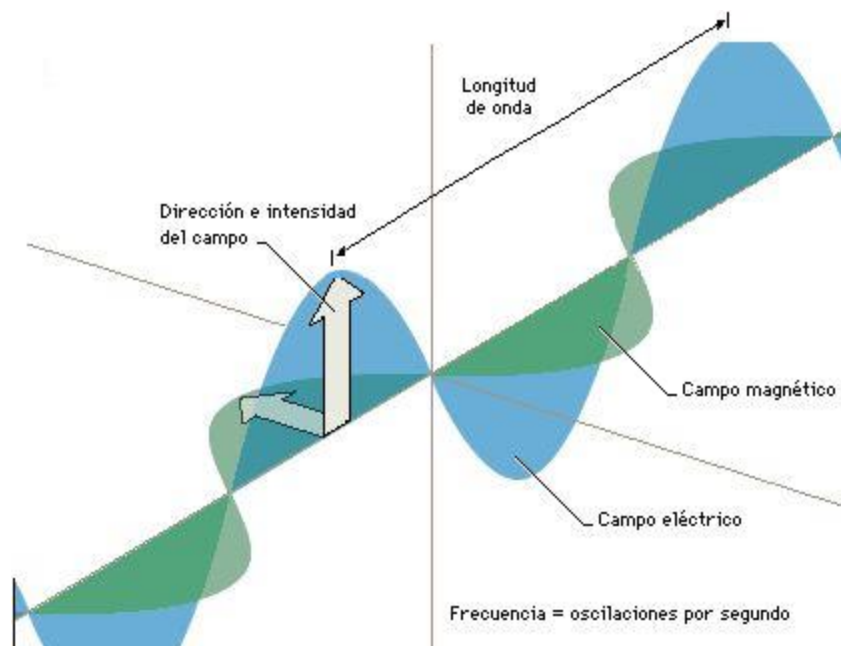


Figura 4.1.1 Onda Electromagnética

Longitud de Onda λ (Lambda): es la distancia entre dos crestas.

Amplitud: Es la máxima perturbación de la onda; la mitad de la distancia entre la cresta y el valle.

Frecuencia (f): Número de veces que se repite la onda por unidad de tiempo, su unidad es Hertz (Hz)

Periodo: $1/f$.

Velocidad: La velocidad de la onda depende del medio por el que se propague. En el vacío su velocidad es igual a la de la luz. En general $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$

Donde C es la velocidad de la luz $c=3 \times 10^8$ m/s, $\epsilon = 8.8541 \times 10^{-12}$ [F/m] y $\mu = 4 \pi \times 10^{-7}$ N/A²

Polarización es la dirección del campo eléctrico (por convenio) y estos pueden ser lineal, circular o elíptico, dependiendo de su propagación y también puede ser en las diferentes direcciones izquierda o derecha para las no lineales. Véase figura 4.1.2.

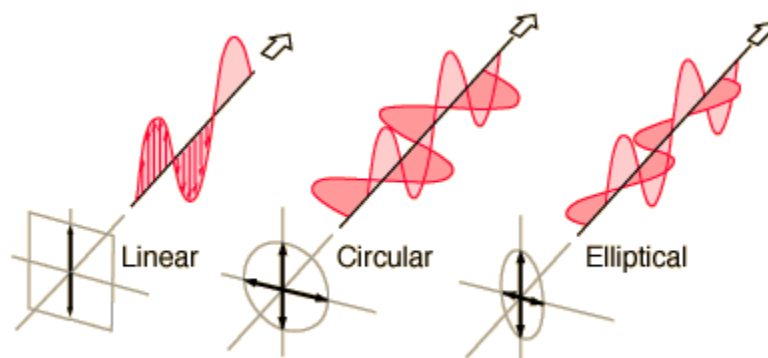


Figura 4.1.2 Tipos de polarización

Para tener una señal adecuada a nuestras necesidades tenemos múltiples parámetros que influyen en la calidad de la señal como las antenas, la PIRE, los transpondedores, G/T y dependiendo los elementos y las técnicas que se vayan a utilizar (Técnica de acceso al medio y modulación) para su transmisión y recepción e incluso la órbita del satélite (en este caso geoestacionario) es como obtendremos diferentes características de la señal.

4.1.1 Tipo de señal

Señales determinísticas y aleatorias

Una señal determinística (ver figura 4.1.3) es una señal en la cual cada valor está fijo y puede ser determinado por una expresión matemática, regla o tabla. Los valores futuros de esta señal pueden ser calculados usando sus valores anteriores teniendo una confianza completa en los resultados. Una señal aleatoria (ver figura 4.1.4) tiene mucha fluctuación respecto a su comportamiento. Los valores futuros de una señal aleatoria no se pueden predecir con exactitud, solo se pueden basar en los promedios de conjuntos de señales con características similares.

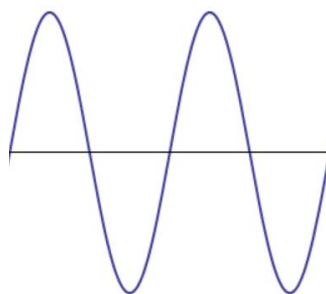


Figura 4.1.3 Señal determinística

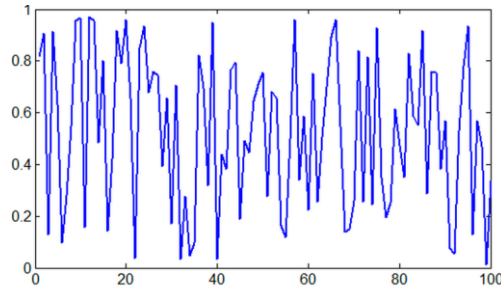


Figura 4.1.4 Señal aleatoria

Señal analógica

Una señal analógica (ver figura 4.1.5) es un tipo de señal generada por algún tipo de fenómeno electromagnético y que es representable por una función matemática continua en la que es variable su amplitud y periodo (representando un dato de información) en función del tiempo. Algunas magnitudes físicas comúnmente portadoras de una señal de este tipo son eléctricas como la intensidad, la tensión y la potencia, pero también pueden ser hidráulicas como la presión; térmicas como la temperatura, mecánicas, etc.



Figura 4.1.5 Señal Analógica

Señal Digital

La señal digital (ver figura 4.1.6) es un tipo de señal generada por algún tipo de fenómeno electromagnético en donde cada signo se codifica; el contenido de la misma puede ser analizado en término de algunas magnitudes que representan

valores discretos, en lugar de valores dentro de un cierto rango. Por ejemplo, el interruptor de la luz sólo puede tomar dos valores o estados: abierto o cerrado, o la misma lámpara: encendida o apagada.

Los sistemas digitales, por ejemplo un ordenador, usan lógica de dos estados representados por dos niveles de tensión eléctrica, uno alto, H y otro bajo, L (High y Low, respectivamente, en inglés).

Referido a un aparato o instrumento de medida, se dice que el aparato es digital cuando el resultado de la medida se representa en un visualizador mediante números (dígitos) en lugar de hacerlo mediante la posición de una aguja, o cualquier otro indicador, en una escala.

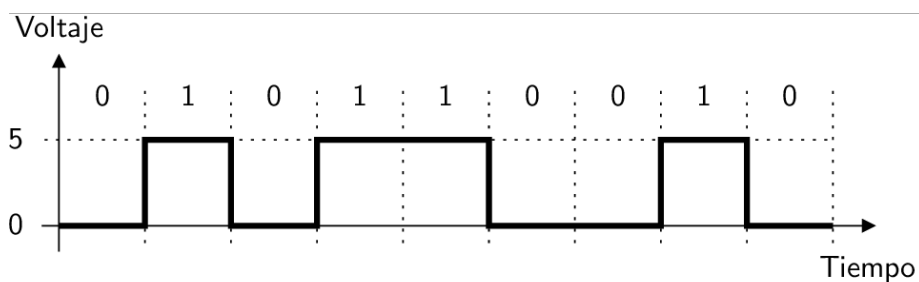


Figura 4.1.6 Señal Digital

Señal Eléctrica

Una señal eléctrica es un tipo de señal generada por algún fenómeno electromagnético. Estas señales pueden ser analógicas si varían de forma continua en el tiempo, o digitales si varían de forma discreta (con valores dados como 0 y 1). Se entiende por señal eléctrica a una magnitud eléctrica cuyo valor de intensidad depende del tiempo. Así, $v(t)$ es una tensión cuya amplitud depende del tiempo e $i(t)$ es una corriente cuya intensidad depende del tiempo. Véase figura 4.1.7.

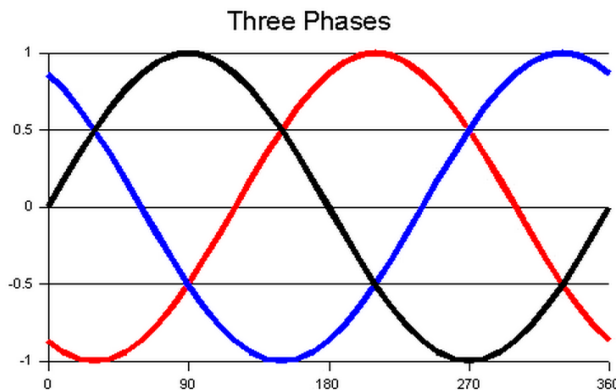


Figura 4.1.7 Señal Eléctrica

Señal Óptica

La comunicación óptica (ver figura 4.1.8) es cualquier forma de comunicación que utiliza la luz como medio de transmisión. Un sistema óptico de comunicación consiste de un transmisor que codifica el mensaje dentro de una señal óptica, un canal, que transporta la señal a su destino, y un receptor, que reproduce el mensaje desde la señal óptica recibida.

Hay muchas formas de comunicaciones ópticas no tecnológicas, incluyendo el lenguaje corporal y el lenguaje de señas. Técnicas como el telégrafo óptico, las banderas de señales, señales de humo y hogueras fueron las primeras formas de comunicación óptica tecnológicas.

La fibra óptica es el medio moderno más común para la comunicación óptica digital. Los sistemas de comunicaciones ópticas de espacio libre también son utilizados en una gran variedad de aplicaciones.

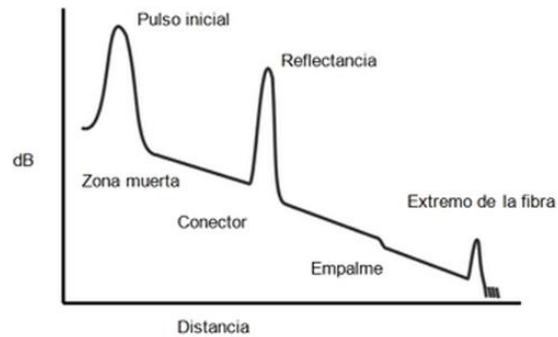


Figura 4.1.8 Señal óptica

Existe una variedad de servicios que ofrecen los sistemas de comunicación satelital, entre estos se encuentran servicios de telefonía, internet, televisión, rastreo satelital, videoconferencia, etc. Estos servicios siguen estándares de comunicación dependiendo del tipo de señal con la que trabajan, estos estándares describen el tipo de modulación que se debe emplear, la velocidad de transmisión de la señal, la potencia mínima a la entrada del receptor para recuperar la señal, el tipo de codificación de fuente y canal, la técnica de multiplexación a utilizar y la infraestructura recomendada para su implementación.

Las señales utilizadas con mayor frecuencia en las comunicaciones satelitales son de telefonía, sonido y televisión. La convergencia de los servicios para ser transportados por un solo medio de transmisión, nos lleva a trabajar con las señales antes descritas en forma digital como datos.

La telefonía digital (véase figura 4.1.9) se logra gracias al uso de codificadores de voz, para codificar la voz se utilizan varias técnicas las cuales se pueden categorizar como codificadores de forma de onda y en codificadores vocales.

La codificación de forma de onda implica tres procesos: muestreo, cuantización y codificación. Las técnicas más populares de codificación son:

- PCM (Pulse Code Modulation). El muestreo se lleva a cabo a una frecuencia de $f_s = 8 \text{ KHz}$ que es ligeramente más alta a lo estipulado en el teorema de

Nyquist. La cuantización transforma cada muestra de voltaje en un valor finito M de niveles discretos, esto introduce un error conocido como ruido de cuantización. Este proceso puede ser uniforme o no uniforme.

La codificación de fuente genera un flujo de bits que representan a la secuencia de muestras cuantificadas, la correspondiente velocidad de bit de codificación es $R_b = mf_s$, donde $m = \log_2 M$ representa el número de bits por muestra. Si $M = 256$, la velocidad de bits resultante es $R_b = 64 \text{ kbit/s}$.

- DM (Delta Modulation). Se realiza un muestreo a una frecuencia de $f_s = 16 \text{ o } 32 \text{ kHz}$. La cuantización aplica la diferencia entre las dos muestras sucesivas, esta diferencia es codificada en forma de un bit; por lo que el valor de la velocidad de bits resultantes depende de la frecuencia de muestreo.
- ADPCM (Adaptive Differential Pulse Code Modulation). En esta técnica una señal diferencial es generada al tomar el valor estimado de la señal de entrada obtenida de la muestra previa y restándole el valor de la muestra actual. Esta diferencia es cuantificada utilizando cuatro bits por muestra.

Los codificadores vocales asumen un cierto mecanismo de producción del habla y transmiten los parámetros de este mecanismo. La técnica LCP (Linear Predictive Coding) asume que el mecanismo de la producción del habla puede ser modelado por un filtro digital; los coeficientes de dicho filtro son periódicamente actualizados por una optimización estadística calculada sobre un número de muestras dado. Las condiciones del tiempo de duración de la trama (10 – 50 ms) dentro de la cual los coeficientes se transmiten a una velocidad de datos R_b tan baja como 2.4 – 4.8 kbit/s.

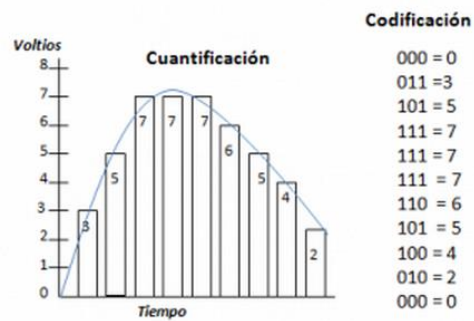


Figura 4.1.9 Codificación de la voz para ser transmitida posteriormente como datos

Las señales digitales de sonido de alta calidad como las que se producen en un programa de radio ocupan una banda que va de 40 Hz a 15 kHz. Para la emisión de señales de audio digitales, se necesita un programa de sonido análogo que pase por un convertidor de análogo a digital; esto implica que la señal analógica sea muestreada, cuantificada y codificada. Dos técnicas de codificación son consideradas, PCM (modulación por codificación de pulsos) y ADM (modulación delta adaptativa).

La Unión Internacional de Telecomunicaciones, de acuerdo a su recomendación ITU-R Rec. BO.651 indica que para la difusión por satélite de señales de audio con banda de 15 kHz, donde se emplea la técnica PCM para codificar la señal, la frecuencia de muestreo debe ser de 32 kHz con 14 bits por muestra. Véase figura 4.1.10.

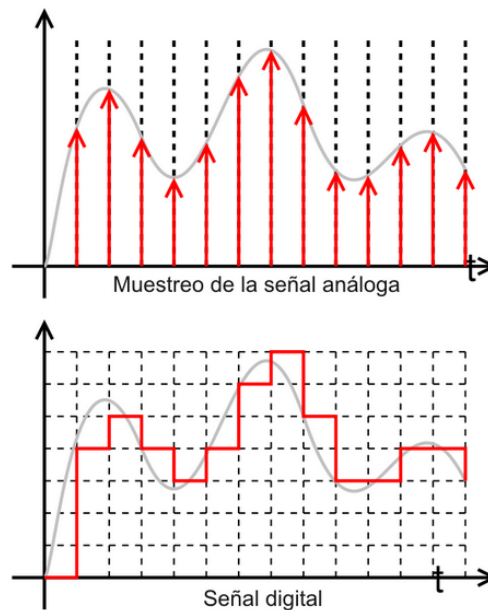


Figura 4.1.10 Ejemplo de señal analógica musical convertida a digital.

Las señales de televisión (véase figura 4.1.11) contienen tres componentes: la señal de luminancia que representa la imagen en blanco y negro, la señal de crominancia que representa el color, y una señal de sonido. Para promover la televisión de alta definición y eliminar los inconvenientes de las señales de video compuestas, han sido propuestos estándares digitales.

El estándar DVB-S2 es la nueva versión del estándar internacional de difusión por satélite combinando televisión y datos con aplicaciones profesionales para satélite. La principal razón para crear el estándar DVB-S2 fue incrementar la capacidad satelital para transmitir televisión digital.

Este estándar especifica cuatro tipos de modulación de los cuales QPSK y 8PSK están optimizados para aplicaciones que utilizan transpondedores en su modo no lineal, operando muy cerca de la zona de saturación. Los tipos de modulación 16 APSK y 32 APSK son orientados para aplicaciones profesionales que requieren operar con transpondedores que trabajen en su zona lineal con un cierto back off.

El estándar DVB-S2 es capaz de soportar el flujo de transmisión de una o varias señales en alta definición. Es compatible con nuevas aplicaciones que están compuestas por el nuevo estándar de codificación H.624/AVC lo que da como resultado el ahorro de ancho de banda. La nueva tecnología DVB-S2 fue diseñada para soportar las siguientes aplicaciones satelitales:

- Servicios de difusión
- Distribución profesional de TV
- Periodismo electrónico por satélite
- Servicios interactivos

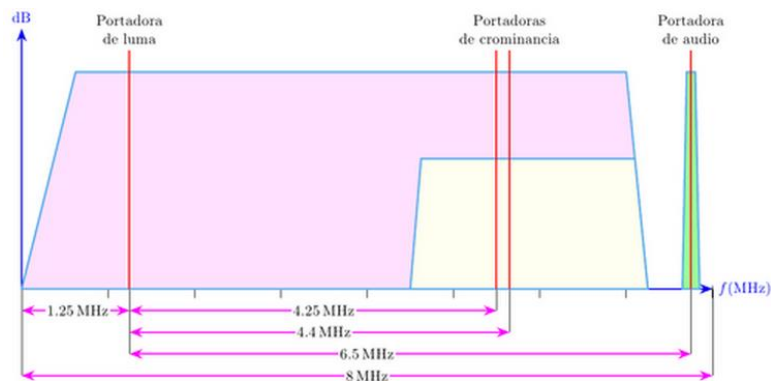


Figura 4.1.11 Ejemplo de señal de televisión

Los datos (ver figura 4.1.12) se han convertido en la forma más común para transferir información, estos datos se relacionan con una gran variedad de servicios que incluyen la telefonía sobre IP, video y el intercambio de información generado por computadoras. Uno de los aspectos más atractivos de la transmisión de datos es la habilidad de combinar en una sola transmisión los datos que son generados por varias fuentes individuales, lo que da como resultado un flujo de datos único llamado tráfico agregado. Este tráfico transfiere señales multimedia integradas por voz, video y otras aplicaciones de datos. El tráfico agregado en ocasiones muestra una variación reducida de la tasa de bits en comparación con el tráfico generado

por fuentes individuales, debido a que al combinar los datos provenientes de varias fuentes, se utiliza un multiplexación estadística.

Los operadores de redes utilizan el tráfico agregado para dimensionar sus enlaces satelitales con una capacidad menor a la suma de las tasas de bit pico de las fuentes individuales. Este dimensionamiento considera tanto el alcance del tráfico y las técnicas de multiplexación en uso.

El tráfico multimedia es transportado por medio de paquetes. La estructura de datos utilizada para el flujo del transporte que se desarrolla para transmitir programas de televisión, puede ser empleada también para llevar cualquier tipo de datos, utilizando como ventaja el amplio reconocimiento de sus estándares y el mercado masivo de producción de equipos. Un ejemplo de esto es la implementación de la técnica MPEG-4 para el flujo de paquetes utilizado en conjunto con el estándar DBV-S2 para la transmisión de datos.

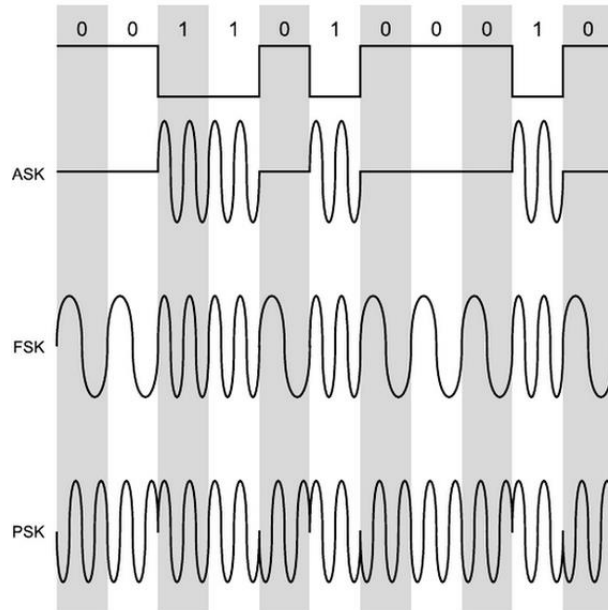


Figura 4.1.12 Señal de datos con diferentes tipos de modulaciones

4.1.2 Modulación

Se denomina modulación al proceso de colocar la información contenida en una señal denominada moduladora, que generalmente es de baja frecuencia, sobre una señal de alta frecuencia que se denomina portadora. Véase figura 4.1.13 La señal resultante de este proceso se denomina señal modulada y esta señal es la que viaja por el medio, en el caso de los satélites el medio es el aire de la atmosfera desde una baja presión hasta la presión ambiente de la Tierra. No hay que olvidar que existen factores climáticos que varían y afectan este medio de propagación de la señal.

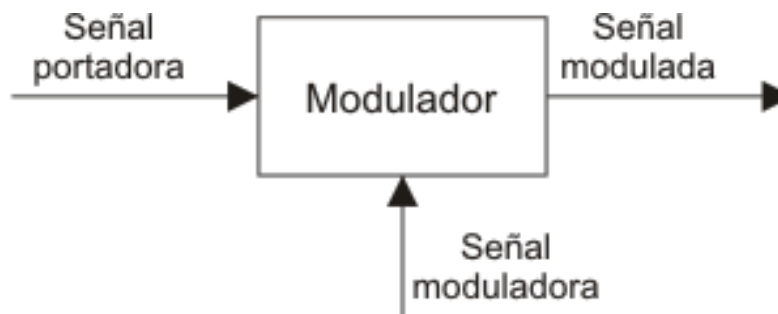


Figura 4.1.13 Proceso de Modulación

La modulación permite aprovechar de mejor forma un canal de comunicación ya que a altas frecuencias la eficiencia de transmisión es mayor, se pueden emplear métodos para la multiplexación de diferentes señales y la señal se vuelve menos susceptible al ruido e interferencias. La modulación se puede clasificar en dos grandes ramas, modulación analógica y modulación digital.

En el caso de las señales satelitales y gracias a la actual inclinación por la convergencia de servicios por medio de tráfico agregado, se utiliza modulación digital para trabajar con paquetes de datos; los beneficios que trae la modulación digital consigo, es que los sistemas son más sensibles, se cuenta con detección y corrección de errores, y se puede codificar la señal.

La modulación ASK suele utilizarse mayormente en enlaces por fibras ópticas.

La modulación FSK se emplea normalmente en enlaces asíncronos. Es el sistema ideal para operar a baja velocidad. Sin embargo, tiene una desventaja: el gran ancho de banda que consume.

La modulación PSK es el método más eficiente para transmitir datos binarios en presencia de ruido. La desventaja es que el diseño del emisor y receptor se complica extraordinariamente. Es ideal para comunicaciones síncronas.

La modulación QAM o Modulación de Amplitud en Cuadratura; es un método bastante eficiente para obtener el máximo rendimiento de un ancho de banda limitado. Esta técnica es una combinación de la modulación en amplitud y fase.

Modulación PSK

La modulación por desplazamiento de fase (Phase Shift Keying) es una forma de modulación angular que consiste en hacer variar la fase de la señal portadora entre un número de valores discretos; la señal moduladora es una señal digital y, por lo tanto, tiene un número de estados limitados.

Dependiendo del número de posibles fases a tomar, recibe diferentes denominaciones. Dado que lo más común es codificar un número entero de bits por cada símbolo, el número de fases a tomar es una potencia de dos. Así tendremos BPSK con 2 fases (equivalente a PAM), QPSK con 4 fases (equivalente a QAM), 8-PSK con 8 fases y así sucesivamente. A mayor número de posibles fases, mayor es la cantidad de información que se puede transmitir utilizando el mismo ancho de banda, pero mayor es también su sensibilidad frente a ruidos e interferencias.

Las modulaciones BPSK y QPSK son óptimas desde el punto de vista de protección frente a errores. Conceptualmente hablando, la diferencia entre distintos símbolos (asociados a cada fase) es máxima para la potencia y ancho de banda utilizados. No pasa lo mismo con 8-PSK, 16-PSK o superiores, para las que existen otras modulaciones más eficientes.

El esquema de modulación QPSK (Quadrphase PSK) se representa en el diagrama de constelación por cuatro puntos equidistantes del origen de coordenadas. Con cuatro fases, se pueden codificar dos bits por cada símbolo. La asignación de bits se hace mediante el código Gray; entre dos símbolos adyacentes solo se diferencian en 1 bit. Véase figura 4.1.14.

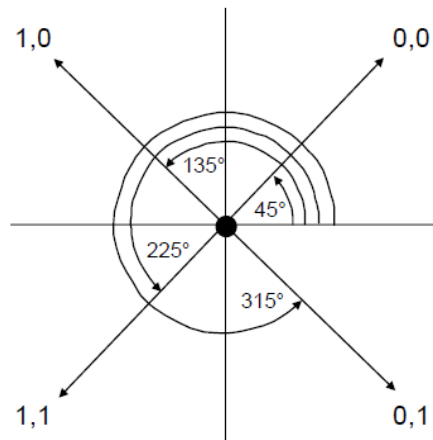


Figura 4.1.14 Constelación para QPSK con código Gray.

Modulación 8 PSK

Cuando se combinan tres bits consecutivos para representar un símbolo, surge la modulación por ocho desplazamientos de fases. En este esquema se utiliza una envolvente constante para la señal portadora. Véase figura 4.1.15

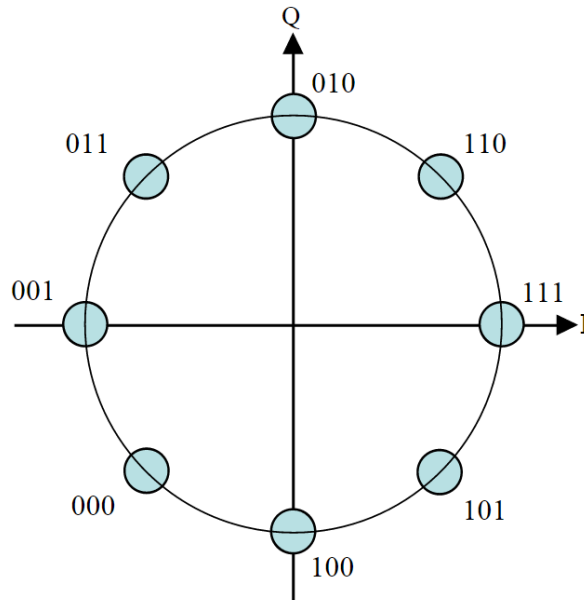


Figura 4.1.15 Constelación Modulación 8PSK

Cuando se trabaja con modulación de gran orden, la diferencia de fases entre el estado de las señales portadoras disminuye, por lo que se requiere incrementar la amplitud de la señal portadora para mantener la misma distancia entre los puntos de la constelación y obtener la misma tasa de error del bit (BER) a la salida del demodulador.

Modulación 16 APSK

Basado en la modulación QPSK donde el generador de la señal de RF superpone dos portadoras en cuadratura, se puede imaginar una modulación en amplitud para cada una de las portadoras, utilizando dos voltajes positivos y dos negativos; lo que da como resultado una modulación 16QAM donde los puntos de la constelación pueden tomar tres diferentes valores en amplitud.

Manteniendo el mismo número de estados $M=16$, es posible reducir el número de los valores en amplitud a dos, para distribuir los puntos de la constelación en dos

círculos concéntricos; a esta modulación se le conoce como 16APSK (16 desplazamientos de amplitud y fase). Véase figura 4.1.16.

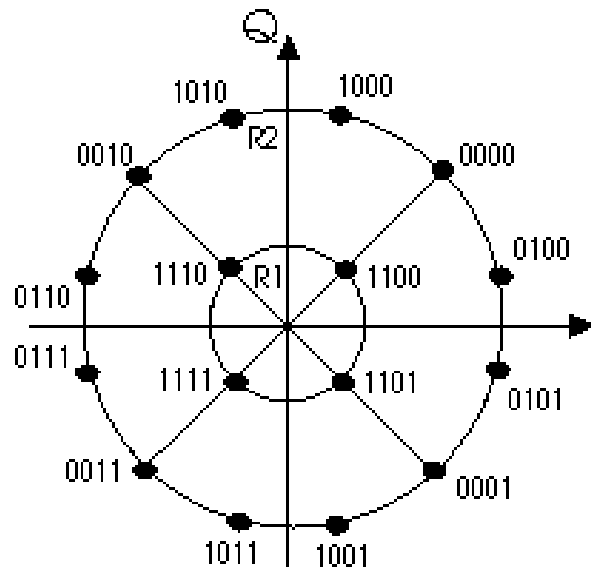


Figura 4.1.16 Constelación de la Modulación 16APSK

Modulación 32 APSK

Una modulación por desplazamiento con tres niveles en la amplitud de la portadora y en combinación con diferentes valores de fase, da como resultado una modulación 32APSK. Esta modulación utiliza cinco bits para representar un punto de su constelación, lo que da como resultado un total de 32 estados que pueden ser tomados por la señal. Véase figura 4.1.17

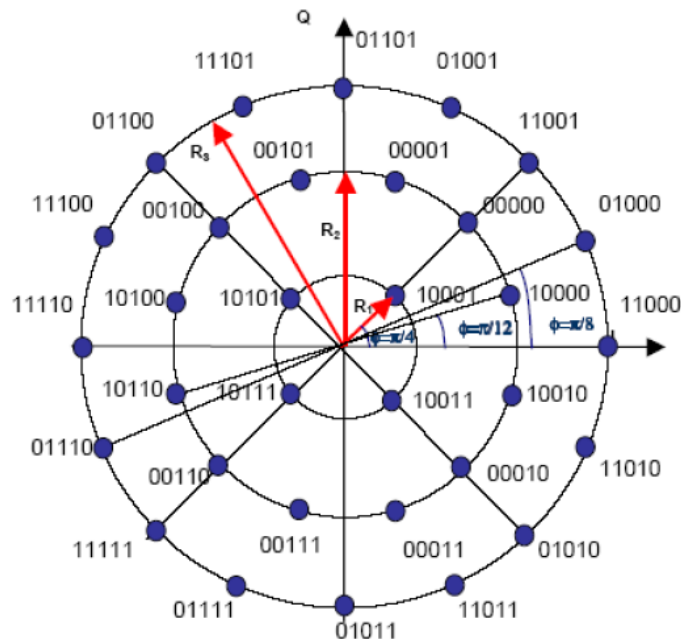


Figura 4.1.17 Constelación de la modulación 32APSK

Modulación ASK

Modulación por desplazamiento de amplitud (Amplitude shift keying). Es una modulación de amplitud donde la señal moduladora es digital. Los dos valores binarios (0 y 1) se representan con dos amplitudes diferentes y es usual que una de las dos amplitudes sea cero; es decir uno de los dígitos binarios se representa mediante la presencia de la portadora a amplitud constante, y el otro dígito se representa mediante la ausencia de la señal portadora, en este caso la frecuencia y la fase se mantiene constante como muestra la figura 4.1.18.

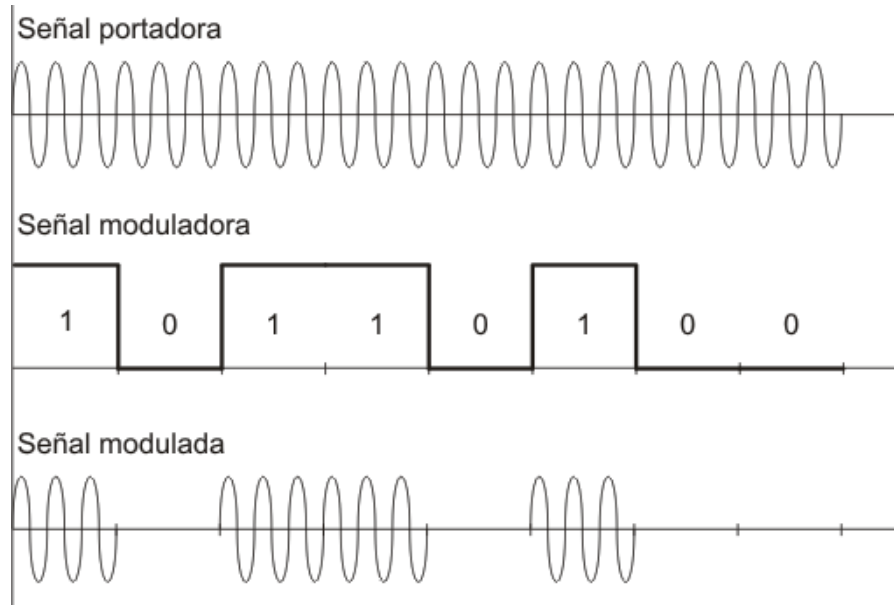


Figura 4.1.18 Modulación ASK

La modulación en ASK no es otra cosa que una variante de la modulación en AM que se adapta perfectamente a las condiciones de los sistemas digitales, además de que les permite trabajar sobre una sola frecuencia de transmisión en vez de tener que lidiar con pulsos cuadrados que contienen componentes en todas las frecuencias del espectro.

Su recuperación también resulta ser más sencilla, dado que sólo depende de sincronizar la frecuencia de las señales sinusoidales que sirven de portadoras y regeneradoras dependiendo si se hallan en el modulador o el demodulador.

El ASK por sí sólo, a pesar de todas estas consideraciones, no es uno de los métodos más utilizados debido a que para cada frecuencia es necesario realizar un circuito independiente, además de que sólo puede transmitirse un solo bit al mismo tiempo en una determinada frecuencia. Otro de los inconvenientes es que los múltiplos de una frecuencia fundamental son útiles y que este tipo de sistemas son susceptibles al ruido.

La modulación ASK tiene el inconveniente de que es muy sensible al ruido que se acumula a lo largo del canal, por lo que la relación señal-ruido (S/N) a la entrada del receptor puede ser tan baja, que la probabilidad de error no sea tolerable. Esta es la causa por la que no se utiliza la modulación ASK para transmitir datos a alta velocidad a menos que el medio de transmisión garantice una adecuada S/N, como en el caso de la fibra óptica.

Modulación FSK

Modulación por desplazamiento de Frecuencia (Frequency Shift Keying). Es un tipo de modulación de frecuencia cuya señal modulante es un flujo de pulsos binarios que varía entre valores predeterminados. En los sistemas de modulación por salto de frecuencia. La señal moduladora hace variar la frecuencia de la portadora, de modo que la señal modulada resultante codifica la información asociándola a valores de frecuencia diferentes.

El FSK binario es una Forma de modulación angular de amplitud constante, similar a la modulación en frecuencia convencional, excepto que la señal modulante es un flujo de pulsos binarios que varía entre dos niveles de voltaje discreto, en lugar de una forma de onda analógica que cambia de manera continua. Véase figura 4.1.19.

A la modulación FSK no le afecta el ruido aditivo del canal, dado que la señal modulada codifica la información con los cambios de frecuencia, es decir, el receptor sólo tiene que contar el número de cruces por cero de la señal que recibe. Por tanto, suprime el ruido simplemente recortando la amplitud de la señal FSK, sin que ello afecte a la información.

Sólo cuando el nivel de ruido es tan alto que llega a forzar el paso por cero de la señal, es cuando se producen errores. Esto es tanto como suponer que $S/N = 0\text{dB}$, es decir, $S = N$.

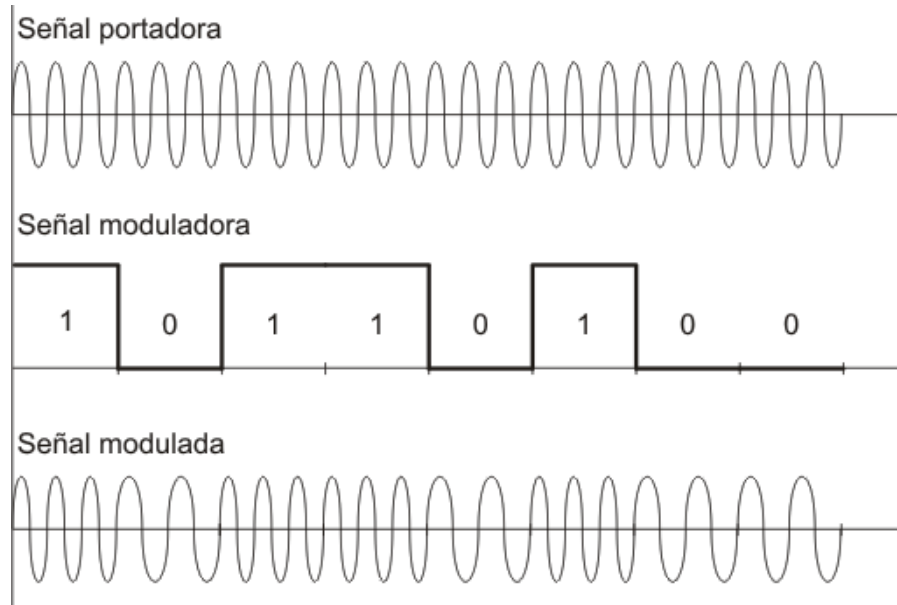


Figura 4.1.19 Modulación FSK

El comportamiento frente al ruido de las señales moduladas en frecuencia es mucho mejor que el de las señales moduladas en amplitud, pero a cambio, el ancho de banda de las señales FM es mayor que el de las señales AM.

Modulación QAM

La Modulación de Amplitud en Cuadratura o QAM es una modulación en la que el mensaje está contenido tanto en la amplitud como en la fase de la señal transmitida. Véase figura 4.1.20.

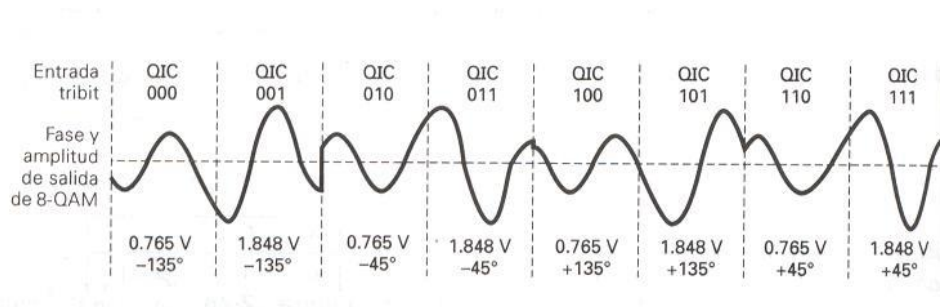


Figura 4.1.20 Modulación 8-QAM

La modulación QAM se basa en la transmisión de dos mensajes independientes por un único camino. Esto se consigue modulando una misma portadora, desfasada 90° entre uno y otro mensaje. Esto supone la formación de dos canales ortogonales en el mismo ancho de banda, con lo cual se mejora en eficiencia de ancho de banda que se consigue con esta modulación.

QAM puede tener distintas combinaciones de amplitud y fase dando lugar a los diferentes tipos de modulación QAM como 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM, 256-QAM. Véase figura 4.1.21.

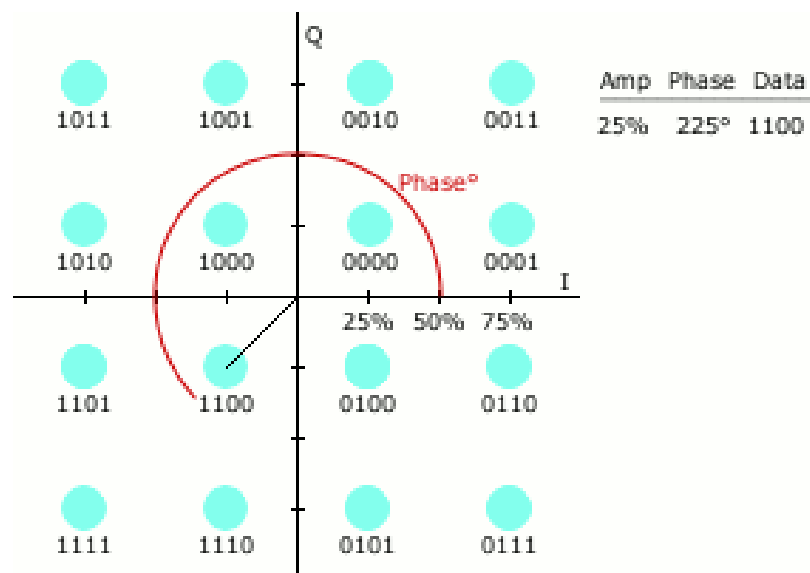


Figura 4.1.21 Constelación 16-QAM

Tiene como entrada un flujo de datos binarios, el cual es dividido en grupos de tantos bits como se requieran para generar N estados de modulación dando una modulación N -QAM, se tienen grupos de m -bits para genera N estados de modulación, es decir, $2^m=N$ donde $m = \text{bits}$

Esta técnica de modulación favorece el aprovechamiento del ancho de banda disponible.

La afectación a las perturbaciones como el ruido y las interferencias depende de la separación de los puntos de su diagrama de estados, mientras más separados estén mejor será la calidad de la señal.

4.1.3 Tasa de Transferencia

En telecomunicaciones (o en redes de datos) se sabe que la información que se envía, cuando es transportada, se le agrega una cantidad de información administrativa que depende de la tecnología usada, por lo tanto hay que distinguir entre transferencia efectiva y rendimiento. El primer caso es la capacidad total de la tecnología, el segundo es lo que se puede medir en términos de la información del usuario, por ejemplo, en Ethernet de 100Mbps la transferencia efectiva es 100Mbps pero el rendimiento puede ser de 60 a 80Mbps, dependiendo de la congestión de la red, de la calidad de los enlaces, de otros factores muy específicos y complejos como los protocolos adicionales a Ethernet.

Las partes del enlace satelital punto a punto son: la estación terrena transmisora, el satélite, la estación terrena receptora, este esquema sirve de base para una configuración de múltiples receptores. Entre estaciones terrenas y el satélite se forman los enlaces, que son la radiación de energía a través del canal.

El transmisor amplifica la señal para ser radiada por la antena, en el canal se tendrá un declive de la potencia y el receptor debe amplificarla sin introducir ruido. Las variables que limitan un enlace vía satélite, son la potencia y el ruido, descrito por el teorema de la capacidad de canal de Shannon-Hartley, que es la máxima tasa de información que podemos transmitir en determinado ancho de banda.

$$R \leq C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Donde:

$$R = \text{tasa de transmision} \left[\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right]$$

$$C = \text{Capacidad del canal} \left[\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right]$$

$$W = \text{Ancho de Banda [Hz]}$$

$$\frac{S}{N} = 10 \log_{10} \left[\frac{\text{Potencia de la señal recibida}}{\text{Potencia del ruido}} \right] [\text{dB}]: \text{relacion señal a ruido}$$

La desigualdad de Shannon marca un límite, resultado de la teoría de la información, en la cual indica hasta cuantos bits por segundo por hertzio, [bps/Hz], se pueden transmitir y cuanta probabilidad de error habrá usando determinada potencia con determinado ruido. Esto se define de acuerdo a la modulación ya que es la forma de onda que se propaga adecuadamente por el medio de transmisión. Una vez elegida la modulación, se tienen dos opciones para optimizar el sistema: aumentar la potencia o disminuir el ruido mediante la reducción de la temperatura del sistema.

Para comunicaciones digitales se tiene:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \left(\frac{W}{R} \right)$$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{2^{\frac{R}{W}} - 1}{\frac{R}{W}}$$

Donde:

$$E_b = S \left(\frac{1}{R} \right): \text{Energia por bit [J]}$$

$$N_0 = \frac{N}{W}: \text{Densidad espectral de la potencia del ruido} \left[\frac{\text{W}}{\text{Hz}} \right]$$

$$\frac{R}{W}: \text{Eficiencia espectral} \left[\frac{\text{bps}}{\text{Hz}} \right]$$

S : Potencia de la señal [W]

N : Potencia de ruido [W]

Para medir la relación señal a ruido, lo que se toma en cuenta es la relación en decibeles de la potencia de la señal portadora y la del ruido. La señal modulada, se denomina con la letra C (carrier). Es la cantidad de energía por unidad de tiempo o el área bajo la curva de la función que representa a la señal. El ruido es una señal no deseada de diferentes fuentes, es una variable aleatoria, el ruido térmico es un proceso con función de probabilidad Gaussiana que se suma a la señal transmitida y que su densidad espectral es constante en el ancho de banda, el ruido blanco, se conoce también como ruido Gaussiano blanco aditivo (AWGN), se designa con la letra N (noise).

$$\frac{C}{N} = 10 \log_{10} \left[\frac{\text{Potencia de portadora recibida}}{\text{Potencia del ruido}} \right]$$

Lo que se desea de un enlace es que con el mínimo uso de recursos, se obtenga el máximo beneficio, es decir, mínima potencia, óptima tasa de bits.

Tomando en cuenta que el diseño de satélites tiene como consecuencia que la potencia y las antenas que usan son parámetros fijos, el resultado del cálculo de enlaces nos dirá qué elementos se pueden modificar en el segmento terrestre. También las frecuencias son asignadas por lo que los parámetros para ajustar un adecuado enlace se reducen al tamaño de las antenas y potencia de las estaciones terrenas. Los efectos de propagación son otro factor importante que afecta al enlace, y se mencionaran en los siguientes subcapítulos.

4.1.4 Codificación del Canal

La codificación se utiliza para preparar la información digital para transmitirse a través del enlace. La codificación consiste en uno o más procesos numéricos que adaptan los datos a las características específicas del enlace satelital. La tabla 4.1.1 muestra las formas comunes de codificación con sus beneficios y características.

Técnica de Codificación	Aplicación	Beneficios	Impacto en el rendimiento
Forward Error Correction FEC	Reducción de la tasa de error	Menor tasa de error. Reduce el requerimiento de potencia (E_b/N_0)	Incrementa la tasa de información para acomodar los bits de redundancia.
Compresión	Reduce el total de bits, ya sea con pérdida o con pérdida	Menor número de datos a enviar o almacenar. Mejor utilización del enlace y sistema.	Incrementa el rendimiento, puede reducir la calidad y genera retardo.
Encriptación	Seguridad de la información	Fabrica datos privados y dificulta su corrupción.	Implica una gestión compleja y puede introducir retardo.
Adaptación de Protocolo	Redes de comunicaciones, usualmente aplicado en TCP/IP	Mejora la experiencia del usuario.	Puede incrementar el rendimiento. Introduce complejidad al sistema.

Tabla 4.1.1 Formas de codificación en comunicaciones satelitales

La corrección de errores hacia adelante o FEC (Forward Error Correction) es un tipo de codificación que se aplica para mejorar la calidad de la transmisión en términos de la Tasa de Error de Bit o BER (Bit Error Rate). Una reducción en el BER se puede tomar como una mejora de la calidad o para reducir la cantidad de potencia transmitida. Las técnicas modernas de FEC utilizan combinaciones de códigos de corrección de errores individuales a través de procesos de concatenación.

En muchos casos el FEC es incorporado dentro de las funciones de modulación y demodulación.

Para la modulación digital, el ancho de banda es directamente proporcional a la tasa de datos:

$$B = a_m R$$

Donde R es la tasa de datos dada en bits por segundo y a_m es una constante determinada por el tipo de modulación digital empleado y por el FEC. Por ejemplo, para una modulación QPSK el valor a_m es de 0.6.

Ruido, interferencia y distorsión de un enlace de comunicaciones digitales ocasionan confusión en el equipo que procesa la información recibida, ocasionando que los bits no se puedan leer. El resultado de este fenómeno se mide a través del BER que es el la tasa de bits erróneos dividido entre el total de bits enviados en un cierto intervalo de tiempo.

El efecto del BER puede ser relativamente menor, como un “click” durante una llamada, o serio en el caso en que el bit represente un número en programas de cómputo.

Para controlar estos errores en el enlace, se utiliza el FEC en donde los datos son codificados y se expande el número de bits en la trama para que un decodificador sofisticado reciba y corrija los errores que se produjeron a través del enlace. Dos clases de códigos FEC son aplicados en la mayoría de los casos, códigos de bloque y códigos convolucionales.

En los códigos de bloque, el codificador asocia r bits de redundancia a cada bloque de n bits de información; cada bloque es codificado independientemente de los otros. La codificación de cada bloque no depende del contenido de los anteriores, por lo que no se requiere almacenar registros de ellos. Los códigos cíclicos son utilizados con mayor frecuencia, particularmente los códigos Reed Solomon (RS) y los Bose, Chaudhari y Hocquenghem (BCH).

En los códigos convolucionales, los bits de entrada no son agrupados en bloques sino que se ejecutan a través de un dispositivo de cómputo que, a su vez, genera otra trama de bits con una tasa elevada de bit.

A la relación entre el número k de bits de información y el número n total de bits transmitidos se le conoce como relación de código de una señal FEC.

$$r = \frac{k}{n} < 1$$

Tomando en cuenta que R_i representa la velocidad binaria de información, la velocidad binaria después de la codificación, o sea la velocidad binaria transmitida es:

$$R_c = R_i/r$$

El incremento en la tasa de datos causa que el ancho de banda en el enlace se incremente. Un ejemplo de del proceso que se lleva a cabo al crear un código convolucional se muestra en la figura 4.1.22

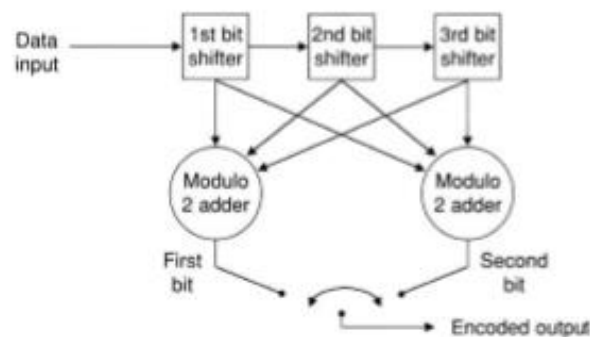


Figura 4.1.22 Diagrama de un codificador convolucional.

Un parámetro importante en el diseño de un codificador convolucional es la longitud de restricción, que es la cantidad de bits de entrada que influyen en la salida del codificador de un solo bit.

Para el campo de las comunicaciones, una meta típica de un bit de error por cada 100 millones de bits transmitidos. La eficiencia de los códigos de corrección de errores de un canal es especificada por la tasa de codificación R que es igual a la relación del código de una señal FEC.

$$R = r = \frac{k}{n}$$

La Figura 4.1.23 muestra la relación del BER con la tasa de codificación R ; se puede observar que al reducir la tasa de codificación la probabilidad de error también es reducida.

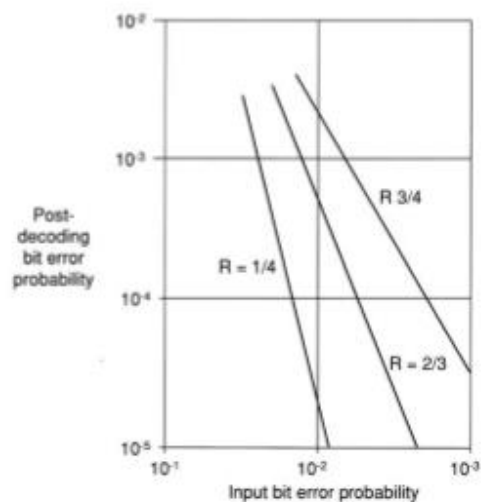


Figura 4.1.23 Rendimiento del BER vs Tasa de codificación R

De acuerdo a la recomendación de la UIT REC S.522, se recomienda que para el servicio de telefonía digital el BER sea de 10^{-3} . Para el servicio de televisión digital, el estándar DVB-S estipula que se requiere de un BER entre 10^{-10} y 10^{-11} después de la codificación interna Reed-Salomon y de un BER de 2×10^{-4} después de la codificación de Viterbi.

4.1.5 Técnicas de acceso al medio.

El canal y la capacidad de comunicación entre una estación terrena y el satélite se ven limitados por un ancho de banda particular para uso del mismo satélite. Por esta razón se buscaron alternativas para hacer un uso eficiente de este canal y brindar la posibilidad de que múltiples estaciones puedan establecer comunicación con el satélite. De esta manera surgieron las Técnicas de multiplicación de canales a través de un mismo medio físico que permitirían hacer realidad este objetivo.

FDMA (Frequency Division Multiplex Access)

Esta técnica de acceso se caracteriza por la división del ancho de banda de cada transpondedor en bandas más pequeñas (portadoras), por esta razón es necesario contemplar también pequeñas bandas de guarda para evitar solape de espectros y cada portadora a su vez puede modularse de manera analógica (FM) o digital (PSK).

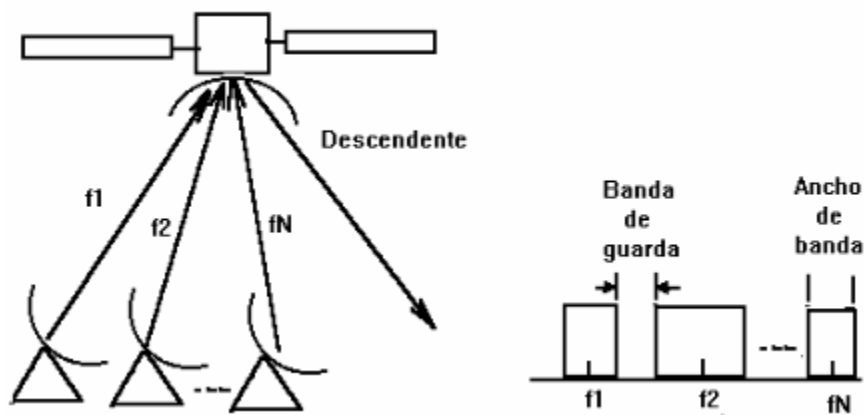


Figura 4.1.24 Esquema de FDMA

Cada segmento y portadora se puede asignar a un número determinado de estaciones, sin embargo de antemano es posible visualizar la limitante de esta

técnica, ya que cuando el número de portadoras aumenta, el ancho de banda asignado a cada portadora debe disminuir, lo que conlleva a una reducción de la capacidad de las mismas.

Además se tiene un principal inconveniente que son los productos de intermodulación en la banda ocupada producidos por la característica de transferencia no lineal en los amplificadores de potencia.

$$f(IM) = m_1f1 + m_2f2 + m_nfn; m_i: 0,1,2,3 \dots \left(\frac{C}{No}\right)_{TOTAL}^{-1} = \left(\frac{C}{No}\right)_{ASC}^{-1} + \left(\frac{C}{No}\right)_{DEC}^{-1} + \left(\frac{C}{No}\right)_{INTERM}^{-1}$$

Para reducir el ruido de intermodulación es necesario trabajar lejos de la saturación del amplificador reduciendo la potencia a la entrada del mismo, Back-off de entrada (BOin). Reducción de la potencia de salida, Back-off de salida (BOout).

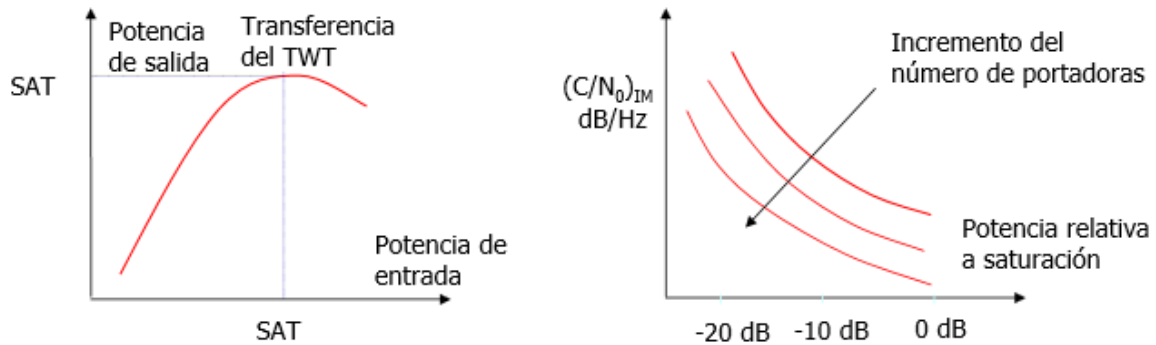


Figura 4.1.25 Graficas del amplificador.

Cuando la capacidad total es la suma de las capacidades de las portadoras parecería que la capacidad debería mantenerse sensiblemente constante. Pero al reducir los productos de intermodulación hay que aumentar el back-off y esto reduce sensiblemente la capacidad.

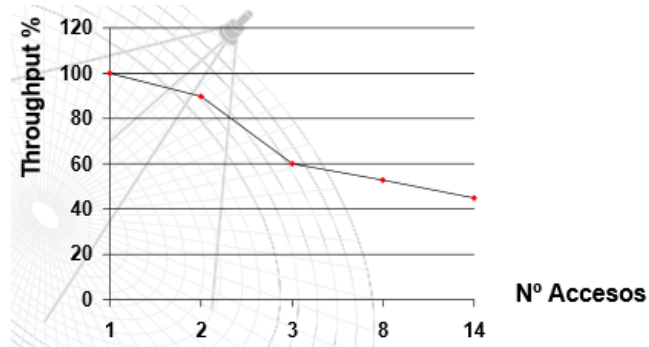


Figura 4.1.26 Troughput de FDMA

TDMA (Time Division Multiplex Access)

En esta técnica de acceso las estaciones acceden al canal de comunicación de acuerdo a un esquema temporal; es decir, múltiples estaciones comparten un canal en común utilizando un orden temporal para transmitir. Por esta razón es posible utilizar todo el ancho de banda del transpondedor para cada una de las estaciones.

De manera similar a las bandas de guarda utilizadas en FDMA, el TDMA requiere tiempos de guarda para adaptar las transmisiones entre usuarios en la trama. Se requieren también preámbulos para transmitir recuperación de las portadoras y sincronización de reloj. Como las ráfagas provienen de estaciones diversas es necesario sincronizar por medio de osciladores no coherentes, los circuitos de recuperación de portadora y sincronismo deben de ser rápidos.

Este método de acceso permite eliminar los productos de intermodulación ya que el transpondedor solo amplifica una portadora en cada instante de tiempo, entonces se puede trabajar con los amplificadores en saturación obteniendo una PIRE máxima.

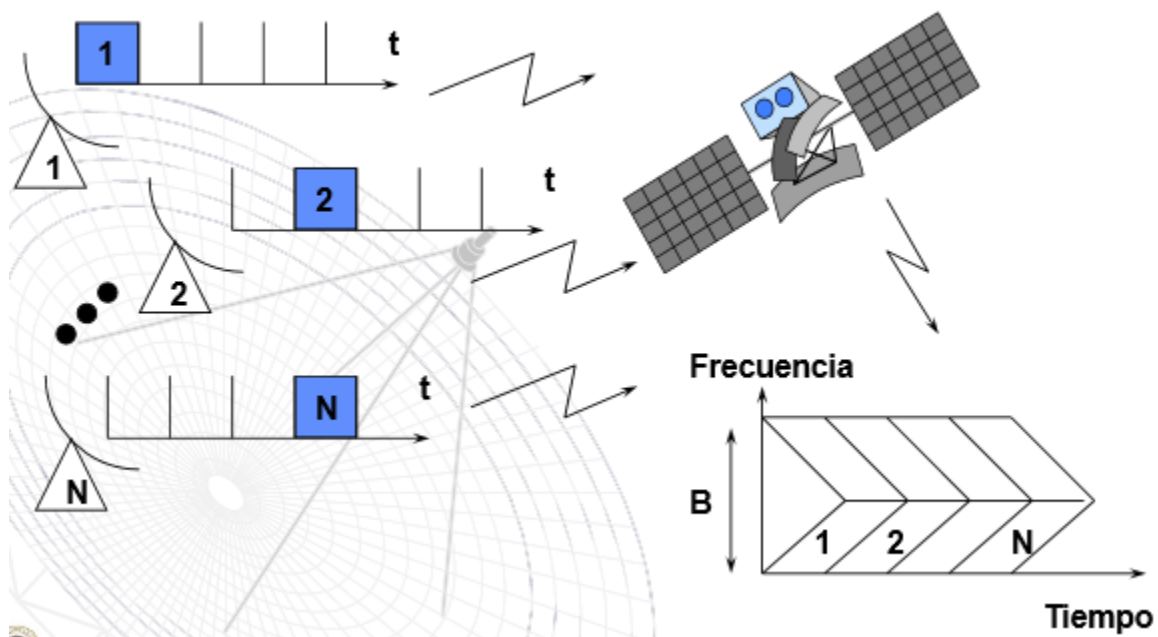


Figura 4.1.27 Esquema de TDMA

Cada estación puede transmitir una portadora durante una fracción de tiempo (ráfaga) del transpondedor que se repite cíclicamente en una trama. A su vez esta trama lleva la información encapsulada de las estaciones transmisoras.

La estación que recibe la trama recibirá incluso información que no le pertenece, sin embargo con la sincronización y la referencia que lleva la misma trama será capaz de extraer la información que le pertenece.

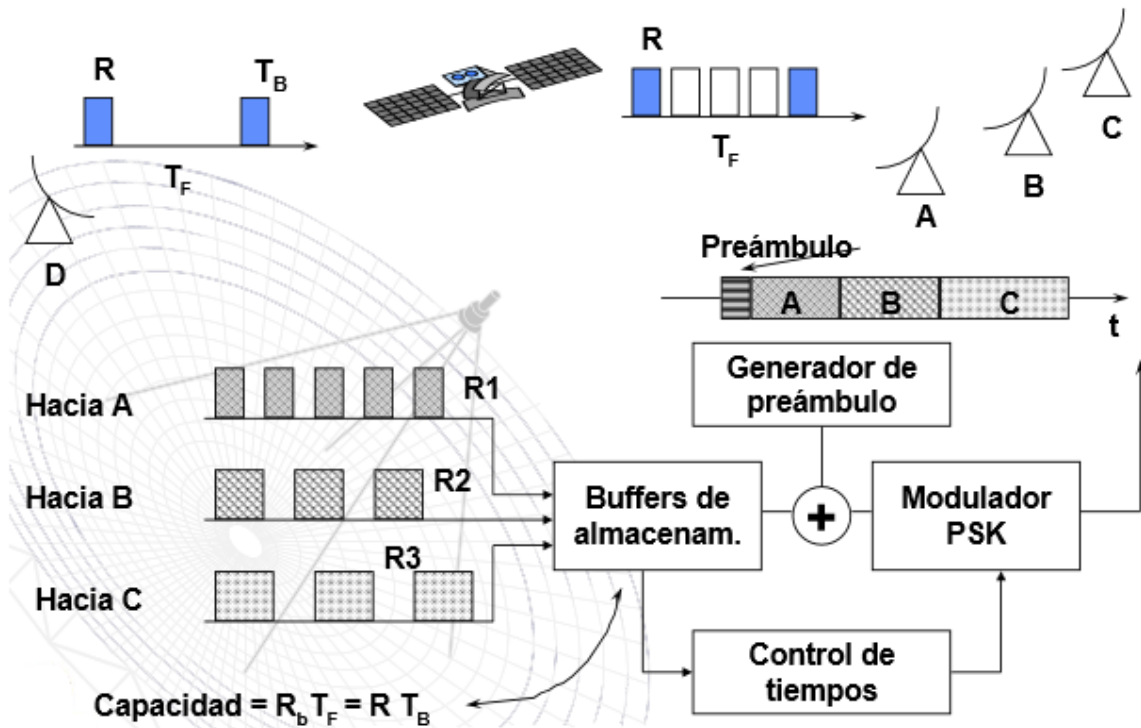


Figura 4.1.28 envío de tramas en TDMA

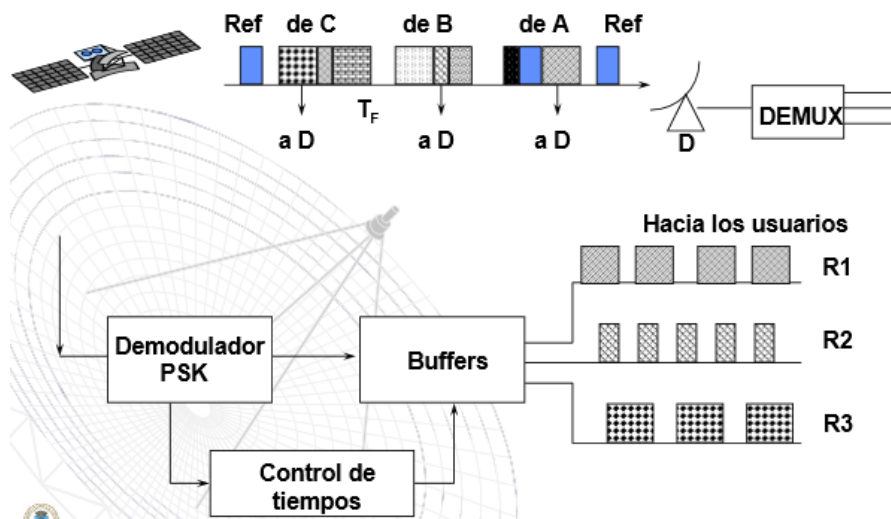


Figura 4.1.29 Recepción de trama en TDMA

La estructura de la trama es la siguiente:

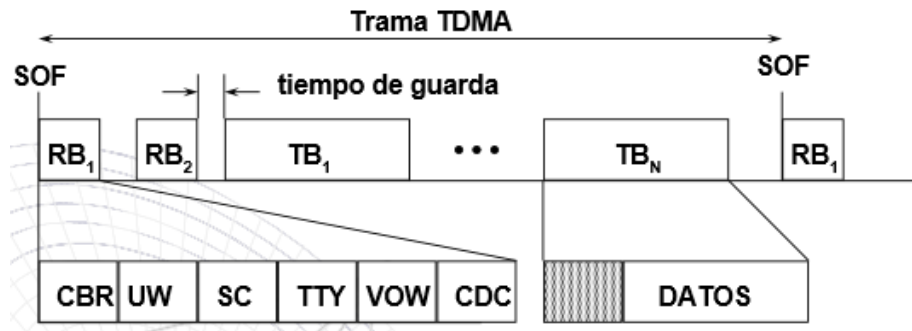


Figura 4.1.30 Estructura de la trama en TDMA

SOF= Comienzo de la trama

RB= ráfaga de referencia (indica el comienzo de trama SOF)

TB= Ráfaga de tráfico compuesta de un preámbulo + campo de datos

CBR= Palabra única (secuencia para sincronización de comienzo y resolución de ambigüedad de fase.

SC= Canal de servicio; TTY, VOW= canales de telefonía y telegrafía entre estaciones.

CDC= Canal de control y retardo para sincronización de la transmisión.

Es posible observar el funcionamiento de la estructura de la trama teórica en comparación con una implementada por INTELSAT.

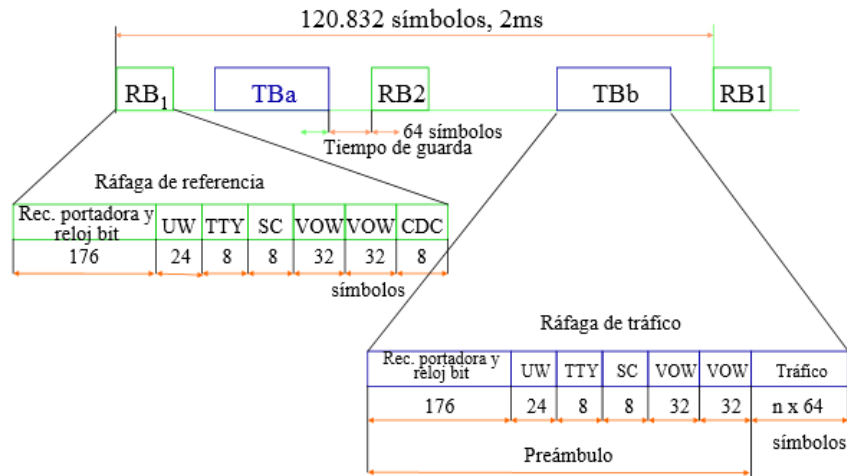


Figura 4.1.31 Trama TDMA con valores de INTELSAT

Sincronización

La sincronización es fundamental para evitar que las ráfagas de una estación se solapen debido al movimiento del mismo satélite lo que hace que la sincronización no sea sencilla y los aspectos a considerar deban calcularse.

El tiempo de propagación entre dos estaciones terrenas puede variar hasta 600µs:

$$2 \times \frac{85 \text{ Km}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} \approx 600 \mu\text{s}$$

El satélite puede cambiar su distancia a una estación 85 Km en 12 Horas produciendo una velocidad radial media equivalente de 7Km/h con valores de hasta 20 Km/h

$$\frac{85 \text{ Km}}{12 \text{ h}} = 7 \text{ Km/h}$$

El cambio de la posición de una ráfaga debido al efecto doppler será de:

$$2 \times \frac{V}{c} = 2 \times \frac{20 \text{ Km/h}}{3 \times 10^5 \frac{\text{Km}}{\text{h}} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} = 37 \frac{\text{ns}}{\text{s}}$$

Para una transmisión QPSK de 120 Mbps el tiempo de duración de símbolo es:

$$\frac{10 \text{ simbolos} \times 17 \text{ ns/simbolo}}{40 \text{ ns/s}} = 4.25 \text{ seg}$$

Debido a la complejidad de la sincronía, es necesario tomar en cuenta también las distintas jerarquías que existen para este fin

- A nivel de portadora:

Es necesario recuperar la frecuencia y la fase de la portadora para su demodulación coherente.

- A nivel de bit:

Se necesita determinar el instante óptimo de decisión para detectar los bits y recuperar el mensaje.

- A nivel de ráfaga:

Hay que detectar el comienzo de ráfaga mediante la palabra única para el posicionamiento correcto de la ráfaga dentro de la trama.

- A nivel de trama:

Se utiliza la ráfaga de referencia para sincronizar el tráfico de las estaciones.

Detección de la palabra única

La palabra única (UW) es una secuencia con alta autocorrección de baja correlación cruzada. La detección se realiza correlacionando la secuencia de llegada con una copia de la UW, esto permite establecer el comienzo de la trama de la estación de referencia, el comienzo de las ráfagas en la trama de las estaciones de tráfico y también permite la resolución de la ambigüedad de fase en la recuperación de portadora.

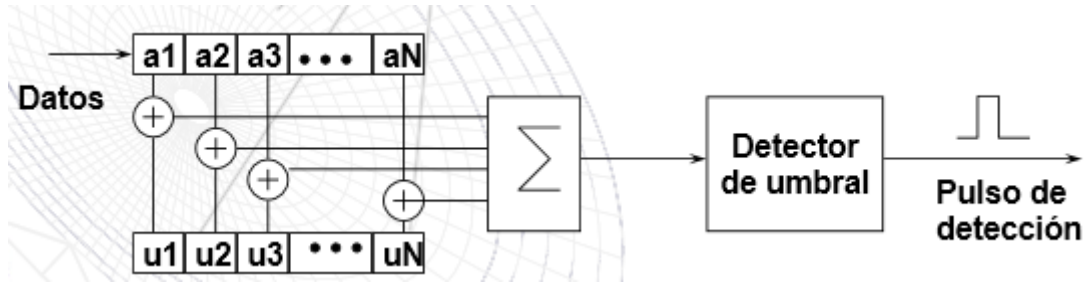


Figura 4.1.32 Diagrama de detección de la palabra única

El máximo número de errores permitidos en la detección de la palabra única es el umbral de detección ϵ .

Una no detección de la palabra única de una ráfaga de tráfico causa que todos estos datos se pierdan. En transmisión de voz esto produce impulsos o “clics”, en el caso de datos se incrementa considerablemente la tasa de bit erróneo.

Una detección falsa de la palabra única de la ráfaga de referencias causa la transmisión fuera de sincronismo de la estación y pérdida de ráfagas.

Para una longitud dada de la palabra única, si se aumenta el umbral de detección se disminuye la probabilidad de no detección pero se aumenta la probabilidad de detección falsa.

Si N es la longitud de la palabra única y p es la probabilidad media de error en recepción entonces la probabilidad de detección correcta P_c será la suma de las probabilidades de 0, 1, 2, ..., ϵ errores en el bloque de N , es decir:

$$P_c = \sum_{i=0}^{\epsilon} \binom{N}{i} p^i (1-p)^{N-i}$$

Para la no detección:

$$P_M = 1 - P_c = \sum_{i=\epsilon+1}^N \binom{N}{i} p^i (1-p)^{N-i}$$

La probabilidad de detección falsa P_F viene dada por la probabilidad de que una secuencia de datos aleatoria solo difiera en ϵ o menos bits de la UW. Para una palabra única de N bits hay 2^N combinaciones de datos que pueden producirse aleatoriamente. Si el umbral fuese 0 entonces la probabilidad de falsa detección sería $1/2^N$.

Para cualquier valor de umbral ϵ el número total de combinaciones en las que pueden aparecer ϵ o menos errores es:

$$\sum_{i=0}^{\epsilon} \binom{N}{i}$$

Por lo tanto la posibilidad de que N bits aleatorios se decodifiquen como palabra única (o probabilidad de falsa detección) es:

$$P_F = \frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{\epsilon} \binom{N}{i}$$

Ejemplo: para $N=40$, $\epsilon=5$ y $p=10^{-3}$ resultan $P_M = 5 \times 10^{-12}$ y $P_F = 10^{-6}$

Si la velocidad de transmisión es de 60 Mbps se producirá una no detección cada 3333 segundos y 60 detecciones falsas cada segundo.

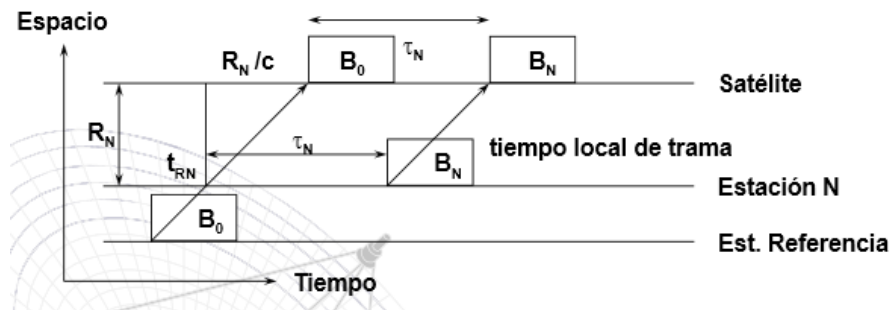


Figura 4.1.33 Sincronización para la palabra única en TDMA

- B_N : Rafaga transmitida por la estación N-esima ($N=0$ para la de referencia)

- t_{RN} : comienzo del tiempo local de trama
- R_N : distancia de la estación N al satellite
- τ_N : retardo entre el comienzo de trama y la ráfaga B_N de la estación N
- c : velocidad de la luz

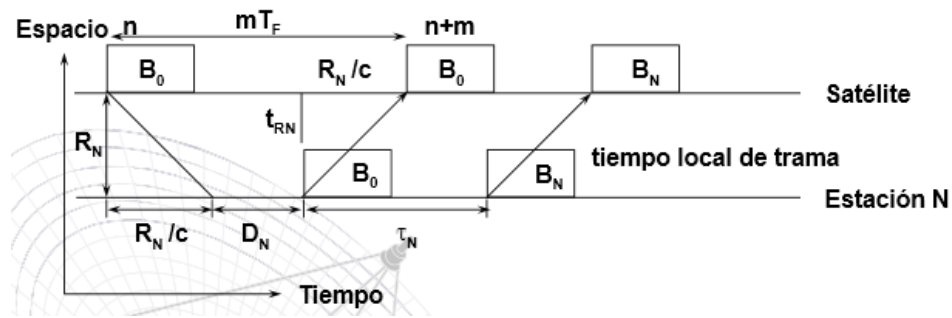


Figura 4.1.34 Sincronización en TDMA

El instante de comienzo local de trama t_{RN} se determina introduciendo un retardo D_N respecto a la recepción de la ráfaga de referencia B_0 .

$$D_N = mT_F - 2\frac{R_N}{c}$$

m : numero entero seleccionado de forma que D_N sea positivo.

T_F : Duración de la trama.

Ejemplo: (Telecom1): $m > 14$ $T_F = 20$ ms, $\frac{2R_N}{c} = \frac{2 \times 42000 \text{ Km}}{c} = 280$ ms.

Sincronización en Lazo cerrado

La estación N-ésima determina su tiempo local de trama sumando $D_N(j)$ al instante de recepción de la ráfaga de referencia, posteriormente añade el retorno τ_N y transmite su ráfaga.

Se observa la trama en recepción y la posición de su ráfaga respecto a la de referencia. Aquí se obtiene el error $\varepsilon_N(j)$ y se actualiza el retardo: $D_N(j+1) = D_N(j) - \varepsilon_N(j)$

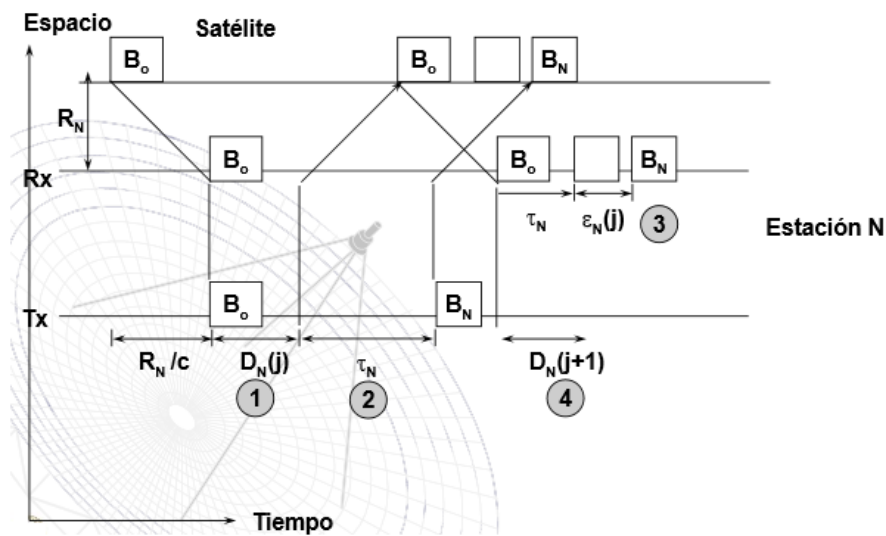


Figura 4.1.35 Sincronización en lazo cerrado

Las estaciones transmisoras en un haz que transmiten hacia otros haces no reciben su propia ráfaga después de ser transmitida por el satélite, por lo tanto no es posible por medio de la sincronización en lazo cerrado así que existen dos soluciones alternativas:

1.- la sincronización con realimentación cooperativa, en la que cada haz del sistema tiene una estación de referencia, cada estación de referencia observa los errores de sincronía de las estaciones de los demás haces y a continuación informa a esas estaciones de las acciones correctoras necesarias.

2.- sincronización en lazo abierto establece tres estaciones que miden el retardo de sus transmisores al satélite y envían la información a la estación de referencia de tal manera que por medio de la triangulación se obtiene, en la estación de referencia, la posición del satélite y su distancia a cada una de las estaciones.

La estación de referencia informa a las estaciones ordinarias de su distancia al satélite y el plan de tiempos de transmisión actualizado, esto implica mayores tiempos de guarda que en el lazo cerrado (tiempo de cálculo de la posición, tiempo de distribución de la información al resto de las estaciones, etc).

Debido a que este método se basa en las tramas es posible entonces medir la eficiencia con la que operan estas tramas de la siguiente manera:

Eficiencia = tiempo de transmisión de datos / tiempo total

$$\eta = (T_F - \sum t_i) / T_F$$

$$\eta = 1 - \sum t_i / T_F$$

Donde $\sum t_i$ es la suma de los tiempos de guarda y de los preámbulos.

Como mejoras se pueden considerar los siguientes puntos:

Utilizar un tiempo de trama mayor sin embargo requiere mayor capacidad de almacenamiento y esto aumenta el retraso en la transmisión.

Utilizar menos tiempo de guarda entre ráfagas implica una sincronización más precisa de la red.

Utilizar preámbulos más cortos implica menos tiempo para la recuperación de portadora y tiempo de bit, o utilizar palabras únicas más cortas aumentando el riesgo de detección falsa o de no-detección.

Rendimiento

Finalmente es importante no perder de vista la importancia que tiene esta técnica para poder utilizar el mismo canal de comunicación eficientemente.

Entonces es necesario observar el comportamiento de este sistema de multiplexación donde $\sum t_i$ se incrementa proporcionalmente con el número de ráfagas o lo que es lo mismo con el número de estaciones de la red. Por lo tanto, la eficiencia disminuye al aumentar el número de estaciones.

El throughput depende del número P de ráfagas en la trama. Si p es el número de bits de cabecera y g el número de bits del tiempo de guarda y R el régimen binario entonces:

$$\eta = 1 - (P + 2)(p + g)/R T_F$$

Tomando valores de INTELSAT

P=N

p=560

g=128

R=120.832 Mbps

$T_F = 2$ ms

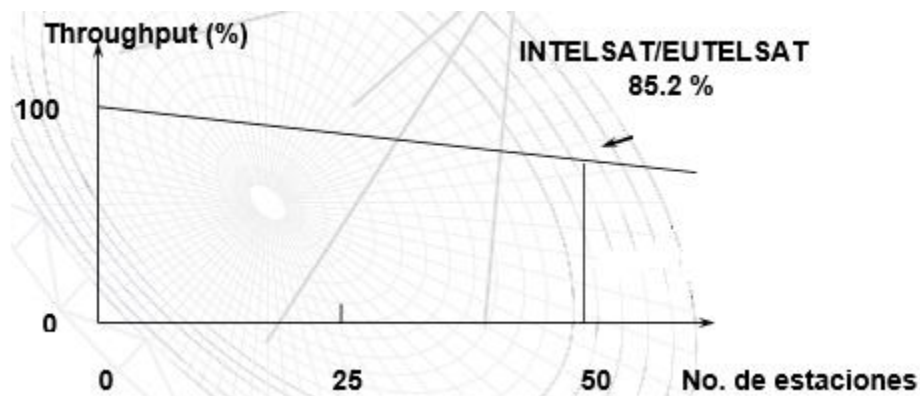


Figura 4.1.36 Throughput TDMA

CDMA (Code Division Multiple Access)

Este método de acceso al medio se basa en la tecnología de espectro expandido y un esquema especial de codificación, por el que a cada transmisor se le asigna un código único, escogido de forma que sea ortogonal respecto al del resto; el receptor capta las señales emitidas por todos los transmisores al mismo tiempo, pero gracias al esquema de codificación puede seleccionar la señal de interés si conoce el código empleado a pesar que todas las señales compartan la misma frecuencia.

En este esquema es posible que todas las estaciones de la red puedan transmitir continuamente y simultáneamente ocupando el mismo ancho de banda, sin embargo esto produce interferencia entre las transmisiones de las diferentes estaciones.

El código único es una secuencia binaria que se combina con la información a transmitir por cada transmisor. Debe distinguirse fácilmente de los demás códigos e incluso de una copia retardada del mismo. Los bits del código se denominan chips.

Para poder transmitir el código y la información se requiere más ancho de banda, de aquí la razón por la que se le denomina espectro ensanchado. Esta técnica utiliza fundamentalmente la secuencia directa DS y la de salto de frecuencia FH. Otras técnicas que utilizan son las de salto de tiempo TH, uso de sistemas FM con pulsos o señales chirp y técnicas híbridas como FH+DS, TH+FH y TH+DS.

Los sistemas CDMA suelen funcionar de forma síncrona. La sincronización de la red simplifica mucho, pero es difícil encontrar buenos códigos.

Principalmente se utiliza en comunicaciones militares, para evitar interferencias de banda estrecha y elevada potencia en la misma banda o para dificultar la información a escuchas no deseadas (sistemas LPI), en comunicaciones civiles, al ensanchar en recepción, se cancela la interferencia procedente de otros satélites si el ancho del haz es alto (apertura de antena reducida) y también para evitar o aprovechar el multitrayecto, si el retardo es superior a la duración de chip.

Existen dos técnicas para el acceso múltiple por división de código que son:

1.-Secuencias directas DS-CDMA

En la transmisión de espectro ensanchado de secuencia directa, la señal de datos de usuario se multiplica por una secuencia de código. Mayormente, se utilizan secuencias binarias. La duración de un elemento en el código se llama el "tiempo de chip". La relación entre el tiempo de símbolo del usuario y el tiempo de chip se llama el factor de propagación. La señal de transmisión ocupa un ancho de banda que es igual a los tiempos de factor de propagación del ancho de banda de los datos de usuario.

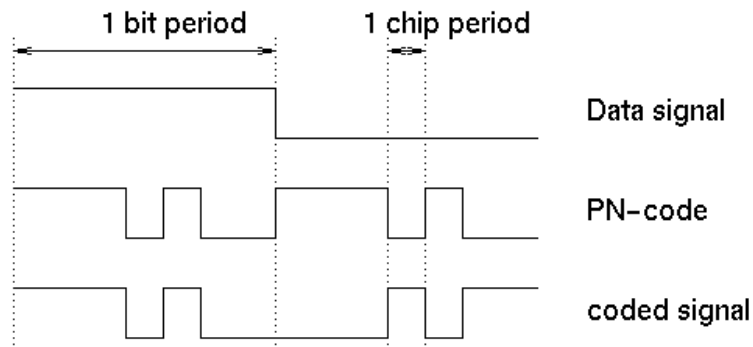


Figura 4.1.37 Secuencia DS-CDMA

En el receptor, la señal recibida se multiplica de nuevo por el mismo código (sincronizado). Esta operación elimina el código, por lo que se recuperan los datos de usuario transmitidos.

Una dificultad importante en la transmisión de secuencia directa es el efecto cerca-lejos. Si más de un usuario está activo, la potencia de interferencia entrante es suprimida por la correlación cruzada entre el código del usuario y el código de referencia de la interferencia. En el caso de que la interferencia está más cerca del receptor, entonces el usuario de referencia, los componentes de interferencia puede no ser suficientemente atenuadas por el proceso de inversión de la dispersión.

En los sistemas CDMA celulares, se necesita (adaptativa) de control de potencia para evitar este problema.

Otro aspecto importante es la Diversidad inherente, donde en un canal de desvanecimiento por trayectos múltiples existen retardados y reflexiones que interfieren con la señal directa, sin embargo, una señal DS-CDMA que sufre de dispersión multitrayecto puede ser detectado por un receptor de tipo rake. Este receptor combina de manera óptima las señales recibidas a través de múltiples caminos.

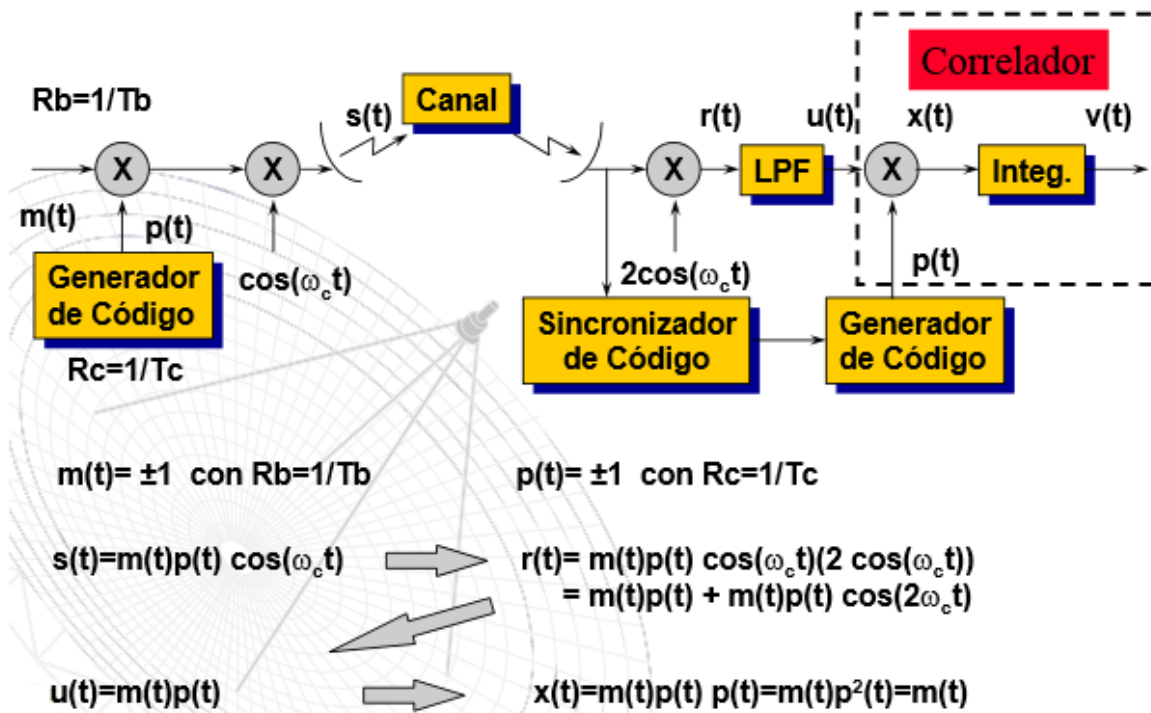


Figura 4.1.38 Diagrama a bloques del sistema SD-TDMA

El espectro de la portadora modulada con $m(t)$ sería:

$$S'(f) = \frac{C}{R_b} \frac{\text{sen}(\pi(f - f_c)/R_b)}{\pi(f - f_c)/R_b}$$

Mientras que el de $s(t)$ sería:

$$S(f) = \frac{C}{R_c} \frac{\text{sen}(\pi(f - f_c)/R_c)}{\pi(f - f_c)/R_c}$$

Por lo tanto, se ha ensanchado en la relación R_c/r_b que se denomina ganancia de proceso.

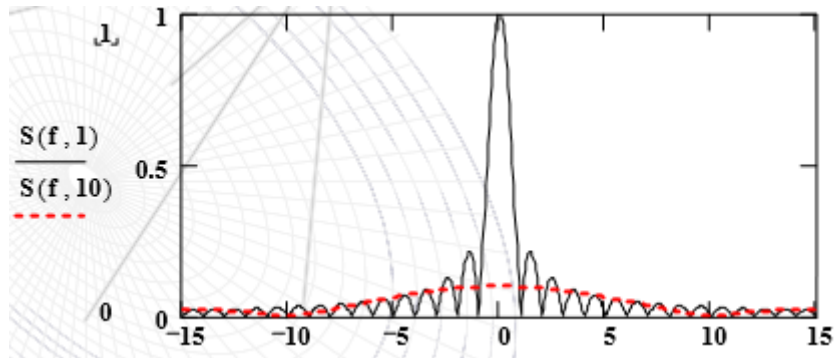


Figura 4.1.39 Espectro ensanchado

La estación receptora recibe la señal procesada $s(t)$ superpuesta e las señales $s_i(t)$ de los $N-1$ restantes usuarios, por lo tanto:

$$r(t) = s(t) + \sum_{i=1}^{N-1} s_i(t)$$

La señal de salida del multiplicador de código es:

$$x(t) = m(t)p^2(t) + \sum_{i=1}^{N-1} m_i(t)p_i(t)p(t)$$

Con lo que se vuelve a ensanchar el espectro de las señales interferentes, que ya había sido ensanchado en transmisión. Estas señales actúan por tanto como ruido con una densidad espectral de potencia muy baja.

Si $J(t)\cos(\omega_c t)$ es una señal interferente, a la salida del multiplicador se tendrá su espectro ensanchado actuando como ruido.

$$x(t) = m(t)p^2(t) + J(t)p(t)$$

2.-Salto de frecuencia FH-CDMA (Frequency Hopping)

Es una técnica básica de modulación usada en transmisión de señales en espectro extendido. Se trata de un cambio repetitivo de frecuencia al momento de la transmisión, esto ayuda a que las señales que quieran interferir la comunicación tengan problemas para hacerlo. El espectro extendido también permite a una señal la posibilidad de ser transportada sobre una banda de frecuencia la cual es considerablemente más amplia que el mínimo ancho de banda necesario por la información de la señal. La energía que se centra originalmente en la banda estrecha se transmite durante muchos y diferentes canales de la banda de frecuencia en un amplio espectro electromagnético.

En la técnica de FH-CDMA, un transmisor da saltos entre todas las frecuencias disponibles sobre la base de un algoritmo específico, que es ya sea planificada de antemano o al azar. La función del transmisor es tener sincronización con el receptor, que permanece sintonizado a la misma frecuencia exacta central del transmisor.

Después una ráfaga de datos corta se realiza en una banda estrecha, en seguida el transmisor sintoniza a una frecuencia diferente y transmite de nuevo, por lo tanto, el receptor también tiene la capacidad de cambiar su frecuencia a través de un ancho de banda especificado muchas veces por segundo, de esta manera se transmite y recibe usando una frecuencia particular para un marco de tiempo específico, cuando termina este lapso tanto el transmisor como el receptor vuelven a cambiar de frecuencia para transmitir de nuevo.

Secuencia directa Code Division Multiple Access (DS-CDMA), otra técnica de espectro ensanchado, se considera una alternativa de FH-CDMA. DS-CDMA divide los datos en pequeños pedazos y los despliega sobre el dominio de la frecuencia.

Los dispositivos que hacen uso de la tecnología FH-CDMA consumen menos energía y son generalmente rentables; sin embargo, los sistemas DS-CDMA son más fiables y funcionan mejor. El mayor beneficio de FH-CDMA se basa en la coexistencia de varios puntos de acceso en la misma zona, que no es posible cuando se utiliza la secuencia directa.

Hay algunas reglas que controlan la forma en que los dispositivos de salto de frecuencia se utilizan. Por ejemplo, en América del Norte, la banda de onda industrial, científica y médica (ISM banda de onda) se divide en 75 canales de salto.

La transmisión de potencia de estos canales de salto no excede de 1 volt en cualquier canal. Esta restricción asegura que un dispositivo individual no consume una cantidad excesiva de ancho de banda o permanecer en exceso en una sola frecuencia.

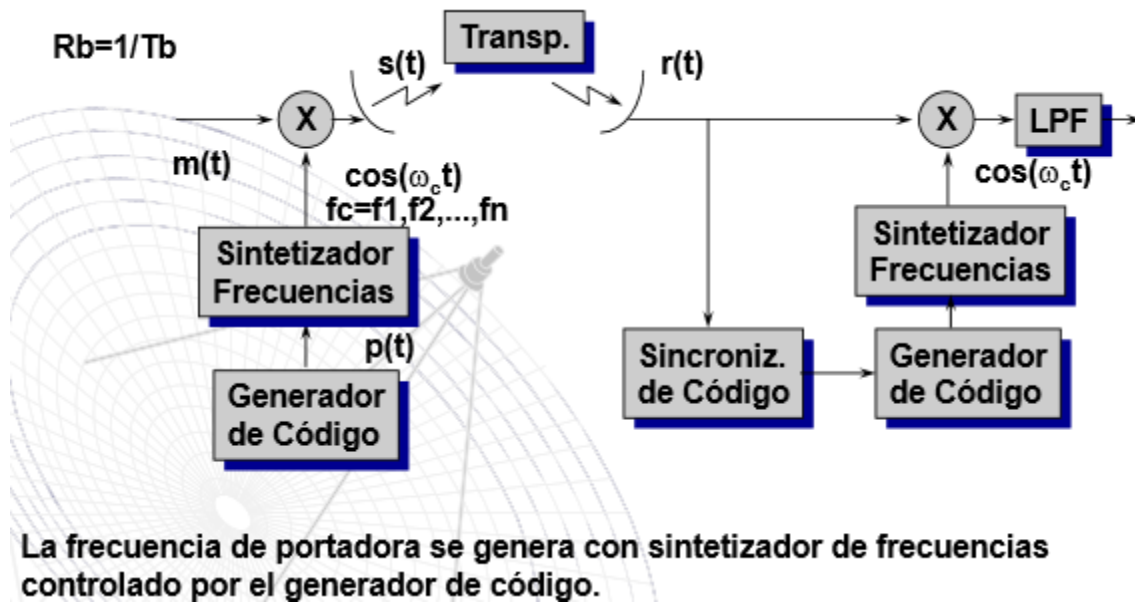


Figura 4.1.40 Diagrama a bloques del FH-CDMA

Código = Secuencia de saltos de frecuencias.

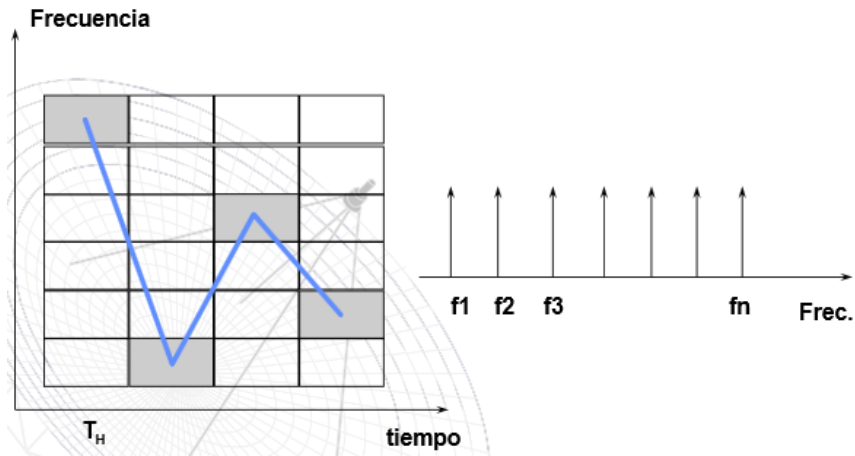


Figura 4.1.41 Saltos de frecuencia en FH-CDMA

Secuencias PN

Los códigos usados en sistemas CDMA son secuencias pseudoaleatorias (PN). Las más conocidas son las secuencias PN lineales de máxima longitud generadas por registros de desplazamiento, o secuencias m. Se generan con registros de desplazamiento de m etapas.

La secuencia m de componentes $\{m\}$ tienen un periodo $2^m - 1$ y tienen un polinomio generador $h(x) = x^m + h_{m-1}x^{m-1} + \dots + h_1x + 1$

Los valores de m se obtienen como:

$$m_j = h_1m_{j-1} + h_2m_{j-2} + \dots + m_{j-m}$$

Utilizando el circuito de la figura

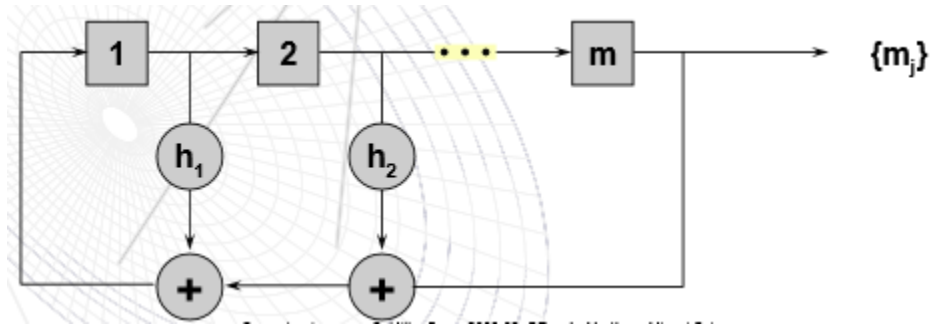


Figura 4.1.42 Circuito de generación de secuencias PN

Auto correlación

Las secuencias PN tienen una función de auto correlación:

$$R_m(j) = \begin{cases} 2^m - 1 & j = 0 \\ -1 & j \neq 0 \end{cases}$$

La figura representa la función de auto correlación normalizada:

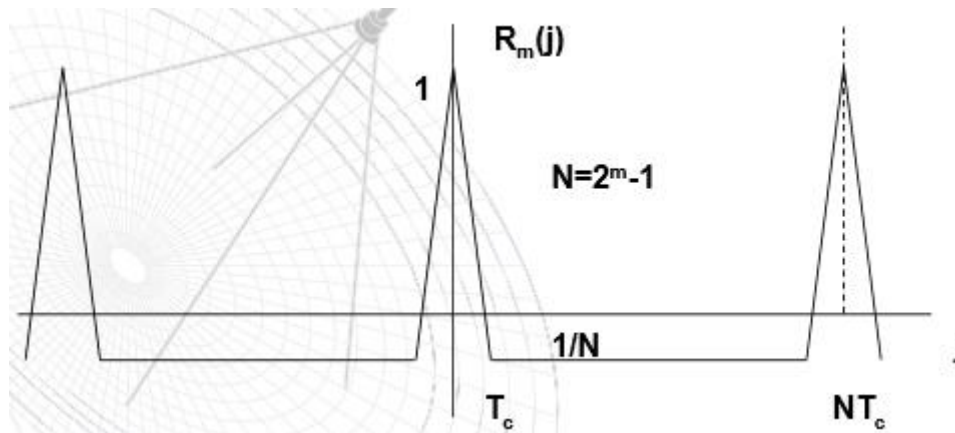


Figura 4.1.43 Función de auto correlación normalizada.

Las secuencias m pueden ser fácilmente copiadas por un sistema interferente que pueda observar 2m chips (2 periodos de la secuencia) utilizando el denominado algoritmo de Berlekamp.

Para mejorar la capacidad frente a intrusos lo que hace es combinar en una red lógica no lineal las salidas de varias, de esta manera se hace imposible determinar el generado de la secuencia a partir de la observación de ésta.

Los generadores Gold, Kasami y Bent proporcionan secuencias de periodo 2^m-1 apropiados para DS-CDMA. En la figura se muestra un generador Gold de 511 chips. Cambiando la posición de la realimentación de la primera secuencia se obtienen 511 códigos diferentes.

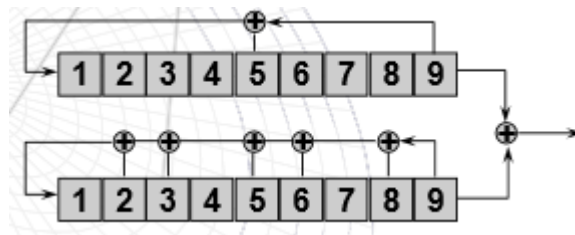


Figura 4.1.44 Generador Gold de 511 chips

Para demodular una señal DS-SS⁴ el receptor debe correlacionar la señal recibida con una copia generada de la secuencia PN en sincronismo con la del transmisor.

El proceso inicial de búsqueda de la fase correcta de la secuencia se denomina adquisición. Una técnica usada habitualmente es la de búsqueda por saltos en serie.

⁴ DS-SS: Espectro ensanchado por secuencia directa, también conocido como DS-SS-SS.

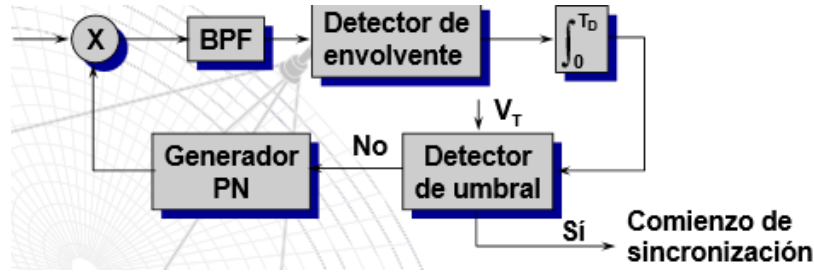


Figura 4.1.45 Diagrama a bloques para sincronizar y demodular una señal DS-SS

El generador proporciona la secuencia $p(t+\Delta)$ por lo que la salida del integrador, cuando T_D es múltiplo del periodo de secuencia, es proporcional a la autocorrección $R(\Delta)$ de $p(t)$. si las secuencias están alineadas se excede el umbral V_T . Si no se alcanza el umbral se procede a un nuevo desplazamiento de la secuencia.

Una vez realizada la adquisición, el receptor debe ser capaz de mantener el alineamiento de fase entre las secuencias dentro de una fracción de chip. El proceso de seguimiento de fase se denomina sincronización y se realiza normalmente en un lazo de enganche de retardo como el de la figura.

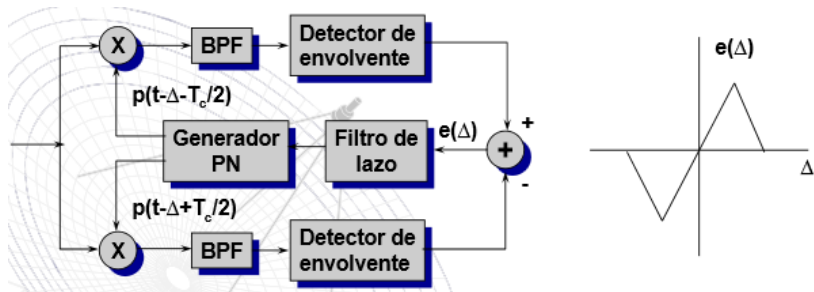


Figura 4.1.46 Lazo de enganche de retardo

Se generan 2 réplicas de la secuencia, adelantada y retardada $T_c/2$, que se multiplican por la señal recibida, se filtran y se pasan por detectores de envolvente. A la salida de estas dos correlaciones que se restan para dar una señal de error que gobierna al reloj del generador de secuencia.

Diversidad de Sistemas CDMA

Se implementa la diversidad espacial tradicional usando dos antenas receptoras en la estación base.

Durante el proceso de handoff utiliza también diversidad espacial. El proceso se denomina de handoff blando y consiste en que durante el mismo dos estaciones base mantienen el enlace en el móvil. Las estaciones base envían los datos y un índice de calidad al centro de conmutación de móviles donde se decide cuál de los dos enlaces es mejor.

La diversidad de frecuencia se realiza dentro del ancho de banda de la señal. El fading multitrayecto puede interpretarse como un filtrado de banda eliminada en el dominio espectral. El ancho del filtro típicamente es menos de 300 khz por lo que solo afecta al 15% del ancho de banda de la señal y solo se pierde una parte pequeña de la misma.

El receptor tiene varios correladores que se pueden asignar a las diferentes copias de las señales retardadas en el tiempo que causan el multitrayecto.

Este tipo de receptor se denomina RAKE (rastrillo) porque sus diversas ramas se combinan de forma que se obtiene ventaja de la diversidad temporal de la señal recibida.

4.2 Características de las estaciones terrenas

4.2.1 Tipo y tamaño de la antena

Las antenas utilizadas en estaciones terrenas deben tener ciertas características que permitan un correcto enlace con el satélite deseado, éstas son:

- Alta directividad en la dirección de la posición nominal del satélite.

- Baja directividad en las demás direcciones, en especial en las cercanas al satélite.

Éstas dos características requieren el uso de antenas directivas, por ello es que se utilizan solo antenas de apertura para las estaciones terrenas con configuraciones como las explicadas con anterioridad en el tema de subsistema de antenas de los satélites.

Como se explicó anteriormente, la ganancia de una antena determina tanto la potencia de salida al transmitir, utilizando una frecuencia de subida (uplink), como la sensibilidad en la recepción de señales con frecuencia de bajada (downlink), por ello es importante que sea alta debido a que las señales viajan muchos kilómetros para llegar a su destino.

Entre los factores que afectan a la eficiencia total de la antena se encuentran el desbordamiento del reflector, el gradiente de iluminación no uniforme, pérdidas óhmicas y ondas estacionarias, obstrucción causada al reflector por el alimentador y su soporte o por el sub-reflector si es el caso, irregularidades de la superficie del reflector y polarización cruzada por acoplamiento a la polarización ortogonal.

Aislamiento entre señales con polarizaciones ortogonales.

Esto asegura que en la recepción tanto en las antenas de los satélites como en las antenas de las bases terrenas, se puedan separar señales con polarizaciones ortogonales, permitiendo un correcto funcionamiento cuando se realiza un reuso de frecuencias por este método.

Enfocándonos principalmente en las características físicas de las antenas en estaciones terrenas se tienen algunas configuraciones de antenas, por ejemplo; las mostradas en la figura 4.2.1 que son la de antena Prime-focus fed (A), el sistema de alimentación Cassegain (B) y el sistema de alimentación de plato Splash (antena de plato plano puesto dentro de la antena) y que se explican a continuación.

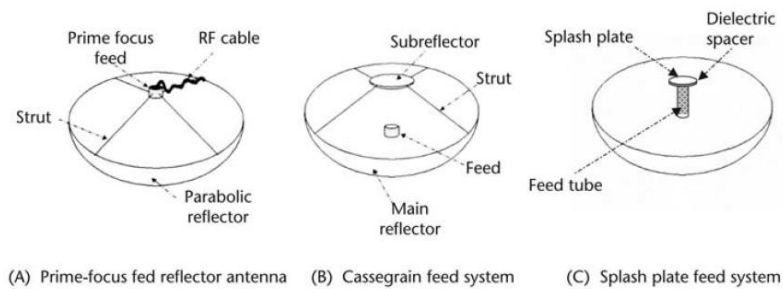


Figura 4.2.1 Configuraciones de antenas usadas comúnmente para enlaces de comunicaciones de dos vías.

- Configuración Prime Focus Fed

Esta configuración de antena se pueden usar con antenas que están en el rango de diámetro menores a 4.5 m. El costo no suele ser un problema por su simplicidad y facilidad en la instalación. Para minimizar las pérdidas y ruido en RF, se coloca un LNB compacto directamente en el puerto de la guía de onda del alimentador para minimizar las pérdidas entre el amplificador principal y el alimentador. El cable de RF usado para conectar el LNB y el equipo de recepción que se encuentra en sitio es colocado en una de las tomas. A menos que las partes electrónicas se puedan ajustar al alimentador, la configuración Prime Focus no es atractiva para transmitir/recibir aplicaciones.

Variando el enfoque del Prime Focus, el alimentador de la corneta está al final de una pieza en forma de gancho de la guía de onda que se extiende desde el vértice del reflector parabólico. El LNB es adjuntado al final de la guía de onda entre el reflector y el ensamblado, es apoyado en el alimentador de corneta ya sea con puntales o con cables de retención. Eso tiene la obvia ventaja de permitir a los electrónicos para ser accesados más fácilmente y provee colocación fuera del camino del haz principal. La rigidez mecánica y estabilidad térmica del sistema de guía de onda doblado es limitada, pero las antenas de pequeño diámetro que son usadas para propósitos TVRO pueden estar con ese enfoque.

- Óptica Cassegrain

Muchas de las deficiencias de la antena de alimentador de foco principal son superadas por el sistema Cassegrain, mostrado anteriormente en la figura 4.2.1 (B). Usando el principio de la óptica plegada del reflector telescópico, el foco de la parábola es dirigida hacia atrás por un subreflector hiperbólico al vértice del centro del reflector principal. Iluminación adecuada es todavía provista, pero la alimentación y los electrónicos pueden estar junto con un punto accesible de la estructura de la antena. En antenas grandes, un hub adjunto es proporcionado en la parte de atrás para la colocación de la terminal completa de RF muy cercana de la alimentación. El sistema Cassegrain elimina el cable o guía de onda entre los electrónicos de RF y la alimentación.

- Splash Plate

El sistema de plato de rocío, mostrado anteriormente en la figura 4.2.1 (C), se basa en una superficie subrefleitora para dirigir la energía de nuevo hacia el reflector. En este caso, la superficie es un disco plano que apoyado por un material dieléctrico como plástico estireno colocado al frente del tubo de alimentación. No hay necesidad de una bocina de alimentación o soporte de alimentación porque el ensamble es soportado por el tubo alimentador propiamente y los electrónicos de RF pueden ser localizados detrás del reflector. Los beneficios de este arreglo se reflejan en su simplicidad mecánica y fuerza, así como su negación de bloqueo de sus puntales.

Geometría de desplazamiento de fuente

El offset fed geometry, se usa para las antenas en las estaciones espaciales pero también han sido aplicadas a las estaciones terrenas. Como se muestra en la figura 4.2.2 es el común TVRO de banda Ku utilizado en casa en altas potencias DBS. Un

principal beneficio del enfoque de desplazamiento es la eliminación del principal bloqueo de haz por el alimentador y las puntales, en el que tiende a mejorar la eficiencia de antena y reducir los niveles de lóbulos laterales. También permite que llueva y que nieve sobre la superficie, porque el reflector está en el grado más crítico con respecto a la Tierra. En un diseño particular, puede haber ventajas mecánicas o de costos también. Mientras que la figura muestra un alimentador simple y un LNB, configuraciones con hasta tres combinaciones alimentador-LNB (para ver tres posiciones orbitales) están disponibles en el mercado.



Figura 4.2.2 TVRO DBS típico de casa.

La menor temperatura de ruido posible en la antena.

La temperatura de ruido de la antena de una estación terrena se integra a partir de la temperatura de ruido proveniente de cada dirección del espacio y de la Tierra, ya que además de captar el ruido de lóbulo principal recibe ruido por los lóbulos laterales y el posterior. Se reciben el ruido de fondo cósmico de aproximadamente 2.8 K, el ruido de la Tierra típicamente de 290 K en diversos lóbulos laterales y el producido por la tropósfera en cielo despejado. También puede existir ruido por

conceptos de pérdidas óhmicas que llega a ser de 7 K adicionales. Por último, es importante considerar la variación del ruido con respecto al ángulo de elevación de la antena, la figura 4.2.3, muestra los valores característicos de ésta relación.

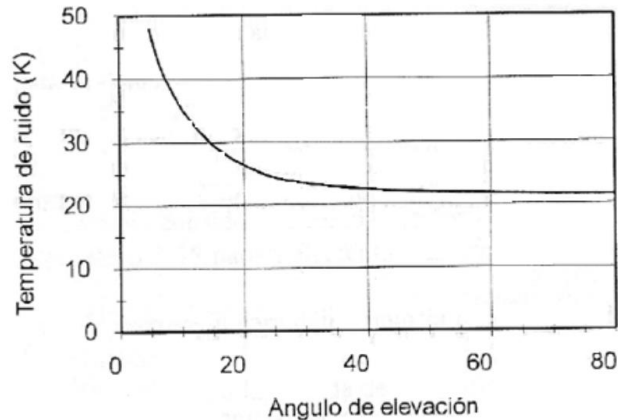


Figura 4.2.3 Temperatura de ruido vs Ángulo de elevación.

El Sol y la Luna aumentan considerablemente la temperatura de ruido de la antena en los intervalos de tiempo en que inciden sobre el lóbulo principal o los lóbulos secundarios mayores. La temperatura de ruido que produce el Sol cuando incide en el eje principal de una antena, cuya anchura de haz sea 0.5° o menor es extraordinariamente alta e impide toda comunicación; su efecto cuando el haz es mayor a 0.5° disminuye exponencialmente. En el caso de los sistemas geoestacionarios los intervalos en que ocurre la interferencia del Sol dependen de la ubicación geográfica de las estaciones terrenas que tengan antenas de alta ganancia, de la posición del satélite en la órbita y de la combinación de movimientos de la Tierra respecto del Sol, por lo que se presenta en 2 periodos anuales de 21 días cada uno durante los equinoccios o cerca de ellos.

Cada interferencia puede durar minutos y ocurre a cada antena en distinto intervalo de tiempo, siendo el número de días de afectación en cada periodo aproximadamente 5 veces la anchura del haz de la antena en grados.

El sistema de montaje de la antena debe permitir cuando menos un movimiento de ajuste mínimo para el apuntamiento hacia el satélite en el proceso de instalación que incluye algunas pruebas para recepción y en el caso de estaciones con capacidad de transmisión las necesarias para obtener autorización de acceso. Obviamente las antenas que necesitan ser redireccionadas con frecuencia o deben operar con satélites que no utilizan la órbita geoestacionaria requieren de mecanismos que permitan realizar movimientos con la facilidad necesaria según el caso, ya sea manualmente o por medios automáticos.

Para realizar los ajustes necesarios y poder recibir y/o transmitir adecuadamente, el subsistema de antenas se conforma como se muestra en la Figura 4.2.4.

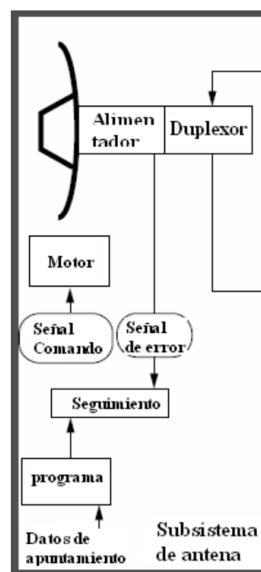


Figura 4.2.4 Subsistema de antena.

Para la instalación y funcionamiento de una antena que se enlazará con un satélite geoestacionario, se definen 3 conceptos importantes:

- Orientación
- Montaje
- Rastreo

4.2.2 Patrón de radiación

El patrón de radiación de la antena, el cual típicamente comprende un haz principal y una estructura de lóbulos laterales, es comúnmente representado como un trazo en dos dimensiones.

El ancho de haz marca su importancia en la medida de qué tan exacto debe apuntarse la antena y qué tan rápidamente la antena rechaza las señales fuera de la región deseada. El ancho angular del haz principal del patrón de radiación de la antena, es caracterizado por el ancho del haz a media potencia (HPBW), que se define como el ancho angular total entre los dos puntos que están a 3 dB abajo del pico del haz principal. El HPBW depende de la distribución de iluminación en la apertura de la antena y la dimensión de la apertura en el plano en el cual el patrón es medido.

La ganancia y directividad son cantidades que definen la capacidad de concentrar la energía de una antena en una dirección particular, y están directamente relacionadas al patrón de radiación de la antena. La ganancia $G(\theta, \phi)$ de una antena en una dirección específica (θ, ϕ) está definida como la razón de la potencia radiada por unidad de ángulo sólido $P(\theta, \phi)$, en la dirección (θ, ϕ) a la potencia por unidad de ángulo sólido radiada desde una antena isotrópica, alimentada con la misma potencia total P_T . La antena isotrópica es una antena hipotética, la cual radia uniformemente en todas direcciones. Por lo tanto:

$$G(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{P_T}{4\pi}}$$

Esta cantidad es una propiedad inherente de la antena e incluye pérdidas por disipación.

Cuando sólo es importante la manera en que se forma el haz en el espacio, en lugar de las pérdidas, entonces se aplica el término de directividad. La directividad $D(\theta, \phi)$

de una antena, no incluye las pérdidas por disposición y está definida con la razón de $P(\theta, \phi)$ a la potencia por unidad de ángulo sólido, desde una antena isotrópica radiando la misma potencia P_R .

Por lo tanto:

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{P_R}{4\pi}}$$

La razón de $G(\theta, \phi)$ a $D(\theta, \phi)$ se conoce como "eficiencia de radiación" de la antena.

El valor de $G(\theta, \phi)$, donde la máxima radiación ocurre, se le conoce simplemente como "ganancia" de la antena, y en la mayoría de los casos se expresa en dBi (decibeles con relación a una antena isotrópica). Este valor corresponde al pico del haz principal del patrón de radiación, el cual es generalmente la dirección (0,0) referida como "la dirección de apuntamiento o eje de apuntamiento de la antena".

El factor de mayor importancia para determinar la eficiencia de la utilización de la órbita geoestacionaria es el patrón de radiación asociado a la antena de la estación terrena, particularmente en la región angular de 0–50° desde el eje de apuntamiento. Para cálculos de interferencia es conveniente describir la envolvente de los lóbulos laterales de la antena de una estación terrena de la siguiente forma:

$$S(\theta) = A - B \log_{10} \theta \text{ dBi}$$

Para $\theta > 1^\circ$ que es el ángulo en grados desde el eje de apuntamiento, A y B son coeficientes numéricos representando el nivel de la envolvente a 1°, fuera de la línea de apuntamiento y la tasa de disminución de la envolvente, respectivamente.

El Comité Consultivo de Radiocomunicaciones de la UIT adoptó un patrón de radiación de referencia para usarse en cálculos de interferencia para antenas grandes con $A = 32$ y $B = 25$, conduciendo a una mínima separación entre satélites

de 2.9° . Para reducir el espacio mínimo entre satélites a 2° y por consecuencia, conseguir más posiciones orbitales, se creó una especificación más estricta $A = 29$ y $B = 25$, que está aplicándose actualmente en las antenas de estaciones terrenas en el modo de transmisión.

Adicionalmente se debe tener lóbulos laterales con niveles bajos (ver figura 4.2.5) de modo que sea minimizada cualquier posible interferencia con otros sistemas de microondas, sean terrestres o satelitales. Así que dichos patrones deben cumplir con ciertos requerimientos mínimos establecidos por las agencias regulatorias antes mencionadas.

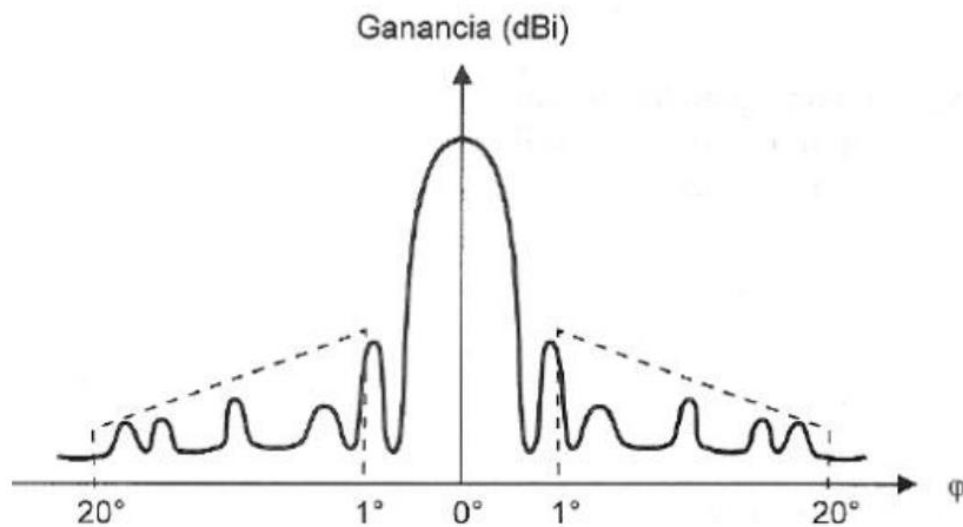


Figura 4.2.5 Patrón de radiación que muestra las limitaciones de lóbulos laterales de una antena de estación terrena

4.2.3 Amplificadores de alta potencia

Un equipo de suma importancia que cada estación terrena posee en el transmisor, es un amplificador de alta potencia; con baja distorsión y bajo ruido; el transmisor debe emitir altas potencias de la señal para vencer una pérdida de propagación considerable (aproximadamente 200 dB para el satélite geostacionario) entre

estación terrena y satélite. Así también deben satisfacerse requisitos económicos y de seguridad del sistema de comunicación comercial.

Actualmente en materia satelital, se conocen tres tipos principales de amplificadores de alta potencia:

- SSPA´s (Amplificadores de potencia en estado sólido)
- Klystrons
- TWT´s (Tubo de onda Progresiva)

Amplificador de potencia en estado sólido (SSPA).

Estos tipos de amplificadores son pequeños y ligeros. Los SSPA disipan considerable calor. La disipación de dicho calor en el espacio es más difícil, debido a la falta de aire.

Estos amplificadores son principalmente usados en estaciones pequeñas de baja capacidad o portátiles. Gracias a los avances tecnológicos en circuitos y al desarrollo de transistores de Arseniuro de Galio (GaAs), los amplificadores de estado sólido desarrollados en la actualidad alcanzan potencias de hasta 50 W para banda Ka. Los amplificadores de estado sólido son implementados por medio de transistores FET y HEMT.

Amplificador Klystron

Este amplificador se compone de una válvula de vacío de electrones en la cual se produce una modulación inicial de velocidad impartida a los electrones. En la última etapa se genera un campo eléctrico que es función de la velocidad modulada del haz de electrones y que finalmente genera una corriente de microondas.

Los Klystron pueden trabajar a frecuencias que superan los 200 GHz. Se pueden implementar una o varias cavidades para ser utilizados como amplificadores de alta potencia.

A mayor número de cavidades se consigue mayor ganancia. Algunos tienen hasta siete cavidades.

Al sintonizar todas ellas a la misma frecuencia se consigue máxima ganancia y menor ancho de banda y variando su sintonía aumenta el ancho de banda y la ganancia disminuye.

El Klystron es muy utilizado como amplificador de potencia en algunas estaciones terrestres de comunicaciones satelitales. En la Figura 4.2.6 se muestra un diagrama simplificado de los componentes de un Klystron típico de múltiples cavidades.

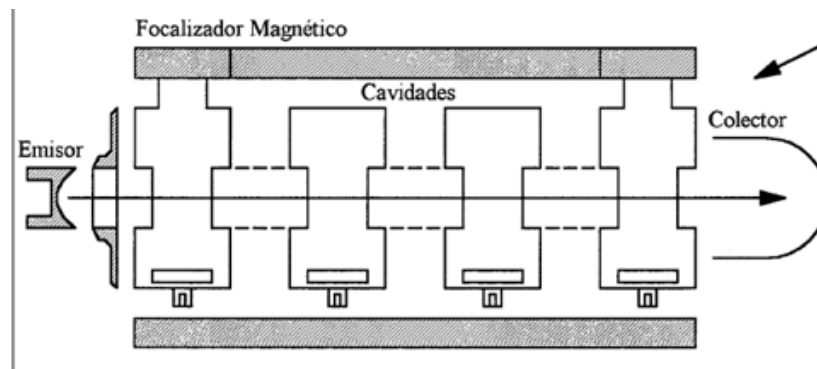


Figura 4.2.6 Klystron de múltiples cavidades.

Generalmente se utilizan 5 cavidades en un Klystron de 3 KW de potencia. Se dispone de un cañón electrónico que emite un haz de electrones que pasa a través del espacio intermedio entre las cavidades de cada uno de los resonadores.

La primera cavidad sirve para ingresar la señal de microondas a ser amplificada, mientras que la segunda se usa para extraer la señal ya amplificada. La señal de entrada excita la primera cavidad creando un campo eléctrico el cual modula a su vez el haz de electrones.

La velocidad de los electrones es proporcional al campo resultante en la cavidad. En la última cavidad se genera un campo eléctrico como función de la velocidad de los electrones que se transforma en una corriente de microondas de salida.

Estos amplificadores son esencialmente de banda angosta, 40 MHz para un amplificador de 6 GHz y 80 MHz para uno de 14 GHz. Al hacer uso de él, también se tendrá de un amplificador por portadora transmitida, además de la necesidad de tener un sistema de ajuste mecánico remoto con el cuál se selecciona la frecuencia de operación central.

Las principales características de los amplificadores Klystron son:

- Alta eficiencia (aproximadamente 39%).
- Sistema de alimentación simple.
- Gran robustez y larga vida útil (entre 30 000 y 40 000 horas).
- Consumo de potencia reducido.
- Sistema de enfriado aire que en lugar de sistemas de enfriamiento a base de líquidos.

En sus inicios los Klystron eran muy grandes y costosos, por lo que su uso era limitado a estaciones terrenas grandes. Hoy en día, con las mejoras tecnológicas el amplificador y el sistema de energía se han reducido a la mitad de tamaño y costo.

Sin embargo una desventaja de estos amplificadores es su limitante en el rango de frecuencias.

Amplificador TWT

Los amplificadores TWT están formados por un tubo de vacío largo con un cañón electrónico conocido como el cátodo emisor de electrones. Los electrones viajan atravesando el tubo viajando desde el cátodo hacia el ánodo. Dichos electrones son concentrados en un haz debido a un campo magnético de contención aplicado alrededor del tubo. El haz de electrones llega al centro de un espiral o cavidad acoplada (circuito de radiofrecuencia).

El haz pasa luego al terminal colector. Un acoplador direccional, que puede ser una guía de onda o una bobina electromagnética, es alimentado con la señal de baja potencia que se va a amplificar. El acoplador direccional se coloca cerca del emisor, induciendo corriente en la hélice.

El circuito de radiofrecuencia actúa como una línea de retardo en la que la señal de radiofrecuencia viaja casi a la misma velocidad a lo largo del tubo que el haz electrónico. El campo electromagnético generado por la señal de radiofrecuencia en el circuito de radiofrecuencia, actúa sobre el haz electrónico, causando una modulación de la velocidad, es decir, el agrupamiento de los electrones. El campo electromagnético generado por la corriente del haz induce de nuevo más corriente sobre el circuito de radiofrecuencia. Se acumula entonces la corriente, amplificándose cada vez más.

Un segundo acoplador direccional, colocado cerca del colector, recibe una amplificación de la señal de entrada desde el otro extremo del circuito de radiofrecuencia. Los atenuadores que se encuentran a lo largo del circuito de radiofrecuencia evitan que la onda reflejada vuelva atrás hacia el extremo colector.

En la figura 4.2.7 se muestra un diagrama de un amplificador TWT y una descripción de los componentes que lo forman.

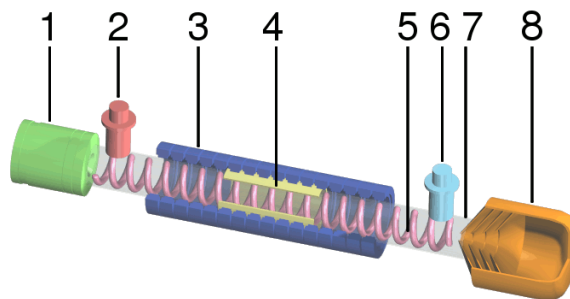


Figura 4.2.7 Tubo de onda progresiva o TWT. (1) Cátodo; (2) Entrada de RF; (3) Imanes; (4) Atenuador; (5) Bobina de hélice; (6) Salida de RF; (7) Tubo de vacío; (8) Colector (ánodo)

Los TWT típicos en general funcionan con una tensión de colector inferior al ánodo y cátodo. La amplificación propiamente dicha se produce en la estructura de enfoque e interacción. En la medida que la onda a amplificar viaja en la estructura de hélice el campo electromagnético modula la velocidad de los electrones en ondas periódicas aproximadamente en fase con el campo.

El TWT es un amplificador de banda ancha, prácticamente cubre toda la banda satelital. Es el amplificador ideal para las estaciones terrenas, esto a partir que los amplificadores permitieron múltiples portadoras independientes al número de repetidores y frecuencias de las mismas.

La banda ancha que posee el TWT nos brinda ventajas, tales como:

- Cualquier cambio en la frecuencia de portadora es posible sin ningún mecanismo de ajuste o modificación del sistema, gracias al amplio ancho de banda que maneja el amplificador.
- Muchas portadoras con diferentes frecuencias pueden ser transmitidas simultáneamente con el mismo amplificador.
- Por el punto anterior, la expansión de tráfico de una estación terrena es posible sin el aumento de TWT. Amplificadores de potencia TWT para 14 GHz o incluso mayores frecuencias utilizan estructuras con concavidad acoplada y rayos lentos.

En las estaciones de comunicaciones por satélite se recurre al Klystron o al TWT debido a las exigencias de potencia de emisión.

En las estaciones terrenas de gran tamaño se utilizan amplificadores Klystron y TWT conectados en cascada como se muestra en la figura 4.2.8.

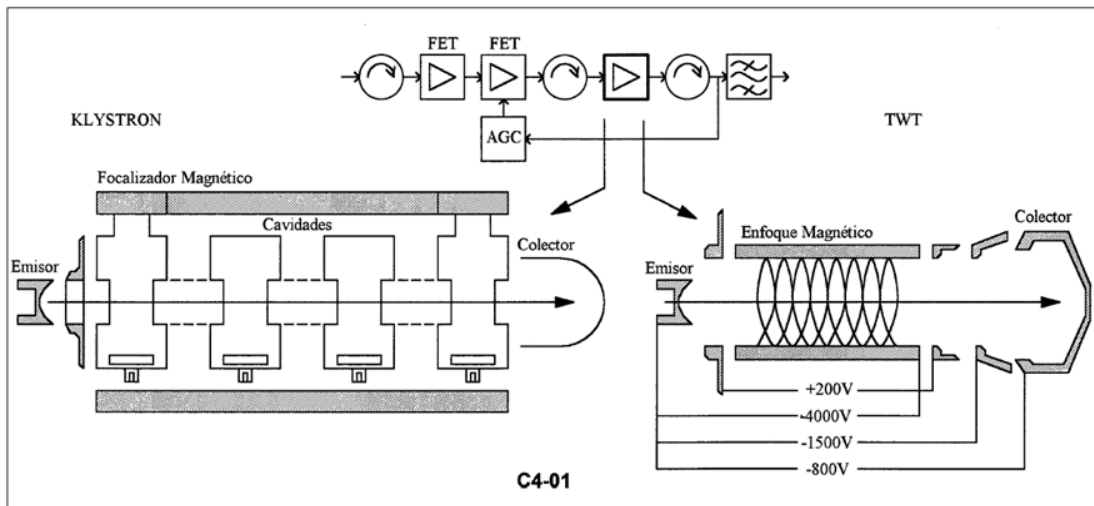


Figura 4.2.8 Amplificador Klystron y TWT.

Las estaciones terrenas de gran tamaño necesitan usar más de un amplificador de potencia ya sea Klystron o TWT conectados en cascada. En el caso de que se utilicen Klystron, la estación requerirá tantos amplificadores como transmisores, se prefiere el uso de Klystron generalmente cuando se desean transmitir pocas portadoras. Si se utilizan TWT en la estación terrena, serán necesarios varios amplificadores para alcanzar la potencia deseada. Además generalmente se utiliza un amplificador extra “en espera” proporcionando una redundancia 1+1.

La siguiente tabla muestra una comparación entre diversos aspectos de los amplificadores Klystron y amplificadores TWT.

Aspectos	TWT	Klystron
Ancho de banda de frecuencia	500 MHz o mayor	35 MHz – 50 MHz
Ganancia/ respuesta de frecuencia	4 dB – 6 dB / 500 MHz	1 dB – 2 dB / 35 MHz – 50 MHz
Ganancia	36 dB – 38 dB	38 dB – 45 dB

Nivel de ruido	-64 dBm/kHz	- 58 dBm/kHz
Confiabilidad	Ligeramente inferior	Alta confiabilidad
Precio	Costoso	Comparativamente económico, aprox. Un tercio de un TWT
Adaptabilidad de uso	Amplificación de portadoras múltiples	Amplificación de una o dos portadoras

Tabla 4.2.1 Comparación entre ambos amplificadores

4.2.4 Amplificadores de bajo ruido

Las antenas ya sea que estén en el satélite o en la estación terrena son las encargadas de recibir y enviar señales de información, comando, telemetría y otras opciones, la señal electromagnética que viaja a través de la atmosfera sufre muchas alteraciones y al tratarse de un satélite geoestacionario con el que estamos trabajando aún más, ya que viaja una distancia de 35,786 km aproximadamente hasta una estación terrena en la cual se añade ruido del medio ambiente, interconexiones, interferencia proveniente de otras fuentes radiantes y de los mismo componentes de los satelites y estaciones terrenas como las antenas o los elementos amplificadores entre otros, por estas razones la señal llega degradada y con elementos indeseables.

Los amplificadores de bajo ruido llamados LNA por sus siglas en inglés (Low noise amplifier) tienen como objetivo amplificar la señal con la menor cantidad de ruido y normalmente se tienen en seguida de la antena que recibe la señal debido a lo mencionado en el párrafo anterior. La función del LNA es captar la señal incierta y extremadamente débil de la antena, por lo general, en forma de micro volts o por debajo de los -100 dBm.

Para un LNA, los principales parámetros son la figura de ruido (NF), la ganancia y la linealidad. El mismo LNA tiene un parámetro de suma importancia llamado Temperatura de ruido que mientras más bajo sea será mejor ya que es ruido que se añade a la señal por el simple hecho de pasar por el LNA. El ruido se debe a las fuentes térmicas y a otras fuentes con figuras de ruido típicas en el rango de 0.5 a 1.5 dB. La ganancia típica se encuentra en 10 y 20 dB para una sola etapa; algunos diseños utilizan amplificadores en cascada con una etapa de NF baja y baja ganancia seguida de una etapa de mayor ganancia que puede tener NF mayor, pero es menos crítico una vez que la señal inicial se haya "ganado". Véase figura 4.2.9



Figura 4.2.9 Amplificador de Bajo Ruido

La no linealidad es otro problema para el LNA ya que la armónica resultante y la distorsión de intermodulación corrompen la señal recibida y dificulta aún más la demodulación y decodificación con BER considerablemente baja. La linealidad se caracteriza generalmente por un punto de intercepción de tercer orden (IP3) que relaciona productos no lineales provocados por el término no lineal de tercer orden a la señal amplificada lineal; cuanto mayor sea el valor de IP3, más lineal será el rendimiento del amplificador.

El consumo de energía y la eficiencia en el LNA no son generalmente la principal preocupación. Por su naturaleza, la mayoría de los LNA son dispositivos de bajo consumo de corriente de 10 a 100 mA y ofrecen una ganancia de voltaje para las etapas subsiguientes, no proporcionan alimentación a la carga. A su vez, también hay uno o dos canales LNA solamente en el sistema por lo que cualquier ahorro que se logre utilizando un LNA de bajo consumo será modesto.

Además de la frecuencia de operación y el ancho de banda, existe una cantidad relativamente grande de similitud funcional entre los LNA. Algunos LNA también incluyen control de ganancia para que el amplificador pueda manejar un rango dinámico amplio de señales de entrada sin sobrecarga y saturación.

Los LNA se fabrican de tecnologías diferentes por ejemplo Semiconductor complementario de óxido metálico o CMOS por sus siglas en inglés (complementary metal-oxide-semiconductor), Transistores con movilidad de electrones alta y pseudomorfo o pHEMT por sus siglas en inglés (pseudomorphic High Electron Mobility Transistor), Circuitos integrados de microondas monolíticas o MMIC por sus siglas en inglés (Monolithic Microwave Integrated Circuits).

En cualquiera de las tecnologías mencionadas es importante un buen diseño con un margen de operación para que cuando llueva, que es la situación de mayor afectación a la señal, la señal no sea tan degradada y se recupere lo mejor posible, este parámetro es llamado Margen de lluvia. También es importante tener una temperatura baja para mantener una temperatura de ruido baja y para esto se utilizan sistemas de refrigeración ya sean termoeléctricas, helio líquido o gaseoso, refrigeración por compensación de temperatura o sistemas más sencillos.

4.2.5 Figura de mérito G/T

La relación de ganancia y temperatura equivalente de ruido G/T, es una cifra de mérito que sirve para demostrar la calidad de recepción de un satélite a una estación terrena.

El factor de mérito se define como la relación entre la ganancia de la antena receptora con respecto a la temperatura de ruido del sistema de recepción, sus unidades son dBi/K

La figura de mérito o factor de calidad del satélite se define y calcula como:

$$\frac{G}{T} = G_{ant} - 10\log_{10}(T_{sys}) \quad \left(\frac{dBi}{K}\right)$$

En la figura 4.2.10 se muestra un sistema de recepción, donde la antena se conecta a un alimentador que se conecta al receptor. Tomaremos en cuenta este sistema para explicar cómo se obtiene el factor de mérito.

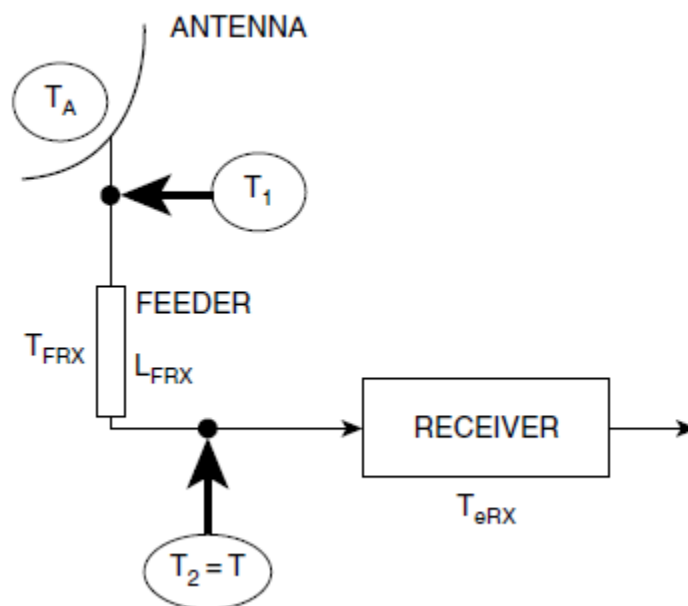


Figura 4.2.10 Sistema de Recepción

Considerando que la temperatura de ruido del sistema T_{sys} toma en cuenta todas las fuentes de ruido dentro del equipo de recepción, entonces la temperatura de ruido del sistema T_{sys} está en función de la temperatura de ruido de la antena T_A , de las pérdidas del alimentador L_{FRX} , de la temperatura termodinámica del alimentador T_F y de la temperatura de ruido efectiva en el receptor T_{eRX} .

La conexión al alimentador se considera una pérdida que se encuentra a una temperatura termodinámica T_F ; esta conexión introduce al sistema una atenuación o pérdida L_{FRX} que corresponde a una ganancia $G_{FRX} = 1/L_{FRX}$ que es menor a 1.

La temperatura de ruido T_1 a la salida de la antena es la suma de la temperatura de ruido de la antena T_A y la temperatura de ruido generada por el alimentador y el receptor conectados en cascada. La temperatura de ruido efectiva T_e en el receptor es T_{eRX}

$$T_1 = T_A + (L_{FRX} - 1)T_F + \frac{T_{eRX}}{G_{FRX}} \quad (K)$$

Al considerar la entrada en el receptor, el ruido debe estar atenuado por el factor L_{FRX} . Sustituyendo en la ecuación anterior G_{FRX} por $1/L_{FRX}$, se obtiene la temperatura de ruido T_2 a la entrada del receptor:

$$T_2 = \frac{T_1}{L_{FRX}} \quad (K)$$

$$T_2 = \frac{T_A}{L_{FRX}} + T_F \left(1 - \frac{1}{L_{FRX}}\right) + T_{eRX} \quad (K)$$

La temperatura de ruido T_2 la cual toma en cuenta el ruido generado por la antena y el alimentador junto con el ruido del receptor se le conoce como temperatura de ruido del sistema T_{sys} a la entrada del receptor.

$$T_{sys} = T_2$$

$$T_{sys} = \frac{T_A}{L_{FRX}} + T_F \left(1 - \frac{1}{L_{FRX}}\right) + T_{eRX} \quad (K)$$

Teniendo el cálculo de la temperatura del sistema T_{sys} , y la ganancia de la antena receptora. Se puede calcular el factor de mérito sustituyendo estos datos en la siguiente ecuación:

$$\frac{G}{T} = G_{ant} - 10 \log_{10}(T_{sys}) \quad \left(\frac{dB_i}{K}\right)$$

Por otra parte la figura de mérito entonces puede redefinirse como:

$\left[\frac{G}{T_{satelite}} \right]_{\frac{dB}{K}} = \left[\frac{(G_R)_{max}}{T_s} \right] \Rightarrow$ Pérdidas por des apuntamiento y conectores en el extremo receptor.

El valor del G/T para cada satélite en particular depende de las características de su antena (ganancia y patrón de radiación), del número de transpondedores y demás elementos del subsistema de comunicaciones, así como la posición de la estación terrena transmisora dentro de la huella de iluminación del satélite.

Por esta razón para algunos casos el G/T es cerca de 0dB/K o negativo, o ligeramente positivo pero nunca demasiado grande, por lo tanto usando el factor de mérito y la densidad de ruido (N_0) tenemos:

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{subida} = PIRE - FSLP + \left(\frac{G}{T} \right)_{satelite} - 10 \log k$$

En la práctica, si se tienen disponibles los contornos de G/T del satélite, no es necesario conocer las características de la antena, los conectores, el amplificador de bajo ruido y transpondedores del mismo. Simplemente se interpola entre los contornos más cercanos a la ubicación de la estación terrena.

El cociente de potencias para el enlace de bajada tenemos:

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{bajada} = PIRE - FSLP + \left(\frac{G}{T} \right)_{estación\ terrena} - 10 \log k$$

Los cálculos se simplifican si dicho cociente G/T es conocido para cada estación en particular, de acuerdo con la información del fabricante.

Con este dato, ya no es necesarios preocuparse en los cálculos por la temperatura de ruido de la antena o del amplificador de bajo ruido, ni de los conectores. Generalmente, cada operador de un satélite recomienda determinados valores de G/T para las estaciones terrenas de sus clientes o usuarios, según el tipo de tráfico que deseen conducir, dentro de un rango de ángulo de elevación.

En la siguiente figura 4.2.11 se muestra la figura de mérito de antenas de 34 m y 70 m operando en las bandas S, X y Ka.

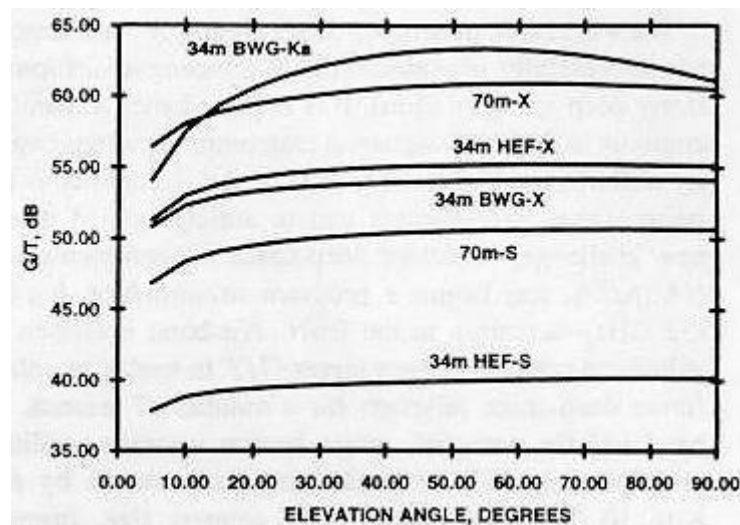


Figura 4.2.11 Figura de mérito para antenas de 34 y 70 metros

4.2.6 Apuntamiento de la antena

Orientación

La orientación de la antena de una estación terrena hacia un satélite geostacionario es realizada ajustando dos ángulos, elevación y acimut. Estos ángulos son medidos tomando como referencia a la línea sobre la cual la antena tiene ganancia máxima, y en el caso de una antena parabólica, dicha referencia es el eje del plato parabólico. El ángulo de elevación θ se define como el ángulo

formado por el plano horizontal local y la línea de vista entre la estación terrena y el satélite (Figura 4.2.11).

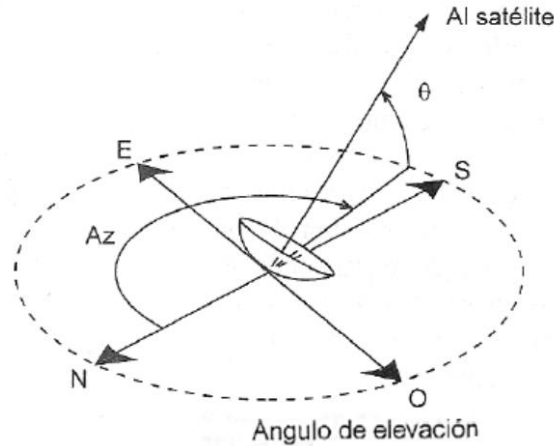


Figura 4.2.11 Ángulos de Acimut y elevación de la antena de una estación terrena.

Tanto el valor del ángulo de elevación como el ángulo de acimut dependen de las coordenadas geográficas de la estación terrena y de la posición orbital del satélite. Las coordenadas geográficas son la latitud y la longitud (véase figura 4.2.12).

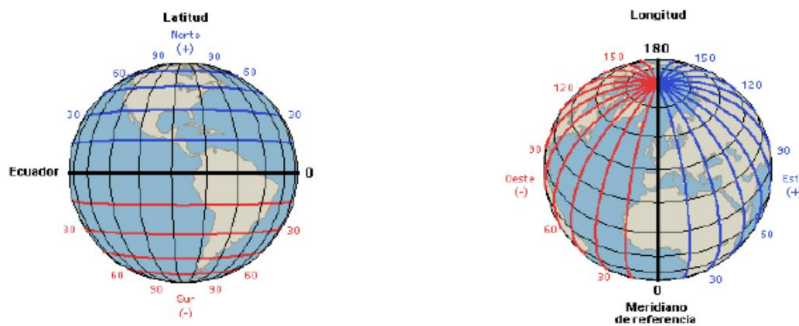


Figura 4.2.12 Latitud y Longitud.

La longitud geográfica es el ángulo, en el plano ecuatorial, entre el meridiano de referencia (Meridiano de Greenwich) y el meridiano de la ubicación, en este caso particular, de la base terrena. Toma valores positivos hacia el este de 0° a 360°.

La latitud geográfica es el ángulo vertical entre la ubicación de la estación terrena y el plano del ecuador, expresado en grados de -90° (Polo Sur) a $+90^\circ$ (Polo Norte).

Para el cálculo tanto del acimut, como del ángulo de elevación se usa la familia de curvas presentada en la figura 4.2.13.

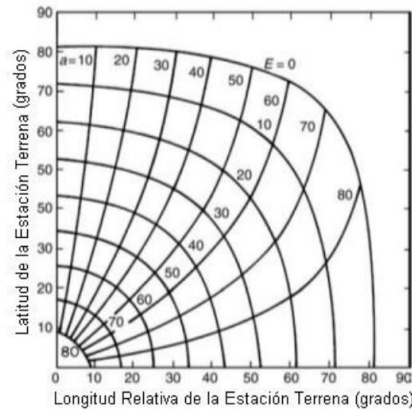


Figura 4.2.13 Relación entre longitud relativa y latitud de una estación terrena.

El ángulo de acimut φ es el ángulo medido en el sentido de las manecillas del reloj entre la línea que une a la estación terrena con el norte geográfico y la proyección horizontal local de la línea de máxima radiación de la antena, que debe apuntar en la dirección hacia el satélite. Véase figura 4.2.14

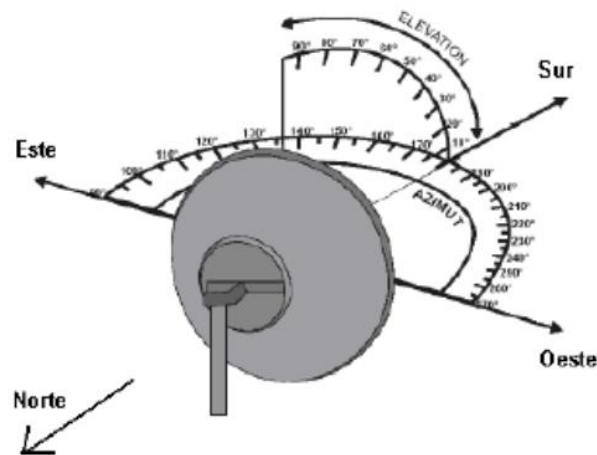


Figura 4.2.14 Acimut y elevación de una antena de base terrena.

Para realizar el cálculo de los ángulos de acimut y elevación se necesita tomar en consideración la siguiente información:

- Latitud de la estación terrena LA_{et}
- Longitud de la estación terrena LO_{et}
- Longitud del satélite LO_{sat}

Cálculo del ángulo de Azimut: Para el cálculo correcto se debe tomar en cuenta la posición de la estación terrena con respecto al satélite:

- Si la estación terrena se encuentra al noroeste del satélite:

$$Azm = 180^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{\tan(LO_{et} - LO_{sat})}{\sin LA_{et}}\right)$$

- Si la estación terrena se encuentra al noreste del satélite:

$$Azm = 180^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{\tan(LO_{et} - LO_{sat})}{\sin LA_{et}}\right)$$

- Si la estación terrena se encuentra al suroeste del satélite:

$$Azm = \tan^{-1}\left(\frac{\tan(LO_{et} - LO_{sat})}{\sin LA_{et}}\right)$$

- Si la estación terrena se encuentra al sureste del satélite:

$$Azim = 360^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{\tan(LA_{et} - LO_{sat})}{\sin LA_{et}}\right)$$

Cálculo del ángulo de Elevación:

$$Elev = \tan^{-1}\left(\frac{\cos LA_{et} \cos(LO_{et} - LO_{sat}) - 0.151}{\sqrt{1 - \cos^2 LA_{et} \cos^2(LO_{et} - LO_{sat})}}\right)$$

Una vez teniendo los ángulos de azimut y elevación se procede a colocar la antena siguiendo estos datos para asegurar que se está apuntando al satélite deseado.

Montaje

Los desplazamientos del satélite y el tipo de la estación terrena (fija o móvil), así como su posición geográfica, sus aplicaciones y las necesidades que se tengan para pruebas y mantenimiento frecuentes, determinan la estructura del montaje que la antena (cuando es direccional) debe tener.

Existen tres tipos de montaje cuya forma de funcionamiento se muestra esquemáticamente en la Figura 4.2.15.

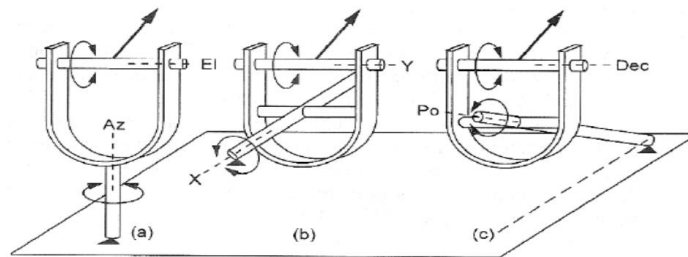


Figura 4.2.15 Tipos de montaje.

- Montaje elevación-acimut (El-Az): En este montaje la antena tiene su eje primario fijo en la dirección vertical, y al girar alrededor de él se efectúan los cambios del ángulo de acimut; su eje secundario es horizontal y con él se orienta la antena en elevación. El montaje es sencillo y tiene la ventaja de que sólo el giro en elevación puede producir deformaciones en la geometría de la antena debida a su peso. La mayoría de las antenas que requieren gran

precisión de la antena o gran libertad de movimiento utilizan este montaje, como las empleadas para el seguimiento de satélites en órbita de transferencia, pero por lo general no puede apuntar muy cerca del cenit.

- Montaje X-Y: Tiene su eje primario colocado horizontalmente, y el eje secundario es perpendicular a él. La configuración es práctica para rastrear con facilidad a un satélite cuando éste pasa por el cenit, puesto que se evita hacer desplazamientos de la antena tan rápidos como los que sí se necesitarían hacer con el montaje El-Az; pero resulta inadecuado para rastrear satélites en el horizonte.

En general, el montaje X-Y es más apropiado para las antenas que se comunican con satélites de órbita baja que con satélites geoestacionarios.

- Montaje ecuatorial: Tiene su eje primario (horario) paralelo al eje de rotación de la Tierra, y el secundario es un eje perpendicular de declinación; como el eje primario es paralelo al eje polar de la Tierra, a este montaje se le llama polar. Normalmente se usa para montar radiotelescopios, pues permite que la antena siga a un objeto celeste con sólo girarla sobre su eje horario. La ventaja del montaje polar para los sistemas geoestacionarios de poder mantener fijo el ajuste de declinación y solo tener movimiento sobre el otro eje no puede aplicarse a estaciones terrenas grandes, porque aunque la antena apunte con gran precisión a la órbita, debido a lo agudo de su lóbulo principal, los movimientos del satélite ocasionarían pérdidas de consideración y por tanto requieren sistemas de seguimiento con movimiento en dos ejes., por esta razón es que se utilizan los otros dos tipos de montaje para satélites no solo geoestacionarios, sino también de órbitas bajas.

Rastreo

Cuando es necesaria la reorientación ocasional hacia otros satélites o el seguimiento de un satélite geoestacionario operando en órbita inclinada, es común el empleo de motores que se controlan remotamente o se programan para un movimiento previsto. Cuanto más angosto sea el ancho del haz de la antena, y ésta esté más cerca del ecuador, el apuntamiento se vuelve más importante, en especial si el satélite está directamente “encima” de la estación. En cambio, si la estación está en una latitud alejada del ecuador, la amplitud de los movimientos del satélite tiene un impacto menor en los ajustes necesarios de la orientación de la antena para seguirlo. Si el ancho del haz de la antena es mucho más grande que la ventana del satélite, entonces no necesita un sistema de rastreo, por el contrario, si se necesita apuntar con una precisión del orden de 0.01° para mantener la comunicación fiable, es recomendable utilizar un sistema de rastreo que no permita una diferencia en el ángulo mayor a la establecida.

Existen dos tipos de sistemas de rastreo, el pre programado y el automático, este último se divide en rastreo por pasos y rastreo mono impulso.

Rastreo pre programado: Consiste en determinar con anticipación los movimientos del satélite y programar acordemente el mecanismo de orientación de la antena de la estación terrena para que lo siga. El satélite no se mueve arbitraria o aleatoriamente, sino de acuerdo con la influencia de las fuerzas perturbadoras en el espacio; por lo tanto, con programas de computadora, sus movimientos y las efemérides de su órbita pueden ser predichos. Esta técnica se utiliza en estaciones medianas en sistemas nacionales.

Rastreo por pasos: También conocido como de ascenso. A intervalos regulares, la antena detecta la intensidad de una señal guía (radiobaliza o radiofaro) emitida por el satélite; a continuación gira un poco (da un paso) alrededor de uno de sus ejes de montaje y compara la intensidad de la señal recibida con la anterior; si el nivel de la señal baja, entonces se mueve ahora en dirección opuesta, y su aumenta en

ese sentido, continua dando pasos hasta detectar el nivel máximo. Se utiliza en estaciones medianas, estaciones grandes y estaciones de barcos.

Rastreo mono impulso: Es el más preciso y fiable para las antenas grandes, especialmente si funcionan en las bandas Ku y Ka. Su forma de operación proviene de la tecnología del radar, pues ahora la búsqueda es por un nivel mínimo de recepción de la señal guía, y para esto la antena parabólica necesita un alimentador especial. Los primeros diseños de sistemas mono impulso utilizan cuatro antenas de bocina colocadas simétricamente alrededor del foco geométrico de la parábola; éstas reciben simultáneamente la señal guía o radiobaliza emitida por el satélite y las detecciones de las cuatro son comparadas para determinar señales de error en el apuntamiento y efectuar las correcciones necesarias. Su inconveniente es que conducen al uso de alimentadores aparatosos y complicados.

Así que los sistemas más modernos, conocidos como mono impulso multimodo, solamente utilizan un acoplador especial de microondas que va insertado en el mismo alimentador primario o corneta de la antena parabólica; cuando hay una desviación en la orientación de la antena en relación con la señal guía del satélite, el acoplador extrae del alimentador señales de propagación de modo superior que permiten determinar el error de apuntamiento y efectuar, en consecuencia, las correcciones que sean requeridas.

4.2.7 Rango satelital

El rango satelital es la distancia que existe entre una estación terrena y el satélite de comunicaciones. Este dato es de gran importancia gracias a que nos indica el tamaño de la trayectoria por la que va a viajar la señal, una trayectoria grande implica que la señal va a ser más susceptible a interferencia y atenuación. Véase figura 4.2.16.

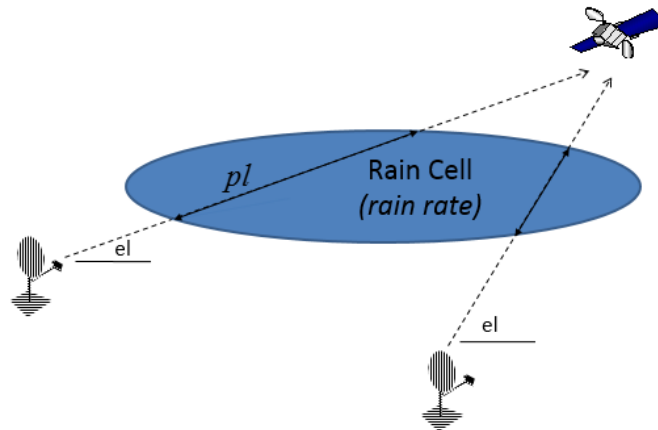


Figura 4.2.16 Distancias diferentes de dos estaciones terrenas hacia el satélite

El cálculo del rango satelital se realiza con la siguiente ecuación:

$$S = [R^2 + (R + h)^2 - 2R(R + h) \cos \beta]^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

R = Radio de la Tierra 6,378 Km

h = Altura de la órbita (35,786 Km)

$$\alpha = \sin^{-1}(0.15126 \cos(Elev))$$

$$\beta = 90^\circ - \alpha - Elev$$

4.3 Efectos atmosféricos en un enlace satelital

4.3.1 Propagación de ondas electromagnéticas por la atmósfera.

Las ondas electromagnéticas se propagan por el aire o por el espacio. En el caso del aire, la atmósfera produce efectos sobre las ondas que la atraviesan. La capa de aire está compuesta de Nitrógeno y Oxígeno en grandes proporciones, junto a

otros gases en cantidades mucho más pequeñas, incluidos fragmentos de elementos que llegan del espacio exterior.

Estos compuestos se encuentran hasta una altitud de 100 km (ver figura 4.3.1) pero la densidad disminuye notablemente y en la alta atmosfera solamente se encuentra Nitrógeno y Helio.

La radiación del Sol actúa en toda la atmosfera. En áreas cercanas a la superficie influye con su calor en los fenómenos meteorológicos. En la alta atmósfera transforma los gases mediante la radiación ultravioleta y los rayos X.

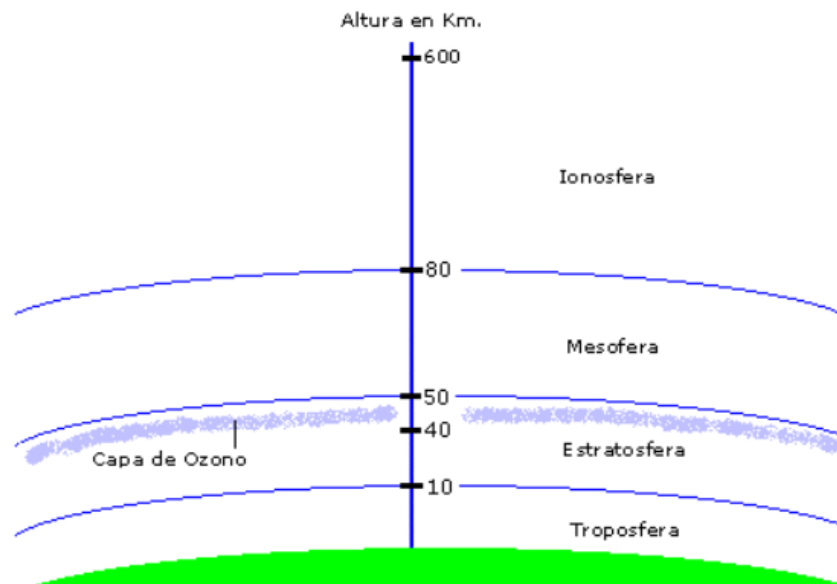


Figura 4.3.1 Capas de la atmósfera en a Tierra.

La ionosfera es la capa de la atmósfera que se encuentra ionizada permanentemente debido a las radiaciones ionizantes procedentes del sol, como la radiación ultravioleta y los rayos X. La altitud de esta capa comienza a los 50 km en la mesosfera hasta cerca de los 1000 Km de altitud dentro de la termosfera. Al encontrarse por encima de los 50 Km de altitud los gases son tenues y es posible encontrar iones positivos y electrones libres, por lo cual tiene propiedades de un gas tenue y de un plasma.

La estructura de la ionosfera viene marcada por el gradiente de la densidad electrónica, así se pueden encontrar picos de la ionización que definen las capas denominadas D, E, F1 y F2. Véase figura 4.3.2

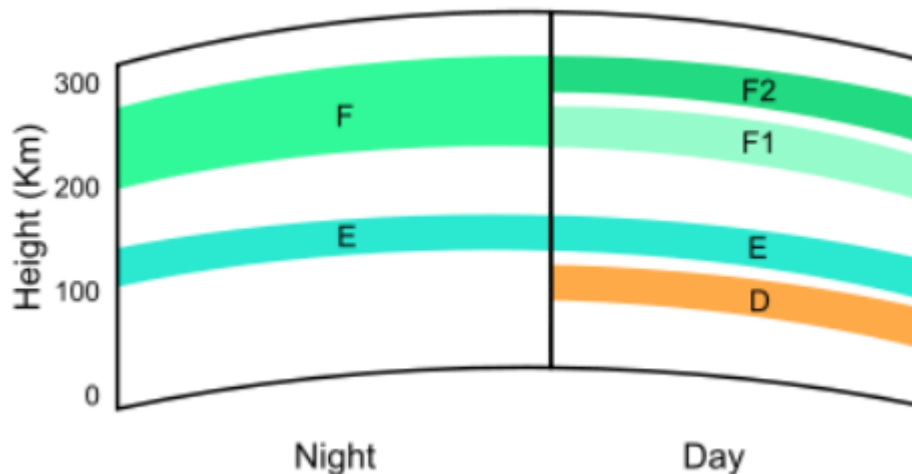


Figura 4.3.2 Estructura de la atmósfera en la ionización a lo largo de un día.

Dependiendo de la frecuencia de las señales de comunicaciones inalámbricas, se pueden presentar varios fenómenos, tales como:

- Onda de superficie: Este tipo de propagación afecta principalmente a señales con frecuencia inferior a la banda MF (<30 MHz de longitud menor a 100 metros), este tipo de señales no pueden atravesar la atmósfera por lo que sólo viajan sobre la superficie de la tierra. Básicamente se trata de señales AM y de radio transoceánicas.
- Reflexión ionosférica: Este fenómeno se presenta a partir de las frecuencias HF (hasta <300 MHz) y el efecto que produce sobre las señales es que modifica el alcance de estas. La capa D de la ionosfera es diurna y desaparece en la noche, en consecuencia, hay menor alcance en el día con relación a la noche. Véase figura 4.3.3.

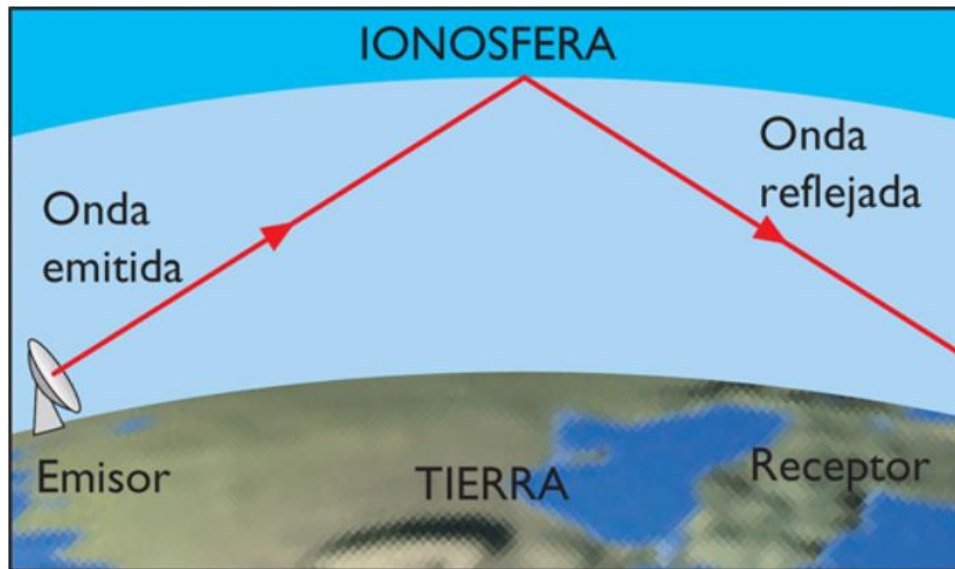


Figura 4.3.3 Reflexión de la onda en la atmósfera.

- Difracción: Es el cambio de dirección de un haz electromagnético, ver figura 4.3.4. En ciertos casos permite la comunicación entre dos puntos sin que haya línea de vista directa. Este fenómeno se presenta en frecuencias inferiores a UHF.

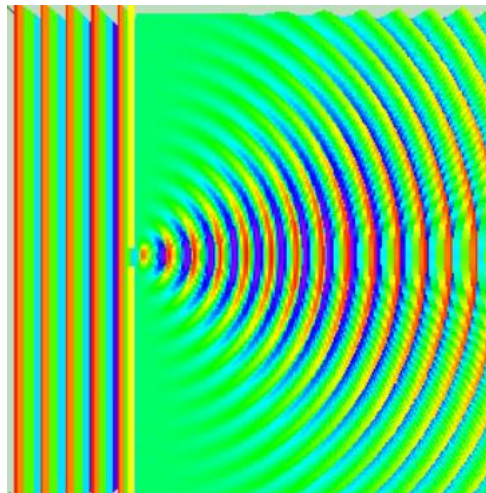


Figura 4.3.4 Difracción de una onda electromagnética.

Las condiciones troposféricas son importantes para las bandas VHF y UHF en los que la longitud de onda es comparable con las “no homogeneidades” del índice de refracción de la atmósfera (que dependerá de la temperatura, presión y humedad). Esto afecta directamente el alcance de la señal que se puede propagar centenares de kilómetros, pero, en ocasiones con desvanecimientos; ya que el cambio de índice de refracción atmosférico causa multitrayectorias con dispersión de la señal.

Para las comunicaciones inalámbricas es de crucial importancia el contenido de vapor, gases diversos y temperatura en la atmósfera, pues todo ello genera factores de diversa importancia para el cálculo de la atenuación de las ondas electromagnéticas, en particular, las ondas con frecuencias mayores a 10 GHz.

4.3.2 Pérdidas por propagación

La energía radiada al tener interacción con el medio sufre de efectos que afectan la transmisión de ondas. Una onda se compone por amplitud, frecuencia y fase. Estos tres parámetros pueden ser modificados al propagarse. La atenuación o disminución de la amplitud de la señal son el problema principal. Caracterizar al medio por el cual las ondas se propagan es útil para poder contrarrestar estos efectos.

Las pérdidas por espacio libre (Free Space Loss) es una de las más significativas ya que por sí mismo el canal es un medio con pérdidas, entonces la solución de la ecuación de onda da como resultado una disminución exponencial de la amplitud de la onda a través del espacio, además la potencia recibida está relacionada con el área de la antena receptora, como densidad de flujo de potencia, watts por unidad de área. La relación de potencia recibida y transmitida está dada por:

$$P_r = P_t g_t g_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R_s} \right)^2$$

Donde:

P_r : potencia recibida

P_t : potencia transmitida

g_t : ganancia Transmitida

g_r : ganancia de recepción

Entonces se define como pérdidas por espacio libre:

$$l_{FSL} = \left(\frac{4\pi R_s}{\lambda} \right)^2$$

$$L_{FSL} = 20 \log \left(\frac{4\pi R_s}{\lambda} \right) [dB]$$

R_s : Rango espacial, longitud entre la estación terrena y el satellite.

λ : longitud de onda.

Esta ecuación quiere decir que en un enlace mientras sea más largo o distante, habrá más pérdidas, como también al usar frecuencias muy grandes. El rango espacial, R_s , varía de acuerdo a la latitud de la estación terrena y se relaciona con los ángulos de apuntamiento de la antena terrestre.

Pérdidas por transmisión debido a un eclipse.

Este tipo de fenómenos puede llegar a interrumpir la transmisión del satélite. Cuando el satélite entra en la sombra de la Tierra interrumpe la fuente de energía solar a sus celdas y esto provoca una pérdida en el servicio de transmisión. Esto significa que el satélite está activo gracias a las baterías de reserva que no son capaces de dar toda la potencia de salida. Los receptores que están en el extremo del área de cobertura pueden perder la señal. El eclipse solar únicamente se produce dos veces al año, y este efecto puede echar abajo las comunicaciones varios minutos al día

4.3.3 Atenuación por lluvia

La atenuación por hidrometeoros como la lluvia, el granizo, la nieve o la niebla, es el factor que más afecta a las señales en frecuencias de microondas entre un satélite y equipos receptores en la tierra, dígase estaciones terrenas o VSAT. Estos fenómenos pueden suceder de imprevisto y presentarse en cualquier área geográfica del planeta donde se esté dando una comunicación de señal satelital

Los factores que contribuyen a la degradación de la señal son la frecuencia, el ángulo de elevación de la antena, la polarización de la señal, la intensidad de lluvia, distribución de la lluvia y la temperatura de las gotas de lluvia.

La atenuación por lluvia se debe a la absorción y dispersión de energía propagante por las partículas de agua. Las gotas de lluvia se comportan como un medio dieléctrico disipador y reflector para los campos eléctricos incidentes, absorbiendo energía o dispersándola en diferentes direcciones. La absorción corresponde a la disipación térmica, siendo función de la conductividad del agua. La dispersión está asociada a múltiples reflexiones de la onda, de modo a satisfacer las condiciones de contorno sobre cada gota. Un campo eléctrico linealmente polarizado que alcanza una gota de lluvia, sufre mayor o menor atenuación conforme su orientación que coincide con el mayor eje de la sección transversal de la gota, esto porque la gota posee la forma de un esferoide con la orientación de su mayor eje en caso horizontal, ya que es aplanada por causa de la acción gravitatoria y de la resistencia del aire. Véase figura 4.3.5

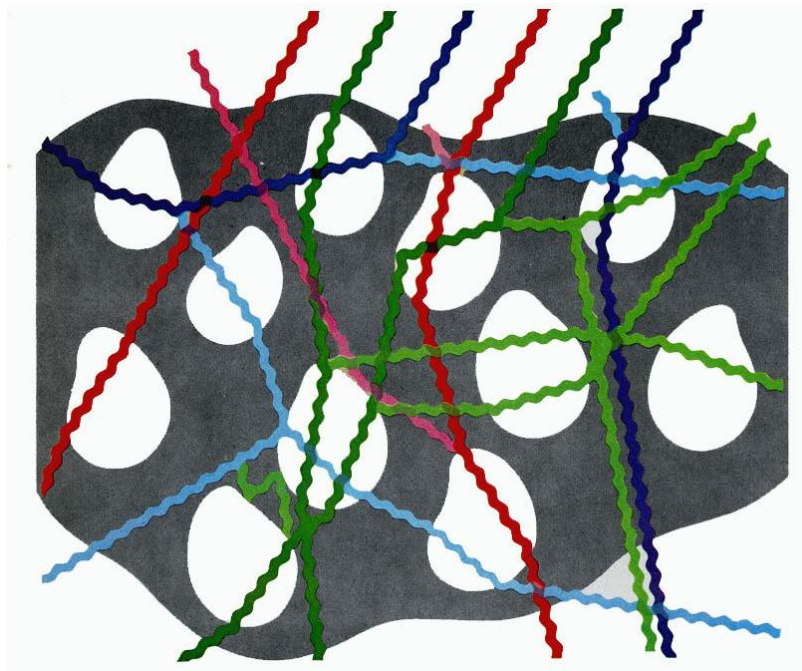


Figura 4.3.5 Efecto de la lluvia sobre frecuencias milimétricas.

La atenuación por nubes dependen básicamente del contenido de agua líquida y de la temperatura de las gotas que las constituyen, este puede ser un factor muy importante para los sistemas con baja disponibilidad debido a mayor persistencia de nubes en el trayecto que en situaciones de precipitación. Dependiendo del ángulo de elevación y de los tipos de nubes en la ubicación donde se encuentra la estación terrestre. El uso de modelos UIT-R con 99.5% de disponibilidad, atenuación de pico varía de 0.1 a 0.8 dB a 20 GHz y varía desde 0.3 hasta 1.7 dB a 30 GHz.⁵

Como ya mencionamos los cambios atmosféricos presentes en nuestro planeta afectan o perturban notablemente las comunicaciones de señal satelital. Particularmente la lluvia es conocida como una de las principales causas que alteran la propagación de señales, haciendo que éstas presenten pérdida de potencia y

⁵ Petranovich, J. 2001. "Mitigating the Effect of Weather on Ka-band High-Capacity Satellites", ViaSat Inc., Estados Unidos.

polarización, además de presentar una atenuación en la señal y llegando hasta la interrupción total de la comunicación. La lluvia siempre se presenta de forma aleatoria y puede hacerse presente en cualquier área geográfica del planeta. En enlaces satelitales que operan en altas frecuencias, como los que operan en banda Ka, la lluvia es el principal enemigo.

Es por esto que existen algunos métodos y modelos estadísticos de predicción que pueden ayudar a pronosticar la atenuación por lluvia en las comunicaciones satelitales, lo cual brinda una herramienta eficaz para implementar dichos resultados en nuevos diseños o en actualizaciones de los sistemas satelitales. De manera simplificada, estos modelos se pueden agrupar en dos categorías:

- Modelos físicos: Definen la física del fenómeno e intentan modelar la estructura vertical y horizontal de la lluvia. Suelen basarse en medidas tomadas por radares meteorológicos, tomando en cuenta parámetros como la altura de la lluvia, la extensión horizontal y vertical de las precipitaciones y la distribución de intensidades en cada célula de lluvia.
- Modelos semi-empíricos: Son obtenidos mediante el ajuste a medidas experimentales de atenuación utilizando variaciones de emplazamientos, ángulos de elevación y frecuencias. Requieren el uso de parámetros estadísticos como longitud de trayecto efectiva, coeficientes de reducción vertical y horizontal, etc.

En la actualidad han sido los modelos semi-empíricos los que más se utilizan y con ellos se han obtenido mejores resultados. La gran mayoría de los modelos para atenuación por lluvia requieren datos de entrada tales como:

$R(p)$: Distribución acumulada de intensidad de lluvia en el emplazamiento, puede obtenerse a partir de medidas locales o mediante mapas globales de intensidad, el cual puede verse en la Recomendación 837-6 de la UIT. Existen modelos que sólo

requieren puntos de la distribución, como la intensidad de lluvia rebasada 0.01% del tiempo $R_{0.01}$.

h : La altura de las nubes o de la lluvia con relación al piso o altura de la isoterma de 0°C . Este dato se obtiene de la misma manera que $R(p)$, mediante sondeos o utilizando mapas globales, éstos pueden tomarse de la Recomendación 839-3 de la UIT.

D : Distancia en la cual las señales se desplazarán bajo el fenómeno meteorológico.

θ : Ángulo de elevación de la antena de la estación.

En la figura 4.3.6 se muestra una imagen con algunos de los parámetros mencionados.

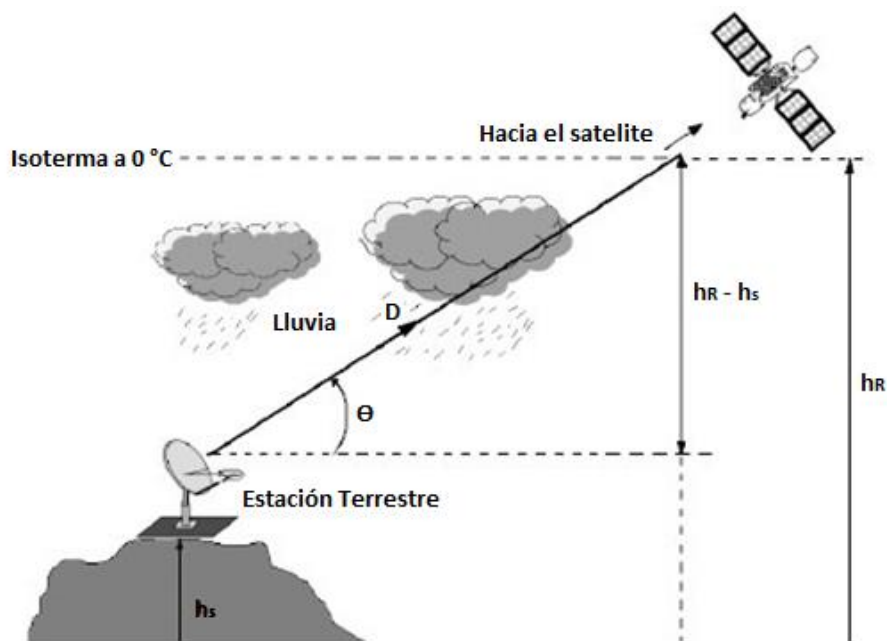


Figura 4.3.6 Trayecto Tierra-espacio con algunos de los parámetros empleados para la predicción de atenuación por lluvia.

Modelos Estadísticos para Atenuación por Lluvia.

Sabemos que la atenuación distribuida de la señal dada en (dB/km) no es constante a lo largo del trayecto ya que la señal puede pasar por regiones en las que se presenta mucha lluvia y en otras en donde no. Para facilitar los cálculos casi todos los modelos calculan la atenuación específica y la atenuación total es el resultado de multiplicar la atenuación específica por la distancia y el resultado de esto se multiplica por un factor de corrector de distancia y dicho factor toma en cuenta el fenómeno de que no llueve todo el trayecto.

- Modelo de Bryant.

Este modelo se basa en el comportamiento físico del medio de propagación. Utiliza algunos parámetros tales como la distribución de intensidad de lluvia, la altura de lluvia, y el ángulo de elevación. Se elaboró mediante la comparación simultánea de medidas experimentales de atenuación a 12 GHz en zonas tropicales y de mucha lluvia. Los resultados son satisfactorios y aplicables en rangos de hasta los 50 GHz, por lo que puede aplicar para banda Ka.

Este modelo asume una lluvia constante dentro de un volumen y se toma en cuenta el diámetro de las gotas. Se comprobó que en zonas tropicales se presentan algunas ventajas al utilizar un ángulo de elevación alto ya que así se asegura una estructura horizontal de la lluvia muy simple.

- Modelo Excell (Exponencial Cell Model)

Este modelo describe a la precipitación como una población de células de lluvia. Las células en el modelo poseen simetría circular y la intensidad de lluvia decrece de forma exponencial con respecto a su valor máximo. La población se define por la densidad espacial de las células. Los valores de intensidad de lluvia se obtienen de la Recomendación 837-6 de la UIT. Véase figura 4.3.7.

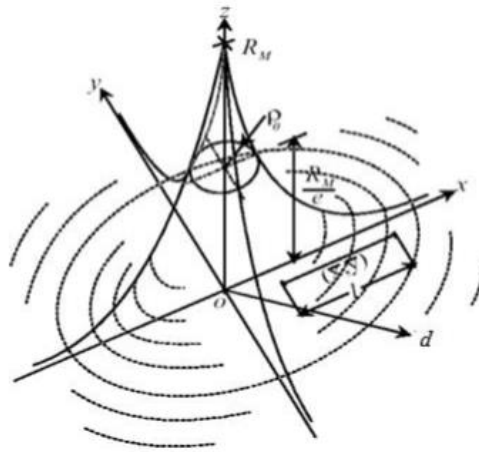


Figura 4.3.7 Representación de una célula de lluvia exponencial según el modelo Excell

- Modelo García-López

Este modelo emplea una distribución completa de intensidades de lluvia al año y coeficientes para diversos climas. Utiliza el modelo dado por la UIT para la geometría del trayecto.

- Modelo UIT.

Este modelo es el más recurrido para las comunicaciones satelitales. La atenuación específica debida a la lluvia puede calcularse a partir de la Recomendación UIT-R 838. La atenuación específica γ (dB/km) se obtiene a partir de la intensidad de lluvia R (mm/h) mediante la ley exponencial:

$$\gamma = k R^\alpha$$

Donde k y α son unas constantes que dependen de la frecuencia y de la polarización de la onda electromagnética.

Algunos valores de k y α para distintas frecuencias y polarizaciones lineales (horizontal y vertical) se muestran en la tabla 4.3.1. En la Rec. UIT-R 838 se proporcionan un mayor número de valores. Para obtener valores a frecuencias intermedias se recomienda aplicar interpolación, utilizando una escala logarítmica para la frecuencia y para k , y una escala lineal para α . De la tabla se deduce que la atenuación es ligeramente superior para polarización horizontal que para vertical. Esto se debe simplemente a la forma que adquieren las gotas de lluvia por el rozamiento durante la caída.

En la figura 4.3.8 se representan curvas de atenuación específica por lluvia en función de la frecuencia y para distintos valores de precipitación. Como puede observarse, la atenuación específica crece rápidamente para frecuencias por encima de 10 GHz. Para una tasa de precipitación de $R = 50$ mm/h se obtienen valores de atenuación específica mayores de 10 dB/km para frecuencias superiores a 30 GHz. Por lo tanto, la lluvia es un problema serio en sistemas de radiocomunicaciones que operen a frecuencias milimétricas.

Frecuencia (GHz)	Polarización horizontal		Polarización vertical	
	k	A	k	α
6	0,00175	1,308	0,00155	1,265
8	0,00454	1,327	0,00395	1,310
10	0,0101	1,276	0,00887	1,264
20	0,0751	1,099	0,0691	1,065
30	0,187	1,021	0,167	1,000
40	0,350	0,939	0,310	0,929
60	0,707	0,826	0,642	0,824
100	1,12	0,743	1,06	0,744

Tabla 4.3.1 Coeficientes de regresión para estimar el valor de la atenuación específica.

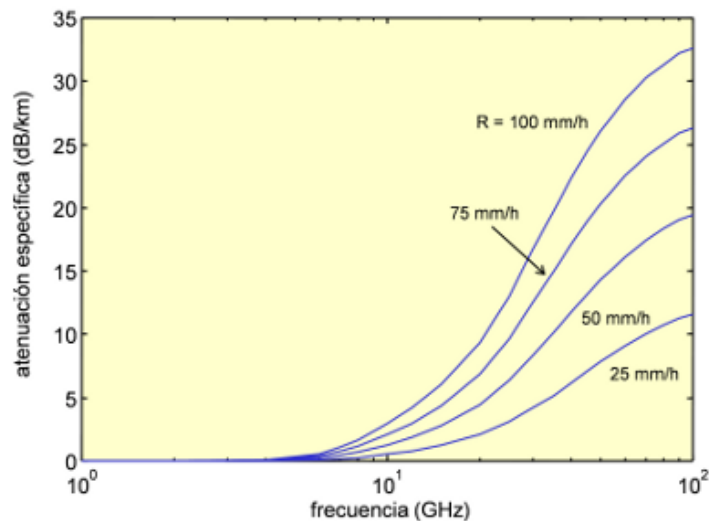


Figura 4.3.8 Gráfica de atenuación específica en función a la frecuencia con R=50 mm/h

Conviene indicar por último que en todos los cálculos anteriores se considera propagación en trayectos horizontales y polarizaciones lineales. Si se tiene una inclinación de la polarización con respecto a la horizontal o un determinado ángulo de elevación en el trayecto, entonces los valores de k y α de la tabla deben modificarse por medio de unas fórmulas de corrección incluidas en la misma recomendación⁶.

RECOMENDACIÓN UIT-R P.838-3, Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción (Cuestión UIT-R 201/3) (1992-1999-2003-2005).

La Asamblea de Radiocomunicaciones, considerando que es necesario calcular la atenuación producida por la lluvia a partir de valores de intensidad de lluvia conocidos, recomienda que se utilice el procedimiento siguiente.

⁶ RECOMENDACIÓN UIT-R P.838-3 obtenida de la página oficial de la UIT

La atenuación específica γ_R (dB/km) se obtiene a partir de la intensidad de la lluvia R (mm/h) mediante la ley potencial:

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (1)$$

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 las ecuaciones siguientes, que se han obtenido mediante el ajuste de curvas a los coeficientes de la ley potencial derivados de cálculos de dispersión:

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad (2)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (3)$$

donde:

f : frecuencia (GHz)

k : puede ser k_H o k_V

α : puede ser α_H o α_V .

En la tabla 4.3.2 se indican los valores de las constantes para el coeficiente k_H de polarización horizontal, y en el tabla 4.3.3 para el coeficiente k_V de polarización vertical. En la tabla 4.3.4 se indican los valores de las constantes para el coeficiente α_H de polarización horizontal, y en la tabla 4.3.5 para el coeficiente α_V de polarización vertical.

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5,33980	-0,10008	1,13098	-0,18961	0,71147
2	-0,35351	1,26970	0,45400		

3	-0,23789	0,86036	0,15354		
4	-0,94158	0,64552	0,16817		

Tabla 4.3.2 Coeficientes para k_H

j	a_j	b_j	c_j	m_k	C_k
1	-3,80595	0,56934	0,81061	-0,16398	0,63297
2	-3,44965	-0,22911	0,51059		
3	-0,39902	0,73042	0,11899		
4	0,50167	1,07319	0,27195		

Tabla 4.3.3 Coeficientes para k_v

j	a_j	b_j	c_j	m_α	C_α
1	-0,14318	1,82442	-0,55187	0,67849	-1,95537
2	0,29591	0,77564	0,19822		
3	0,32177	0,63773	0,13164		
4	-5,37610	-0,96230	1,47828		
5	16,1721	-3,29980	3,43990		

Tabla 4.3.4 Coeficientes para α_H

j	a_j	b_j	c_j	m_α	C_α
1	-0,07771	2,33840	-0,76284	-0,053739	0,83433
2	0,56727	0,95545	0,54039		
3	-0,20238	1,14520	0,26809		
4	-48,2991	0,791669	0,116226		
5	48,5833	0,791459	0,116479		

Tabla 4.3.5 Coeficientes para α_v

Para la polarización lineal y circular, y para cualquier geometría del trayecto, los coeficientes de la ecuación (1) pueden calcularse mediante los valores de las ecuaciones (2) y (3) utilizando las ecuaciones siguientes:

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2 \quad (4)$$

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2k \quad (5)$$

dónde θ es el ángulo de elevación del trayecto y τ es el ángulo de inclinación de la polarización con respecto a la horizontal ($\tau = 45^\circ$ para la polarización circular).

Para facilitar su consulta, los coeficientes k y α se muestran gráficamente en las Figuras 4.3.9, 4.3.10, 4.3.11 y 4.3.12 respectivamente y en la tabla 4.3.6 se indican los valores numéricos de los coeficientes en determinadas frecuencias.

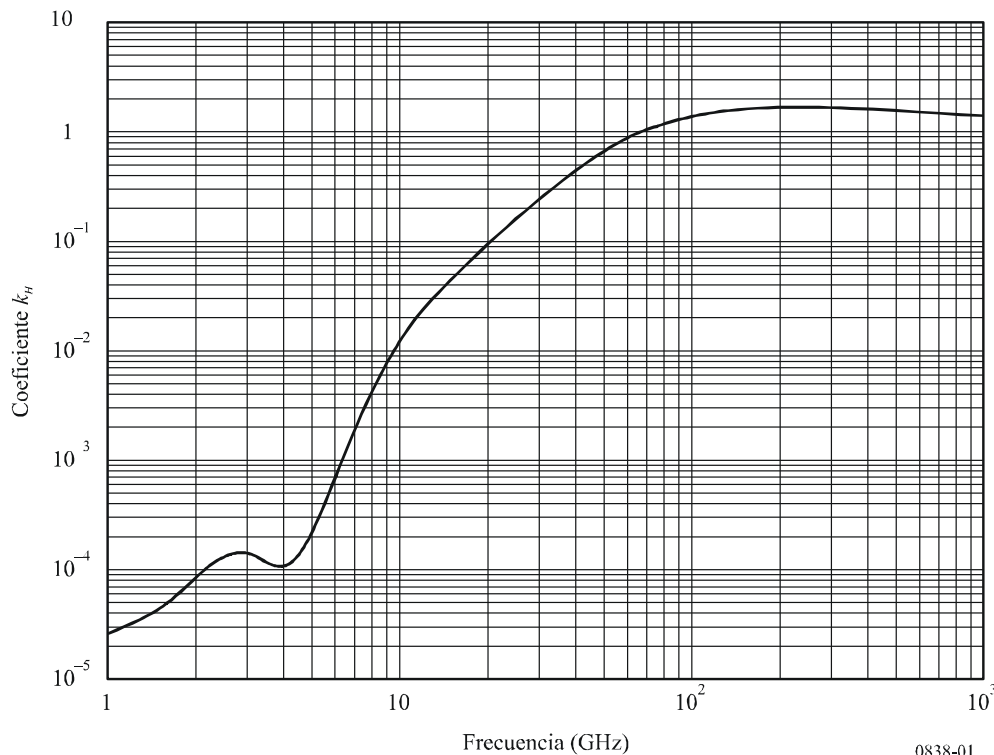


Figura 4.3.9 Coeficiente k de polarización horizontal

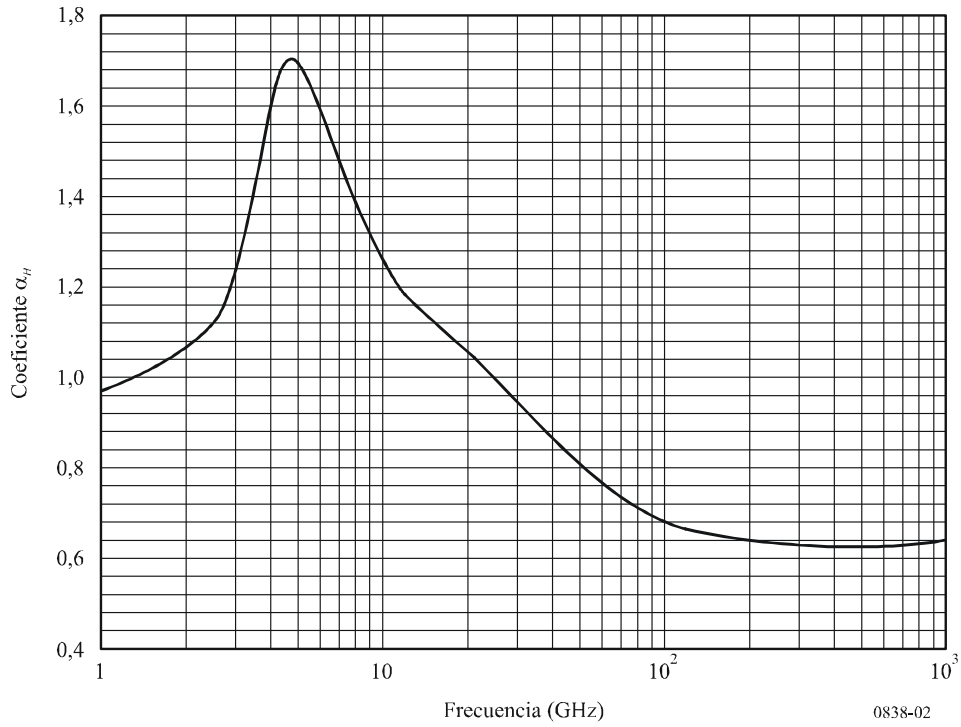


Figura 4.3.910 Coeficiente α de polarización horizontal

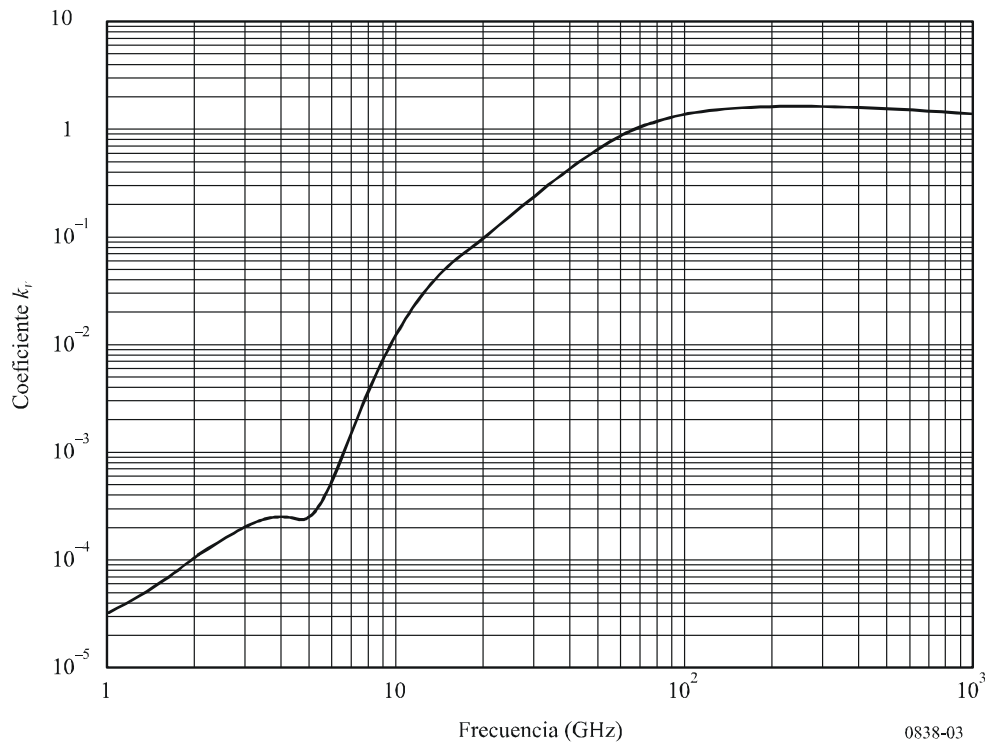
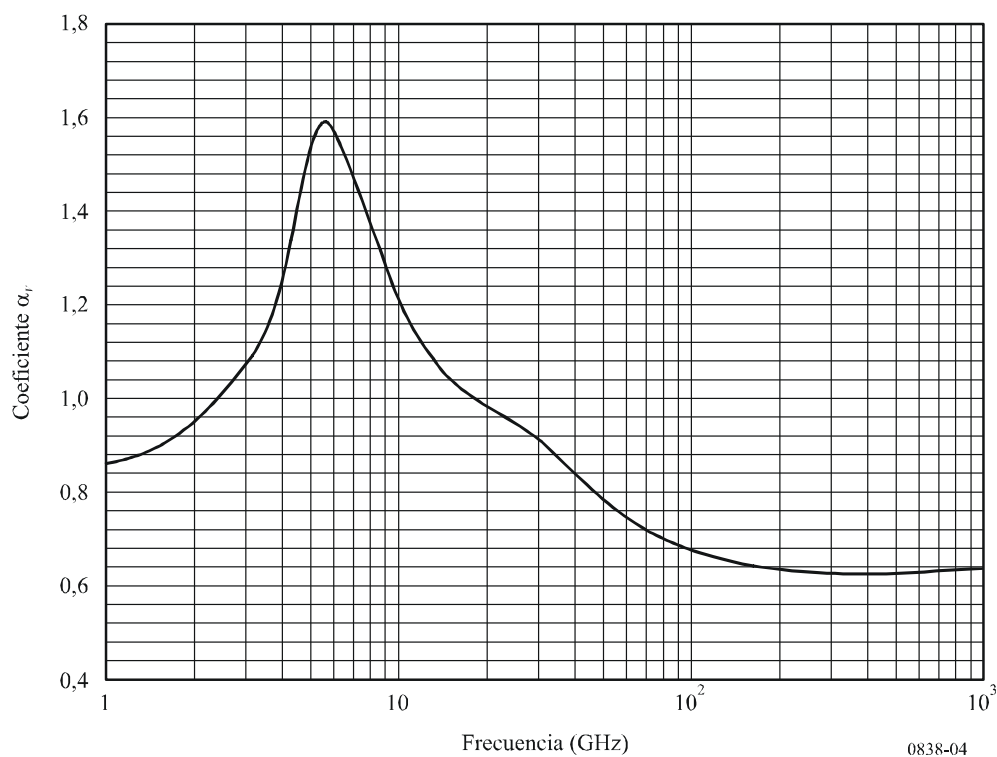


Figura 4.3.11 Coeficiente k de polarización vertical



Coeficiente α de polarización vertical

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
16	0,05282	1,1086	0,05899	1,0273
17	0,06146	1,0949	0,06797	1,0137
18	0,07078	1,0818	0,07708	1,0025
19	0,08084	1,0691	0,08642	0,9930
20	0,09164	1,0568	0,09611	0,9847
21	0,1032	1,0447	0,1063	0,9771
22	0,1155	1,0329	0,1170	0,9700
23	0,1286	1,0214	0,1284	0,9630
24	0,1425	1,0101	0,1404	0,9561
25	0,1571	0,9991	0,1533	0,9491
26	0,1724	0,9884	0,1669	0,9421

27	0,1884	0,9780	0,1813	0,9349
28	0,2051	0,9679	0,1964	0,9277
29	0,2224	0,9580	0,2124	0,9203
30	0,2403	0,9485	0,2291	0,9129
31	0,2588	0,9392	0,2465	0,9055
32	0,2778	0,9302	0,2646	0,8981
33	0,2972	0,9214	0,2833	0,8907
34	0,3171	0,9129	0,3026	0,8834
35	0,3374	0,9047	0,3224	0,8761
36	0,3580	0,8967	0,3427	0,8690
37	0,3789	0,8890	0,3633	0,8621
38	0,4001	0,8816	0,3844	0,8552
39	0,4215	0,8743	0,4058	0,8486
40	0,4431	0,8673	0,4274	0,8421

Tabla 4.3.6 Coeficientes que dependen de la frecuencia para estimar la atenuación específica debida a la lluvia utilizando las ecuaciones (4), (5) y (1)

4.4 Topología de la red

Todas las comunicaciones por satélite realizan la función de un repetidor de señales en una red de telecomunicaciones. El tipo más básico de repetidor es el que se realiza con satélites conocidos como Bent Pipe o de tubo, los cuales no modifican la naturaleza de la transmisión entre las estaciones terrenas; en este caso las estaciones terrenas organizan sus transmisiones para hacer más eficiente el uso de los recursos del satélite y permitir que más puntos en la Tierra puedan transmitir e intercambiar información. En satélites más sofisticados con procesamiento de señales a bordo, el satélite realiza funciones como el intercambio de conexiones entre estaciones e incluso modificar el formato de transmisión de las señales.

El diseño, operación e inversión económica dependen fuertemente de la manera en que se desea desplegar la arquitectura de la red.

La conectividad es la propiedad por la cual una red satelital provee enlaces a los usuarios. Las tres formas genéricas de conectividad son punto a punto, punto a multipunto, y multipunto interactivo.

El primer uso de los satélites de comunicaciones fueron los enlaces punto a punto entre dos estaciones terrenas. La comunicación entre una estación terrena a otra es a través de una trayectoria dedicada sobre el mismo satélite (véase Figura 4.4.1). Dos enlaces son necesarios para alojar una comunicación simultánea en ambas direcciones. El enlace puede permanecer en un sitio por un largo periodo o puede establecerse por un periodo limitado a la duración de un evento.

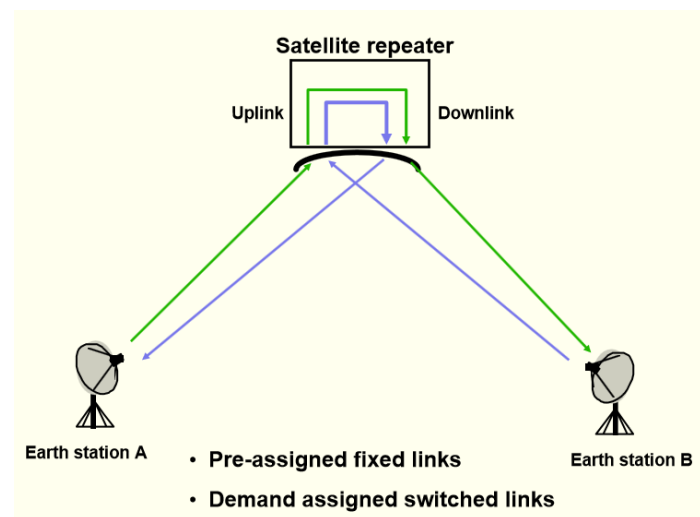


Figura 4.4.1 Enlace Punto a Punto

Los enlaces punto a punto permitieron a los satélites crear una red mundial de circuitos telefónicos, los cuales generaron el empuje necesario para la fundación sólida del desarrollo de las telecomunicaciones mundiales. Esto fue antes de la implementación del cable de fibra óptica.

Desde los años 80's los satélites son utilizados para conectividades punto a multipunto, también llamados de broadcast. Como se muestra en la Figura 4.4.2 una sola estación terrena puede transmitir un flujo continuo de información hacia todos los puntos receptores dentro del área de cobertura. La mayoría de los satélites que trabajan con redes punto a multipunto ofrecen servicios de contenidos de televisión a la población.

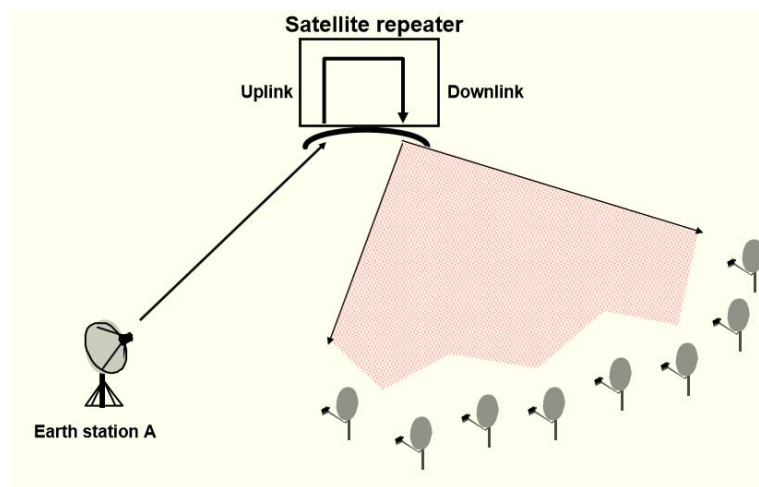


Figura 4.4.2 Enlace Punto a Multipunto

Si se agrega la capacidad de transmitir a cada terminal receptora, un sistema de broadcast se convierte en una red multipunto interactiva. Cada sitio remoto emplea un tipo de estación terrena denominada VSAT (Very Small Aperture Terminal). La estación terrena maestra o HUB envía la señal de broadcast hacia todas las terminales receptoras, estas terminales pueden transmitir sus requerimientos o paquetes de vuelta al HUB a través del mismo satélite, véase Figura 4.4.3. Por ejemplo, un suscriptor envía el requerimiento para descargar un archivo que contiene una película o un software digital, este requerimiento es recibido por el HUB que transmite dicho archivo por medio del enlace de broadcast.

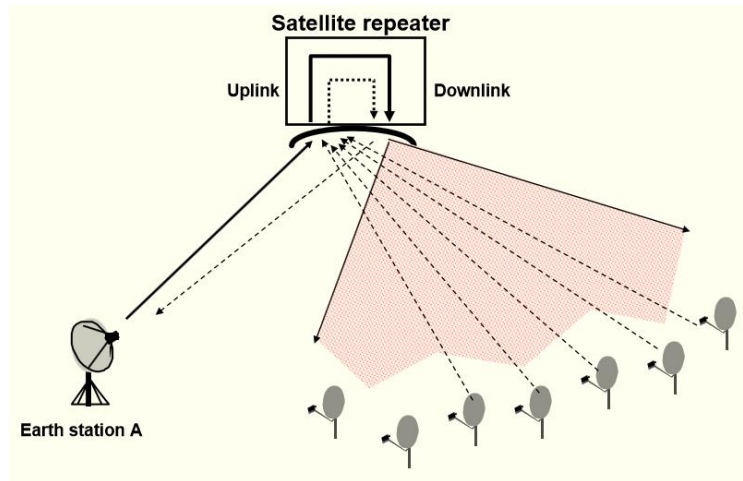


Figura 4.4.3 Red multipunto interactiva.

Servicios de ancho de banda dedicados.

La historia comercial de los satélites de comunicaciones se fundó con el uso de los satélites geoestacionarios y estaciones terrenas fijas, lo que significa que la dirección y distancia del enlace no cambia. El principal enfoque de los servicios y enlaces satelitales es brindar un ancho de banda dedicado a cada servicio; de este modo la comunicación es establecida y se mantiene continuamente por un largo periodo de tiempo.

4.5 Expresiones y fórmulas para el cálculo de un enlace satelital

El enlace satelital es una forma básica de comunicación dado que es una trayectoria con línea de vista entre la Tierra y el espacio. Esto significa que existe una línea imaginaria que se extiende entre la estación terrena y la antena del satélite, esta línea solo atraviesa la atmósfera y ningún obstáculo.

La atenuación en el espacio libre es determinada por el inverso de la ley del cuadrado, que estipula que la potencia recibida es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Existen efectos adicionales que producen una degradación y variación en tiempo de la señal; entre estos efectos se encuentra la

lluvia, efectos terrestres como la absorción por árboles o paredes y algunas pérdidas producidas por condiciones inestables en el aire y la ionosfera.

Es trabajo del ingeniero tomar en cuenta factores como el rendimiento del satélite, la configuración y rendimiento de las estaciones terrenas y el impacto del medio de propagación en la banda de frecuencia de interés. El primer paso en el diseño de un enlace de microondas es identificar los requerimientos totales y los componentes críticos que determinan el rendimiento. La figura 4.5.1 muestra una arquitectura con un Hub o Telepuerto en el enlace de subida y una VSAT en el enlace de bajada; el satélite es representado como un repetidor que convierte la frecuencia.

Dada la naturaleza análoga del enlace de radiofrecuencia, cada elemento contribuye con ganancia o pérdida en el enlace y puede agregar ruido e interferencia.

El resultado del rendimiento total es presentado en términos de la tasa entre la potencia de la portadora y la potencia del ruido C/N , y de la calidad de la señal. Un diseño realizado apropiadamente, puede predecir si el enlace trabajará con la calidad requerida de acuerdo con las especificaciones de los componentes terrenales y espaciales. Los efectos de cualquier evento inesperado, pueden ser cubiertos si se cuenta con un margen apropiado en el enlace.

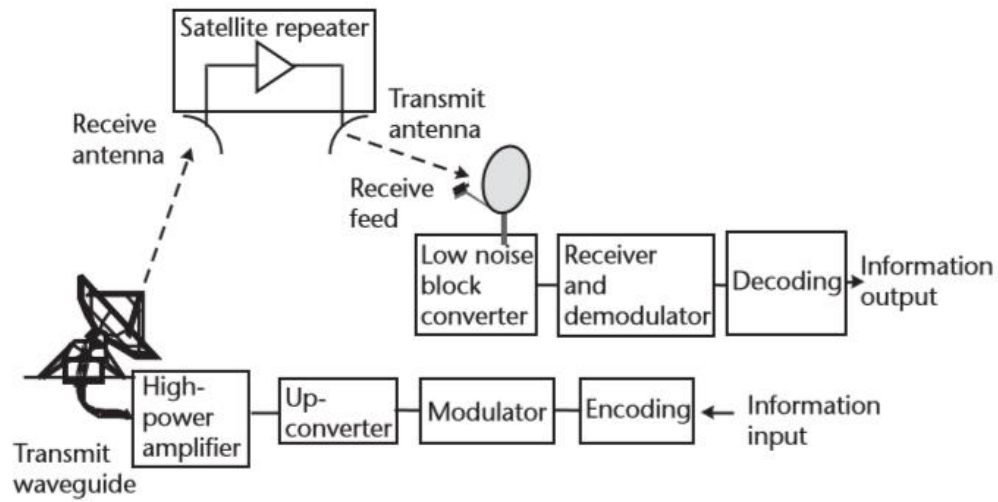


Figura 4.5.1 Arquitectura Broadcast

El enlace entre el satélite y la estación terrena se representa matemáticamente por la siguiente ecuación:

$$p_r = \frac{p_t g_t g_r c^2}{(4\pi)^2 R^2 f^2} [W]$$

Donde:

p_r : representa la potencia recibida en la antena receptora.

p_t : representa la potencia aplicada en la antena de transmisión.

g_r : representa la ganancia de la antena de recepción.

g_t : representa la ganancia de la antena de transmisión.

c : corresponde a la velocidad de la luz (aproximadamente 300×10^6 m/s)

R : corresponde al rango satelital o longitud de la trayectoria en metros.

f : frecuencia de la señal en Hertz.

Es común realizar el cálculo del presupuesto de enlace en decibeles; la misma fórmula pero en decibeles tiene la forma de un balance de potencia:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - 20 \log(f \cdot R) + 147.6 \text{ [dBW]}$$

En la fórmula anterior, la potencia recibida es medida en un decibel relativo a 1W, por lo que sus unidades son [dBW].

Los últimos dos términos representan las pérdidas por la trayectoria en el espacio libre A_0 entre la estación terrena y el satélite.

Efectos de propagación

Una onda se compone por amplitud, frecuencia y fase. Estos tres parámetros pueden ser modificados al propagarse. La atenuación o disminución de la amplitud de la señal son el problema principal. Caracterizar al medio por el cual las ondas se propagan es útil para poder contrarrestar estos efectos. Las pérdidas más significativas se describen a continuación:

- Pérdidas por el espacio libre (Free Space Loss)

El canal es un medio con pérdidas, entonces la solución de la ecuación de onda da como resultado una disminución exponencial de la amplitud de la onda a través del espacio, además la potencia recibida está relacionada con el área de la antena receptora, como densidad de flujo de potencia, watts por unidad de área. Se define como pérdidas por espacio libre:

$$l_{FSL} = \left(\frac{4\pi R_s}{\lambda} \right)^2$$

$$l_{FSL} = 20 \log \left(\frac{4\pi R_s}{\lambda} \right) [dB]$$

Donde:

R_s = Rango espacial, longitud entre la estación terrena y el satélite.

λ = Longitud de onda.

Esta ecuación quiere decir que en un enlace mientras sea más largo o distante, habrá más pérdidas, como también al usar frecuencias muy grandes. El rango espacial, R_s , varía de acuerdo a la latitud de la estación terrena y se relaciona con los ángulos de apuntamiento de la antena terrestre.

- Atenuación por lluvia

El fenómeno meteorológico más significativo en las pérdidas es la lluvia, para banda Ka puede haber pérdidas de hasta 20 [dB]. Se calcula con el producto de atenuación específica y la longitud que abarca la lluvia.

$$\gamma_R = kR^\alpha \text{ [dB/km]}$$

Donde:

k y α : constantes que dependen de la frecuencia y polarización.

R: intensidad de la lluvia en mm/h.

$$L_r = \gamma_R L \text{ [dB]}$$

- Absorción Atmosférica

La absorción es la atenuación debido a la irreversible conversión de energía radioeléctrica a calor.

Las frecuencias utilizadas pueden coincidir con frecuencias de resonancia de algunos gases atmosféricos, la del vapor de agua 22.2 GHz, y del oxígeno (aire seco) 60 [GHz], esto trae como consecuencia que la energía se convierta en calor, es decir, que sea absorbida, reduciendo la potencia de la onda radioeléctrica. Véase figura 4.5.2.

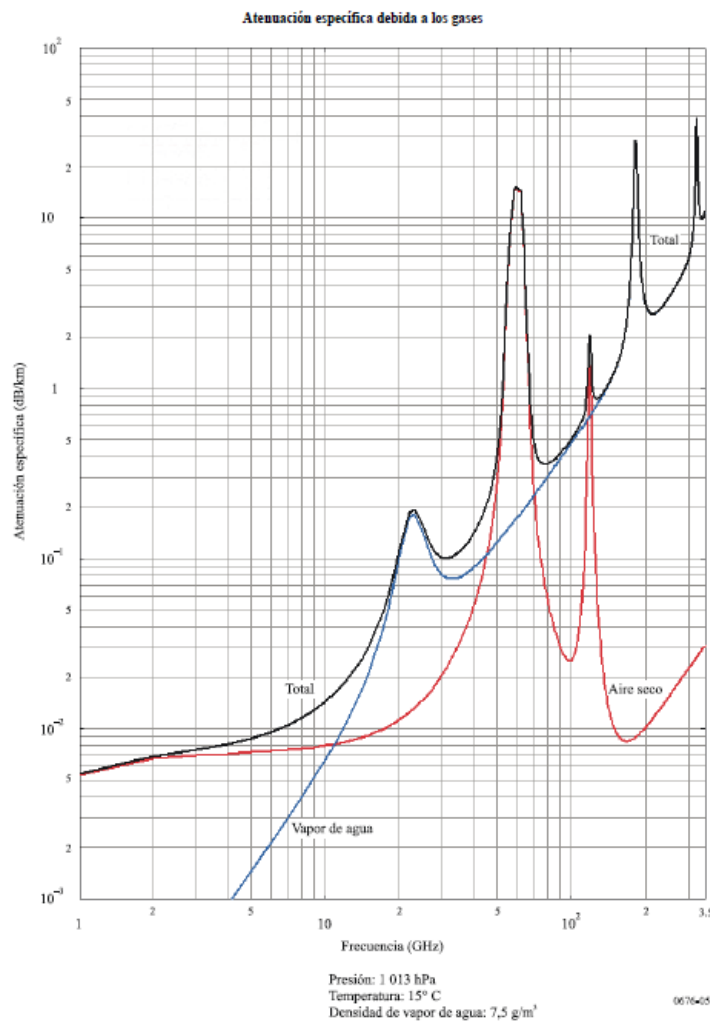


Figura 4.5.2 Atenuacion especifica UIT

- Despolarización

El cambio de polarización provoca pérdidas, introducción de interferencia, polarización cruzada, debido al efecto de radiación solar en las capas atmosféricas, la lluvia, hielo o por múltiples trayectorias. Para sistemas que reutilizan frecuencias, es un efecto muy importante ya que depende de polarizaciones ortogonales que no se interfieren mutuamente.

Los parámetros aislamiento y discriminación por polarización, APX y DPX respectivamente, indican qué tan grande es la señal comparada con la que se considera ruido. El aislamiento es la comparación de dos señales distintas y la discriminación es la comparación de componentes de campo de la misma señal.

$$APX = 20 \log \frac{E_{11}}{E_{21}}$$

E_1 , E_2 : son señales que se transmiten en polarizaciones ortogonales y al girar por lo tanto se tendrán E_{11} , E_{21} en la misma dirección produciendo interferencia.

$$DPX = 20 \log \frac{E_{cop}}{E_{pol X}}$$

E_{cop} y $E_{pol X}$ son componentes, copolarizada y polarizada cruzada respectivamente, de la misma señal después de que ha girado.

No hay que olvidarse de la lluvia que también causa despolarización como ya se mencionó. Las señales con polarización lineal son las que menos son afectadas por este fenómeno.

- Retardo y latencia

Para el viaje redondo se denomina latencia, es decir transmisión y recepción. El retardo es una desventaja para la órbita geoestacionaria, ya que es considerable, el tiempo de subida y bajada promedio es de 0.125 [s] ya que depende de las latitudes

de las estaciones. Además existen enlaces con doble salto, lo cual incrementa el retardo, el retardo se calcula con la expresión:

$$t = \frac{R_s}{C}$$

- Relación $\frac{C}{N_0}$

Para el diseño de enlaces satelitales el parámetro principal requerido para obtener los valores de potencia requerida y los tamaños de las antenas es la relación portadora a densidad de ruido ($\frac{C}{N_0}$), además al conocer estos valores podemos darnos una idea del costo en las estaciones terrenas. La ecuación básica de un enlace de sistemas de comunicaciones digitales es:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P G_t G_r}{L_l L_{FSL} L_a k T_s R}$$

Esta ecuación toma en cuenta diversos parámetros, tales como el límite de Shannon para las tasas de velocidades, el ruido del sistema, pérdidas, potencias y tamaños de las antenas del sistema. Donde:

$\frac{E_b}{N_0}$: relación de energía recibida por bit a densidad de ruido.

P : potencia de transmisión [W].

L_t : pérdidas en la línea de transmisión del transmisor.

G_t : ganancia de la antena transmisora.

L_{FSL} : Pérdidas en el espacio libre.

L_a : Pérdidas del trayecto.

G_r : Ganancia de la antena receptora.

k = constante de Boltzmann: $1.380\ 6488(13) \times 10^{-23}$ [J/K].

T_s : Temperatura de ruido del sistema [K].

R : tasa de datos [bps].

La ecuación expresada en [dB] es:

$$\frac{E_b}{N_0} = P + G_t + G_r - L_l - L_{FSL} - 228.6 - 10 \log T_s - 10 \log R$$

Tenemos que la relación portadora a densidad de ruido expresada en [dBHz] es:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log R$$

Y en [dB]:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log R - 10 \log W \quad [dB]$$

Donde:

W : ancho de banda de ruido en el receptor [Hz].

- PIRE

Como ya se mencionó en el capítulo anterior uno de los parámetros para el cálculo de enlace satelital es la potencia radiada isotrópica radiada efectiva mejor conocida como PIRE. Ésta se expresa por:

$$PIRE = P_t * G_A \quad [W]$$

También el PIRE se expresa en términos logarítmicos expresado en dB de la siguiente manera:

$$PIRE (dBW) = P_t (dBW) + G_A (dB)$$

Donde:

P_t = Potencia entregada a la antena [W].

G_A = Ganancia lineal de la antena.

- Figura de mérito $\frac{G_r}{T_s}$

Se define como la sensibilidad de la estación receptora, donde ambas variables están calculadas en un mismo punto y en [dB/K], y la expresión está dada por:

$$\frac{G_r}{T_s} = G_r + 10 \log T_s$$

Este parámetro es debido al patrón de radiación y ganancia de la antena.

Entonces la ecuación de la relación de portadora a densidad de ruido para un canal de comunicaciones, tomando en cuenta los parámetros anteriormente mencionados, es:

$$\frac{C}{N_0} = PIRE_t \cdot \left(\frac{1}{L_{FSL} L_a} \right) \cdot \frac{G_r}{T_s} \cdot k$$

Y en [dBHz]:

$$\frac{C}{N_0} = PIRE - L_{FSL} - \frac{G_r}{T_s} + 228.6$$

Esta última ecuación toma en cuenta los parámetros en la transmisión y recepción. Se debe hacer un análisis del parámetro de interferencias en el sistema completo.

Enlace ascendente

La señal de información debe pasar por los procesos de digitalización, codificación (compresión y cifrado), modulación (FSK, PSK o QAM) y amplificación mediante TWT, Klystron y SSPA. Cuando dicha señal es emitida por el medio se generan pérdidas en la amplitud y se añade ruido, por lo que el satélite debe ser capaz de recibir la señal.

Existen parámetros que intervienen en el enlace ascendente, como son el PIRE de la estación transmisora, las pérdidas de propagación, y la figura de mérito del satélite.

Se describe el proceso del enlace ascendente como:

- Se genera una señal de alta potencia y se radia hacia el satélite.
- La señal es atenuada durante el trayecto y se introduce ruido de distintas fuentes.
- El receptor tiene una sensibilidad para recibir señales pequeñas, sin embargo el nivel de la señal contiene ruido agregado, contrarrestando la calidad de la señal.

Como resultado se tiene en el enlace de subida:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_a = p_t G_{at} \frac{1}{L_{propagación}} \left(\frac{1}{K}\right)_{sat} \frac{1}{k}$$

Donde:

G_{at} : ganancia de antena transmisora.

En decibeles:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_a = PIRE_a - L_{propagación} + \left(\frac{G}{T}\right)_{sat} - 10 \log k$$

Donde:

$\left(\frac{C}{N_0}\right)_a$: relación $\frac{C}{N_0}$ ascendente de la estación transmisora en [dBW]

$L_{propagación}$: pérdidas en [dB]

$\left(\frac{G}{T}\right)_{sat}$: figura de mérito del satélite en [dB]

G : ganancia de la antena receptora del satélite y T es la temperatura del ruido introducido.

k : constante de boltzmann

$$L_{propagación} = L_{espacio libre} + L_{absorción} + L_{polarización} + L_{desapuntamiento} \dots$$

Al hablar de pérdidas por propagación es posible incluir diferentes tipos, sin embargo, las más significativas son por espacio libre, lluvia y absorción.

Los fenómenos meteorológicos, como la lluvia, son eventos esporádicos y temporales, por lo que es posible utilizar un margen de ocurrencia y de esta manera no afecte de manera importante el enlace. Por esta razón se añade un parámetro m_a que es el margen para el enlace ascendente.

Densidad de flujo de saturación del satélite.

$$F_s = \frac{PIRE_a}{4\pi R_s} \left[\frac{dBW}{m^2} \right]$$

De manera logarítmica:

$$F_s = PIRE_a - 10 \log(4\pi R_s) \left[\frac{dBW}{m^2} \right]$$

El valor de F_s indica con qué valor de PIRE, las estaciones terrenas deben transmitir para saturar al transpondedor.

Después de realizar algebra como despejes, sustituciones, reducciones y considerando cielo despejado, sin tomar en cuenta las pérdidas por absorción atmosférica, apuntamiento, despolarización, se obtiene:

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_a = F_s - 20 \log f + \left(\frac{G}{T} \right)_{sat} - 207.15 - m_a [dBHz]$$

F: frecuencia en [GHz]

Esta expresión implica sólo introducir la frecuencia del enlace de subida y el dato de densidad de flujo de saturación, la figura de mérito es brindado por el fabricante del satélite y estiman un margen aceptable.

Intermodulación

Una vez que la señal es recibida en el satélite, esta debe ser amplificada. En esta etapa se introduce ruido térmico y ruidos de los dispositivos no lineales del satélite. El ruido de intermodulación es producido por el uso de múltiples portadoras moduladas, f_1 y f_2 , y sus respectivas componentes armónicas en la frecuencia o términos de alto grado, que se encuentran alrededor de la portadora. Véase figura 4.5.3.

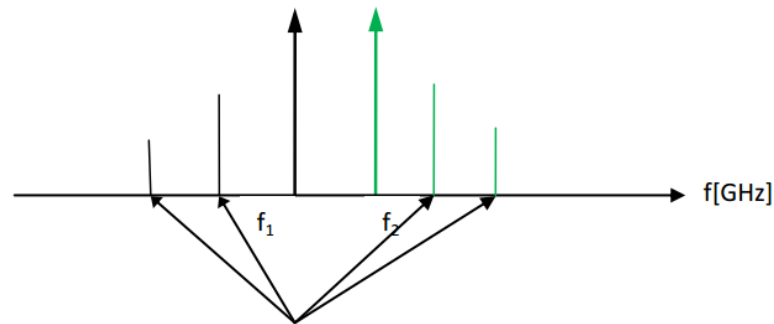


Figura 4.5.3 Intermodulación

Las componentes armónicas de la portadora f_2 generan ruido para la portadora en f_1 y viceversa. Con más portadoras en el transpondedor existirá mayor ruido de intermodulación.

El valor de relación portadora a ruido (C/N) en la etapa del satélite es definido como:

$$\left(\frac{C}{N}\right) = p_s/n_i$$

Donde:

p_s : Potencia del transmisor del satélite

n_i : Ruido de intermodulación generado por el transpondedor

En la expresión anterior, la potencia del ruido es referida en Watts; su cálculo es complicado pero es realizado por los fabricantes y proporcionado como dato. Sin embargo, existen curvas para poder estimar dicho valor de acuerdo al número de portadoras y del back-off de entrada. Véase figura 4.5.4.

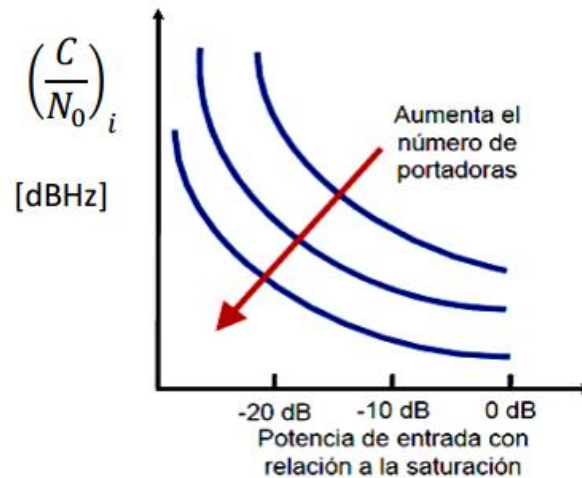


Figura 4.5.4 Variación de (C/N_0)

El uso de anchos de banda estrechos ayuda a evitar problemas de intermodulación. Es común introducir un parámetro denominado back-off (BO) el cual, a la entrada de un sistema significa una atenuación de la señal al nivel de punto de operación del amplificador; a la salida de un sistema significa disminuir la señal de salida. Incluir el BO en los cálculos disminuye el efecto del ruido de intermodulación en el enlace.

Enlace descendente

La señal después de ser convertida a una portadora con frecuencia menor que la portadora de subida, es transmitida a una estación terrena, la cual puede variar en dimensiones con respecto a la transmisora, además, las condiciones del clima y geográficas serán distintas. La figura 4.5.5 representa un modelo representativo del enlace.

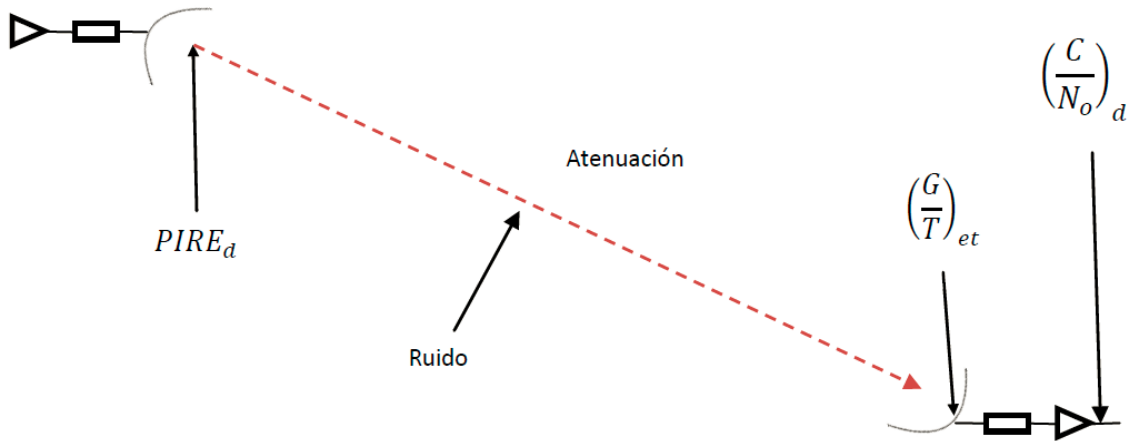


Figura 4.5.5 Modelo general de un enlace de bajada.

La ecuación general para el enlace descendiente, de manera homóloga a la del ascendente en [dBHz]:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_d = PIRE_d - L_{propagacion} + \left(\frac{G}{T}\right)_{et} - 10 \log k$$

Donde:

$\left(\frac{C}{N_0}\right)_d$: *relacion portadora a densidad de ruido descendente.*

$PIRE_d$: *PIRE del satelite.*

$L_{propagacion}$: *perdidas de espacio libre, lluvia, etc. en la estacion receptora.*

$\left(\frac{G}{T}\right)_{et}$: *figura de merito de la estacion terrena receptora.*

k : *constante de Boltzman.*

El valor del $PIRE_d$ descendente es proporcionado por los fabricantes del satélite y define las zonas de cobertura, que como en el caso del enlace ascendente, los contornos $PIRE_d$ o huella del satélite resumen información de la antena transmisora del satélite, patrón de radiación, ganancia y ancho de haz.

Para que un sistema se encuentre lo suficiente sobrado para funcionar en las peores condiciones climatológicas, por ejemplo, se debe añadir un margen a los cálculos m_d . Además, tomando en cuenta el back-off de salida BO_s , del transpondedor se tiene:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_d = PIRE_d - L_{propagacion} + \left(\frac{G}{T}\right)_{et} - 10 \log k - BO_s - m_d$$

Presupuesto de enlace total

La relación portadora a densidad de ruido total es el parámetro que representa que tan grande es la potencia de la señal de información con respecto a la densidad de ruido.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_t = 10 \log \left[\frac{1}{alog \left(\frac{C}{N_0}\right)_{ascend}} + \frac{1}{alog \left(\frac{C}{N_0}\right)_{intermod}} + \frac{1}{alog \left(\frac{C}{N_0}\right)_{descend}} \right]^{-1} [dBHz]$$

Introduciendo en la ecuación anterior las interferencias de diferente índole, se tiene:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_t = 10 \log \left[\frac{1}{alog \left(\frac{C}{N_0}\right)_{ascend}} + \frac{1}{alog \left(\frac{C}{N_0}\right)_{intermod}} + \frac{1}{alog \left(\frac{C}{N_0}\right)_{descend}} + \frac{1}{alog \left(\frac{C}{X}\right)_{interferencias}} \right]^{-1} [dBHz]$$

Con esta ecuación de la relación total portadora a densidad de ruido se obtienen las demás relaciones y los parámetros de cada una.

El valor requerido se obtiene de la tasa de datos deseada, R, la energía por bit (relacionada con el valor de VER (Bit Error Rate) y un margen de implementación, MI:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{requerido} = \frac{E_b}{N_0} + 10\log R + MI \text{ [dBHz]}$$

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES.

Una plataforma de comunicaciones está compuesta de una serie de elementos interconectados que interactúan entre sí para lograr establecer servicios de conectividad entre un transmisor y un receptor.

México cuenta con posiciones satelitales asignadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones que se encarga de regular y coordinar las posiciones satelitales de cada país.

Según la UIT en su recomendación R12-ITURKA.BAND-C-0020 para satélites geoestacionarios en banda Ka, son 0.12 grados de separación y distancia máxima de 1 grado.

Cada país tiene derecho a cierto número de posiciones satelitales. Sin embargo, una vez asignada, se tiene un periodo de siete años para ocuparla; si no lo hace, esa posición se le otorga al siguiente país en la lista de espera.

Cuando se desocupa una posición asignada, porque la vida útil de un satélite se acaba, o por otras razones, el país con esa posición tiene un plazo de dos años para reemplazarlo. De esa manera no pierde su posición. Como se podrá entender, estas reglas exigen de los países mucha planeación a largo plazo.

Por este motivo en el 2012 el asesor de la Subsecretaria de Comunicaciones de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes Juan Carlos Leal indicó que México perdió la posición de 89° para satélites en banda Ka debido a que no fue posible lanzar un satélite que brindara servicios. Por consecuencia esta posición ahora la ocupan los canadienses.

Mientras que para la posición 109.2° se llegó a un acuerdo con la administración de Canadá para cambiarla por la posición 114.9°

Las posiciones satelitales con las que cuenta México actualmente son:

CAPITULO 5 PROPOSTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

No.	Concesionario	Numero de satélites	posición
1	Eutelsat Americas	EUTELSAT 115 West A (antes Satmex 5)	114.9° W
2	Eutelsat Americas	EUTELSAT 113 West A (antes Satmex 6)	113.0° W
3	Eutelsat Americas	EUTELSAT 117 West A (antes Satmex 8)	116.8° W
4	QuetzSat	QuetzSat 1	77° W
5	Mexsat	Mexsat 2 (Morelos 3)	113.5° W
6	Mexsat	Mexsat 3 (Bicentenario)	114.9° W

Una plataforma de comunicaciones está compuesta de una serie de elementos interconectados que interactúan entre sí para lograr establecer servicios de conectividad entre un transmisor y un receptor.

La plataforma propuesta para este proyecto se puede dividir en tres partes, la primera es la estación terrena Hub, la segunda es el subsistema de comunicaciones del satélite y por último la estación terrena VSAT. A continuación se describen los elementos y técnicas que interactúan en cada una de estas partes.

Estación terrena Hub:

Debido a que cada HUB va a operar en un gran ancho de banda, se decidió que la etapa de amplificación de potencia estará compuesta por un TWT y no amplificadores tipo Klystron, debido a que los amplificadores TWT tienen la capacidad de abarcar un gran rango de frecuencias, por lo que puede amplificar simultáneamente varias portadoras dirigidas a diferentes transpondedores. Para la banda de frecuencias Ka, un TWT provee una potencia de salida en el rango de los 20 a 100 Watts, es por eso que se consideraron los siguientes elementos:

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

- Antena de reflector parabólico de 9 metros de diámetro con una potencia de transmisión de 80 [W]. Se decidió utilizar esta potencia para evitar saturar los transpondedores para que no operen en su región no lineal.
- Equipo de acceso óptico para conectar el tráfico de la estación terrena a los anillos ópticos de transporte de los operadores que proveen voz, datos y video.
- Tecnología DBV-S2/ACM que permite el ajuste de modulación y FEC en función de las condiciones atmosféricas de cada sitio receptor.
- Montajes de acimut y elevación que soporten tracking.
- Modulación QPSK y 8PSK para condiciones de cielo despejado. El utilizar modulación 8PSK permite tener mejor tasa de bits en el mismo ancho de banda. Véase Figura 5.1

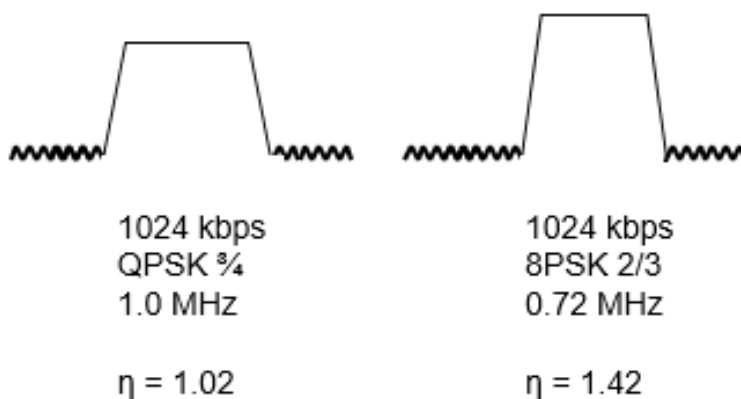


Figura 5.1 Diferencia entre modulación QPSK y 8PSK.

- El Hub recibirá y demodulará las señales provenientes del satélite por slot de frecuencia.

Subsistema de comunicaciones del satélite:

- 5 antenas de reflector de 2 metros de diámetro cada una.
- Una antena omnidireccional para telemetría.
- 56 alimentadores tipo corneta.
- 72 Transpondedores, 56 para el tráfico de ida y 16 para el tráfico de vuelta.
- 80 TWTs.

CAPITULO 5 PROPOSTA DE LA PRATAFORMA DE COMUNICACIONES

- Polarización Circular Derecha y Polarización Circular Izquierda.
- Portadora única de acceso broadcast.
- Interconexión entre los alimentadores, amplificadores, osciladores y filtros como se muestran en las figuras 5.2 y 5.3.

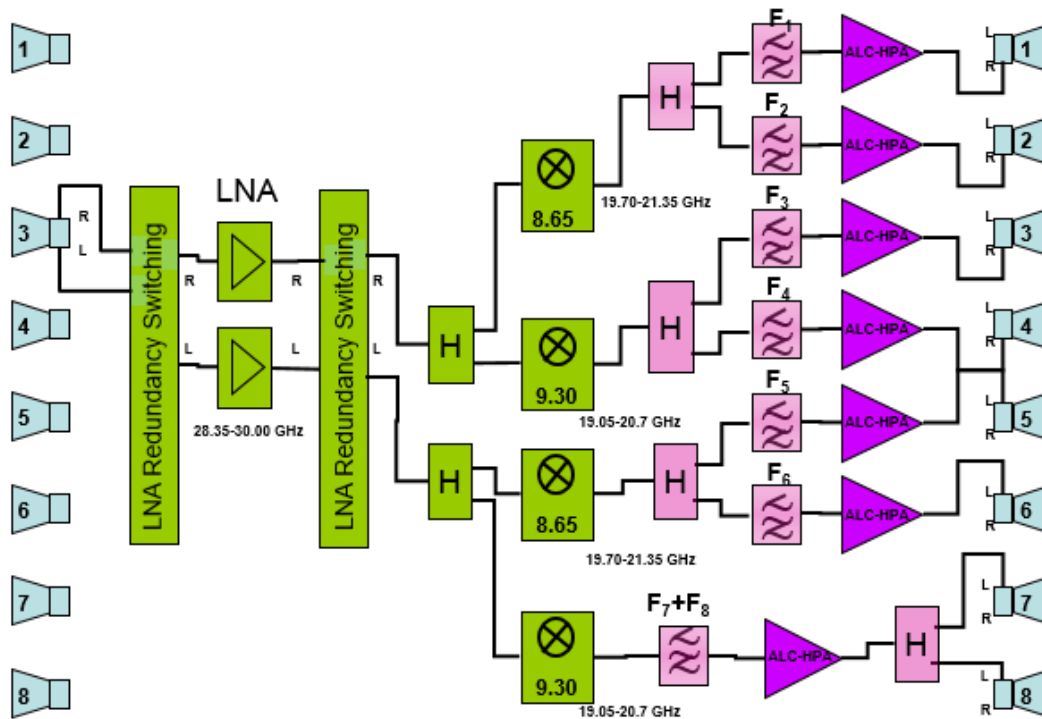


Figura 5.2 Interconexión de los elementos del satélite para el enlace de ida.

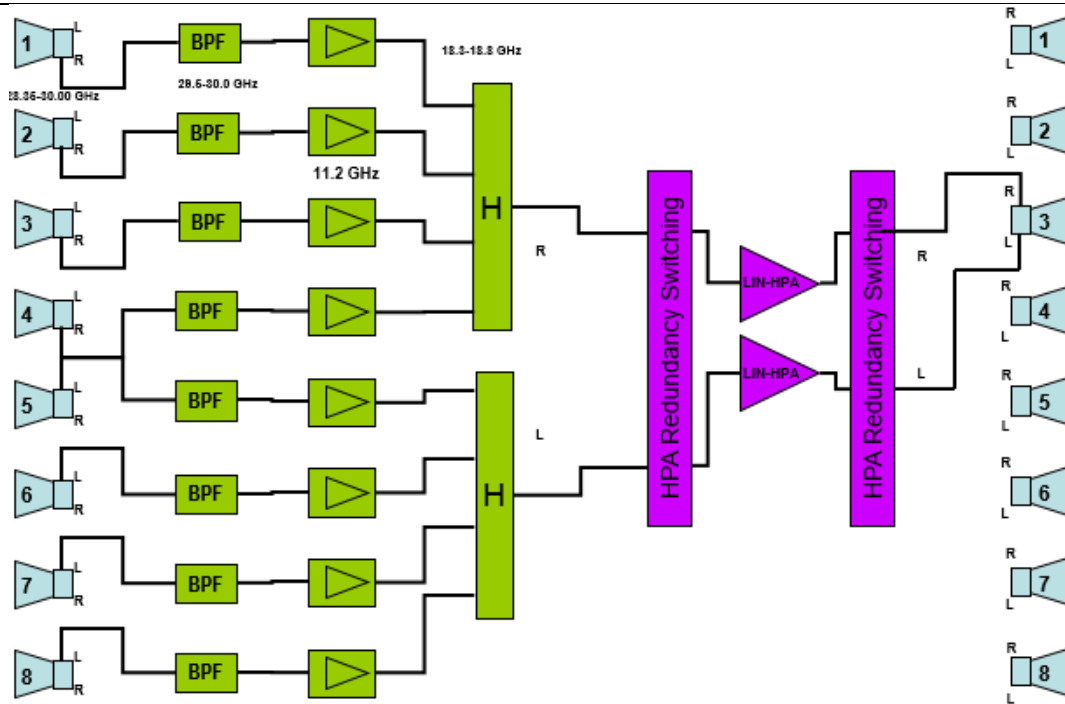


Figura 5.3 Interconexión de los elementos del satélite para el enlace de vuelta.

Estación terrena VSAT

Gracias a que las antenas parabólicas con alimentadores tipo corneta proveen gran directividad y mayor ganancia en comparación de las antenas Cassegrain y de plato de rocío; se optó por utilizar este tipo de antenas para instalarse en las residencias de los usuarios finales.

Los amplificadores de estado sólido son los más económicos y convenientes para ser utilizados en estaciones terrenas que operan con portadoras que ocupan poco ancho de banda; por esta razón este tipo de amplificadores son los más utilizados en la estaciones VSAT. Proveen un rango de potencia de salida hasta los 20 watts, mejor linealidad y menor factor de ruido.

CAPITULO 5 ROPUESTA DE LA PRATAFORMA DE COMUNICACIONES

- Antena de reflector de 0.9 metros de diámetro con una potencia de transmisión de 8 [W]. El diámetro de esta antena es muy popular, comercialmente hablando, lo que la hace más económica.
- Un alimentador tipo corneta.
- Portadora de múltiple acceso FDMA-TDMA.
- Unidad Cable Modem con interfaz simple. Véase Figura 5.4.

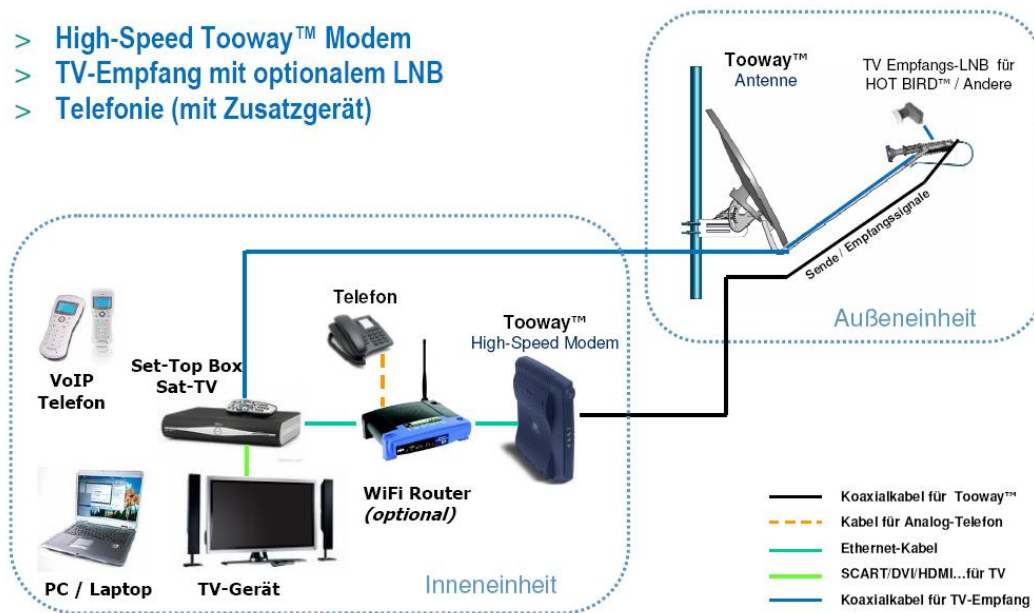


Figura 5.4 Subsistema de VSAT para ofrecer servicios de triple play.

La interacción de todos los elementos y técnicas descritas anteriormente permiten que una plataforma de comunicaciones pueda funcionar para ofrecer servicios a la población.

5.1 Cobertura del satélite.

El propósito de una plataforma de comunicaciones satelital es ofrecer servicios de telefonía, datos y video a usuarios que se encuentran en zonas que son difíciles de alcanzar por medios fijos, como el cobre o la fibra óptica. Un satélite tiene la ventaja

CAPITULO 5 PROYECTO DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

de cubrir grandes zonas terrestres, lo que implica que es factible que las señales de comunicaciones lleguen a lugares remotos como islas, montañas, costas, selvas, etc.

La plataforma que se está diseñando en este trabajo está pensada para cubrir las zonas que comprenden la región de México, Centroamérica y de ser posible, ampliar la cobertura a las islas que se encuentran en el Caribe.

Una de las ventajas de trabajar en la banda Ka es que se puede utilizar la técnica de radiación por medio de haces puntuales, estos haces puntuales son pequeñas zonas de cobertura que normalmente son de 300 a 400 Km de diámetro sobre la superficie terrestre. Es factible utilizar esta técnica con el fin de que la PIRE radiada se concentre en puntos específicos, de esta manera se evita pérdida de energía radiada y se contribuye a disminuir las pérdidas causadas por la atenuación por lluvia.

El satélite cuenta con reflectores con forma de paraboloides los cuales generan haces circulares o elípticos. Cada reflector genera tantas coberturas como haces puntuales tenga, esto significa que cada haz se logra con una corneta y es posible generar en un mismo reflector hasta 18 haces. Véase Figura 5.1.1

En un satélite estándar el máximo número de reflectores es de 5, tomando en cuenta este dato y el máximo número de haces que se pueden generar en un solo reflector, se tiene que en un satélite estándar se pueden generar un total de 90 haces puntuales.

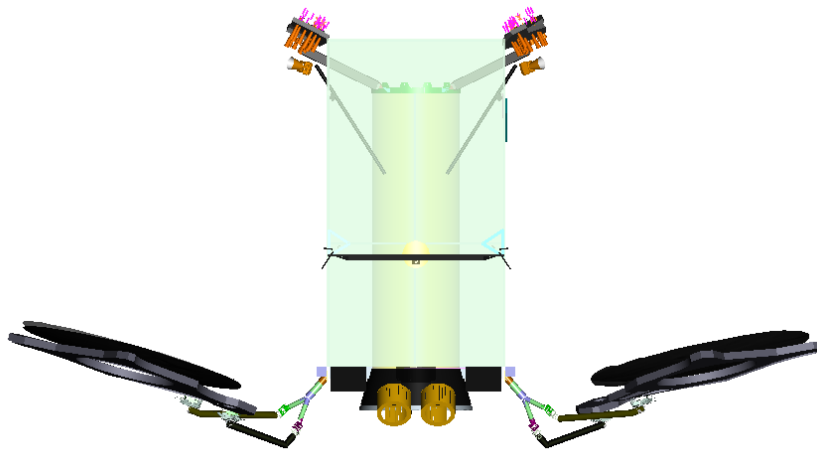


Figura 5.1.1 Reflectores con forma de paraboloides alimentado por varias cornetas

El aislamiento entre haces con reuso de frecuencia se logra con haces separados geográficamente aunque estos se generen en el mismo reflector.

El método que se seguirá para el diseño de nuestra plataforma, consiste en conocer el número de haces puntuales necesarios para lograr una cobertura nacional, centroamericana y del caribe. Se tomara como punto de partida el valor del diámetro de los haces puntuales, con este dato se procederá a acomodar los haces de tal forma que se cubran las regiones antes mencionadas; una vez posicionados los haces puntuales, se procederá a enumerarlos para conocer el total de haces que se van a necesitar. A partir del número total de haces que se necesitan, se decidirá la forma más conveniente para el diseño.

Para el análisis para el diámetro de los haces puntuales se toma en cuenta el área a cubrir la cual se muestra en la figura 5.1.2 con un área de $5\,509\,283\text{ km}^2$ obtenidos con la herramienta Google Earth.

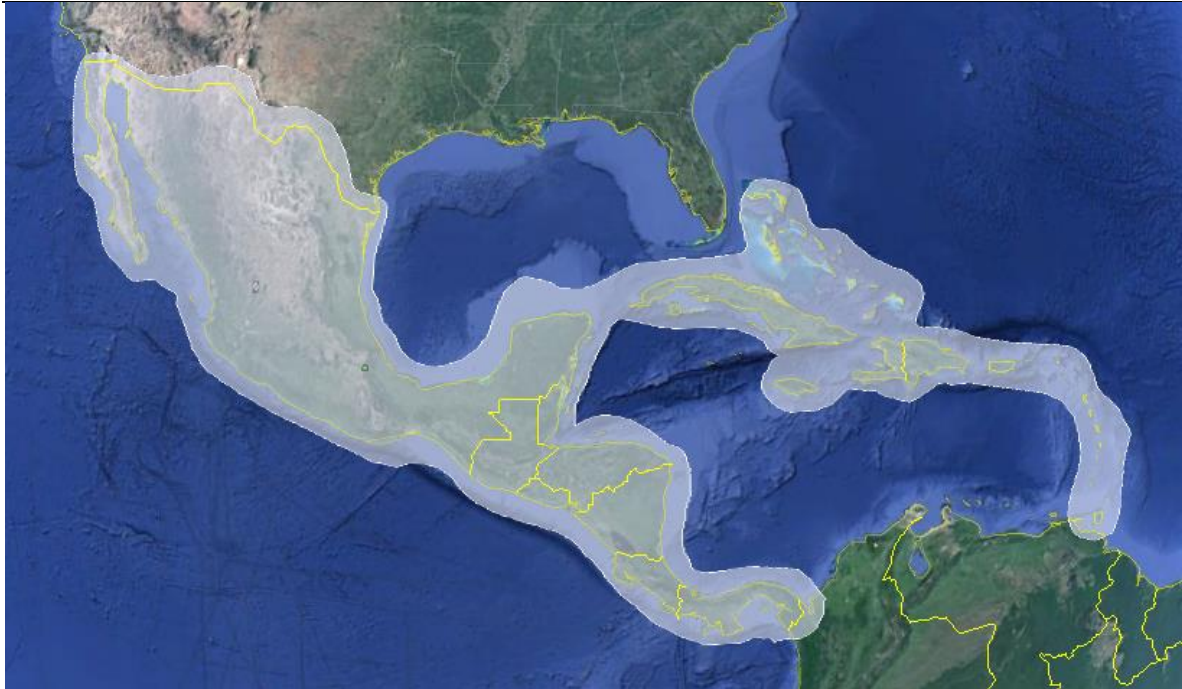


Figura 5.1.2 Cobertura propuesta para los haces puntuales.

Los haces puntuales al momento de estar agrupados tiene solapamiento por lo tanto utilizamos la fórmula para el cálculo de hexágonos de células como se muestra en la figura 51.3.

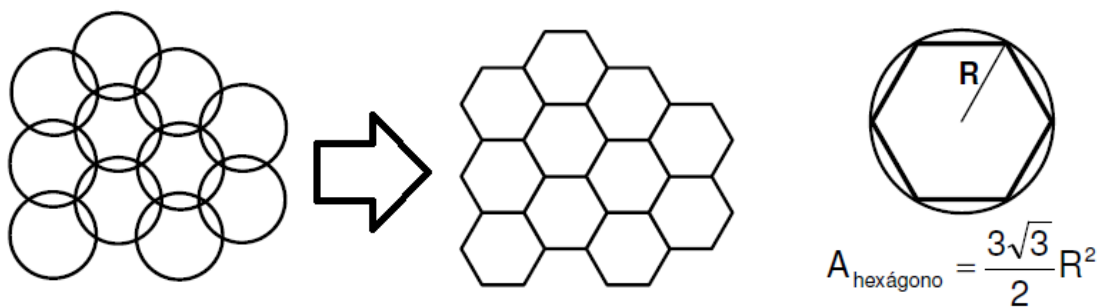


Figura 5.1.3 Representación de haces puntuales para cálculo de área a cubrir

Entonces, para calcular el área de un haz tenemos:

$$\frac{5\,509\,283 \text{ Km}^2}{56 \text{ haces}} = 98\,380 \text{ km}^2/\text{Haz}$$

De la ecuación del área de un hexágono:

Despejamos el radio R:

$$R = \sqrt{\frac{2\text{Area}}{3\sqrt{3}}} = \sqrt{\frac{2(98\,380)}{3\sqrt{3}}} = 194.593 \text{ Km}$$

El radio resultante se redondea a 195 km resultando un diámetro de 390 km. Con este diámetro el área de cada haz sería de:

$$\text{Área} = \frac{3\sqrt{3}}{2} R^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} 195^2 = 98\,791.84 \text{ km}^2$$

En conjunto tiene un área de:

$$(98\,791.84 \text{ Km}^2)(56 \text{ haces}) = 5\,532\,343.04 \text{ km}^2$$

Que cubre la zona requerida como se muestra en la figura 5.1.4

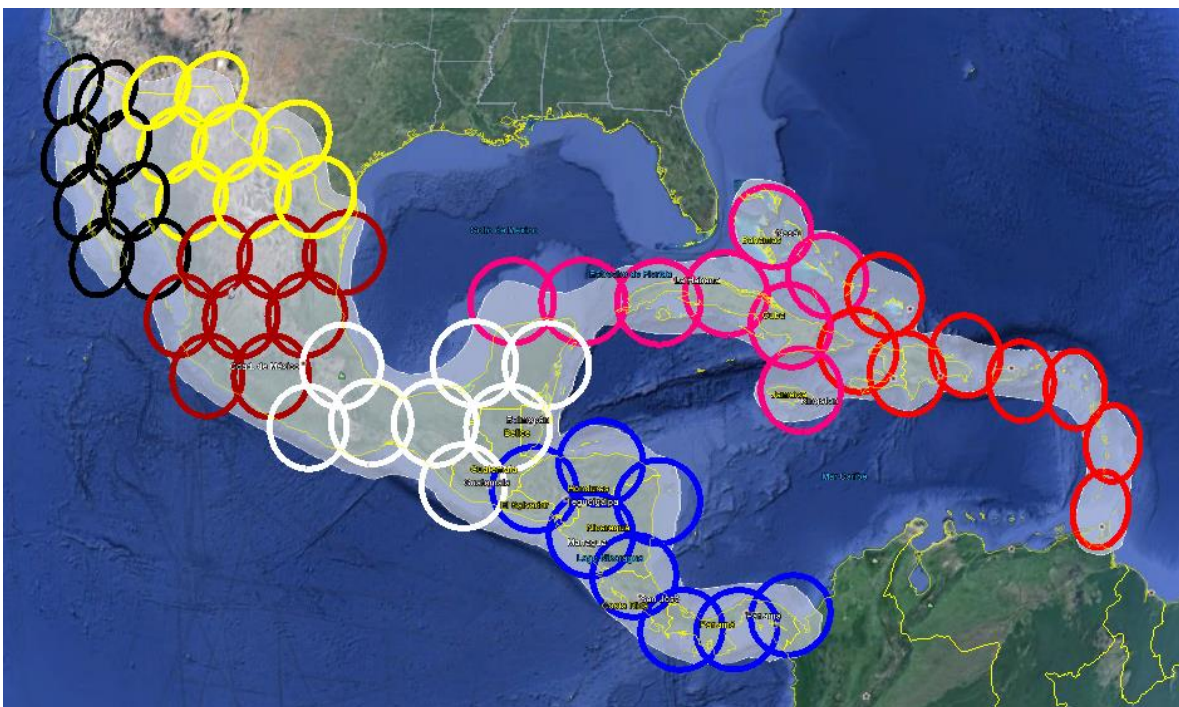


Figura 5.1.4 Cobertura requerida y cobertura de los haces puntuales.

- **Población**

La cobertura de nuestro satélite abarca un vasto territorio que comprende los siguientes países: México, Guatemala, Honduras, Belice, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Panamá, y Cuba y Jamaica en el Mar Caribe; brindando diversos servicios a la población que ahí radica como se muestra en la figura 5.1.5.

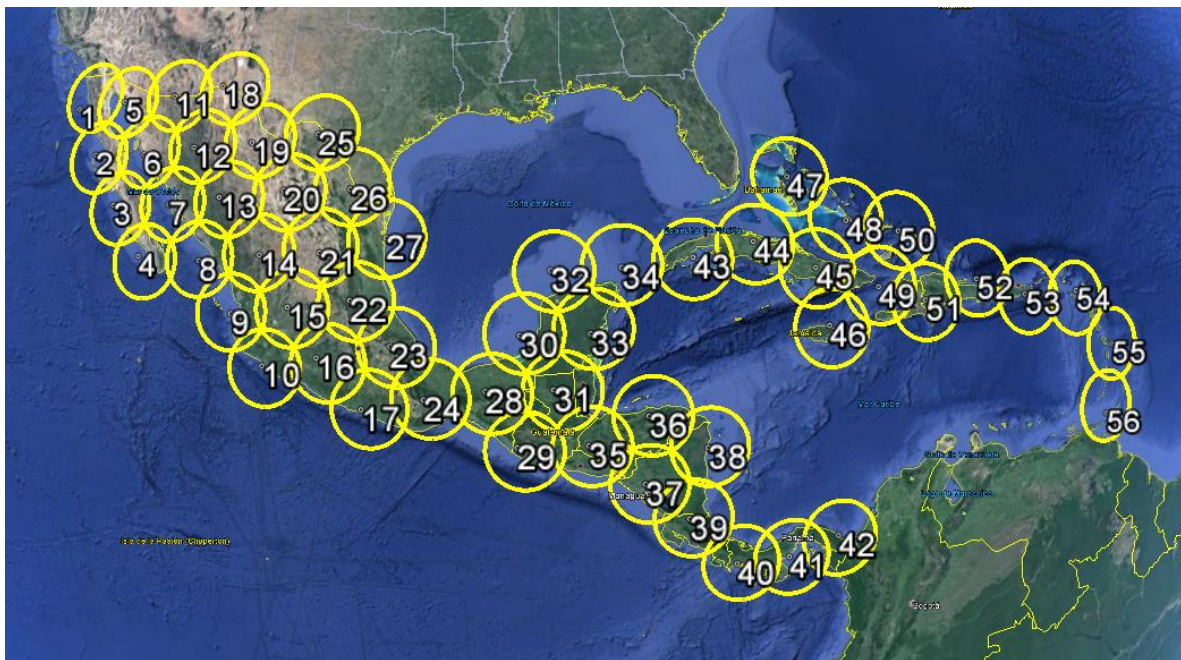


Figura 5.1.5 Cobertura lograda con 56 haces puntuales.

Es importante tomar en cuenta toda la población que se verá beneficiada con los servicios que brindará el satélite, la siguiente tabla muestra la población total (estimada) de cada uno de los países antes mencionados.

PAÍS	POBLACIÓN (habitantes)
México	112,336,538 (2010)
Guatemala	11,237,196 (2002)
Honduras	8,303,771 (2012)

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

Belice	356,600	(2010)
El Salvador	5,744,113	(2007)
Nicaragua	5,142,098	(2005)
Costa Rica	4,301,712	(2011)
Panamá	3,405,813	(2010)
Cuba	11,167,325	(2012)
Jamaica	2,717,991	(2013)
Haiti	9,996,731	(2014)
República Dominicana	9,445,281	(2010)
Puerto Rico	3,808,610	(2008)

Tabla 5.1.1 Número de habitantes en cada país.

NOTA: Todos los datos anteriores fueron tomados de los resultados de los censos de población elaborados por las Instituciones encargadas en cada país.

Para brindar un dato más exacto, existen proyecciones de crecimiento que las Instituciones de estadística de cada país se encargan de elaborar para años futuros, por lo que tomaremos éstas en cuenta para las estimaciones del año 2015.

País	Población Estimada 2015 (habitantes)	Haces que conforman la región
México	119,715,000	Del 1 al 35
Guatemala	15,859,714	30, 32 36
Honduras	8,260,749	36,37 y parte 38
Belice	339,758	32 y 34
El Salvador	6,383,752	36
Nicaragua	6,169,269	38, 39, 40
Costa Rica	4,937,755	40, 41
Panamá	3,926,027	41, 42, 43

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

Cuba	11,258,597	44, 45, 46 y 50
Jamaica	2,721,252	47
Haití	10,461,409	50, 52
República Dominicana	10,000,000	53 y 53
Puerto Rico	3,708,748	52, 53, 54

Tabla 5.1.2 Número estimado de habitantes en el año 2015.⁷

Se puede observar que tendremos aproximadamente 203, 742, 030 habitantes en México, Centroamérica y el Caribe que pueden acceder a los servicios que ofrecerá el satélite.

En las siguientes tablas se mostrará un aproximado de usuarios beneficiados, por cada spot marcado en el mapa de la figura 5.1.2.

Estado	Número de spots que abarca	Número aproximado de usuarios
Baja California	1, 2, 5, 6	3484150
Baja California Sur	3, 4	763929
Sonora	5, 6, 7, 11, 12	2932821
Sinaloa	7, 8, 13	2984571
Chihuahua	12, 13, 18, 19	3710129
Coahuila	20, 25	2960681
Nuevo Leon	21, 26	5085848
Tamaulipas	22, 27	3543366
Durango	13, 14, 20	1764726

⁷ Datos obtenidos de las Instituciones encargadas de censar la población de cada país: INEGI (México); INE (Guatemala); INE (Honduras); INE (Belice); DIGESTYC (El Salvador); INIDE (Nicaragua); INEC (Costa Rica); INEC (Panamá); ONE (Cuba); SIJ (Jamaica); ONE (República Dominicana); ONE (Haiti); Oficina del censo (Puerto Rico).

CAPITULO 5 PROUESTA DE LA PRATAFORMA DE COMUNICACIONES

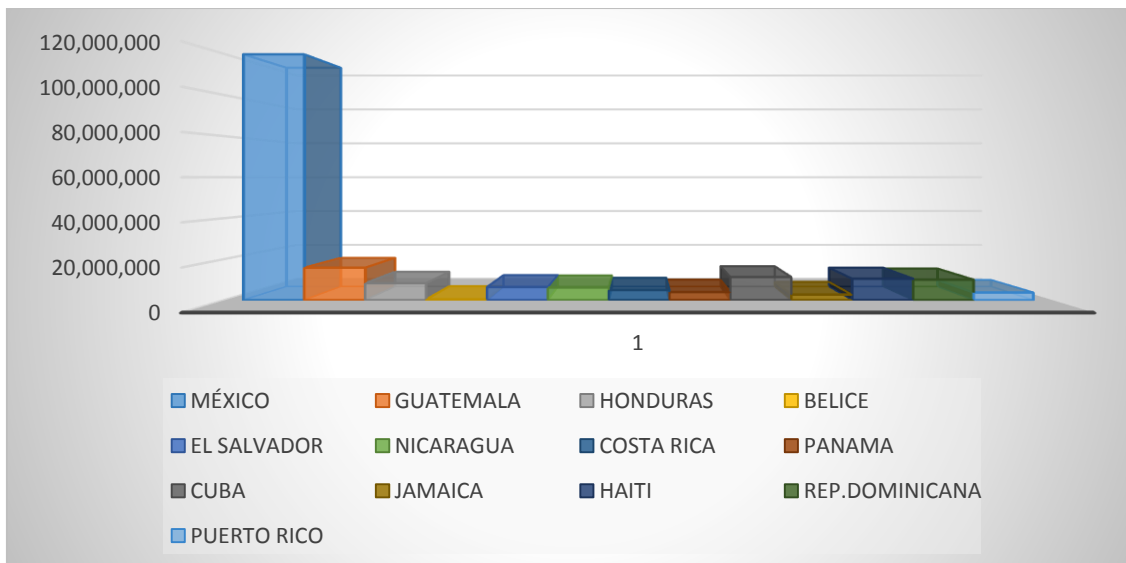
Zacatecas	14, 15, 21	1576068
San Luis Potosí	21, 22	2753478
Nayarit	9	1223797
Aguascalientes	15	1287660
Jalisco	9, 10, 15	7931267
Guanajuato	15, 22	5817614
Queretaro	22	2004472
Colima	10	723455
Michoacán	10, 15, 16	4596499
Estado de México	16, 22, 23	16870388
Distrito Federal	16	8854600
Hidalgo	22, 23	2878369
Puebla	17, 23	6193836
Tlaxcala	23	1278308
Veracruz	22, 23, 24, 28	8046828
Morelos	16, 23	1920350
Guerrero	16, 17	3568139
Oaxaca	17, 24	4012295
Tabasco	28	2383900
Chiapas	28, 29, 31	5252808
Campeche	30, 31, 33	907878
Yucatan	32, 33, 34	2118762
Quintana Roo	33, 34	1574824
Guatemala	29, 31 35	15859714
Honduras	35, 36	8260749
Belice	31	339758
El Salvador	35	6383752
Nicaragua	37, 38, 39	6169269
Costa Rica	39, 40	4937755
Panamá	40, 41, 42	3926027

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

Cuba	43, 44, 45 y 49	11258597
Jamaica	46	2721252
Haití	49, 51	10461409
República Dominicana	51, 52	10000000
Puerto Rico	52, 53	3708748

Tabla 5.1.3 Población beneficiada por estado de la república mexicana y por país de Centroamérica.

Como se puede observar en la tabla anterior, México es el país que contará con mayor cobertura, ya que el territorio es muy grande, a cada estado le corresponde uno, dos o más spots para cubrir todo un estado. Como resultado tenemos que un aproximado total de 205, 032, 846 habitantes en México y el caribe, y obviamente tal y como se muestra en la gráfica, México es el país con mayor cantidad de usuarios.



Gráfica 5.1.1 Comparación de habitantes en cada país contenido en el área de cobertura.

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

Es México en donde se puede presentar un alta demanda de servicios brindados por el satélite, ya que posee más habitantes, además de que éste país ocupa casi la totalidad de nuestra área de cobertura.

- **Atenuaciones y pérdidas en el área de cobertura.**

Ruido provocado en una antena receptora satelital

En lugares calurosos se debe considerar colocar la antena receptora elevada del suelo a una distancia significativa, manteniendo la vista directa con el satélite, esto debido al calor que irradia la superficie terrestre, ya que se introduce ruido al sistema atenuando parte de la información.

Las principales fuentes de ruido en una antena terrestre son las siguientes:

Fuente de ruido	Temperatura de ruido (K)
Ruido cósmico y galáctico	2.76 - 10
Atmosfera (troposfera)	10
Lluvia	30
Tierra	oct-50
Solar y lunar	Despreciable
Interferencia de enlaces terrestres	Variable

Tabla 5.1.4 Fuentes de ruido en una antena terrestre.

La temperatura de ruido depende de muchos factores y existen diversos métodos para calcularla. En realidad, la única forma de saber con exactitud la temperatura de ruido de una antena determinada es midiéndola, para diferentes ángulos de

elevación, y que muy probablemente el dato medido cambie un poco día a día, en especial si el ángulo de elevación es muy bajo.

El cálculo de la temperatura de ruido de una antena receptora en el enlace de subida, es decir de la antena de un satélite, es mucho más simple y directo que para un enlace de bajada. Las antenas de los satélites apuntan hacia la Tierra y su haz principal de radiación generalmente es menos ancho que el disco terrestre visto desde la órbita geostacionaria; por lo tanto, reciben toda la radiación térmica de la Tierra y entonces su temperatura equivalente de ruido es muy próxima a los 290 K. Esta temperatura no es precisamente igual para todos los satélites, porque depende de la frecuencia y del tipo de masa hacia donde la antena está orientada; por ejemplo, los continentes radian más ruido que los océanos. Sin embargo, a menos que se tengan fuentes de datos más precisas, basta con suponer $T_A = 290$ K para todos los casos.

Factores de ajuste debido a la ubicación geográfica.

El diagrama de radiación de las antenas de los satélites tiene un haz de borde definido, al cual se refiere los valores de PIRE, G/T y la densidad de flujo de potencia. En el análisis del enlace se pueden aplicar factores de ajuste para tener en cuenta la ubicación de una estación terrena dentro del haz del satélite. Dichos factores conocidos como factores Beta (β) – o corrección del ángulo de mira o ventaja del diagrama de radiación- se aplican a todos los haces del satélite

El factor β se define como la diferencia entre la ganancia en el borde del haz del satélite y la ganancia en dirección de una estación terrena. Para cada estación terrena se deben tener en cuenta tanto los factores β del enlace ascendente (β_u) como los del enlace descendente (β_d), porque la cobertura del enlace ascendente difiere de la del descendente incluso para una misma estación (y aun para el mismo haz).

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

Estos factores pueden calcularse a partir de la cobertura de los haces del satélite, donde las líneas o contornos de la proyección representan incrementos de un dB desde el borde del haz.

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 mostro 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, Allnut, Haidaral). Actualmente, y desde 1999, la recomendación UIT-R 618-10 (aprobada en 2009) ya toma en cuenta las consideraciones del modelo DAH. 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.

Atenuaciones por lluvia.

Se llevarán a cabo los cálculos de atenuación por lluvia utilizando el modelo CCIR. Es necesario que para este tipo de cálculo se considere las especificaciones técnicas del satélite como son: nombre, posición, orbita, bandas de operación y otros detalles.

Las estaciones terrenas de enlace de subida y de enlace de bajada deben de ser consideradas en cuanto a las distintas localidades de la República Mexicana como latitud, longitud, altura sobre el nivel del mar y banda de operación.

El modelo de la atenuación por lluvia se basa en un modelo estadístico, donde la tasa de lluvia se mide en milímetros por hora. Generalmente la probabilidad de lluvia se representa como p y la tasa de lluvia como R_p , esta probabilidad se midió como cantidad de tiempo de lluvia en un tiempo determinado, generalmente anual.

Entonces tenemos la atenuación específica.

$$\alpha = aR_p^b \frac{dB}{Km}$$

Donde a y b dependen de la frecuencia y la polarización.

$$a = \begin{cases} 4.21 * 10^{-5} f^{2.42}, & f \leq 54.09 \text{ GHz} \\ 4.09 * 10^{-2} f^{0.699} & 54 < f \leq 54.09 \text{ GHz} \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} 1.41 f^{-0.0779}, & f \leq 25 \text{ GHz} \\ 4.09 f^{-0.272} & 25 < f \leq 164 \text{ GHz} \end{cases}$$

Apartado de estos rangos de frecuencia, los coeficientes son iguales a cero. Si los coeficientes son lineales polarizados horizontalmente o verticalmente, los coeficientes para la polarización circular deben ser calculados como:

$$a_c = 0.5(a_h + a_v)$$

$$a_c = \frac{a_h b_h + a_v b_v}{2a_c}$$

Dónde:

$$R_p : \text{tasa de lluvia en } \frac{mm}{hr}, \text{ particular para cada país.}$$

L_R : es la longitud geométrica de la lluvia expresada en Km

La longitud geométrica se puede calcular como:

$$L_R = \frac{L_o}{1 + \frac{L_o(r_r - 6.2)}{2636}}$$

CAPITULO 5 ROPUESTA DE LA PRATAFORMA DE COMUNICACIONES

Donde la inclinación de la longitud de la trayectoria es L_0 :

$$L_0 = \frac{H_0 - H_g}{\sin \theta}$$

θ : es el ángulo de elevación de la estación terrena.

H_g : es la altitud de la estación terrena en Km

H_0 : es la altura de lluvia en Km.

l : es la altitud de la estación terrena de modo que $H_0 = \begin{cases} 4.8, & l < 30^\circ \\ 7.8 - 0.1 * l, & l \geq 30^\circ \end{cases}$

Frecuencia (GHz)	Ah	av	Bh	bv
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.88
2	0.00065	0.000138	0.963	0.923
4	0.00175	0.000591	1.121	1.075
6	0.00301	0.00155	1.308	1.265
8	0.00454	0.00265	1.332	1.31
10	0.0101	0.00395	1.327	1.264
12	0.0188	0.00887	1.276	1.2
15	0.0367	0.0168	1.217	1.128
20	0.0751	0.0335	1.154	1.065
25	0.124	0.0691	1.099	1.03
30	0.187	0.113	1.061	1

Tabla 5.1.5 Tabla general de los coeficientes de atenuación específica.

Modelos de atenuación por lluvia

La atenuación originada por la lluvia puede calcularse integrando la atenuación especificada en toda su longitud siempre y cuando se conozca la intensidad de lluvia, generalmente no se cuenta con este dato para poder realizar el cálculo, por esta razón se han propuesto métodos de predicción estadística de la atenuación causada por lluvia, debido a que es un aspecto muy importante en la comunicación satelital, se han realizado distintos modelos de calculo que se pueden clasificar como:

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

Modelos físicos: Intentan definir el fenómeno y modelar su comportamiento como son el horizontal y el vertical de la lluvia. Se basan en medidas de radares meteorológicos sobre los que se toman parámetros como la altura de la lluvia, la extensión horizontal y vertical de las precipitaciones y la distribución de intensidades de lluvia en una célula.

Modelos semi-empíricos: son obtenidos mediante la medición y ajustes experimentales de atenuación en varios lugares y condiciones, frecuencias y ángulos de elevación. Deben tener una base subyacente de conocimientos científicos.

Modelo CCIR

Las señales portadoras se atenúan conforme se propagan en el espacio en donde está lloviendo, en este caso se tendrá una distancia que la señal tiene que recorrer atravesando el fenómeno meteorológico y que a su vez dependerá de la altura de las nubes con relación al piso y del ángulo de elevación de la antena de la estación.

Esta longitud es la que se busca determinar para saber cómo va a ser afectada la señal satelital debido a la lluvia. La CCIR publicó un reporte en 1990 recomendando un método para realizar este cálculo.

1.- Se determina la intensidad de caída de lluvia $R_{0.01}$ excedido por 0.01% de promedio anual, cuando la estación terrena se tiene localizada.

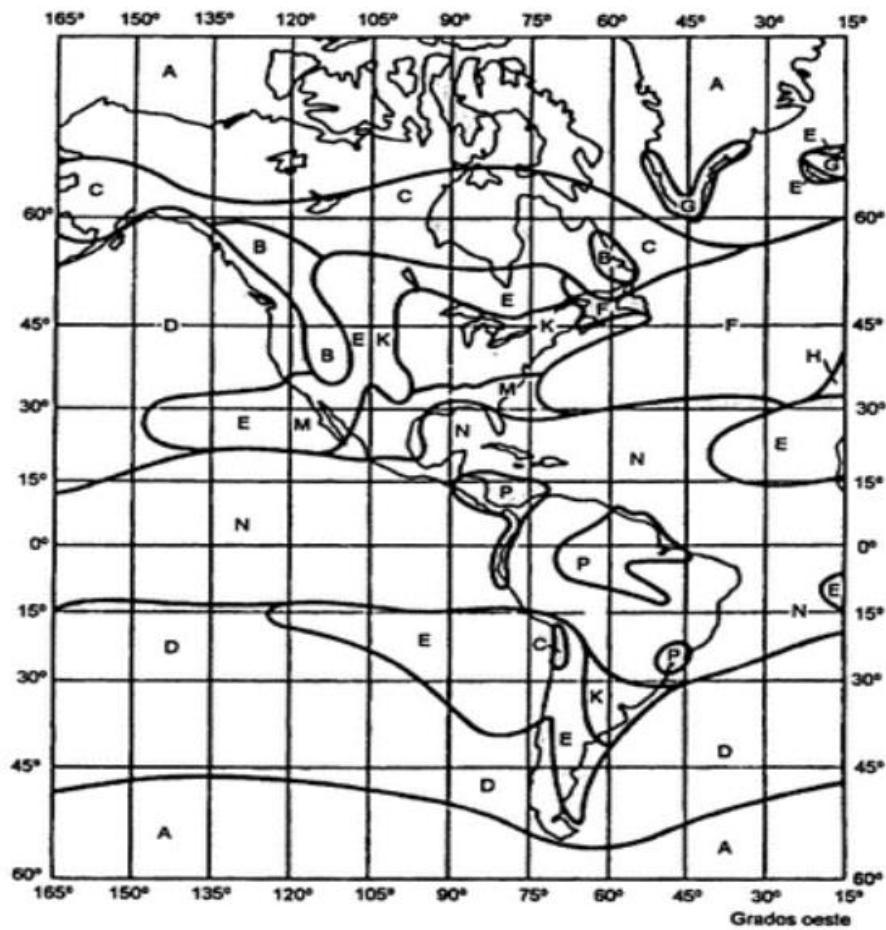


Figura 5.1.3 Regiones de América designadas por la CCIR de acuerdo a la intensidad de lluvia.

Se debe señalar que para las áreas de interés, deberemos tomar en cuenta el territorio correspondiente a México, la zona de caribe y Centroamérica, a las cuales corresponden 3 zonas que son M, N y P para los cálculos. Véase figura 5.1.4



Figura 5.1.4 Zonas de intensidad de lluvia excedida para México, el caribe y Centroamérica.

Porcentaje del tiempo excedido en un año (%) y equivalencia en minutos acumulados		Intensidad de lluvia excedida (mm/h)													
		A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P
0.1	526	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65
0.01	53	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145
0.001	5.3	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250

Tabla 5.1.6 Datos estadísticos por región.

2.- Se calcula la altura de la lluvia:

$$h_r = 3 + 0.028 l \quad 0^\circ < l < 36^\circ [km]$$

$$h_r = 4 + 0.075 (l - 36) \quad l > 36^\circ [km]$$

Donde l es la latitud de la estación terrena medida en grados (norte o sur).

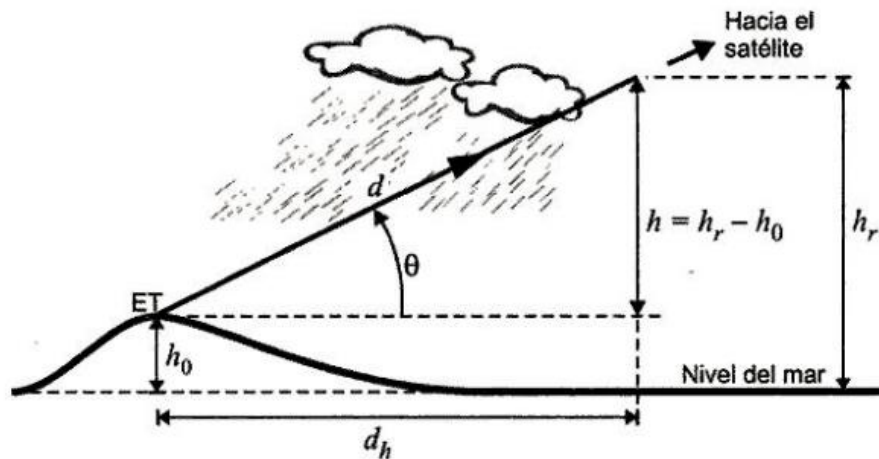


Figura 5.1.5 Distancia que recorre la señal en la lluvia sufriendo atenuación.

Estas expresiones ya toman en cuenta de manera aproximada la altura de la isoterma de cero grados en función de la altitud.

3.- Cálculo de la inclinación de la longitud de la trayectoria:

$$L_0 = \frac{H_0 - H_g}{\sin \theta}$$

4.- Se calcula el factor de reducción para 0.01% del tiempo que se desea, considerando que la lluvia no es homogénea.

$$r_{0.01} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{L_s}{L_0}\right) \cos \theta\right)}$$

Dónde:

$$L_0(km) = 35^{(-0.015R_{0.01})}$$

5.- Cálculo de L_e :

$$L_e = L_S r_{0.01} \text{ [km]}$$

6.- Se determina γ_R que se puede obtener de los nomogramas de la figura 5.1.6 en función de $R_{0.01}$ y de la frecuencia (en una polarización circular toma valores de la atenuación obtenida para cada polarización lineal).

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha \left(\frac{db}{km}\right)$$

La frecuencia está en función de los coeficientes k y α que vienen dados por:

$$k = \frac{[k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos E^2 \cos \tau]}{2}$$

$$k = \frac{[k_h \alpha_H + k_v \alpha_V + (k_h \alpha_H - k_v \alpha_V)\cos E^2 \cos 2\tau]}{2k}$$

Dónde $k_h, \alpha_H, k_v, \alpha_V$ son valores de la tabla 5.1.3, θ es el ángulo de elevación y τ es la polarización del ángulo de inclinación.

7.- Se obtiene el valor de atenuación conveniente para la lluvia excedida de 0.01% del promedio anual.

$$A_{RAIN(\rho=0.01)} = \gamma_R L_e \text{ [dB]}$$

Una manera alterna de calcular es usando el nomograma publicado por la misma CCIR de la figura 5.1.6 Con ayuda de una regla es posible unir el punto de intensidad de lluvia con el punto de frecuencia de transmisión, según la polarización empleada, el valor se puede leer en la recta central donde cruza con la recta trazada.

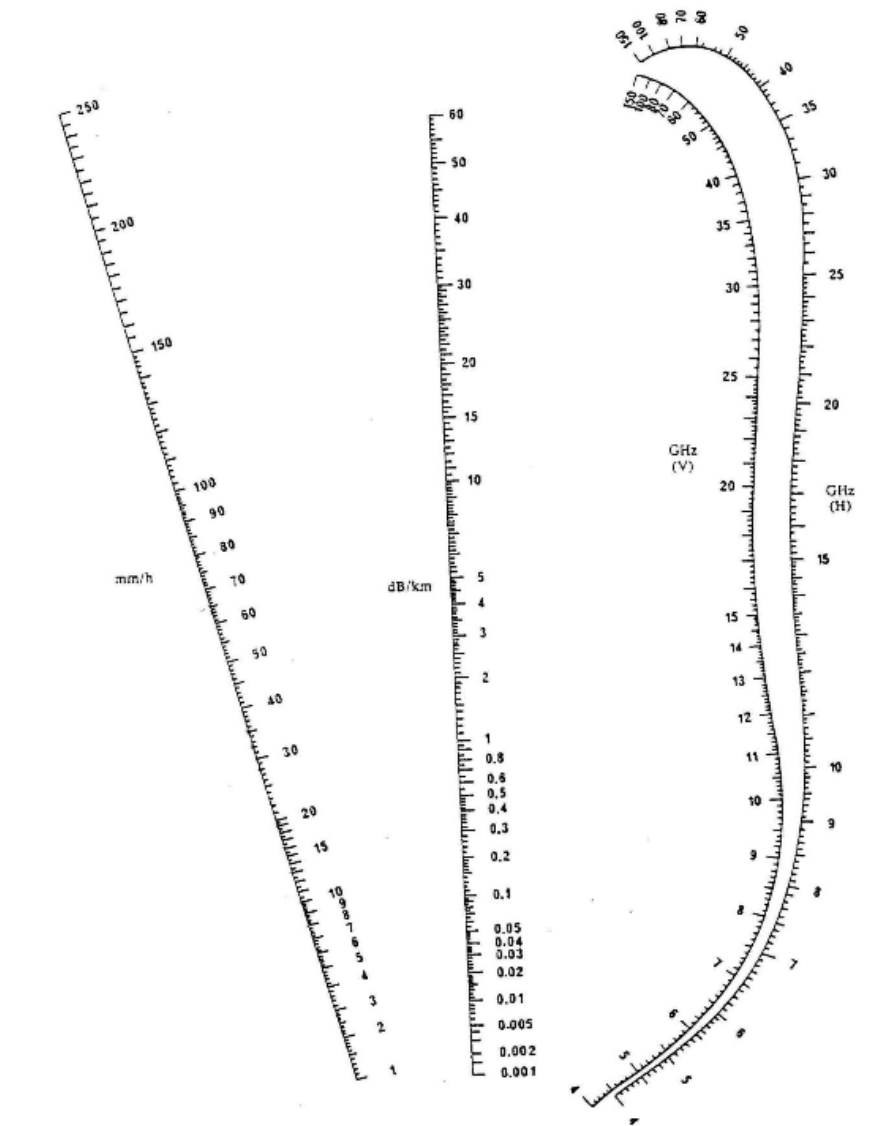


Figura 5.1.6 Nomograma de la CCIR del reporte 721 para calcular gráficamente el coeficiente.

El valor de la atenuación excedida por un porcentaje p entre 0.001% y 1% está dada por:

$$A_{RAIN}(p) = A_{RAIN}(p = 0.001) \times 0.12p^{-(0.546+0.043\log p)}$$

Modelo ITU-R Rec. 618-10

CAPITULO 5 ROPUESTA DE LA PRATAFORMA DE COMUNICACIONES

El siguiente método proporciona estimaciones debidas a la atenuación por lluvia sobre los trayectos oblicuos en un determinado punto de frecuencias de hasta 55 GHz, para ello es necesario conocer los siguientes parámetros:

$R_{0.01}$: intensidad de la lluvia en el punto de interes, para el 0,01% de un año promedio $\left(\frac{mm}{h}\right)$.

h_s : Altura de la estación terrena sobre el nivel 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 (8500 km)

Los datos de altura de la estación terrena sobre el nivel medio del mar pueden obtenerse como una estimación a partir de los mapas de altitud topográfica de la recomendación ITU-R P. 1511. El esquema de la Figura 5.1.7 muestra la geometría del trayecto.

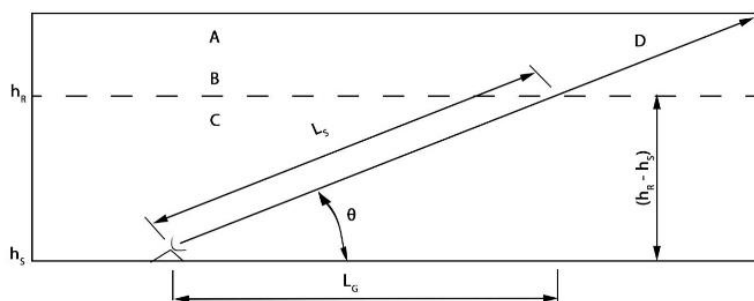


Figura 5.1.7 Representación de un trayecto tierra-espacio.

A: Precipitación helada

B: Altura de la lluvia

C: Precipitación Líquida.

D: Trayecto Tierra-espacio.

Procedimiento:

1.- Se determina la altitud de la lluvia, H_0 , indicada en la recomendación ITU-R P.839-3.

- En las zonas del mundo donde no se dispone de información específica se puede obtener el valor de medio de la altura de la isoterma de 0°C por encima del nivel del mar, h_0 puede obtenerse de las oficinas de Radiocomunicaciones de la ITU.
- La altura de la lluvia por encima del nivel del mar, h_r puede calcularse partiendo de la isoterma de 0°C como:

$$h_r = h_0 + 0.36 \text{ (km)}$$

- De manera específica se tomarán los valores correspondientes al territorio de México, el Caribe y Centroamérica como se observa en la figura 5.1.8.

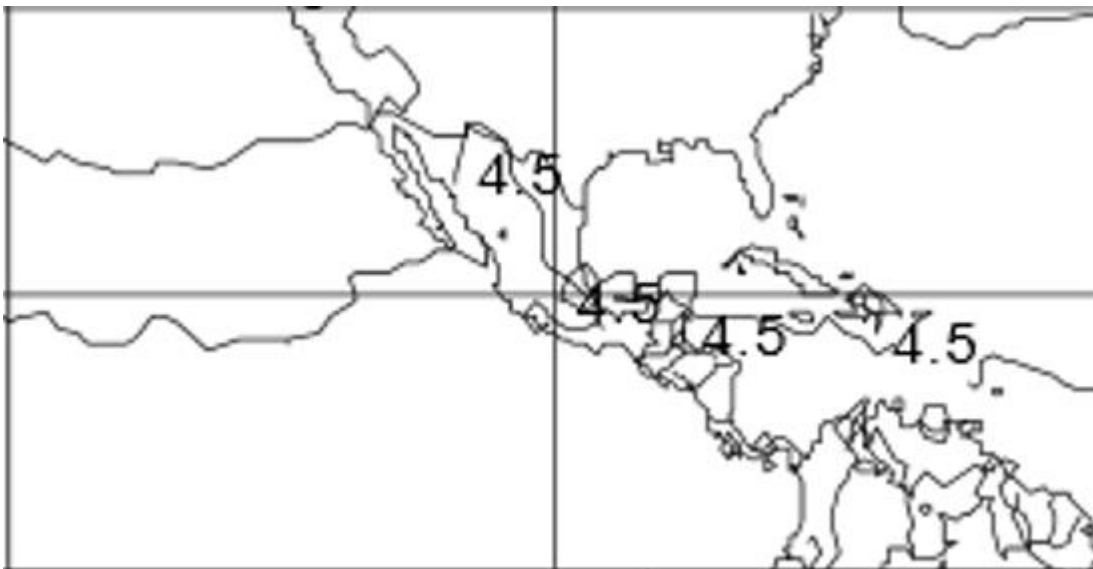


Figura 5.1.8 Valores promedio de isoterma por encima del nivel del mar en México, el Caribe y Centroamérica.

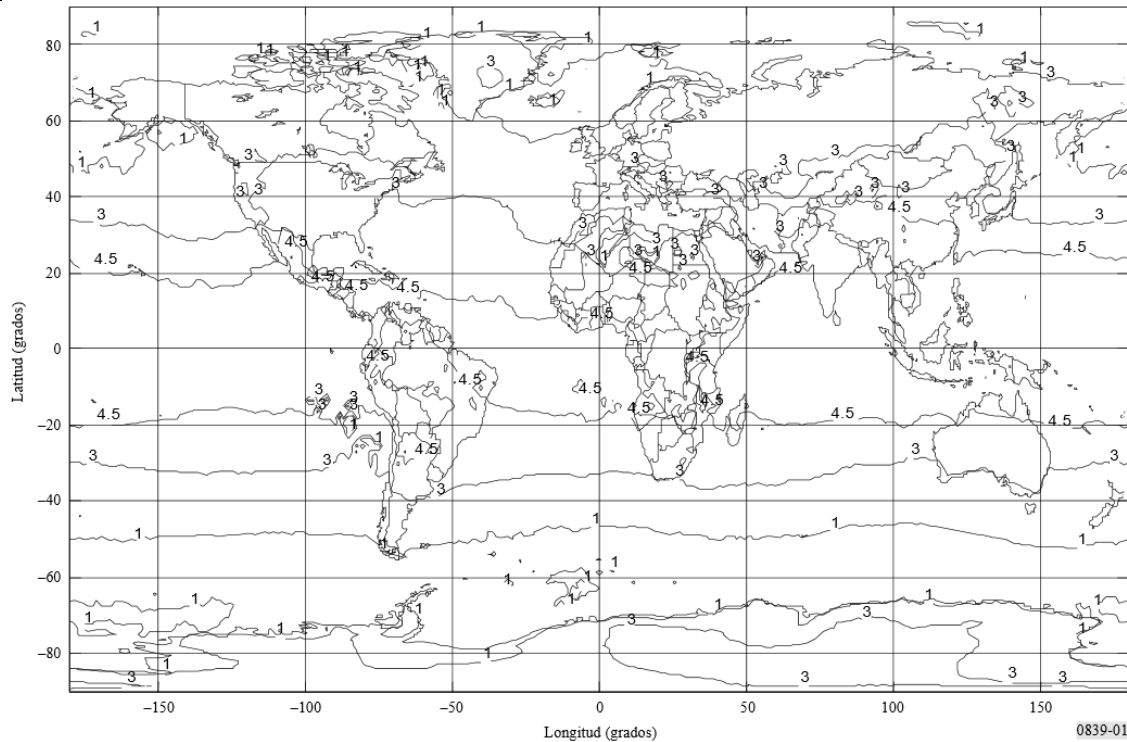


Figura 5.1.9 Altura medio anual de la isoterma de 0°C por encima del nivel del mar.

Los valores se expresan en longitud de 0° a 360° y en latitud de +90° a -90°. Para un emplazamiento diferente de los puntos de la cuadrícula, la altura de la isoterma de 0°C por encima del nivel medio del mar en el lugar deseado se puede calcular por medio de la interpolación de los valores en los cuatro puntos de cuadrícula más próximos.

2.- Para ángulos mayores a 5°, se calcula distancia de trayecto L_{S1} en el espacio correspondiente.

$$L_S = \frac{(h_0 - h_S)}{\text{sen } \theta} [km]$$

Para ángulos menores a 5° se calcula como:

$$L_S = \frac{2(h_0 - h_S)}{(\text{sen}^2\theta + \frac{2(h_0 - h_S)}{R_e})^{\frac{1}{2}} + \text{sen}\theta} [km]$$

En el caso de que $h_0 - h_S$ sea menos o igual a cero, la atenuación debida a la lluvia prevista para cualquier porcentaje de tiempo es cero y son necesarios los pasos siguientes.

3.- Se determina la proyección horizontal, $L_G = L_S \cos\theta$ [km]

4.- Se calcula la intensidad de lluvia, $R_{0.01}$ rebasada durante el 0.01% de un año medio (con tiempo de integración de 1 min). De no ser posible obtener datos estadísticos de la zona, se pueden realizar aproximaciones utilizando los mapas de intensidad de lluvia que aparecen en la recomendación ITU-R P.837. En caso de que $R_{0.01}$ sea cero, la atenuación debida a la lluvia calculada para cualquier porcentaje de tiempo es cero y no es necesario realizar los pasos siguientes.

5.- Se calcula la atenuación específica, γ_R con los coeficientes dependientes de la frecuencia que aparece en la recomendación ITU-R P.838 y el índice de lluvia $R_{0.01}$ de acuerdo al paso 4 y aplicando la ecuación:

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

6.- Se calcula el factor de reducción horizontal, $r_{0.01}$ para el 0,01% del tiempo.

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

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

$$\xi = \tan^{-1} \left(\frac{h_0 - h_S}{L_G r_{0.01}} \right) [\text{grados}]$$

Para cuando $\xi > \theta$

$$L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} [km]$$

Para otro caso:

$$L_R = \frac{h_0 - h_S}{\text{sen } \theta} [km]$$

Si $|\varphi| < 36^\circ$

$$X = 36 - |\varphi| [km]$$

Para otro caso:

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

8.- La longitud de trayecto efectiva viene dada por:

$$L_E = L_R v_{0.01} [km]$$

9.- Para calcular la atenuación que rebasa el nivel pluvial previsto por el 0.01% de un año $A_{0.01}$ se obtiene mediante:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E [dB]$$

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PRATAFORMA DE COMUNICACIONES

10.- para la atenuación que rebasa el nivel pluvial estimado para otros porcentajes de un año promedio, tomando en cuenta un margen de 0.001% al 5% se puede calcular a partir de la atenuación que rebasa el nivel pluvial para el 0.01% de un año medio.

Si $p \geq 1\%$ o $|\varphi| \geq 36^\circ$; $\beta=0$

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

En otro caso:

$\beta = -0.005(|\varphi| - 36^\circ) + 1.8 - 4.25 \text{ sen}\theta$

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

Este método proporciona una aproximación de las estadísticas a largo plazo de la atenuación debida a la lluvia. Si se comparan con otros datos se tiene que tomar en cuenta la variación anual que registran las estadísticas de intensidad de lluvia tomando en cuenta la recomendación ITU-R P.678.

Atenuación por absorción atmosférica.

Al trabajar con frecuencias altas significa que las ondas electromagnéticas interactúan con las moléculas de los gases de la atmosfera lo que reduce la potencia de las señales. La UIT ha asignado bandas de operación entre las cuales de 1 a 30 GHz se encuentran las que menos absorción ofrecen a las señales del espectro electromagnético.

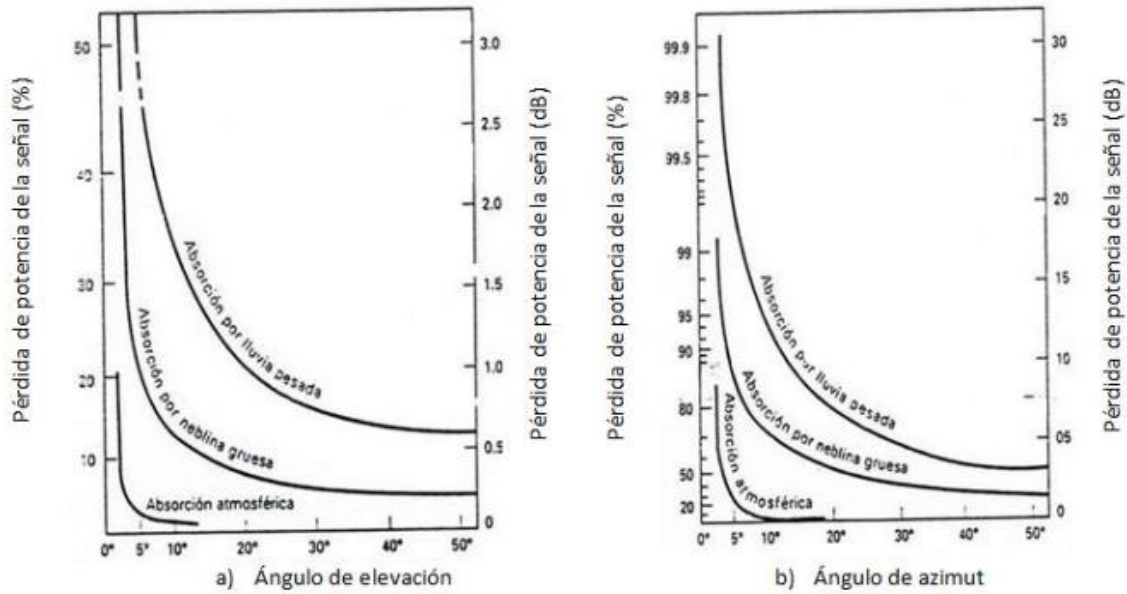


Figura 5.1.10 Atenuación debida a la absorción atmosférica para a): la banda de los 6 a 4 GHz, b): la banda de los 14 a 12 GHz.

Despolarización causada por la lluvia.

Cuando llueve en la troposfera, las señales que pasan a través de ella son despolarizadas, es decir, hay pérdida de potencia en la señal.

El grado de despolarización está función de la forma y la orientación de las gotas de lluvia, de la frecuencia y la polarización de la onda, así como de la densidad de lluvia o número de gotas en el trayecto de propagación.

La fórmula más actual para calcular la magnitud de la discriminación de polarización cruda es:

$$D_{PX} = U - V(\log A_R) \text{ donde:}$$

$$U = 30 \log f - 40 \log(\cos\theta) - 20 \log(\text{sen}(2\tau))$$

$$V = 20, \text{ si } 8\text{GHz} < f < 15\text{GHz} \text{ (Banda Ku)}$$

$$V = 23, \text{ si } 15\text{GHz} < f < 35\text{GHz} \text{ (Banda Ka)}$$

Tomando en cuenta que:

f es la frecuencia en GHz

θ es el ángulo de elevación de la estación terrena

τ es el ángulo de inclinación del plano de polarización con relación al plano horizontal local (es 4 para polarización circular)

En general los sistemas satelitales con polarización lineal funcionan mejor y son más confiables que los de polarización circular en presencia de lluvia.

Atenuación por gases atmosféricos

La atenuación originada por los gases atmosféricos es causada principalmente por la frecuencia utilizada, el ángulo de elevación, altura sobre el nivel del mar y de la densidad de vapor de agua. Afecta a frecuencias por arriba de los 10 GHz y para ángulos de elevación bajos.

Se pueden calcular las pérdidas por gases atmosféricos como:

$$L_g = (\gamma_0 + \gamma_w) * D_{atm} \text{ (dB)}$$

Dónde:

γ_0 : es la atenuación específica debida al aire seco $\left(\frac{\text{dB}}{\text{Km}}\right)$

γ_w : es la atenuación específica debida al vapor de agua $\left(\frac{\text{dB}}{\text{Km}}\right)$

D_{atm} : Distancia de la trayectoria atmosférica.

La distancia de la trayectoria atmosférica se encuentra en función del ángulo de elevación de la antena en la estación terrena, así como de la altura de la atmósfera, tomando como referencia el nivel del mar, la altura aproximada es de 10 Km.

$$D_{atm} = \frac{10}{\text{sen } \theta} \text{ (Km)}$$

θ : es el ángulo de elevación de la antena en la estación terrena.

Los valores de γ_0 γ_w se obtienen de la figura 5.1.11.

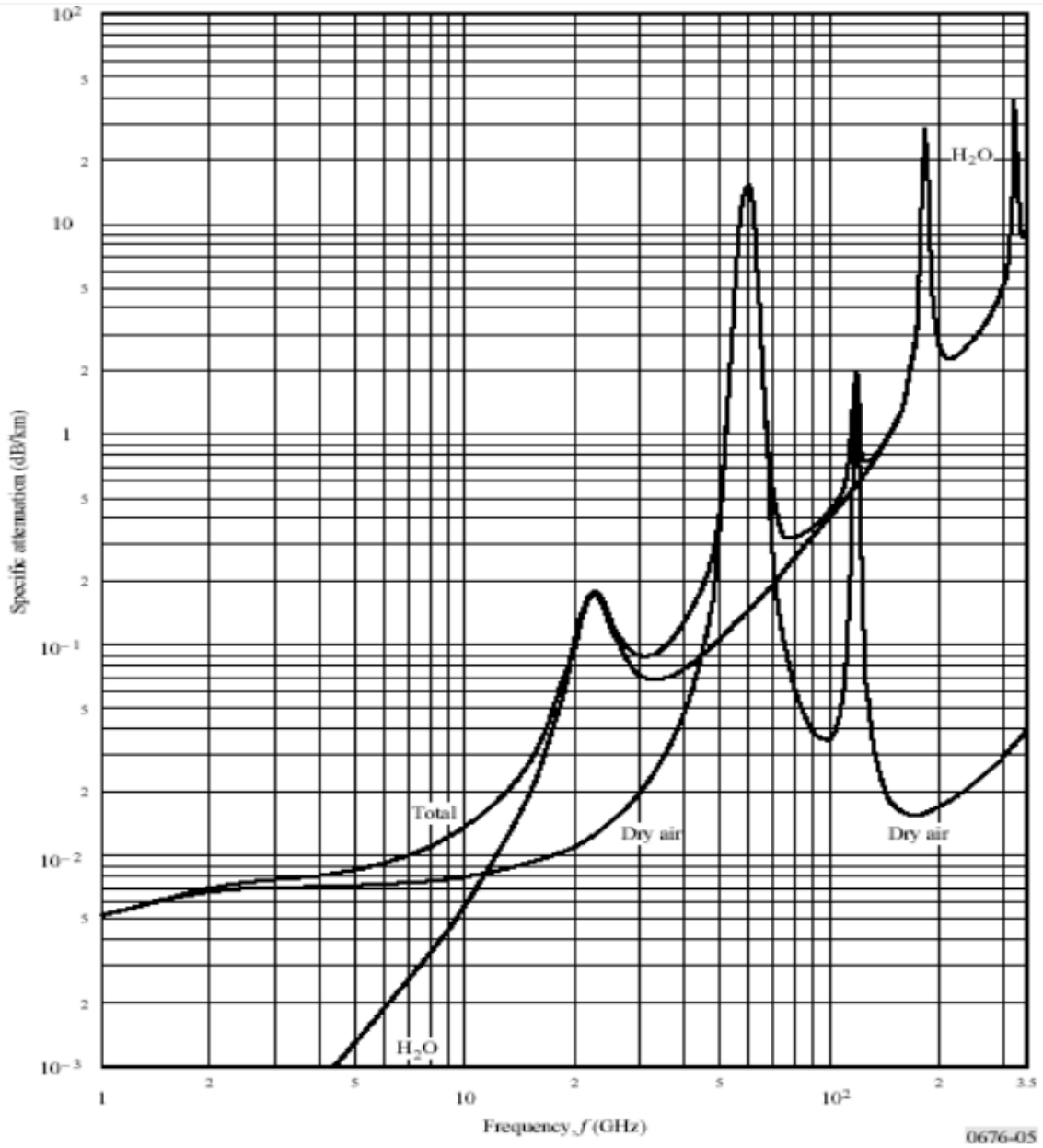


Figura 5.1.11 Atenuación específica debida a los gases atmosféricos.

Atenuación debida a nubes y niebla.

Para sistemas que operan a frecuencias mayores de los 10 GHz la atenuación originada por las nubes se convierte en un factor importante. Para calcular esta atenuación, para un valor de probabilidad determinado:

$$L_c = \frac{L * kl}{\text{sen}(\theta)} \text{ (dB) para } 90^\circ \geq \theta \geq 5^\circ$$

Dónde:

Kl: es el coeficiente de la atenuación específica.

L: es la estadística del contenido de la columna total de agua líquida.

θ : Es el ángulo de elevación.

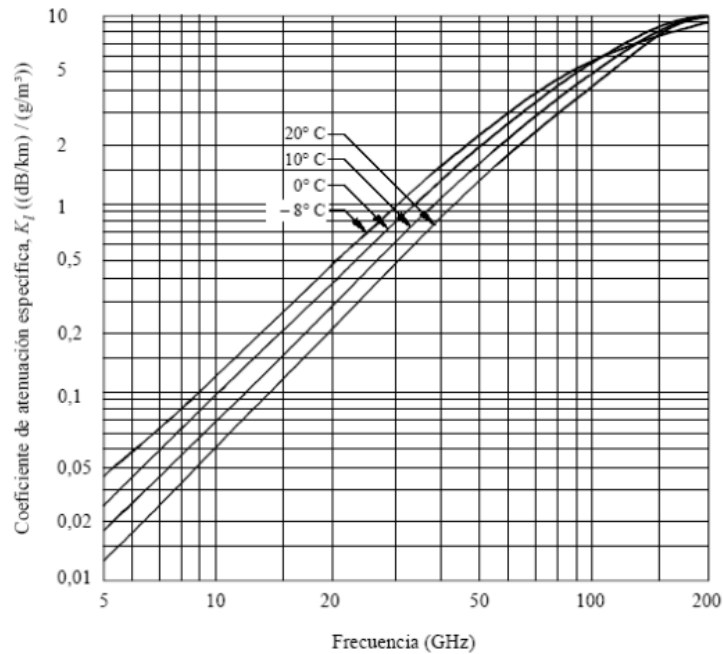


Figura 5.1.12 Atenuación específica de las pequeñas gotas de agua a diversas.

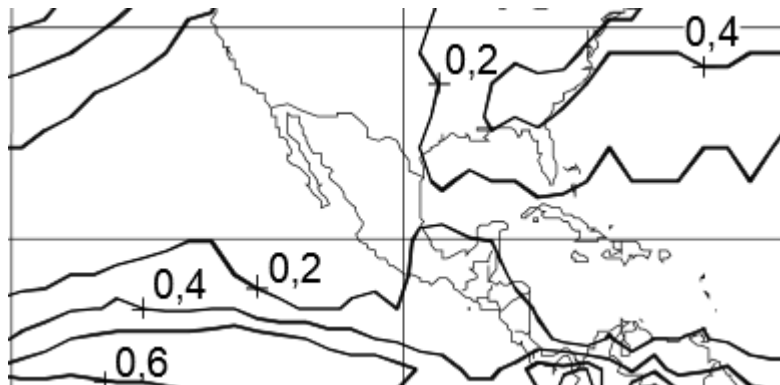


Figura 5.1.13 Contenido total normalizado de la columna de agua líquida de nube (kg/m²) rebasado durante el 90% del año

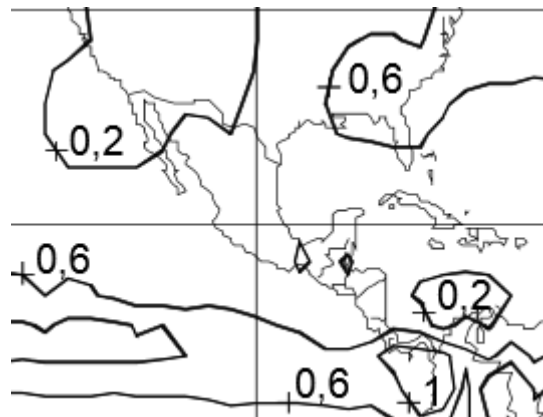


Figura 5.1.14 Contenido total normalizado de la columna de agua líquida de nube (kg/m²) rebasado durante el 95% del año

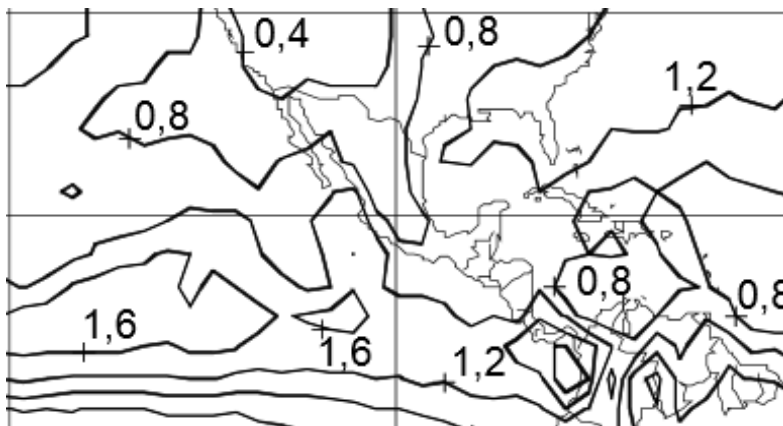


Figura 5.1.15 Contenido total normalizado de la columna de agua líquida de nube (kg/m m2) rebasado durante el 99% del año.

5.2 Posicionamiento Satelital

Actualmente los satélites que transmiten en banda Ka que se ubican en la posición 115° W es el ViaSat 1 que da servicio a los Estados Unidos y el satélite Wildblue 1 en la posición 111° W son los principales que nos pueden ocasionar interferencias a nuestro satélite propuesto.

El ViaSat 1 es un satélite de la compañía estadounidense del mismo nombre ubicada en Carlsbad, California que ofrece servicios de redes de alta velocidad para mercados desde el comercial hasta de uso militar, está en el ranking de las 50 principales compañías en el SpaceNews. Planean lanzar el ViaSat 2 en el 2016 sin más datos revelados al momento. Su posición orbital es muy cercana al MexSat Bicentenario. El ViaSat 1 transmite en Banda Ka y tiene algunos puntos fronterizos de interferencia con Mexico como son los haces puntuales G2DL, G2DR, G3DL, G3DR, G4DL, G4DR, G5DL, G5DR, U45DR, U62DL, U63DR, U70DR, U71DL y U72DL. Se muestra un ejemplo de estos haces en la figura 5.2.1.



Figura 5.2.1 Ejemplo de interferencia de un haz del satélite ViaSat 1 en territorio mexicano.

El Wildblue 1 es un satélite que ofrece servicios principalmente de internet de alta velocidad y tiene varios puntos de interferencia con nuestro satélite y estos son en los haces puntuales del 118 al 122, del 127 al 131 así como un haz puntual apuntando a Nuevo Laredo en Tamaulipas (GWLaredo) como se muestra en la figura 5.2.2.



Figura 5.2.2 Interferencia predominante del satélite Wildblue 1

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

Nuestra propuesta de diseño satelital podrá ser capaz de brindar servicios de internet principalmente así como servicios de televisión e incluso telefonía y estará situado en la posición 113° W sobre la órbita geoestacionaria con un rango de cobertura de toda la República Mexicana y Centroamérica principalmente como se muestra en la figura 5.2.3.



Figura 5.2.3 Posicionamiento del satélite propuesto en banda Ka.

5.3 Plan y reuso de frecuencias

El ancho de banda a utilizar en una red de comunicaciones por satélite es un factor clave para el diseño de la plataforma debido a que el plan de frecuencias se basa en el ancho de banda disponible. Uno de los objetivos a cumplir en nuestro diseño es crear un plan de frecuencias enfocado en el uso eficiente del ancho de banda.

A continuación, en la figura 5.3.1 se muestra gráficamente como se encuentra dividido el espectro radioeléctrico correspondiente a la Banda Ka.

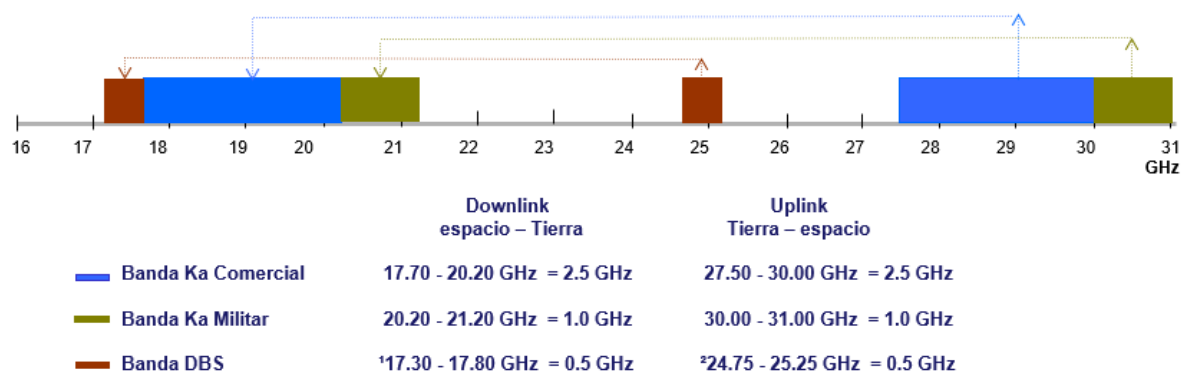


Figura 5.3.1 División de la banda Ka

Como se muestra en la figura anterior, la banda Ka asignada para el uso comercial cuenta con 2.5 GHz. En el enlace de ascenso, el ancho de banda disponible va de los 27.5 GHz a los 30 GHz, mientras que para el enlace de descenso el ancho de banda se encuentra entre 17.7 GHz y 20.2 GHz.

Para evitar interferencias ocasionadas por radiaciones de satélites adyacentes, se decidirá en que rango de frecuencias operará nuestro satélite tomando en consideración los siguientes factores:

- Satélites que actualmente se encuentran operando en la banda Ka y que ocupan posiciones adyacentes a la de nuestro satélite.
- Radiaciones de otros satélites sobre nuestra zona de cobertura.

La tabla 5.3.1 informa cual es la porción del rango de frecuencias del espectro comercial de la banda Ka que ocupan los satélites Anik F2 y ViaSat 1.

Satélite	Espectro Crudo [GHz]	Rango Ascendente [GHz]	Rango Descendente [GHz]
Anik F2	1.0	28.35 a 28.60 & 29.25 a 30.0	18.30 a 18.80 & 19.70 a 20.20
ViaSat 1	1.5	28.1 a 29.1 & 29.50 a 30.0	18.30 a 19.30 & 19.70 a 20.20

Tabla 5.3.1 Frecuencias usadas por los satélites Anik F2 y ViaSat 1

Para nuestra plataforma satelital se propone utilizar un espectro crudo de 1 GHz, la mitad de este espectro será utilizado para el enlace de ida y la otra mitad para el enlace de regreso. Véase Figura 5.3.2.

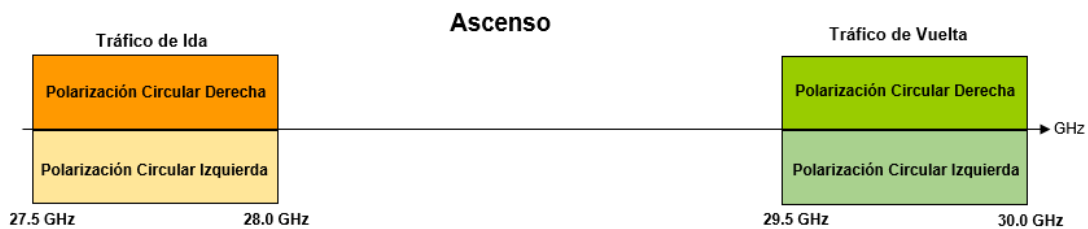


Figura 5.3.2 Plan de frecuencias para el Ascenso

Para el tráfico descendente, el plan que se propone se muestra en la figura 5.3.3.

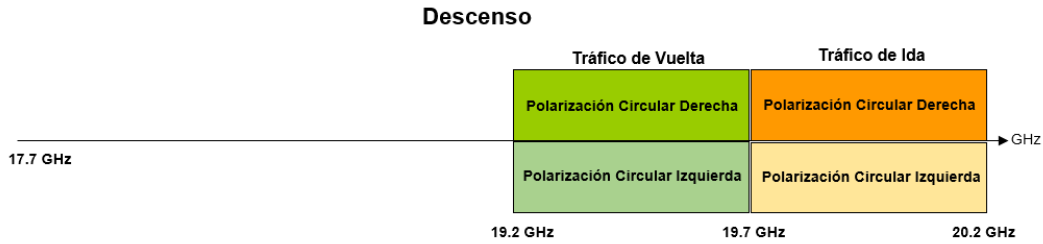


Figura 5.3.3 Plan de frecuencias para el descenso

Para evitar problemas de interferencia de radiación por satélite adyacente, lo más recomendable es entrar en contacto con las compañías que operan los satélites ViaSat 1 y Anik F2 para compartir información importante como patrones de radiación de las antenas de los satélites, coberturas exactas, potencia y planes de frecuencia; con el fin de analizar toda esta información y evitar afectación de servicios entre un satélite y otro.

Considerando que se va a trabajar con la técnica de reuso de frecuencias empleada por medio de haces puntuales, a continuación se presenta el plan de frecuencias completo, tomando en cuenta que cada haz va a utilizar un ancho de banda de 125 MHz. Véase Figura 5.3.4.

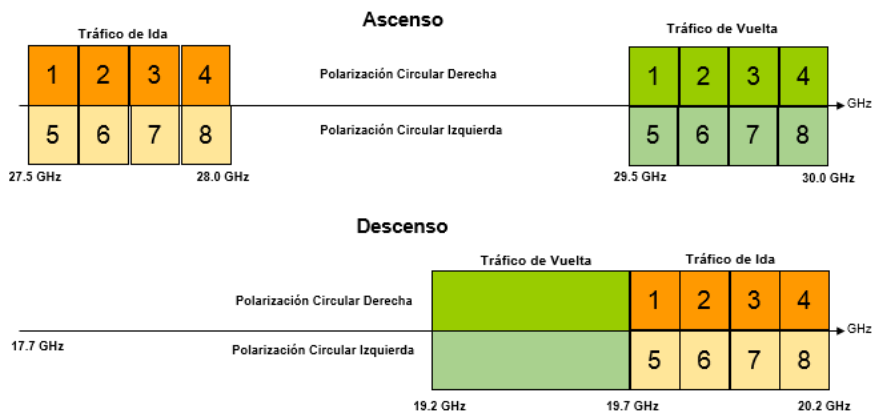


Figura 5.3.4 Plan de frecuencias tomando en cuenta 8 haces puntuales

En la figura anterior se aprecia el plan de frecuencia a utilizar en nuestra plataforma satelital. Se decidió utilizar un espectro crudo de 1 GHz, 8 haces puntuales, dos polarizaciones (polarización circular derecha e izquierda) y un factor de reuso de 7. Considerando todos estos factores se tiene que el ancho de banda real que utilizará la plataforma será de 14 GHz, a continuación se muestra como se obtiene este valor:

$$AB_{Total} = (\text{Espectro Crudo}) \times (\text{Factor de Reuso}) \times (\text{Num de Pol}) \text{ [GHz]}$$

$$AB_{Total} = (1) \times (7) \times (2) \text{ [GHz]}$$

$$AB_{Total} = 14 \text{ [GHz]}$$

Recordando que se utilizarán 56 haces puntuales para la cobertura de México y Centroamérica, se decidió agrupar estos haces en grupos de 8, de esta forma se pueden acomodar los haces de tal forma que se tengan 7 grupos tal como se muestra en la figura 5.3.5.

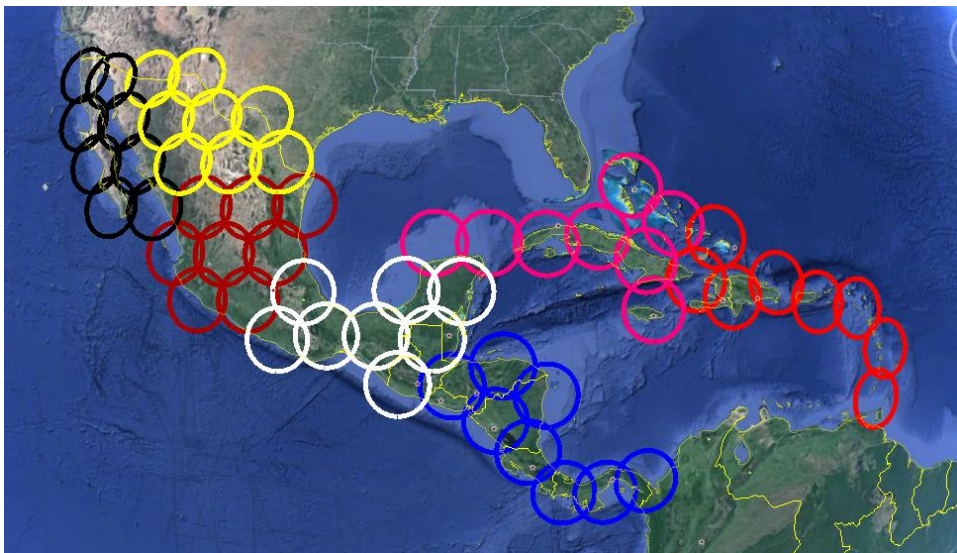


Figura 5.3.5 Cobertura utilizando un factor de reuso de 7

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PRATAFORMA DE COMUNICACIONES

Dado que se pretende diseñar una red multipunto interactiva, se necesita de una estación terrena maestra o HUB que mande el tráfico a todos los usuarios, esta estación terrena estará situada en un solo haz para cada grupo de haces. El haz donde se situó el HUB va a trabajar con un ancho de banda de 625 MHz debido a que el HUB envía y recibe tráfico con un ancho de banda de 500 MHz más los 125 MHz que se utilizan para enviar y recibir tráfico a los usuarios finales.

Para poder ofrecer servicios, el HUB se conecta a los anillos de las redes fijas por medio de fibra óptica para a través de estos anillos se tenga acceso a los servidores de internet, telefonía y televisión. En la figura 5.3.6 se muestra una red multipunto interactiva que utiliza haces puntuales.

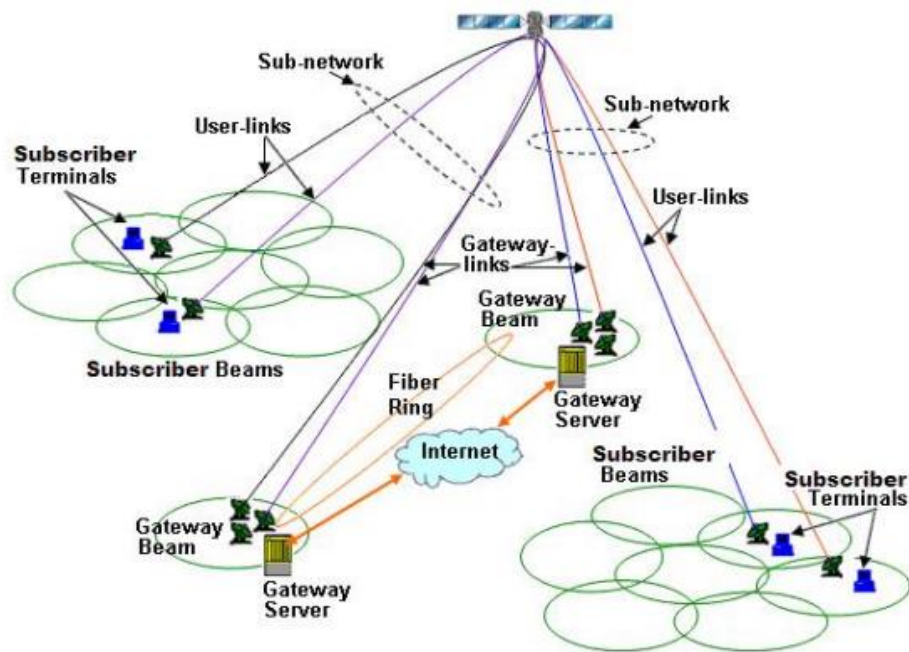


Figura 5.3.6 Red interactiva multipunto utilizando haces puntuales

Para representar que cada uno de los haces dentro de un mismo grupo trabaja en un rango de frecuencia diferente, se procederá a indicar cada haz puntual por medio de un cierto color, los haces que tienen un mismo color significa que utilizan el

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

mismo rango de frecuencias. En la figura 5.3.7 se muestra como queda el mapa con los haces puntuales identificados por grupo y número de haces.

Los grupos de haces se clasifican por letras, de la A a la G; mientras que los haces se identifican por números del 1 al 8.

Por ejemplo, en el mapa se puede identificar que el haz puntual A5 trabaja a la misma frecuencia que el haz puntual B5 y que el C5, y no existe problema que entre estos haces se trabaje con el mismo rango de frecuencia gracias a que se encuentran aislados geográficamente.

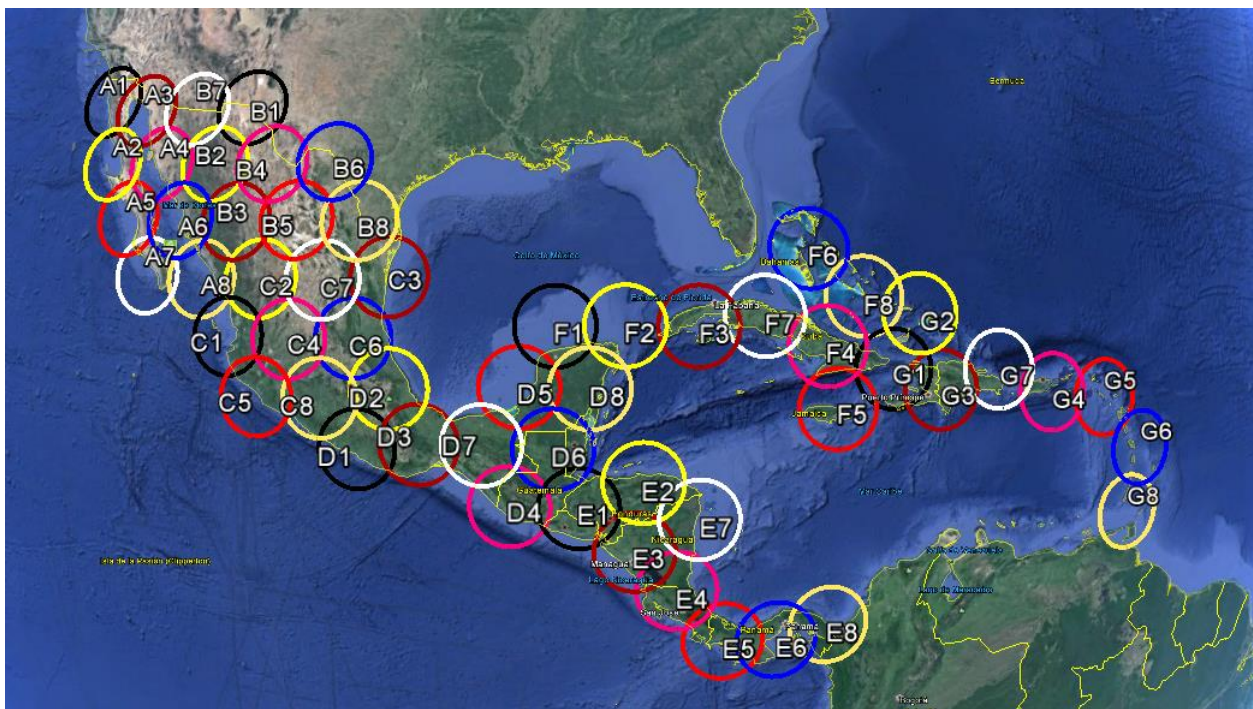


Figura 5.3.7 Representación de haces por medio de letras y números.

Un satélite mediano cuenta por lo general 5 reflectores, tomando en cuenta que en un solo reflector se pueden generar hasta 18 haces puntuales, se propone utilizar cinco reflectores y en cada uno se van a generar los siguientes haces:

Reflector	Haces Puntuales que genera
1	A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, B1, B2 y B3
2	B4, B5, B6, B7, B8, C1, C2, C3, C4, C5 y C6
3	C7, C8, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8 y E1
4	E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, F1, F2, F3 y F4
5	F5, F6, F7, F8, G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7 y G8

Tabla 5.3.2 Distribución de los haces de acuerdo al reflector donde se generan

Para lograr una distribución equitativa, se propone que cuatro reflectores generen 11 haces puntuales y el quinto reflector genere 12 haces puntuales.

5.4 Presupuesto de enlace

El cálculo del presupuesto de enlace es un paso importante en la fase de diseño de una plataforma satelital para asegurar su correcto funcionamiento una vez puesto en órbita el satélite.

El presupuesto de enlace es un procedimiento en donde se toman en cuenta todos los factores que contribuyen a que una señal alcance su objetivo y también todos los factores que degradan dicha señal. Una vez considerados todos estos factores se procede a realizar un balance de potencia para conocer el nivel de potencia con que la señal llega al destino receptor. En otras palabras, cada factor representa un valor que puede incrementar la potencia de nuestra señal o disminuirla, según sea el caso; al cálculo realizado tomando en cuenta los factores existentes desde el punto donde se genera la señal hasta el punto donde se entrega la señal se le conoce como presupuesto de potencia.

El proceso de los elementos que conforman un enlace se puede describir de manera simple, al comienzo se tiene un transmisor caracterizado por un amplificador de alta potencia, después de que la señal es amplificada pasa por una guía de ondas que introduce algo de pérdidas, después llega a la antena donde se propaga en forma de ondas electromagnéticas en el espacio; al viajar la señal se ve afectada por varias pérdidas, principalmente las pérdidas por espacio libre, la pequeña porción

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

de señal que es captada por la antena receptora viaja a través de una guía de ondas hasta el amplificador de bajo ruido del receptor. Es posible caracterizar el receptor por el margen mínimo que debe tener la señal para poder ser recuperada.

La ecuación de balance de potencia es una relación matemática que se muestra a continuación:

$$P_r = P_t - L_t + G_t - A + G_r - L_r \text{ [dB]}$$

Es común expresar los parámetros en el enlace en decibeles para reducir la complejidad de la expresión a operaciones como adición y sustracción. El balance de potencia en decibeles se puede entender en que la potencia recibida es igual a la potencia con que es transmitida la señal más todas las ganancias menos todas las pérdidas.

Dado que el objetivo de nuestra plataforma consiste en ofrecer servicios multimedia interactivos como internet por satélite, se realizarán dos presupuestos de potencia, el primero para el tráfico de ida que se origina en el HUB (la que ofrece los servicios) hacia receptor VSAT (usuario del servicio); y el segundo para el tráfico de vuelta que se origina en la VSAT y termina en el HUB.

Cada uno de los HUB's se debe ubicar en un punto estratégico que permita acceder a los anillos ópticos de las redes mundiales debido a que el HUB es quien enviará todo el tráfico hacia las estaciones terrenas y recibirá todas las peticiones de los usuarios para salir a las redes mundiales de telefonía e internet.

Se revisaron los mapas de los anillos ópticos para encontrar en que ciudades dentro de nuestra cobertura estos anillos tienen nodos; tomando en cuenta lo anterior, se procedió a elegir una ciudad grande para posicionar el HUB. En la figura 5.4.1 se muestra la ubicación de cada uno de los HUB's.

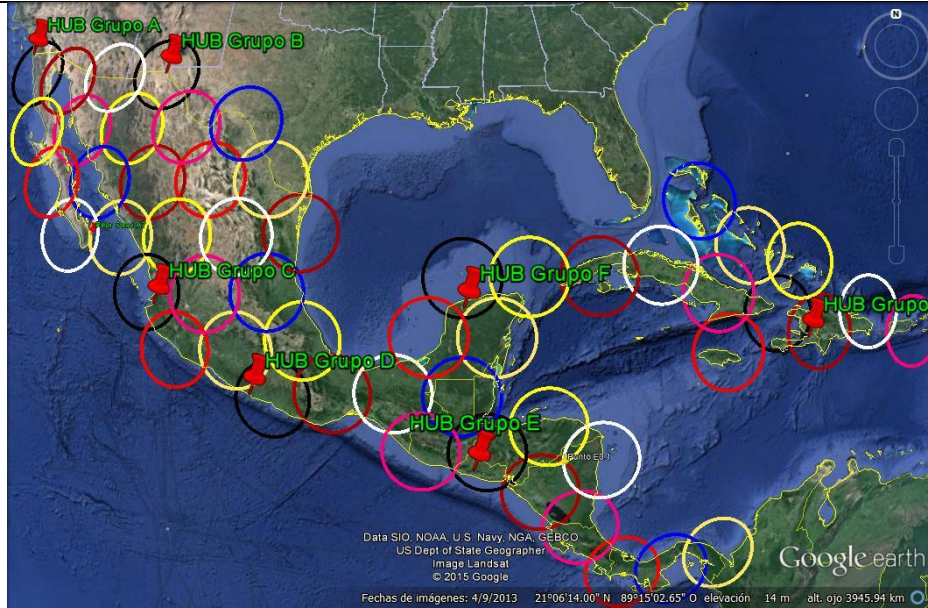


Figura 5.4.1 HUBs de cada grupo.

Se procederá a encontrar en el mapa de cobertura el peor caso (la locación con las peores condiciones para establecer comunicación) y se realizara el presupuesto de potencia sobre ese peor caso. Si el presupuesto de potencia resulta favorable para este caso, se asegura que todos los demás casos tendrán éxito.

El peor caso de cada haz puntual se encontró tomando en cuenta la altitud del terreno que cubre cada haz y la longitud de dicho punto hacia el satélite; un punto alejado al satélite y con menor altitud provoca que la señal que se origine en ese punto tendrá que viajar una trayectoria larga y tendrá que atravesar en mayor proporción las zonas de lluvia y las zonas atmosféricas. En la figura 5.4.2 se muestra la ubicación de los peores casos de cada haz puntual del grupo A.

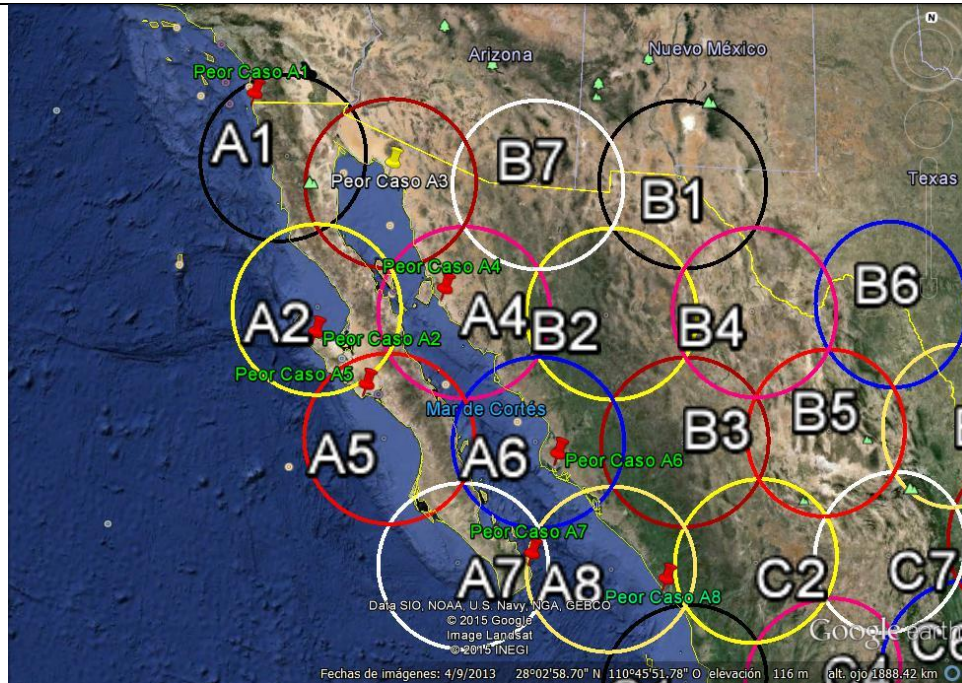


Figura 5.4.2 Ubicación del peor caso para los haces puntuales del grupo A

Atenuaciones que afectan en enlace satelital.

Atenuación por lluvia

Es importante saber y tomar en cuenta la cantidad de pérdidas en la potencia que tendremos debido a la lluvia, como bien se sabe el territorio de México, Centroamérica y el Caribe cuentan con una variedad de climas por lo que es necesario saber cómo afectarán estos fenómenos naturales a nuestros servicios.

De acuerdo a la recomendación ITU-R P.618-10, podemos estimar las pedidas por lluvia en nuestras áreas de interés de acuerdo a estadísticas de lluvias y cálculos establecidos en otras recomendaciones como ITU-R P.837-6 e ITU-R P.838-3, que son complementos de información.

Esta recomendación fue tomada en cuenta debido a que los parámetros e información con la que se cuenta está disponible en la página oficial de la UIT, en comparación con otros modelos es una de las más utilizadas y que menor margen de error representan.

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

Como se ha venido explicando anteriormente, con ayuda de la herramienta de *Google Earth Inc.* que ha brindado la facilidad de ubicar los puntos geográficamente, se obtuvieron los parámetros necesarios para el modelo de atenuación por lluvia, como latitud, longitud, altitud del punto de estudio sobre el nivel del mar y delimitaciones geográficas.

La información que se obtiene al realizar los cálculos con estas ubicaciones es que a mayor distancia existe mayor atenuación, también de acuerdo a la posición se reduce el ángulo de inclinación hacia el satélite y en complemento la estadística de lluvia para los diferentes zonas de lluvia nos da como resultado las variedades de atenuaciones aun siendo casi las mismas zonas.

A continuación se muestran los resultados de las atenuaciones por lluvia en el grupo A en comparación con el Grupo E, se toman estos dos grupos como ejemplo ya que ambos tienen una gran diferencia en cuanto a ubicación y precipitación de lluvia.

En la tabla 5.4.1 se pueden apreciar las atenuaciones para cada uno de los puntos ubicados dentro de cada haz puntual, es necesario tomar en cuenta que se muestran los resultados para las frecuencias más vulnerables; mientras que para la tabla 5.4.2 se puede observar que se incrementa bastante la atenuación por lluvia, es razonable ya que se encuentran en Centroamérica y es la que mayor índice de precipitación de lluvia tiene.

GRUPO A						
	Haz	Caso	Latitud ET en Grados	Longitud ET en Grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico de la VSAT	A1	Mejor	32.4509	-116.042	29.566	5.4141
	A1	Peor	31.4364	-115.041	29.566	8.1758
	A2	Mejor	28.3256	-113.502	29.689	5.8468
	A2	Peor	27.6668	-114.868	29.689	7.8340
	A3	Mejor	31.4481	-111.443	29.812	6.0250
	A3	Peor	31.3106	-113.514	29.812	8.1373
	A4	Mejor	29.8693	-110.372	29.935	5.5724
	A4	Peor	28.8537	-111.981	29.935	7.9075

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

A5	Mejor	26.5612	-112.151	29.566	5.9325
A5	Peor	26.7523	-113.561	29.566	7.7677
A6	Mejor	26.5398	-107.759	29.689	3.4434
A6	Peor	25.682	-109.086	29.689	7.7112
A7	Mejor	23.1851	-109.927	29.812	5.3112
A7	Peor	23.5807	-109.498	29.812	7.5615
A8	Mejor	24.3227	-105.968	29.935	2.1445
A8	Peor	23.1828	-106.421	29.935	7.5883

Tabla 5.4.1 Cálculos de atenuación por lluvia del grupo A en frecuencias de 29.566 GHz hasta 29.935 GHz

Grupo E						
		Caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico de la Vsat al satélite	E1	Mejor	13.6927	-89.218	29.566	29.9174
	E1	Peor	15.8248	-87.5593	29.566	36.5793
	E2	Mejor	15.1181	-86.6583	29.689	24.3758
	E2	Peor	15.5362	-83.9759	29.689	39.1006
	E3	Mejor	13.7264	-85.1263	29.812	25.9247
	E3	Peor	11.3921	-86.0407	29.812	37.6207
	E4	Mejor	9.6599	-83.84994	29.935	15.3990
	E4	Peor	10.0329	-83.1001	29.935	39.9459
	E5	Mejor	8.8164	-82.5318	29.566	11.8522
	E5	Peor	9.0985	-81.5505	29.566	41.9792
	E6	Mejor	8.4996	-81.6425	29.689	33.9859
	E6	Peor	8.9748	-79.5176	29.689	43.3517
	E7	Mejor	13.9303	-85.0026	29.812	33.7512
	E7	Peor	15.0173	-83.1628	29.812	40.4236
	E8	Mejor	7.45844	-76.334	29.935	33.8390
	E8	Peor	9.4443	-75.9213	29.935	46.7206

Tabla 5.4.2 Cálculos de atenuación por lluvia del grupo E en frecuencias de 29.566 GHz hasta 29.935 GHz

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

Atenuación por Gases Atmosféricos.

Para los cálculos de atenuación por gases atmosféricos es necesario tomar en cuenta las tablas de referencia contenidas en la recomendación UIT-R P.676-6 que nos permitirán saber la atenuación en función de la frecuencia utilizada. Los enlaces mayormente afectados son los que van del satélite a la VSAT, ya que se encuentran cerca a la frecuencia de los 22.2 GHz, que es la frecuencia de resonancia del aire seco y del vapor de agua, como se muestra en la tabla 5.4.3.

GRUPO A						
	Haz	Caso	Latitud ET en Grados	Longitud ET en Grados	Frecuencia (GHz)	Perdidas por gases Lg (dB)
Tráfico del Satélite a la VSAT	A1	Mejor	32.4509	-116.0417	19.766	2.8610
	A1	Peor	31.4364	-115.0411	19.766	2.8398
	A2	Mejor	28.3256	-113.5018	19.889	2.7858
	A2	Peor	27.6668	-114.8678	19.889	2.7771
	A3	Mejor	31.4481	-111.4434	20.012	2.8393
	A3	Peor	31.3106	-113.514	20.012	2.8360
	A4	Mejor	29.8693	-110.3719	20.135	2.8131
	A4	Peor	28.8537	-111.9807	20.135	2.7943
	A5	Mejor	26.5612	-112.1514	19.766	2.7604
	A5	Peor	26.7523	-113.5605	19.766	2.7629
	A6	Mejor	26.5398	-107.7585	19.889	2.7697
	A6	Peor	25.682	-109.0862	19.889	2.7538
	A7	Mejor	23.1851	-109.9272	20.012	2.7216
	A7	Peor	23.5807	-109.4978	20.012	2.7270
	A8	Mejor	24.3227	-105.9683	20.135	2.7492
	A8	Peor	23.1828	-106.4213	20.135	2.7338

Tabla 5.4.3: Cálculos de atenuación por gases atmosféricos del grupo A en frecuencias de 19.766 GHz hasta 20.135 GHz

Por último podemos contemplar las atenuaciones por lluvia, gases atmosféricos, nubes y pérdidas por propagación en espacio libre.

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PRATAFORMA DE COMUNICACIONES

Aquí se toman en cuenta todos los aspectos que tienen relación con cada uno de estos efectos naturales, de manera comparativa podemos observar cómo cambian las atenuaciones tanto para el grupo A en la tabla 5.4.4 como para el Grupo G en la tabla 5.4.5 que representa una mayor inclinación y distancia hacia el satélite.

Todos los resultados pueden ser consultados en el documento anexo.

Grupo A						
		Caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	A1	Mejor	32.4509	106.5515	19.766	216.7628
	A1	Peor	31.4364	106.5515	19.766	218.5769
	A2	Mejor	28.3256	107.8757	19.889	217.0329
	A2	Peor	27.6668	109.6759	19.889	218.3607
	A3	Mejor	31.4481	106.3624	20.012	217.1896
	A3	Peor	31.3106	107.3724	20.012	218.5673
	A4	Mejor	29.8693	104.6532	20.135	216.9226
	A4	Peor	28.8537	103.0998	20.135	218.4403
	A5	Mejor	26.5612	101.8306	19.766	217.0373
	A5	Peor	26.7523	101.1055	19.766	218.2788
	A6	Mejor	26.5398	102.6361	19.889	215.3936
	A6	Peor	25.682	100.2848	19.889	218.2706
	A7	Mejor	23.1851	108.6301	20.012	216.6387
	A7	Peor	23.5807	111.6133	29.812	218.1491
	A8	Mejor	24.3227	100.4722	29.935	214.6284
	A8	Peor	23.1828	97.6151	29.935	218.2081

Tabla 5.4.4 Atenuación total del enlace satelital que va del Satélite a la VSAT del Grupo A.

Grupo G						
		Caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico del	G1	Mejor	20.0434	-75.5833	19.766	221.576
	G1	Peor	19.728	-72.0847	19.766	224.2404
	G2	Mejor	21.9272	-71.9938	19.889	224.3959
	G2	Peor	21.4609	-71.1386	19.889	224.6441
	G3	Mejor	18.5323	-72.3324	20.012	224.1942

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

G3	Peor	19.6734	-70.3111	20.012	225.3108
G4	Mejor	18.1295	-66.7779	20.135	223.9305
G4	Peor	18.7064	-64.2864	20.135	227.7422
G5	Mejor	17.3365	-62.7717	19.766	225.5684
G5	Peor	16.3209	-61.0403	19.766	228.5364
G6	Mejor	15.3755	-61.3268	19.889	224.5408
G6	Peor	13.1258	-59.422	19.889	229.4213
G7	Mejor	18.953	-69.646	20.012	224.7049
G7	Peor	18.0879	-67.9162	29.812	226.0527
G8	Mejor	12.1574	-61.677	29.935	226.3678
G8	Peor	10.1549	-61.0171	29.935	229.1111

Tabla 5.4.5 Atenuación total del enlace satelital que va del Satélite a la VSAT del Grupo G.

La mayor cantidad de pérdidas se deben a la propagación por espacio libre que para este grupo A se encuentra en el orden de los 214.62 dB a los 218.57 dB. Mientras que para el grupo G este tipo de pérdidas está en el rango de los 221.576 dB a los 229.4213 dB.

Por lo que el cambio de zona tiene una gran influencia en la atenuación por propagación en el espacio libre.

La ecuación del balance de potencia usualmente se presenta en una tabla a la que se le denomina presupuesto de potencia, en la cual se escribe cada parámetro del enlace con su valor.

En esta tabla se calcula el C/N del enlace de ascenso, el C/N del enlace de descenso y el C/N total, una vez teniendo estos datos se procede a obtener el Eb/No a la entrada del receptor.

Como ejemplo, a continuación se realizara el presupuesto de potencia para el enlace que va de la estación terrena maestra ubicada en el haz puntual A1 hacia el peor caso del haz puntual A7.

Ubicación HUB: 32°30'51.51"N, 117° 2'8.79"O

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

Ubicación VSAT: 23°34'50.57"N, 109°29'52.08"O

Parámetro	Valor	Unidades
Potencia de Transmisión	80	W
Pérdidas en la guía de ondas del Tx	1	dB
Ganancia antena Tx	66.07	dB
PIRE	85.10	dBW
Pérdidas en el espacio libre	212.67	dB
Pérdidas atmosféricas	2.69	dB
Pérdidas por atenuación por lluvia	6.516	dB
Ganancia de la antena receptora	52.09	dB
Pérdidas en la guía de onda del Rx	1	dB
Potencia recibida	-87.08	dB
Ancho de Banda	36	MHz
Temperatura de ruido del sistema	570	K
Constante de Boltzmann	-228.6	dB
Potencia de ruido recibido	-125.47	dB
C/N Ascenso	18.86	dB
Potencia de Transmisión	120	W
Pérdidas en la guía de ondas del Tx	1	dB
Ganancia antena Tx	49.31	dB
PIRE	70.10	dBW
Pérdidas en el espacio libre	213.35	dB
Pérdidas atmosféricas	2.18	dB
Pérdidas por atenuación por lluvia	4.37	dB
Ganancia de la antena receptora	43.29	dB
Pérdidas en la guía de onda del Rx	1	dB
Potencia recibida	-106.58	dB
Ancho de Banda	36	MHz
Temperatura de ruido del sistema	70	K
Constante de Boltzmann	-228.6	dB
Potencia de ruido recibido	-134.58	dB
C/N Descenso	23.16	dB
C/N Total	92.77	dB
Tasa de bit	30	Mbps
Relación Tasa de datos – Ancho de Banda	0.6	dB
Eb/No	18	dB

Tabla 5.4.6 Presupuesto de potencia para el peor caso del haz puntual A7

CAPITULO 5 ROPUESTA DE LA PRATAFORMA DE COMUNICACIONES

En las siguientes tablas se encuentra el resumen del presupuesto de potencia para cada uno de los peores casos de cada haz puntual tanto para el tráfico de ida como para el tráfico de retorno.

Grupo A enlace HUB a VSAT - Modulación QPSK							
Haz Puntual	Potencia Tx [W]	Frec. Ascenso [GHz]	Frec. Descenso [GHz]	AB [MHz]	Tasa (bps)	Peor Eb/No [dB]	Mejor Eb/No [dB]
A1	80	27.566	19.766	36	30000000	18.1439	24.6779
A2	80	27.689	19.889	36	30000000	18.2203	24.7003
A3	80	27.812	20.012	36	30000000	17.9025	24.6792
A4	80	27.935	20.135	36	30000000	17.9519	24.6938
A5	80	27.566	19.766	36	30000000	17.9308	24.7048
A6	80	27.689	19.889	36	30000000	17.9524	24.7084
A7	80	27.812	20.012	36	30000000	18.0000	24.7173
A8	80	27.935	20.135	36	30000000	18.0053	24.7149

Tabla 5.4.7 Resultados de los presupuestos de potencia para el grupo A, enlace de ida.

Grupo A enlace VSAT a HUB - Modulación QPSK							
Haz Puntual	Potencia Tx [W]	Frec. Ascenso [GHz]	Frec. Descenso [GHz]	AB [MHz]	Tasa (bps)	Peor Eb/No [dB]	Mejor Eb/No [dB]
A1	10	29.566	19.45	0.5	416666.66	21.1707	29.0927
A2	10	29.689	19.45	0.5	416666.66	21.4738	29.1212
A3	10	29.812	19.45	0.5	416666.66	21.2025	29.0944
A4	10	29.935	19.45	0.5	416666.66	21.4062	29.1134
A5	10	29.566	19.45	0.5	416666.66	21.5334	29.1277
A6	10	29.689	19.45	0.5	416666.66	21.5814	29.1317
A7	10	29.812	19.45	0.5	416666.66	21.7100	29.1439
A8	10	29.935	19.45	0.5	416666.66	21.6855	29.1408

Tabla 5.4.8 Resultados de los presupuesto de potencia para el grupo A, enlace de retorno.

Grupo B enlace HUB a VSAT - Modulación QPSK							
Haz Puntual	Potencia Tx [W]	Frec. Ascenso [GHz]	Frec. Descenso [GHz]	AB [MHz]	Tasa (bps)	Peor Eb/No [dB]	Mejor Eb/No [dB]
B1	80	27.566	19.766	36	30000000	17.7743	24.6601
B2	80	27.689	19.889	36	30000000	17.9089	24.6856
B3	80	27.812	20.012	36	30000000	17.9704	24.6970
B4	80	27.935	20.135	36	30000000	18.0300	24.6686
B5	80	27.566	19.766	36	30000000	17.9222	24.6715
B6	80	27.689	19.889	36	30000000	17.8704	24.6653
B7	80	27.812	20.012	36	30000000	18.0032	24.6723
B8	80	27.935	20.135	36	30000000	17.8389	24.6662

Tabla 5.4.9 Resultados de los presupuestos de potencia para el grupo B, enlace de ida.

Grupo B enlace VSAT a HUB - Modulación QPSK							
Haz Puntual	Potencia Tx [W]	Frec. Ascenso [GHz]	Frec. Descenso [GHz]	AB [MHz]	Tasa (bps)	Peor Eb/No [dB]	Mejor Eb/No [dB]
B1	10	29.566	19.45	0.5	416666.66	19.4177	29.0856
B2	10	29.689	19.45	0.5	416666.66	19.7984	29.1181
B3	10	29.812	19.45	0.5	416666.66	19.9290	29.1335
B4	10	29.935	19.45	0.5	416666.66	20.0469	29.0966
B5	10	29.566	19.45	0.5	416666.66	19.8470	29.1003
B6	10	29.689	19.45	0.5	416666.66	19.6588	29.0917
B7	10	29.812	19.45	0.5	416666.66	19.9863	29.1013
B8	10	29.935	19.45	0.5	416666.66	19.4991	29.0935

Tabla 5.4.10 Resultados de los presupuesto de potencia para el grupo B, enlace de retorno.

Grupo C enlace HUB a VSAT - Modulación QPSK							
Haz Puntual	Potencia Tx [W]	Frec. Ascenso [GHz]	Frec. Descenso [GHz]	AB [MHz]	Tasa (bps)	Peor Eb/No [dB]	Mejor Eb/No [dB]
C1	80	27.566	19.766	36	30000000	13.7987	24.7996
C2	80	27.689	19.889	36	30000000	13.8624	24.7811
C3	80	27.812	20.012	36	30000000	12.8286	24.6963
C4	80	27.935	20.135	36	30000000	17.3477	24.7904
C5	80	27.566	19.766	36	30000000	13.8319	24.8093
C6	80	27.689	19.889	36	30000000	13.0735	24.7230
C7	80	27.812	20.012	36	30000000	13.5500	24.7144
C8	80	27.935	20.135	36	30000000	13.7740	24.7993

Tabla 5.4.11 Resultados de los presupuestos de potencia para el grupo C, enlace de ida.

Grupo C enlace VSAT a HUB - Modulación QPSK							
Haz Puntual	Potencia Tx [W]	Frec. Ascenso [GHz]	Frec. Descenso [GHz]	AB [MHz]	Tasa (bps)	Peor Eb/No [dB]	Mejor Eb/No [dB]
C1	10	29.566	19.45	0.5	416666.66	9.6714	29.2133
C2	10	29.689	19.45	0.5	416666.66	9.6928	29.2043
C3	10	29.812	19.45	0.5	416666.66	8.9852	29.1642
C4	10	29.935	19.45	0.5	416666.66	10.9942	29.2089
C5	10	29.566	19.45	0.5	416666.66	9.6970	29.2178
C6	10	29.689	19.45	0.5	416666.66	9.1609	29.1767
C7	10	29.812	19.45	0.5	416666.66	9.4777	29.1728
C8	10	29.935	19.45	0.5	416666.66	9.6680	29.2131

Tabla 5.4.12 Resultados de los presupuesto de potencia para el grupo C, enlace de retorno.

Grupo D enlace HUB a VSAT - Modulación QPSK							
Haz Puntual	Potencia Tx [W]	Frec. Ascenso [GHz]	Frec. Descenso [GHz]	AB [MHz]	Tasa (bps)	Peor Eb/No [dB]	Mejor Eb/No [dB]
D1	80	27.566	19.766	36	30000000	10.8354	24.7901
D2	80	27.689	19.889	36	30000000	10.8370	24.7683
D3	80	27.812	20.012	36	30000000	10.8390	24.7706
D4	80	27.935	20.135	36	30000000	10.8344	24.7472
D5	80	27.566	19.766	36	30000000	10.7687	24.7267
D6	80	27.689	19.889	36	30000000	10.7862	24.7217
D7	80	27.812	20.012	36	30000000	10.8122	24.7475
D8	80	27.935	20.135	36	30000000	10.7776	24.7022

Tabla 5.4.13 Resultados de los presupuestos de potencia para el grupo D, enlace de ida.

Grupo D enlace VSAT a HUB - Modulación QPSK							
Haz Puntual	Potencia Tx [W]	Frec. Ascenso [GHz]	Frec. Descenso [GHz]	AB [MHz]	Tasa (bps)	Peor Eb/No [dB]	Mejor Eb/No [dB]
D1	10	29.566	19.45	0.5	416666.66	2.2149	29.2045
D2	10	29.689	19.45	0.5	416666.66	1.8356	29.1757
D3	10	29.812	19.45	0.5	416666.66	1.9012	29.1793
D4	10	29.935	19.45	0.5	416666.66	1.4234	29.1491
D5	10	29.566	19.45	0.5	416666.66	0.8382	29.1227
D6	10	29.689	19.45	0.5	416666.66	0.7040	29.1157
D7	10	29.812	19.45	0.5	416666.66	1.4121	29.1494
D8	10	29.935	19.45	0.5	416666.66	0.1584	29.0913

Tabla 5.4.14 Resultados de los presupuesto de potencia para el grupo D, enlace de retorno.

Grupo E enlace HUB a VSAT - Modulación QPSK							
Haz Puntual	Potencia Tx [W]	Frec. Ascenso [GHz]	Frec. Descenso [GHz]	AB [MHz]	Tasa (bps)	Peor Eb/No [dB]	Mejor Eb/No [dB]
E1	80	27.566	19.766	36	30000000	3.6318	24.6061
E2	80	27.689	19.889	36	30000000	3.6630	24.5744
E3	80	27.812	20.012	36	30000000	3.7011	24.6023
E4	80	27.935	20.135	36	30000000	3.7310	24.5758
E5	80	27.566	19.766	36	30000000	3.6165	24.5598
E6	80	27.689	19.889	36	30000000	3.6487	24.5349
E7	80	27.812	20.012	36	30000000	3.6871	24.5667
E8	80	27.935	20.135	36	30000000	3.6863	24.4799

Tabla 5.4.15 Resultados de los presupuestos de potencia para el grupo E, enlace de ida.

Grupo E enlace VSAT a HUB - Modulación QPSK							
Haz Puntual	Potencia Tx [W]	Frec. Ascenso [GHz]	Frec. Descenso [GHz]	AB [MHz]	Tasa (bps)	Peor Eb/No [dB]	Mejor Eb/No [dB]
E1	10	29.566	19.45	0.5	416666.66	-16.1911	29.0361
E2	10	29.689	19.45	0.5	416666.66	-16.5254	28.9947
E3	10	29.812	19.45	0.5	416666.66	-16.3047	29.0312
E4	10	29.935	19.45	0.5	416666.66	-16.6743	28.9970
E5	10	29.566	19.45	0.5	416666.66	-17.1585	28.9765
E6	10	29.689	19.45	0.5	416666.66	-17.6112	28.9441
E7	10	29.812	19.45	0.5	416666.66	-16.7759	28.9854
E8	10	29.935	19.45	0.5	416666.66	-19.1890	28.8748

Tabla 5.4.16 Resultados de los presupuesto de potencia para el grupo E, enlace de retorno.

Grupo F enlace HUB a VSAT - Modulación QPSK							
Haz Puntual	Potencia Tx [W]	Frec. Ascenso [GHz]	Frec. Descenso [GHz]	AB [MHz]	Tasa (bps)	Peor Eb/No [dB]	Mejor Eb/No [dB]
F1	80	27.566	19.766	36	30000000	8.2203	24.5722
F2	80	27.689	19.889	36	30000000	8.2418	24.5612
F3	80	27.812	20.012	36	30000000	7.7928	24.4996
F4	80	27.935	20.135	36	30000000	7.7311	24.4162
F5	80	27.566	19.766	36	30000000	7.7146	24.4433
F6	80	27.689	19.889	36	30000000	7.7222	24.4205
F7	80	27.812	20.012	36	30000000	7.7520	24.4574
F8	80	27.935	20.135	36	30000000	7.6825	24.3755

Tabla 5.4.17 Resultados de los presupuestos de potencia para el grupo F, enlace de ida.

Grupo F enlace VSAT a HUB - Modulación QPSK							
Haz Puntual	Potencia Tx [W]	Frec. Ascenso [GHz]	Frec. Descenso [GHz]	AB [MHz]	Tasa (bps)	Peor Eb/No [dB]	Mejor Eb/No [dB]
F1	10	29.566	19.45	0.5	416666.66	-3.7982	29.0051
F2	10	29.689	19.45	0.5	416666.66	-3.9432	28.9904
F3	10	29.812	19.45	0.5	416666.66	-5.3768	28.9120
F4	10	29.935	19.45	0.5	416666.66	-8.4745	28.8065
F5	10	29.566	19.45	0.5	416666.66	-7.4222	28.8405
F6	10	29.689	19.45	0.5	416666.66	-8.3892	28.8114
F7	10	29.812	19.45	0.5	416666.66	-6.7814	28.8584
F8	10	29.935	19.45	0.5	416666.66	-10.4785	28.7556

Tabla 5.4.18 Resultados de los presupuesto de potencia para el grupo F, enlace de retorno.

Grupo G enlace HUB a VSAT - Modulación QPSK							
Haz Puntual	Potencia Tx [W]	Frec. Ascenso [GHz]	Frec. Descenso [GHz]	AB [MHz]	Tasa (bps)	Peor Eb/No [dB]	Mejor Eb/No [dB]
G1	80	27.566	19.766	36	30000000	-0.2273	23.9406
G2	80	27.689	19.889	36	30000000	-0.1892	23.9143
G3	80	27.812	20.012	36	30000000	-0.1571	23.9024
G4	80	27.935	20.135	36	30000000	-0.1719	23.7301
G5	80	27.566	19.766	36	30000000	-0.3289	23.6027
G6	80	27.689	19.889	36	30000000	-0.3203	23.5309
G7	80	27.812	20.012	36	30000000	-0.1716	23.8481
G8	80	27.935	20.135	36	30000000	-0.2208	23.6220

Tabla 5.4.19 Resultados de los presupuestos de potencia para el grupo G, enlace de ida.

Grupo G enlace VSAT a HUB - Modulación QPSK							
Haz Puntual	Potencia Tx [W]	Frec. Ascenso [GHz]	Frec. Descenso [GHz]	AB [MHz]	Tasa (bps)	Peor Eb/No [dB]	Mejor Eb/No [dB]
G1	10	29.566	19.45	0.5	416666.66	-22.5408	28.4399
G2	10	29.689	19.45	0.5	416666.66	-22.6728	28.4058
G3	10	29.812	19.45	0.5	416666.66	-22.7407	28.3913
G4	10	29.935	19.45	0.5	416666.66	-26.3831	28.1763
G5	10	29.566	19.45	0.5	416666.66	-33.0490	28.0214
G6	10	29.689	19.45	0.5	416666.66	-37.1543	27.9351
G7	10	29.812	19.45	0.5	416666.66	-23.3015	28.3228
G8	10	29.935	19.45	0.5	416666.66	-31.6597	28.0447

Tabla 5.4.20 Resultados de los presupuesto de potencia para el grupo G, enlace de retorno.

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

Los resultados obtenidos en las tablas anteriores hacen referencia al E_b/N_0 ya que es el parámetro que representa la calidad de la señal transmitida en la cual se encuentra involucrado un factor que distorsiona la señal, habrán bits erróneos y no habría manera de recuperar la señal correcta el cual es el BER (Bit Error Rate) que es una medida de la probabilidad de los errores que tenga la transmisión debido a la intensidad del ruido así como la atenuación por diversos factores.

Las tablas muestran un comportamiento el cual depende de la ubicación y la cantidad de lluvia. En los grupos A, B y C los resultados son buenos alrededor de 17 dB ya que el E_b/N_0 mínimo requerido por el estándar DVB-S2 es de 11 dB, en el grupo D comienza a decaer oscilando entre 5 y 10 dB y para los grupos E, F y G tenemos resultados por debajo de 5 dB que está por debajo de los requerimientos del estándar DVB-S2, esto nos afecta directamente a la potencia de la señal C/N_0 que está implicado directamente en el E_b/N_0 ya que, como se mencionó, es un parámetro de la potencia de la señal y uno de los factores que la afectan directamente es la atenuación por lluvia para la banda Ka la cual tiene longitud de onda alrededor de 1 cm y es comparable con el tamaño de las gotas de lluvia, este es el principal motivo de los resultados malos en los grupos mencionados para el peor de los casos. El C/N mínimo obtenido en el presupuesto está alrededor de 20 dB para los Grupos A y B, para los grupos C y D alrededor de 10 dB y los grupos E, F y G está por debajo de 5 dB.

En la figura 5.4.3 vemos una gráfica general de los resultados del E_b/N_0 del enlace que va del Hub a la VSAT para cada grupo y área, ésta nos muestra los resultados que van decayendo en los diferentes grupos que es menor debido a una frecuencia menor en comparación con la del retorno.

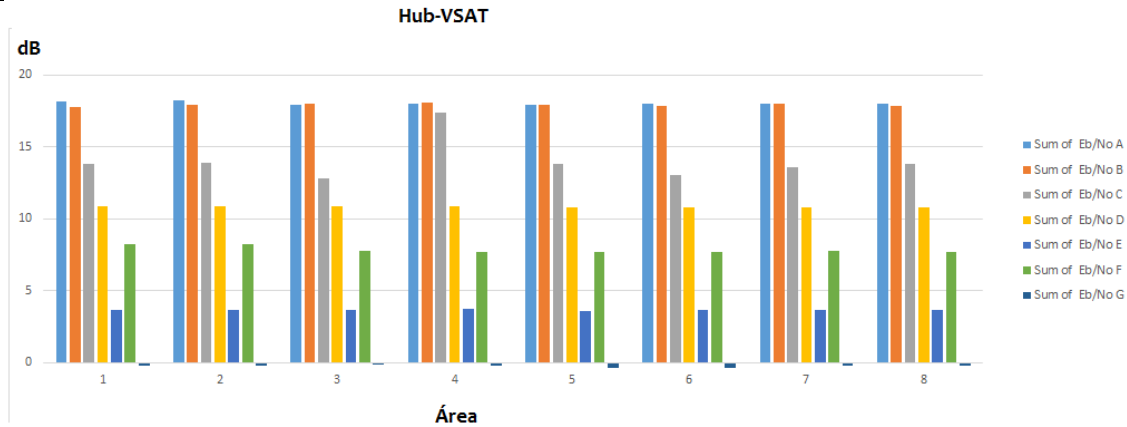


Figura 5.4.3 Eb/No del Hub a la VSAT

La figura 5.4.4 es una gráfica general de los resultados del Eb/No de la VSAT al Hub con cada grupo y área, ésta muestra resultados que van decayendo en los diferentes grupos debido a la frecuencia y la intensidad de lluvia, en los primeros grupos A, B y C hay valores positivos, mientras que para el grupo D tiene valores no buenos y en los últimos grupos E, F y G se tienen valores muy malos.



Figura 5.4.4 Eb/No de la VSAT al Hub.

CAPITULO 5 PROPUESTA DE LA PLATAFORMA DE COMUNICACIONES

En la región de los grupos D, E, F y G es muy representativo el índice de precipitación de lluvia, por tal motivo no es recomendable el uso de banda Ka en estas regiones para la posición satelital usada.

Se usa una modulación QPSK por recomendación del estándar de Difusión de Video Digital por Satélite (DVB-S2, segunda generación) el cual hace la recomendación debido a la gran eficiencia de datos binarios sin mencionar la simplicidad de los amplificadores y equipos receptores, se utiliza una potencia constante para amplificadores que trabajan en una zona no lineal de los transpondedores del satélite ya que trabajan cerca del punto de saturación.

CONCLUSIONES

De acuerdo al objetivo principal de este trabajo que consiste en el diseño de una plataforma de comunicaciones utilizando la banda de frecuencias Ka para el territorio Nacional y Centroamérica, los resultados obtenidos en este trabajo nos muestran que es factible que nuestra plataforma pueda ofrecer servicios de internet, voz y video para la región de México gracias a que en esta región las pérdidas por lluvia son menores a comparación con las pérdidas existentes en la región de Centroamérica y del Caribe.

La plataforma diseñada nos permite utilizar de forma eficiente el ancho de banda disponible para las comunicaciones comerciales en la banda Ka gracias a que se propone hacer uso de la técnica de reúso de frecuencias geográfico y por polarización. El usar estas técnicas nos permite incrementar setecientos por ciento el ancho de banda disponible.

Con 56 haces puntuales de 390 kilómetros de diámetro propuestos en nuestra plataforma se lograron abarcar las zonas que nos interesaban cubrir. Dada la ambición del proyecto y con los recursos con los que contábamos para explotar al máximo el uso de la banda Ka se planteó extender los servicios brindados por el satélite a la zona del Caribe.

Sin embargo, por la posición del satélite y después de analizar los resultados obtenidos en el presupuesto de enlace concluimos que no es viable utilizar nuestra plataforma en las zonas de Centroamérica y el Caribe debido a que las pérdidas causadas por la lluvia son mayores en dichas regiones, además por la lejanía que existe entre dichas zonas y la posición del satélite ocasiona pérdidas tales que impiden que se establezca una correcta comunicación y con esto el servicio brindado sería ineficiente.

Para lograr la cobertura y brindar servicio a dichas zonas se tendría que ubicar nuestro satélite en una posición más al este, lo cual por la regulación actual no es posible.

CONCLUSIONES

Respecto a los resultados obtenidos para la región de México observamos que el presupuesto de enlace da excelentes resultados, lo que permitirá brindar los servicios de internet, voz y datos de manera óptima; y esto representa un incremento en la accesibilidad de servicios que son parte fundamental para el desarrollo del país y la reducción de la brecha digital actual.

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

A continuación se muestran las tablas correspondientes a las atenuaciones correspondientes al tráfico que va del Satélite a las VSAT y el que va de las VSAT al satélite, ya que son las tablas más representativas en relación a los enlaces debido a que las VSAT transmiten a una potencia menor y manejan frecuencias altas. Las tablas se encuentran separadas por las categorías de atenuación por lluvia, atenuación por gases atmosféricos y por pérdidas totales, estas pérdidas totales contemplan las atenuaciones antes mencionadas y agregando las atenuaciones por nubes y por pérdidas de propagación en espacio libre.

Tablas del grupo A ascenso y descenso para lluvia.

GRUPO A						
		Ubicación				Cálculos de atenuación por lluvia
		Tipo de caso	Latitud ET en Grados	Longitud ET en Grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico de la VSAT al Satélite	Spot A1	Mejor	32.4509	-116.042	29.566	5.414108768
	Spot A1	Peor	31.4364	-115.041	29.566	8.175853818
	Spot A2	Mejor	28.3256	-113.502	29.689	5.846820839
	Spot A2	Peor	27.6668	-114.868	29.689	7.834096971
	Spot A3	Mejor	31.4481	-111.443	29.812	6.025069862
	Spot A3	Peor	31.3106	-113.514	29.812	8.137347781
	Spot A4	Mejor	29.8693	-110.372	29.935	5.5724682
	Spot A4	Peor	28.8537	-111.981	29.935	7.907507556
	Spot A5	Mejor	26.5612	-112.151	29.566	5.932543513
	Spot A5	Peor	26.7523	-113.561	29.566	7.767735128
	Spot A6	Mejor	26.5398	-107.759	29.689	3.443465661
	Spot A6	Peor	25.682	-109.086	29.689	7.711257878
	Spot A7	Mejor	23.1851	-109.927	29.812	5.31122457
	Spot A7	Peor	23.5807	-109.498	29.812	7.561519593
	Spot A8	Mejor	24.3227	-105.968	29.935	2.144577095
	Spot A8	Peor	23.1828	-106.421	29.935	7.5883827

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

GRUPO A						
		Ubicación				Cálculos de atenuación por lluvia
		Tipo de caso	Latitud ET en Grados	Longitud ET en Grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Trafico del Satélite a la VSAT	Spot A1	Mejor	32.4509	-116.0417	19.766	3.434516838
	Spot A1	Peor	31.4364	-115.0411	19.766	5.281694014
	Spot A2	Mejor	28.3256	-113.5018	19.889	3.76857884
	Spot A2	Peor	27.6668	-114.8678	19.889	5.110169604
	Spot A3	Mejor	31.4481	-111.4434	20.012	3.7876802
	Spot A3	Peor	31.3106	-113.514	20.012	5.170592309
	Spot A4	Mejor	29.8693	-110.3719	20.135	3.508574479
	Spot A4	Peor	28.8537	-111.9807	20.135	5.055745868
	Spot A5	Mejor	26.5612	-112.1514	19.766	3.867172077
	Spot A5	Peor	26.7523	-113.5605	19.766	5.104733343
	Spot A6	Mejor	26.5398	-107.7585	19.889	2.154657199
	Spot A6	Peor	25.682	-109.0862	19.889	5.056975481
	Spot A7	Mejor	23.1851	-109.9272	20.012	3.423018768
	Spot A7	Peor	23.5807	-109.4978	20.012	4.924644162
	Spot A8	Mejor	24.3227	-105.9683	20.135	1.315339661
	Spot A8	Peor	23.1828	-106.4213	20.135	4.919620743

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Tablas del grupo A ascenso y descenso para gases atmosféricos.

GRUPO A						
		Ubicación				Cálculos de atenuación por gases atmosféricos
		Tipo de caso	Latitud ET en Grados	Longitud ET en Grados	Frecuencia (GHz)	Perdidas por gases Lg (dB)
Trafico de la VSAT al Satélite	Spot A1	Mejor	32.4509	-116.0417	29.566	2.288841546
	Spot A1	Peor	31.4364	-115.0411	29.566	2.27184243
	Spot A2	Mejor	28.3256	-113.5018	29.689	2.228703017
	Spot A2	Peor	27.6668	-114.8678	29.689	2.221718765
	Spot A3	Mejor	31.4481	-111.4434	29.812	2.271507985
	Spot A3	Peor	31.3106	-113.514	29.812	2.268848956
	Spot A4	Mejor	29.8693	-110.3719	29.935	2.250484271
	Spot A4	Peor	28.8537	-111.9807	29.935	2.235512466
	Spot A5	Mejor	26.5612	-112.1514	29.566	2.208325104
	Spot A5	Peor	26.7523	-113.5605	29.566	2.210324417
	Spot A6	Mejor	26.5398	-107.7585	29.689	2.215836598
	Spot A6	Peor	25.682	-109.0862	29.689	2.203114059
	Spot A7	Mejor	23.1851	-109.9272	29.812	2.177290126
	Spot A7	Peor	23.5807	-109.4978	29.812	2.18167799
	Spot A8	Mejor	24.3227	-105.9683	29.935	2.199426024
	Spot A8	Peor	23.1828	-106.4213	29.935	2.187063003

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

GRUPO A						
		Ubicación				Cálculos de atenuación por gases atmosféricos
		Tipo de caso	Latitud ET en Grados	Longitud ET en Grados	Frecuencia (GHz)	Perdidas por gases Lg (dB)
Trafico del Satélite a la VSAT	Spot A1	Mejor	32.4509	-116.0417	19.766	2.861051932
	Spot A1	Peor	31.4364	-115.0411	19.766	2.839803038
	Spot A2	Mejor	28.3256	-113.5018	19.889	2.785878771
	Spot A2	Peor	27.6668	-114.8678	19.889	2.777148456
	Spot A3	Mejor	31.4481	-111.4434	20.012	2.839384982
	Spot A3	Peor	31.3106	-113.514	20.012	2.836061195
	Spot A4	Mejor	29.8693	-110.3719	20.135	2.813105338
	Spot A4	Peor	28.8537	-111.9807	20.135	2.794390582
	Spot A5	Mejor	26.5612	-112.1514	19.766	2.76040638
	Spot A5	Peor	26.7523	-113.5605	19.766	2.762905522
	Spot A6	Mejor	26.5398	-107.7585	19.889	2.769795748
	Spot A6	Peor	25.682	-109.0862	19.889	2.753892574
	Spot A7	Mejor	23.1851	-109.9272	20.012	2.721612658
	Spot A7	Peor	23.5807	-109.4978	20.012	2.727097488
	Spot A8	Mejor	24.3227	-105.9683	20.135	2.74928253
	Spot A8	Peor	23.1828	-106.4213	20.135	2.733828754

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Tablas del grupo A ascenso y descenso para Pérdidas totales.

Grupo A						
		Ubicación				Cálculos de atenuación total en el trayecto
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico de la Vsat al Satélite	Spot A1	Mejor	32.4509	-116.0417	29.566	222.1255
	Spot A1	Peor	31.4364	-115.0411	29.566	224.8549
	Spot A2	Mejor	28.3256	-113.5018	29.689	222.4795
	Spot A2	Peor	27.6668	-114.8678	29.689	224.4533
	Spot A3	Mejor	31.4481	-111.4434	29.812	222.7755
	Spot A3	Peor	31.3106	-113.514	29.812	224.8827
	Spot A4	Mejor	29.8693	-110.3719	29.935	222.3186
	Spot A4	Peor	28.8537	-111.9807	29.935	224.6249
	Spot A5	Mejor	26.5612	-112.1514	29.566	222.4898
	Spot A5	Peor	26.7523	-113.5605	29.566	224.3289
	Spot A6	Mejor	26.5398	-107.7585	29.689	220.0513
	Spot A6	Peor	25.682	-109.0862	29.689	224.2945
	Spot A7	Mejor	23.1851	-109.9272	29.812	221.8801
	Spot A7	Peor	23.5807	-109.4978	29.812	224.139
	Spot A8	Mejor	24.3227	-105.9683	29.935	218.7923
	Spot A8	Peor	23.1828	-106.4213	29.935	224.2121

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo A						
		Ubicación				Cálculos de atenuación total en el trayecto
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot A1	Mejor	32.4509	-116.0417	19.766	216.7628374
	Spot A1	Peor	31.4364	-115.0411	19.766	218.5769001
	Spot A2	Mejor	28.3256	-113.5018	19.889	217.0329965
	Spot A2	Peor	27.6668	-114.8678	19.889	218.3607871
	Spot A3	Mejor	31.4481	-111.4434	20.012	217.1896675
	Spot A3	Peor	31.3106	-113.514	20.012	218.5673871
	Spot A4	Mejor	29.8693	-110.3719	20.135	216.9226353
	Spot A4	Peor	28.8537	-111.9807	20.135	218.4403664
	Spot A5	Mejor	26.5612	-112.1514	19.766	217.0373651
	Spot A5	Peor	26.7523	-113.5605	19.766	218.2788948
	Spot A6	Mejor	26.5398	-107.7585	19.889	215.3936309
	Spot A6	Peor	25.682	-109.0862	19.889	218.2706973
	Spot A7	Mejor	23.1851	-109.9272	20.012	216.6387394
	Spot A7	Peor	23.5807	-109.4978	29.812	218.149153
	Spot A8	Mejor	24.3227	-105.9683	29.935	214.6284974
	Spot A8	Peor	23.1828	-106.4213	29.935	218.2081214

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Tablas del grupo B ascenso y descenso para lluvia.

Grupo B						
		Ubicación				Cálculos de atenuación por lluvia
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico de la Vsat al satélite	Spot B1	Mejor	31.6834	-106.5515	29.566	4.809176355
	Spot B1	Peor	31.6834	-106.5515	29.566	8.273682659
	Spot B2	Mejor	29.5291	-107.8757	29.689	3.716270068
	Spot B2	Peor	28.1301	-109.6759	29.689	7.574862649
	Spot B3	Mejor	26.2159	-106.3624	29.812	2.371197657
	Spot B3	Peor	25.1289	-107.3724	29.812	7.328072989
	Spot B4	Mejor	27.5127	-104.6532	29.935	4.75814275
	Spot B4	Peor	29.0936	-103.0998	29.935	6.970870289
	Spot B5	Mejor	25.5739	-101.8306	29.566	4.070611588
	Spot B5	Peor	27.497	-101.1055	29.566	7.426438813
	Spot B6	Mejor	29.08	-102.6361	29.689	3.510851548
	Spot B6	Peor	28.2375	-100.2848	29.689	7.804104276
	Spot B7	Mejor	30.546	-108.6301	29.812	4.010166536
	Spot B7	Peor	30.5863	-111.6133	29.812	7.120393141
	Spot B8	Mejor	25.3425	-100.4722	29.935	2.840951921
	Spot B8	Peor	25.9415	-97.6151	29.935	8.132488384

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo B						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por lluvia	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot B1	Mejor	31.6834	-106.5515	19.766	3.04111214
	Spot B1	Peor	31.6834	-106.5515	19.766	5.327907146
	Spot B2	Mejor	29.5291	-107.8757	19.889	2.304636658
	Spot B2	Peor	28.1301	-109.6759	19.889	4.92524451
	Spot B3	Mejor	26.2159	-106.3624	20.012	1.453888123
	Spot B3	Peor	25.1289	-107.3724	20.012	4.739978664
	Spot B4	Mejor	27.5127	-104.6532	20.135	2.989382956
	Spot B4	Peor	29.0936	-103.0998	20.135	4.421565258
	Spot B5	Mejor	25.5739	-101.8306	19.766	2.553031127
	Spot B5	Peor	27.497	-101.1055	19.766	4.800646661
	Spot B6	Mejor	29.08	-102.6361	19.889	2.161737758
	Spot B6	Peor	28.2375	-100.2848	19.889	5.008687932
	Spot B7	Mejor	30.546	-108.6301	20.012	2.446282127
	Spot B7	Peor	30.5863	-111.6133	29.812	4.521014729
	Spot B8	Mejor	25.3425	-100.4722	29.935	1.733766826
	Spot B8	Peor	25.9415	-97.6151	29.935	5.176817221

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Tablas del grupo B ascenso y descenso para gases atmosféricos.

Grupo B						
		Ubicación				Cálculos de atenuación por gases atmosféricos
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Pérdidas por gases atmosféricos Lg (dB)
Tráfico de la VSAT al satélite	Spot B1	Mejor	31.6834	-106.5515	29.566	2.286521019
	Spot B1	Peor	31.6834	-106.5515	29.566	2.286521019
	Spot B2	Mejor	29.5291	-107.8757	29.689	2.251588321
	Spot B2	Peor	28.1301	-109.6759	29.689	2.229445462
	Spot B3	Mejor	26.2159	-106.3624	29.812	2.217145579
	Spot B3	Peor	25.1289	-107.3724	29.812	2.202180645
	Spot B4	Mejor	27.5127	-104.6532	29.935	2.239274523
	Spot B4	Peor	29.0936	-103.0998	29.935	2.267178183
	Spot B5	Mejor	25.5739	-101.8306	29.566	2.234310191
	Spot B5	Peor	27.497	-101.1055	29.566	2.260662499
	Spot B6	Mejor	29.08	-102.6361	29.689	2.269831416
	Spot B6	Peor	28.2375	-100.2848	29.689	2.275740189
	Spot B7	Mejor	30.546	-108.6301	29.812	2.263350171
	Spot B7	Peor	30.5863	-111.6133	29.812	2.258910552
	Spot B8	Mejor	25.3425	-100.4722	29.935	2.24167883
	Spot B8	Peor	25.9415	-97.6151	29.935	2.272697407

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo B						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por gases atmosféricos	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot B1	Mejor	31.6834	-106.5515	19.766	2.858151273
	Spot B1	Peor	31.6834	-106.5515	19.766	2.858151273
	Spot B2	Mejor	29.5291	-107.8757	19.889	2.814485401
	Spot B2	Peor	28.1301	-109.6759	19.889	2.786806827
	Spot B3	Mejor	26.2159	-106.3624	20.012	2.771431974
	Spot B3	Peor	25.1289	-107.3724	20.012	2.752725807
	Spot B4	Mejor	27.5127	-104.6532	20.135	2.799093153
	Spot B4	Peor	29.0936	-103.0998	20.135	2.833972729
	Spot B5	Mejor	25.5739	-101.8306	19.766	2.792887738
	Spot B5	Peor	27.497	-101.1055	19.766	2.825828124
	Spot B6	Mejor	29.08	-102.6361	19.889	2.83728927
	Spot B6	Peor	28.2375	-100.2848	19.889	2.844675237
	Spot B7	Mejor	30.546	-108.6301	20.012	2.829187714
	Spot B7	Peor	30.5863	-111.6133	29.812	2.82363819
	Spot B8	Mejor	25.3425	-100.4722	29.935	2.802098537
	Spot B8	Peor	25.9415	-97.6151	29.935	2.840871759

Tablas del grupo B ascenso y descenso para Pérdidas totales.

Grupo B						
		Ubicación				Cálculos de atenuación total en el trayecto
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico de la Vsat al satélite	Spot B1	Mejor	31.6834	-106.5515	29.566	221.2411
	Spot B1	Peor	31.6834	-106.5515	29.566	224.5711
	Spot B2	Mejor	29.5291	-107.8757	29.689	219.8365
	Spot B2	Peor	28.1301	-109.6759	29.689	223.5069
	Spot B3	Mejor	26.2159	-106.3624	29.812	218.1736
	Spot B3	Peor	25.1289	-107.3724	29.812	222.9571
	Spot B4	Mejor	27.5127	-104.6532	29.935	220.4019
	Spot B4	Peor	29.0936	-103.0998	29.935	222.5788
	Spot B5	Mejor	25.5739	-101.8306	29.566	219.3553
	Spot B5	Peor	27.497	-101.1055	29.566	222.6884
	Spot B6	Mejor	29.08	-102.6361	29.689	218.7396
	Spot B6	Peor	28.2375	-100.2848	29.689	222.961
	Spot B7	Mejor	30.546	-108.6301	29.812	219.0712
	Spot B7	Peor	30.5863	-111.6133	29.812	222.0838
	Spot B8	Mejor	25.3425	-100.4722	29.935	217.6955
	Spot B8	Peor	25.9415	-97.6151	29.935	223.0524

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo B						
		Ubicación				Cálculos de atenuación total en el trayecto
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot B1	Mejor	31.6834	-106.5515	19.766	214.4329
	Spot B1	Peor	31.6834	-106.5515	19.766	216.6854
	Spot B2	Mejor	29.5291	-107.8757	19.889	213.5196
	Spot B2	Peor	28.1301	-109.6759	19.889	216.004
	Spot B3	Mejor	26.2159	-106.3624	20.012	212.5046
	Spot B3	Peor	25.1289	-107.3724	20.012	215.699
	Spot B4	Mejor	27.5127	-104.6532	20.135	214.2192
	Spot B4	Peor	29.0936	-103.0998	20.135	215.8265
	Spot B5	Mejor	25.5739	-101.8306	19.766	213.6376
	Spot B5	Peor	27.497	-101.1055	19.766	216.0769
	Spot B6	Mejor	29.08	-102.6361	19.889	213.5931
	Spot B6	Peor	28.2375	-100.2848	19.889	216.5318
	Spot B7	Mejor	30.546	-108.6301	20.012	214.0159
	Spot B7	Peor	30.5863	-111.6133	29.812	216.1373
	Spot B8	Mejor	25.3425	-100.4722	29.935	213.3782
	Spot B8	Peor	25.9415	-97.6151	29.935	217.0986

Tablas del grupo C ascenso y descenso para lluvia.

Grupo C						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por lluvia	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico de la Vsat al satélite	Spot C1	Mejor	21.8605	-104.35	29.566	9.912245694
	Spot C1	Peor	20.6516	-105.2261	29.566	16.70012308
	Spot C2	Mejor	23.71	-104.9145	29.689	7.023292034
	Spot C2	Peor	22.906	-105.8736	29.689	16.61903179
	Spot C3	Mejor	23.6476	-99.1927	29.812	14.20331776
	Spot C3	Peor	24.4918	-97.7441	29.812	18.25620186
	Spot C4	Mejor	19.6721	-102.2789	29.935	7.217506198
	Spot C4	Peor	20.6561	-103.711	29.935	11.12436937
	Spot C5	Mejor	19.9566	-103.7173	29.566	7.654880722
	Spot C5	Peor	19.1196	-104.577	29.566	16.6404049
	Spot C6	Mejor	19.8505	-99.661	29.689	5.652105725
	Spot C6	Peor	22.2615	-97.8884	29.689	17.89216536
	Spot C7	Mejor	25.2753	-100.5828	29.812	5.317809476
	Spot C7	Peor	24.2579	-99.1429	29.812	17.11485217
	Spot C8	Mejor	19.6658	-100.2696	29.935	4.218562214
	Spot C8	Peor	17.5802	-101.4821	29.935	16.70897921

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo C						
		Ubicación				Cálculos de atenuación por lluvia
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot C1	Mejor	21.8605	-104.35	19.766	3.713816915
	Spot C1	Peor	20.6516	-105.2261	19.766	6.363506527
	Spot C2	Mejor	23.71	-104.9145	19.889	2.547306776
	Spot C2	Peor	22.906	-105.8736	19.889	6.280083992
	Spot C3	Mejor	23.6476	-99.1927	20.012	5.380324533
	Spot C3	Peor	24.4918	-97.7441	20.012	6.892799255
	Spot C4	Mejor	19.6721	-102.2789	20.135	2.718725059
	Spot C4	Peor	20.6561	-103.711	20.135	4.28835133
	Spot C5	Mejor	19.9566	-103.7173	19.766	2.844928588
	Spot C5	Peor	19.1196	-104.577	19.766	6.366181426
	Spot C6	Mejor	19.8505	-99.661	19.889	1.998345518
	Spot C6	Peor	22.2615	-97.8884	19.889	6.615261548
	Spot C7	Mejor	25.2753	-100.5828	20.012	1.893143068
	Spot C7	Peor	24.2579	-99.1429	29.812	6.498208067
	Spot C8	Mejor	19.6658	-100.2696	29.935	1.500356066
	Spot C8	Peor	17.5802	-101.4821	29.935	6.520189705

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Tablas del grupo C ascenso y descenso para gases atmosféricos.

Grupo C						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por gases atmosféricos	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Pérdidas por gases atmosféricos Lg (dB)
Tráfico de la VSAT al satélite	Spot C1	Mejor	21.8605	-104.35	29.566	2.184958777
	Spot C1	Peor	20.6516	-105.2261	29.566	2.171186297
	Spot C2	Mejor	23.71	-104.9145	29.689	2.198321376
	Spot C2	Peor	22.906	-105.8736	29.689	2.186799778
	Spot C3	Mejor	23.6476	-99.1927	29.812	2.235451598
	Spot C3	Peor	24.4918	-97.7441	29.812	2.256589754
	Spot C4	Mejor	19.6721	-102.2789	29.935	2.180065547
	Spot C4	Peor	20.6561	-103.711	29.935	2.17881194
	Spot C5	Mejor	19.9566	-103.7173	29.566	2.173582793
	Spot C5	Peor	19.1196	-104.577	29.566	2.163209805
	Spot C6	Mejor	19.8505	-99.661	29.689	2.2003394
	Spot C6	Peor	22.2615	-97.8884	29.689	2.234840815
	Spot C7	Mejor	25.2753	-100.5828	29.812	2.240147531
	Spot C7	Peor	24.2579	-99.1429	29.812	2.241643927
	Spot C8	Mejor	19.6658	-100.2696	29.935	2.194185411
	Spot C8	Peor	17.5802	-101.4821	29.935	2.171474295

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo C						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por gases atmosféricos	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot C1	Mejor	21.8605	-104.35	19.766	2.731198471
	Spot C1	Peor	20.6516	-105.2261	19.766	2.713982871
	Spot C2	Mejor	23.71	-104.9145	19.889	2.74790172
	Spot C2	Peor	22.906	-105.8736	19.889	2.733499723
	Spot C3	Mejor	23.6476	-99.1927	20.012	2.794314497
	Spot C3	Peor	24.4918	-97.7441	20.012	2.820737192
	Spot C4	Mejor	19.6721	-102.2789	20.135	2.725081933
	Spot C4	Peor	20.6561	-103.711	20.135	2.723514926
	Spot C5	Mejor	19.9566	-103.7173	19.766	2.716978491
	Spot C5	Peor	19.1196	-104.577	19.766	2.704012256
	Spot C6	Mejor	19.8505	-99.661	19.889	2.75042425
	Spot C6	Peor	22.2615	-97.8884	19.889	2.793551019
	Spot C7	Mejor	25.2753	-100.5828	20.012	2.800184414
	Spot C7	Peor	24.2579	-99.1429	29.812	2.802054908
	Spot C8	Mejor	19.6658	-100.2696	29.935	2.742731763
	Spot C8	Peor	17.5802	-101.4821	29.935	2.714342869

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Tablas del grupo C ascenso y descenso para Pérdidas totales.

Grupo C						
		Ubicación				Cálculos de atenuación total en el trayecto
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico de la Vsat al satélite	Spot C1	Mejor	21.8605	-104.35	29.566	226.4241
	Spot C1	Peor	20.6516	-105.2261	29.566	233.185
	Spot C2	Mejor	23.71	-104.9145	29.689	223.5972
	Spot C2	Peor	22.906	-105.8736	29.689	233.1705
	Spot C3	Mejor	23.6476	-99.1927	29.812	230.8848
	Spot C3	Peor	24.4918	-97.7441	29.812	234.9782
	Spot C4	Mejor	19.6721	-102.2789	29.935	223.8275
	Spot C4	Peor	20.6561	-103.711	29.935	227.7319
	Spot C5	Mejor	19.9566	-103.7173	29.566	224.1445
	Spot C5	Peor	19.1196	-104.577	29.566	233.1097
	Spot C6	Mejor	19.8505	-99.661	29.689	222.2299
	Spot C6	Peor	22.2615	-97.8884	29.689	234.5366
	Spot C7	Mejor	25.2753	-100.5828	29.812	222.0083
	Spot C7	Peor	24.2579	-99.1429	29.812	233.8083
	Spot C8	Mejor	19.6658	-100.2696	29.935	220.8561
	Spot C8	Peor	17.5802	-101.4821	29.935	233.3022

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo C						
		Ubicación				Cálculos de atenuación total en el trayecto
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot C1	Mejor	21.8605	-104.35	19.766	216.8374
	Spot C1	Peor	20.6516	-105.2261	19.766	219.4595
	Spot C2	Mejor	23.71	-104.9145	19.889	215.7514
	Spot C2	Peor	22.906	-105.8736	19.889	219.4612
	Spot C3	Mejor	23.6476	-99.1927	20.012	218.7116
	Spot C3	Peor	24.4918	-97.7441	20.012	220.2656
	Spot C4	Mejor	19.6721	-102.2789	20.135	215.9932
	Spot C4	Peor	20.6561	-103.711	20.135	217.5603
	Spot C5	Mejor	19.9566	-103.7173	19.766	215.9457
	Spot C5	Peor	19.1196	-104.577	19.766	219.4461
	Spot C6	Mejor	19.8505	-99.661	19.889	215.2065
	Spot C6	Peor	22.2615	-97.8884	19.889	219.8918
	Spot C7	Mejor	25.2753	-100.5828	20.012	215.2337
	Spot C7	Peor	24.2579	-99.1429	29.812	219.8417
	Spot C8	Mejor	19.6658	-100.2696	29.935	214.803
	Spot C8	Peor	17.5802	-101.4821	29.935	219.7774

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Tablas del grupo D ascenso y descenso para lluvia.

Grupo D						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por lluvia	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico de la Vsat al satélite	Spot D1	Mejor	17.0752	-97.1154	29.566	9.3937549
	Spot D1	Peor	16.7223	-99.7749	29.566	22.67767084
	Spot D2	Mejor	19.6394	-98.0879	29.689	7.495671517
	Spot D2	Peor	19.2337	-96.1206	29.689	23.91728471
	Spot D3	Mejor	16.8805	-97.0886	29.812	8.633011469
	Spot D3	Peor	16.1986	-94.9617	29.812	23.71858371
	Spot D4	Mejor	15.4686	-91.4714	29.935	7.118344785
	Spot D4	Peor	13.7524	-90.193	29.935	25.02531043
	Spot D5	Mejor	18.9332	-89.6509	29.566	24.5854814
	Spot D5	Peor	21.0925	-90.2219	29.566	26.35062403
	Spot D6	Mejor	15.6332	-90.6175	29.689	14.50405827
	Spot D6	Peor	17.2442	-87.9145	29.689	26.62025214
	Spot D7	Mejor	16.5605	-92.4844	29.812	13.75136995
	Spot D7	Peor	18.7086	-92.1236	29.812	25.05551857
	Spot D8	Mejor	18.4122	-89.2943	29.935	24.62609208
	Spot D8	Peor	20.4822	-86.8857	29.935	27.63606708

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo D						
		Ubicación				Cálculos de atenuación por lluvia
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot D1	Mejor	17.0752	-97.1154	19.766	2.827701615
	Spot D1	Peor	16.7223	-99.7749	19.766	7.04000071
	Spot D2	Mejor	19.6394	-98.0879	19.889	2.18830978
	Spot D2	Peor	19.2337	-96.1206	19.889	7.241438254
	Spot D3	Mejor	16.8805	-97.0886	20.012	2.68290497
	Spot D3	Peor	16.1986	-94.9617	20.012	7.495500193
	Spot D4	Mejor	15.4686	-91.4714	20.135	2.106983819
	Spot D4	Peor	13.7524	-90.193	20.135	7.717654415
	Spot D5	Mejor	18.9332	-89.6509	19.766	7.128408984
	Spot D5	Peor	21.0925	-90.2219	19.766	7.608969037
	Spot D6	Mejor	15.6332	-90.6175	19.889	4.249110284
	Spot D6	Peor	17.2442	-87.9145	19.889	7.658118486
	Spot D7	Mejor	16.5605	-92.4844	20.012	4.231303646
	Spot D7	Peor	18.7086	-92.1236	29.812	7.711461569
	Spot D8	Mejor	18.4122	-89.2943	29.935	7.43412968
	Spot D8	Peor	20.4822	-86.8857	29.935	8.133576149

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Tablas del grupo D ascenso y descenso para gases atmosféricos.

Grupo D						
		Ubicación				Cálculos de atenuación por gases atmosféricos
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Pérdidas por gases atmosféricos Lg (dB)
Tráfico de la VSAT al satélite	Spot D1	Mejor	17.0752	-97.1154	29.566	2.205032343
	Spot D1	Peor	16.7223	-99.7749	29.566	2.179082154
	Spot D2	Mejor	19.6394	-98.0879	29.689	2.212497585
	Spot D2	Peor	19.2337	-96.1206	29.689	2.22926849
	Spot D3	Mejor	16.8805	-97.0886	29.812	2.204143848
	Spot D3	Peor	16.1986	-94.9617	29.812	2.22312573
	Spot D4	Mejor	15.4686	-91.4714	29.935	2.264700146
	Spot D4	Peor	13.7524	-90.193	29.935	2.275488101
	Spot D5	Mejor	18.9332	-89.6509	29.566	2.314130683
	Spot D5	Peor	21.0925	-90.2219	29.566	2.321050852
	Spot D6	Mejor	15.6332	-90.6175	29.689	2.278386875
	Spot D6	Peor	17.2442	-87.9145	29.689	2.333040804
	Spot D7	Mejor	16.5605	-92.4844	29.812	2.25647612
	Spot D7	Peor	18.7086	-92.1236	29.812	2.274992822
	Spot D8	Mejor	18.4122	-89.2943	29.935	2.316486612
	Spot D8	Peor	20.4822	-86.8857	29.935	2.374969125

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo D						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por gases atmosféricos	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot D1	Mejor	17.0752	-97.1154	19.766	2.756290429
	Spot D1	Peor	16.7223	-99.7749	19.766	2.723852693
	Spot D2	Mejor	19.6394	-98.0879	19.889	2.765621982
	Spot D2	Peor	19.2337	-96.1206	19.889	2.786585612
	Spot D3	Mejor	16.8805	-97.0886	20.012	2.75517981
	Spot D3	Peor	16.1986	-94.9617	20.012	2.778907162
	Spot D4	Mejor	15.4686	-91.4714	20.135	2.830875182
	Spot D4	Peor	13.7524	-90.193	20.135	2.844360126
	Spot D5	Mejor	18.9332	-89.6509	19.766	2.892663354
	Spot D5	Peor	21.0925	-90.2219	19.766	2.901313565
	Spot D6	Mejor	15.6332	-90.6175	19.889	2.847983594
	Spot D6	Peor	17.2442	-87.9145	19.889	2.916301005
	Spot D7	Mejor	16.5605	-92.4844	20.012	2.82059515
	Spot D7	Peor	18.7086	-92.1236	29.812	2.843741028
	Spot D8	Mejor	18.4122	-89.2943	29.935	2.895608265
	Spot D8	Peor	20.4822	-86.8857	29.935	2.968711406

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Tablas del grupo D ascenso y descenso para Pérdidas totales.

Grupo D						
		Ubicación				Cálculos de atenuación total en el trayecto
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico de la Vsat al satélite	Spot D1	Mejor	17.0752	-97.1154	29.566	225.9446
	Spot D1	Peor	16.7223	-99.7749	29.566	239.1781
	Spot D2	Mejor	19.6394	-98.0879	29.689	224.0971
	Spot D2	Peor	19.2337	-96.1206	29.689	240.551
	Spot D3	Mejor	16.8805	-97.0886	29.812	225.2541
	Spot D3	Peor	16.1986	-94.9617	29.812	240.3764
	Spot D4	Mejor	15.4686	-91.4714	29.935	223.8916
	Spot D4	Peor	13.7524	-90.193	29.935	241.8191
	Spot D5	Mejor	18.9332	-89.6509	29.566	241.3446
	Spot D5	Peor	21.0925	-90.2219	29.566	243.1228
	Spot D6	Mejor	15.6332	-90.6175	29.689	231.2316
	Spot D6	Peor	17.2442	-87.9145	29.689	243.4509
	Spot D7	Mejor	16.5605	-92.4844	29.812	230.4731
	Spot D7	Peor	18.7086	-92.1236	29.812	241.8126
	Spot D8	Mejor	18.4122	-89.2943	29.935	241.4974
	Spot D8	Peor	20.4822	-86.8857	29.935	244.6166

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo D						
		Ubicación				Cálculos de atenuación total en el trayecto
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot D1	Mejor	17.0752	-97.1154	19.766	215.9914
	Spot D1	Peor	16.7223	-99.7749	19.766	220.1519
	Spot D2	Mejor	19.6394	-98.0879	19.889	215.4207
	Spot D2	Peor	19.2337	-96.1206	19.889	220.507
	Spot D3	Mejor	16.8805	-97.0886	20.012	215.9522
	Spot D3	Peor	16.1986	-94.9617	20.012	220.8025
	Spot D4	Mejor	15.4686	-91.4714	20.135	215.5489
	Spot D4	Peor	13.7524	-90.193	20.135	221.1806
	Spot D5	Mejor	18.9332	-89.6509	19.766	220.5057
	Spot D5	Peor	21.0925	-90.2219	19.766	220.9997
	Spot D6	Mejor	15.6332	-90.6175	19.889	217.611
	Spot D6	Peor	17.2442	-87.9145	19.889	221.1258
	Spot D7	Mejor	16.5605	-92.4844	20.012	217.6039
	Spot D7	Peor	18.7086	-92.1236	29.812	221.1202
	Spot D8	Mejor	18.4122	-89.2943	29.935	220.9767
	Spot D8	Peor	20.4822	-86.8857	29.935	221.7883

Tablas del grupo E ascenso y descenso para lluvia.

Grupo E						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por lluvia	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico de la Vsat al satélite	Spot E1	Mejor	13.6927	-89.218	29.566	29.91748924
	Spot E1	Peor	15.8248	-87.5593	29.566	36.57935133
	Spot E2	Mejor	15.1181	-86.6583	29.689	24.37582153
	Spot E2	Peor	15.5362	-83.9759	29.689	39.10061579
	Spot E3	Mejor	13.7264	-85.1263	29.812	25.92478798
	Spot E3	Peor	11.3921	-86.0407	29.812	37.62078145
	Spot E4	Mejor	9.6599	-83.84994	29.935	15.39900016
	Spot E4	Peor	10.0329	-83.1001	29.935	39.94592674
	Spot E5	Mejor	8.8164	-82.5318	29.566	11.85229182
	Spot E5	Peor	9.0985	-81.5505	29.566	41.97920519
	Spot E6	Mejor	8.4996	-81.6425	29.689	33.98598415
	Spot E6	Peor	8.9748	-79.5176	29.689	43.35174059
	Spot E7	Mejor	13.9303	-85.0026	29.812	33.75124416
	Spot E7	Peor	15.0173	-83.1628	29.812	40.42362351
	Spot E8	Mejor	7.45844	-76.334	29.935	33.83909805
	Spot E8	Peor	9.4443	-75.9213	29.935	46.72064972

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo E						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por lluvia	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot E1	Mejor	13.6927	-89.218	19.766	6.955852343
	Spot E1	Peor	15.8248	-87.5593	19.766	8.639359786
	Spot E2	Mejor	15.1181	-86.6583	19.889	5.63128242
	Spot E2	Peor	15.5362	-83.9759	19.889	8.968350339
	Spot E3	Mejor	13.7264	-85.1263	20.012	6.373212055
	Spot E3	Peor	11.3921	-86.0407	20.012	9.17817067
	Spot E4	Mejor	9.6599	-83.84994	20.135	3.654081751
	Spot E4	Peor	10.0329	-83.1001	20.135	9.471316239
	Spot E5	Mejor	8.8164	-82.5318	19.766	2.565864969
	Spot E5	Peor	9.0985	-81.5505	19.766	9.111606379
	Spot E6	Mejor	8.4996	-81.6425	19.889	7.559262335
	Spot E6	Peor	8.9748	-79.5176	19.889	9.367457113
	Spot E7	Mejor	13.9303	-85.0026	20.012	8.052362676
	Spot E7	Peor	15.0173	-83.1628	29.812	9.561779864
	Spot E8	Mejor	7.45844	-76.334	29.935	7.822604159
	Spot E8	Peor	9.4443	-75.9213	29.935	10.48781731

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Tablas del grupo E ascenso y descenso para gases atmosféricos.

Grupo E						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por gases atmosféricos	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Pérdidas por gases atmosféricos Lg (dB)
Tráfico de la VSAT al satélite	Spot E1	Mejor	13.6927	-89.218	29.566	2.291054225
	Spot E1	Peor	15.8248	-87.5593	29.566	2.331203389
	Spot E2	Mejor	15.1181	-86.6583	29.689	2.344502847
	Spot E2	Peor	15.5362	-83.9759	29.689	2.403516186
	Spot E3	Mejor	13.7264	-85.1263	29.812	2.368783835
	Spot E3	Peor	11.3921	-86.0407	29.812	2.339780063
	Spot E4	Mejor	9.6599	-83.84994	29.935	2.380761771
	Spot E4	Peor	10.0329	-83.1001	29.935	2.399537831
	Spot E5	Mejor	8.8164	-82.5318	29.566	2.409477151
	Spot E5	Peor	9.0985	-81.5505	29.566	2.43524349
	Spot E6	Mejor	8.4996	-81.6425	29.689	2.431067335
	Spot E6	Peor	8.9748	-79.5176	29.689	2.491182348
	Spot E7	Mejor	13.9303	-85.0026	29.812	2.372412787
	Spot E7	Peor	15.0173	-83.1628	29.812	2.419709825
	Spot E8	Mejor	7.45844	-76.334	29.935	2.589464145
	Spot E8	Peor	9.4443	-75.9213	29.935	2.610142384

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo E						
		Ubicación				Cálculos de atenuación por gases atmosféricos
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot E1	Mejor	13.6927	-89.218	19.766	2.863817782
	Spot E1	Peor	15.8248	-87.5593	19.766	2.914004237
	Spot E2	Mejor	15.1181	-86.6583	19.889	2.930628559
	Spot E2	Peor	15.5362	-83.9759	19.889	3.004395232
	Spot E3	Mejor	13.7264	-85.1263	20.012	2.960979793
	Spot E3	Peor	11.3921	-86.0407	20.012	2.924725079
	Spot E4	Mejor	9.6599	-83.84994	20.135	2.975952214
	Spot E4	Peor	10.0329	-83.1001	20.135	2.999422289
	Spot E5	Mejor	8.8164	-82.5318	19.766	3.011846439
	Spot E5	Peor	9.0985	-81.5505	19.766	3.044054362
	Spot E6	Mejor	8.4996	-81.6425	19.889	3.038834168
	Spot E6	Peor	8.9748	-79.5176	19.889	3.113977935
	Spot E7	Mejor	13.9303	-85.0026	20.012	2.965515984
	Spot E7	Peor	15.0173	-83.1628	20.012	3.024637282
	Spot E8	Mejor	7.45844	-76.334	20.135	3.236830182
	Spot E8	Peor	9.4443	-75.9213	20.135	3.26267798

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Tablas del grupo E ascenso y descenso para Pérdidas totales.

Grupo E						
		Ubicación				Cálculos de atenuación total en el trayecto
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico de la Vsat al satélite	Spot E1	Mejor	13.6927	-89.218	29.566	246.633
	Spot E1	Peor	15.8248	-87.5593	29.566	253.3705
	Spot E2	Mejor	15.1181	-86.6583	29.689	241.228
	Spot E2	Peor	15.5362	-83.9759	29.689	256.0623
	Spot E3	Mejor	13.7264	-85.1263	29.812	242.8581
	Spot E3	Peor	11.3921	-86.0407	29.812	254.5
	Spot E4	Mejor	9.6599	-83.84994	29.935	232.3903
	Spot E4	Peor	10.0329	-83.1001	29.935	256.972
	Spot E5	Mejor	8.8164	-82.5318	29.566	228.7889
	Spot E5	Peor	9.0985	-81.5505	29.566	258.9631
	Spot E6	Mejor	8.4996	-81.6425	29.689	250.9983
	Spot E6	Peor	8.9748	-79.5176	29.689	260.4735
	Spot E7	Mejor	13.9303	-85.0026	29.812	250.6913
	Spot E7	Peor	15.0173	-83.1628	29.812	257.4511
	Spot E8	Mejor	7.45844	-76.334	29.935	251.2085
	Spot E8	Peor	9.4443	-75.9213	29.935	264.1267

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo E						
		Ubicación				Cálculos de atenuación total en el trayecto
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot E1	Mejor	13.6927	-89.218	19.766	220.2885
	Spot E1	Peor	15.8248	-87.5593	19.766	222.0496
	Spot E2	Mejor	15.1181	-86.6583	19.889	219.121
	Spot E2	Peor	15.5362	-83.9759	19.889	222.5706
	Spot E3	Mejor	13.7264	-85.1263	20.012	219.963
	Spot E3	Peor	11.3921	-86.0407	20.012	222.7124
	Spot E4	Mejor	9.6599	-83.84994	20.135	217.3199
	Spot E4	Peor	10.0329	-83.1001	20.135	223.1728
	Spot E5	Mejor	8.8164	-82.5318	19.766	216.1255
	Spot E5	Peor	9.0985	-81.5505	19.766	222.7198
	Spot E6	Mejor	8.4996	-81.6425	19.889	221.2135
	Spot E6	Peor	8.9748	-79.5176	19.889	223.1341
	Spot E7	Mejor	13.9303	-85.0026	20.012	221.649
	Spot E7	Peor	15.0173	-83.1628	29.812	223.2482
	Spot E8	Mejor	7.45844	-76.334	29.935	221.8769
	Spot E8	Peor	9.4443	-75.9213	29.935	224.5798

Tablas del grupo F ascenso y descenso para lluvia.

Grupo F						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por lluvia	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico de la Vsat al satélite	Spot F1	Mejor	20.9712	-89.6209	29.566	26.50337249
	Spot F1	Peor	21.595	-88.2103	29.566	27.36093654
	Spot F2	Mejor	20.908	-87.5523	29.689	27.29484625
	Spot F2	Peor	21.4928	-86.7916	29.689	27.99885764
	Spot F3	Mejor	22.7939	-83.146	29.812	27.34306576
	Spot F3	Peor	23.0979	-81.4822	29.812	31.63622266
	Spot F4	Mejor	20.0586	-76.6412	29.935	26.4692358
	Spot F4	Peor	20.7334	-75.2234	29.935	36.58054848
	Spot F5	Mejor	18.0841	-76.6234	29.566	19.80708671
	Spot F5	Peor	17.9152	-76.1833	29.566	35.15183071
	Spot F6	Mejor	24.944	-78.0461	29.689	34.98398783
	Spot F6	Peor	26.5066	-77.0761	29.689	36.47626588
	Spot F7	Mejor	22.3183	-79.8619	29.812	29.71320997
	Spot F7	Peor	22.3346	-78.1216	29.812	34.17768976
	Spot F8	Mejor	23.5422	-75.2335	29.935	37.17927538
	Spot F8	Peor	23.0857	-73.6448	29.935	39.00799076

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo F						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por lluvia	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot F1	Mejor	20.9712	-89.6209	19.766	7.687655678
	Spot F1	Peor	21.595	-88.2103	19.766	7.841465962
	Spot F2	Mejor	20.908	-87.5523	19.889	7.792039495
	Spot F2	Peor	21.4928	-86.7916	19.889	7.932446013
	Spot F3	Mejor	22.7939	-83.146	20.012	7.797046184
	Spot F3	Peor	23.0979	-81.4822	20.012	8.892537946
	Spot F4	Mejor	20.0586	-76.6412	20.135	7.128665782
	Spot F4	Peor	20.7334	-75.2234	20.135	9.712296184
	Spot F5	Mejor	18.0841	-76.6234	19.766	5.068106096
	Spot F5	Peor	17.9152	-76.1833	19.766	9.005383686
	Spot F6	Mejor	24.944	-78.0461	19.889	8.959862515
	Spot F6	Peor	26.5066	-77.0761	19.889	9.19344317
	Spot F7	Mejor	22.3183	-79.8619	20.012	8.206345095
	Spot F7	Peor	22.3346	-78.1216	29.812	9.287385018
	Spot F8	Mejor	23.5422	-75.2335	29.935	9.767146351
	Spot F8	Peor	23.0857	-73.6448	29.935	10.08526316

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Tablas del grupo F ascenso y descenso para gases atmosféricos.

Grupo F						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por gases atmosféricos	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Pérdidas por gases atmosféricos Lg (dB)
Tráfico de la VSAT al satélite	Spot F1	Mejor	20.9712	-89.6209	29.566	2.329808569
	Spot F1	Peor	21.595	-88.2103	29.566	2.359191977
	Spot F2	Mejor	20.908	-87.5523	29.689	2.365635758
	Spot F2	Peor	21.4928	-86.7916	29.689	2.38495543
	Spot F3	Mejor	22.7939	-83.146	29.812	2.476025932
	Spot F3	Peor	23.0979	-81.4822	29.812	2.521330421
	Spot F4	Mejor	20.0586	-76.6412	29.935	2.643864775
	Spot F4	Peor	20.7334	-75.2234	29.935	2.701795653
	Spot F5	Mejor	18.0841	-76.6234	29.566	2.629495253
	Spot F5	Peor	17.9152	-76.1833	29.566	2.643995426
	Spot F6	Mejor	24.944	-78.0461	29.689	2.642400898
	Spot F6	Peor	26.5066	-77.0761	29.689	2.6934858
	Spot F7	Mejor	22.3183	-79.8619	29.812	2.559511749
	Spot F7	Peor	22.3346	-78.1216	29.812	2.613487435
	Spot F8	Mejor	23.5422	-75.2335	29.935	2.728008471
	Spot F8	Peor	23.0857	-73.6448	29.935	2.787916501

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo F						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por gases atmosféricos	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot F1	Mejor	20.9712	-89.6209	19.766	2.912260711
	Spot F1	Peor	21.595	-88.2103	19.766	2.948989971
	Spot F2	Mejor	20.908	-87.5523	19.889	2.957044697
	Spot F2	Peor	21.4928	-86.7916	19.889	2.981194287
	Spot F3	Mejor	22.7939	-83.146	20.012	3.095032414
	Spot F3	Peor	23.0979	-81.4822	20.012	3.151663026
	Spot F4	Mejor	20.0586	-76.6412	20.135	3.304830969
	Spot F4	Peor	20.7334	-75.2234	20.135	3.377244566
	Spot F5	Mejor	18.0841	-76.6234	19.766	3.286869066
	Spot F5	Peor	17.9152	-76.1833	19.766	3.304994282
	Spot F6	Mejor	24.944	-78.0461	19.889	3.303001122
	Spot F6	Peor	26.5066	-77.0761	19.889	3.36685725
	Spot F7	Mejor	22.3183	-79.8619	20.012	3.199389687
	Spot F7	Peor	22.3346	-78.1216	29.812	3.266859294
	Spot F8	Mejor	23.5422	-75.2335	29.935	3.410010589
	Spot F8	Peor	23.0857	-73.6448	29.935	3.484895626

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Tablas del grupo F ascenso y descenso para Pérdidas totales.

Grupo F						
		Ubicación			Cálculos de atenuación total en el trayecto	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico de la Vsat al satélite	Spot F1	Mejor	20.9712	-89.6209	29.566	243.2919
	Spot F1	Peor	21.595	-88.2103	29.566	244.2044
	Spot F2	Mejor	20.908	-87.5523	29.689	244.1864
	Spot F2	Peor	21.4928	-86.7916	29.689	244.9263
	Spot F3	Mejor	22.7939	-83.146	29.812	244.9685
	Spot F3	Peor	23.0979	-81.4822	29.812	249.3525
	Spot F4	Mejor	20.0586	-76.6412	29.935	244.4635
	Spot F4	Peor	20.7334	-75.2234	29.935	254.6878
	Spot F5	Mejor	18.0841	-76.6234	29.566	237.6655
	Spot F5	Peor	17.9152	-76.1833	29.566	253.0386
	Spot F6	Mejor	24.944	-78.0461	29.689	252.9037
	Spot F6	Peor	26.5066	-77.0761	29.689	254.4957
	Spot F7	Mejor	22.3183	-79.8619	29.812	247.5055
	Spot F7	Peor	22.3346	-78.1216	29.812	252.0766
	Spot F8	Mejor	23.5422	-75.2335	29.935	255.3374
	Spot F8	Peor	23.0857	-73.6448	29.935	257.2815

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo F						
		Ubicación			Cálculos de atenuación total en el trayecto	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot F1	Mejor	20.9712	-89.6209	19.766	221.0952
	Spot F1	Peor	21.595	-88.2103	19.766	221.3055
	Spot F2	Mejor	20.908	-87.5523	19.889	221.3222
	Spot F2	Peor	21.4928	-86.7916	19.889	221.4995
	Spot F3	Mejor	22.7939	-83.146	20.012	221.8367
	Spot F3	Peor	23.0979	-81.4822	20.012	223.0207
	Spot F4	Mejor	20.0586	-76.6412	20.135	221.5462
	Spot F4	Peor	20.7334	-75.2234	20.135	224.2399
	Spot F5	Mejor	18.0841	-76.6234	19.766	219.2975
	Spot F5	Peor	17.9152	-76.1833	19.766	223.2625
	Spot F6	Mejor	24.944	-78.0461	19.889	223.2678
	Spot F6	Peor	26.5066	-77.0761	19.889	223.5986
	Spot F7	Mejor	22.3183	-79.8619	20.012	222.4086
	Spot F7	Peor	22.3346	-78.1216	29.812	223.5936
	Spot F8	Mejor	23.5422	-75.2335	29.935	224.3443
	Spot F8	Peor	23.0857	-73.6448	29.935	224.7748

Tablas del grupo G ascenso y descenso para lluvia.

Grupo G						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por lluvia	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico de la Vsat al satélite	Spot G1	Mejor	20.0434	-75.5833	29.566	29.38405646
	Spot G1	Peor	19.728	-72.0847	29.566	40.3082281
	Spot G2	Mejor	21.9272	-71.9938	29.689	40.84512253
	Spot G2	Peor	21.4609	-71.1386	29.689	41.9802685
	Spot G3	Mejor	18.5323	-72.3324	29.812	37.953557
	Spot G3	Peor	19.6734	-70.3111	29.812	42.64458647
	Spot G4	Mejor	18.1295	-66.7779	29.935	37.23285569
	Spot G4	Peor	18.7064	-64.2864	29.935	53.45838671
	Spot G5	Mejor	17.3365	-62.7717	29.566	47.67044139
	Spot G5	Peor	16.3209	-61.0403	29.566	61.50586244
	Spot G6	Mejor	15.3755	-61.3268	29.689	42.41801671
	Spot G6	Peor	13.1258	-59.422	29.689	65.64581864
	Spot G7	Mejor	18.953	-69.646	29.812	40.49998116
	Spot G7	Peor	18.0879	-67.9162	29.812	46.13685036
	Spot G8	Mejor	12.1574	-61.677	29.935	48.00372894
	Spot G8	Peor	10.1549	-61.0171	29.935	60.01970304

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo G						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por lluvia	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot G1	Mejor	20.0434	-75.5833	19.766	7.514163109
	Spot G1	Peor	19.728	-72.0847	19.766	9.922834405
	Spot G2	Mejor	21.9272	-71.9938	19.889	9.981977578
	Spot G2	Peor	21.4609	-71.1386	19.889	10.16589093
	Spot G3	Mejor	18.5323	-72.3324	20.012	9.806253266
	Spot G3	Peor	19.6734	-70.3111	20.012	10.73408836
	Spot G4	Mejor	18.1295	-66.7779	20.135	8.968850006
	Spot G4	Peor	18.7064	-64.2864	20.135	12.47277668
	Spot G5	Mejor	17.3365	-62.7717	19.766	10.27315894
	Spot G5	Peor	16.3209	-61.0403	19.766	12.99368635
	Spot G6	Mejor	15.3755	-61.3268	19.889	9.002404503
	Spot G6	Peor	13.1258	-59.422	19.889	13.59105131
	Spot G7	Mejor	18.953	-69.646	20.012	10.07751263
	Spot G7	Peor	18.0879	-67.9162	29.812	11.26698183
	Spot G8	Mejor	12.1574	-61.677	29.935	10.81321806
	Spot G8	Peor	10.1549	-61.0171	29.935	13.47185124

Tablas del grupo G ascenso y descenso para gases atmosféricos.

Grupo G						
		Ubicación			Cálculos de atenuación por gases atmosféricos	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Pérdidas por gases atmosféricos Lg (dB)
Tráfico de la VSAT al satélite	Spot G1	Mejor	20.0434	-75.5833	29.566	2.682297087
	Spot G1	Peor	19.728	-72.0847	29.566	2.826157633
	Spot G2	Mejor	21.9272	-71.9938	29.689	2.850316169
	Spot G2	Peor	21.4609	-71.1386	29.689	2.88712747
	Spot G3	Mejor	18.5323	-72.3324	29.812	2.80512699
	Spot G3	Peor	19.6734	-70.3111	29.812	2.912911755
	Spot G4	Mejor	18.1295	-66.7779	29.935	3.105856903
	Spot G4	Peor	18.7064	-64.2864	29.935	3.288346784
	Spot G5	Mejor	17.3365	-62.7717	29.566	3.400152215
	Spot G5	Peor	16.3209	-61.0403	29.566	3.550679987
	Spot G6	Mejor	15.3755	-61.3268	29.689	3.515170504
	Spot G6	Peor	13.1258	-59.422	29.689	3.694018056
	Spot G7	Mejor	18.953	-69.646	29.812	2.942112314
	Spot G7	Peor	18.0879	-67.9162	29.812	3.034024432
	Spot G8	Mejor	12.1574	-61.677	29.935	3.460113262
	Spot G8	Peor	10.1549	-61.0171	29.935	3.511563837

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo G						
		Ubicación				Cálculos de atenuación por gases atmosféricos
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación que rebasa el nivel previsto (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot G1	Mejor	20.0434	-75.5833	19.766	3.352871359
	Spot G1	Peor	19.728	-72.0847	19.766	3.532697041
	Spot G2	Mejor	21.9272	-71.9938	19.889	3.562895212
	Spot G2	Peor	21.4609	-71.1386	19.889	3.608909337
	Spot G3	Mejor	18.5323	-72.3324	20.012	3.506408737
	Spot G3	Peor	19.6734	-70.3111	20.012	3.641139694
	Spot G4	Mejor	18.1295	-66.7779	20.135	3.882321129
	Spot G4	Peor	18.7064	-64.2864	20.135	4.11043348
	Spot G5	Mejor	17.3365	-62.7717	19.766	4.250190269
	Spot G5	Peor	16.3209	-61.0403	19.766	4.438349984
	Spot G6	Mejor	15.3755	-61.3268	19.889	4.39396313
	Spot G6	Peor	13.1258	-59.422	19.889	4.61752257
	Spot G7	Mejor	18.953	-69.646	20.012	3.677640392
	Spot G7	Peor	18.0879	-67.9162	29.812	3.79253054
	Spot G8	Mejor	12.1574	-61.677	29.935	4.325141578
	Spot G8	Peor	10.1549	-61.0171	29.935	4.389454796

Tablas del grupo G ascenso y descenso para Pérdidas totales.

Grupo G						
		Ubicación			Cálculos de atenuación total en el trayecto	
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico de la Vsat al satélite	Spot G1	Mejor	20.0434	-75.5833	29.566	246.8092
	Spot G1	Peor	19.728	-72.0847	29.566	257.982
	Spot G2	Mejor	21.9272	-71.9938	29.689	258.5961
	Spot G2	Peor	21.4609	-71.1386	29.689	259.7938
	Spot G3	Mejor	18.5323	-72.3324	29.812	255.6633
	Spot G3	Peor	19.6734	-70.3111	29.812	260.5377
	Spot G4	Mejor	18.1295	-66.7779	29.935	255.4838
	Spot G4	Peor	18.7064	-64.2864	29.935	272.008
	Spot G5	Mejor	17.3365	-62.7717	29.566	266.2928
	Spot G5	Peor	16.3209	-61.0403	29.566	280.3686
	Spot G6	Mejor	15.3755	-61.3268	29.689	261.2603
	Spot G6	Peor	13.1258	-59.422	29.689	284.771
	Spot G7	Mejor	18.953	-69.646	29.812	258.4423
	Spot G7	Peor	18.0879	-67.9162	29.812	264.2329
	Spot G8	Mejor	12.1574	-61.677	29.935	266.8299
	Spot G8	Peor	10.1549	-61.0171	29.935	278.9279

ANEXO DE TABLAS DE PÉRDIDAS

Grupo G						
		Ubicación				Cálculos de atenuación total en el trayecto
		Tipo de caso	Latitud ET en grados	Longitud ET en grados	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
Tráfico del satélite a la Vsat	Spot G1	Mejor	20.0434	-75.5833	19.766	221.576
	Spot G1	Peor	19.728	-72.0847	19.766	224.2404
	Spot G2	Mejor	21.9272	-71.9938	19.889	224.3959
	Spot G2	Peor	21.4609	-71.1386	19.889	224.6441
	Spot G3	Mejor	18.5323	-72.3324	20.012	224.1942
	Spot G3	Peor	19.6734	-70.3111	20.012	225.3108
	Spot G4	Mejor	18.1295	-66.7779	20.135	223.9305
	Spot G4	Peor	18.7064	-64.2864	20.135	227.7422
	Spot G5	Mejor	17.3365	-62.7717	19.766	225.568
	Spot G5	Peor	16.3209	-61.0403	19.766	228.5364
	Spot G6	Mejor	15.3755	-61.3268	19.889	224.5408
	Spot G6	Peor	13.1258	-59.422	19.889	229.4213
	Spot G7	Mejor	18.953	-69.646	20.012	224.7049
	Spot G7	Peor	18.0879	-67.9162	29.812	226.0527
	Spot G8	Mejor	12.1574	-61.677	29.935	226.3678
	Spot G8	Peor	10.1549	-61.0171	29.935	229.1111

BIBLIOGRAFÍA

- Neri Vela, R. (2003). Comunicaciones por satélite, Thomson
- Constantino Pérez Vega, José María Zamanillo Sainz de la Maza, Alicia Casanueva López. Sistemas de telecomunicación (2007). Textos universitarios de la Universidad de Cantabria, Ingenierías.
- Rayón Montoya Erick, Jiménez Raya Diana Berenice (2009). Tesina: Bandas de frecuencia C, K, Ku y Ka utilizadas por satélites.
- Bruce, Elbert. (2004). The Satellite Communication Applications Handbook. Artech House. London
- Matthew N. O. Sadiku (2009). Elementos de electromagnetismo, Alfaomega.
- Constantine A., Balanis (1997). Antenna Theory, Analysis and design, John Wiley & Sons
- García, Rodrigo; Morales Santiago (2012). Instalaciones de radiocomunicaciones; Paraninfo. España.
- Louis E. Frenzel Jr. (2014). Principles of Electronic Communication Systems. Fourth Edition. Mc Graw Hill.
- ITU-R Recommendation “Attenuation due to clouds and fog”, International Telecommunications Union, Geneva. 1999
- J.A. Bava, A.J. Sanz, (1995). “Microondas y recepción Satelital”, Buenos Aires, HASA.

ARTÍCULOS O REVISTAS

- Ka-band or Ku-band? Chris Hudson; December 2011; Intelsat General Corporation. (En línea). Consultado el 19 de julio de 2015 en <http://www.intelsatgeneral.com/blog/ka-band-or-ku-band-which-better-you/>

CONSULTA EN INTERNET

- The National Museum of Computing: Extra-Terrestrial Relays, (En línea). Consultado el 10 de Julio del 2015 en <http://www.tnmoc.org/sites/default/files/Extra-Terrestrial%20Relays2.pdf>
- Nanosatélites, Microsatélites y Minisatélites: Una Alternativa de Futuro, (En línea). Consultado el 09 de Julio del 2015 en http://rseap.webs.upv.es/Anales/06/A_Nanosatelites.pdf
- Nanosatélites: el espacio al alcance de todos. (En línea). Consultado el 10 de Julio del 2015 en <http://blogthinkbig.com/nanosatelites-programa-satlab/>
- Coimbraweb.com. Un sitio para las telecomunicaciones. (en línea) Consultado el 9 de Julio del 2015 en http://www.coimbraweb.com/documentos/radio/8.2_orbitas.pdf
- Arquitectura y tipos de satélites. (En línea). Consultado el 10 de Julio del 2015 en <http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad3/satelite2.htm>
- UPV, Sistemas de Satélites. (En línea). Consultado el 14 de Julio del 2015 en http://www.upv.es/satelite/trabajos/Grupo4_00.01/estruc.htm
- AIRBUS DEFENCE & SPACE, Como transforman los satélites la energía solar. (En línea). Consultado el 15 de Julio del 2015 en <http://www.space-airbusds.com/es/noticias-articulos/como-transforman-los-satelites-la-energia-solar-en-electricidad.html>
- UPM, Comunicaciones por Satélite. (En línea). Consultado el 16 de Julio del 2015 en <http://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/material/CSA08-3-ComunicacionesAntenas.pdf>

- Space Surveillance (En línea). Consultado el 17 de Julio de 2015 en <http://internet-sat.com.mx/coberturas.php#SM5ka>
- La banda ancha por satélite alcanza la mayoría de edad (En línea). Consultado el 20 de Julio del 2015 en <https://itunews.itu.int/es/2746-La-banda-ancha-por-satelite-alcanza-la-mayoria-de-edad.note.aspx>
- UCS Satellite Database. (En línea). Consultado el 20 de Julio de 2015 en http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/solutions/space-weapons/ucs-satellite-database.html#.Va2liPmqkq
- Globecast proporciona servicio VoD para canal Inglés Multisim Tv;(En línea) consultado el 22 de julio del 2015 en <http://www.panoramaaudiovisual.com/2015/07/03/globecast-proporciona-servicio-vod-para-el-canal-ingles-muslim-tv/>
- Tv y video; (En línea) consultado el 22 de julio del 2015 en <http://www.tvyvideo.com/200308293478/articulos/tecnologia/ka-band-mayor-ancho-de-banda-para-transmisiatelital.html>
- Telecom y telégrafos; (En línea) consultado el 22 de julio del 2015 en http://www.telecomm.net.mx/telecomm/dmdocuments/mdocumental_banda_Ka.pdf
- Comunicaciones Media networks; (En línea) consultado el 22 de julio del 2015 en <http://comunicacionesmn.blogspot.mx/2012/07/citel-recomienda-incorporar-la-banda-ka.html>
- La Banda ancha por satélite (En línea). Consultado el 16 de Julio del 2015 en <https://itunews.itu.int/es/2746-La-banda-ancha-por-satelite-alcanza-la-mayoria-de-edad.note.aspx>
- Estudio de las bandas de frecuencia (En línea). Consultado el 18 de Julio del 2015 en <http://www.upv.es/satelite/trabajos/pracGrupo17/frecuencias.html>
- Ku vs Ka (En línea). Consultado el día 20 del Julio del 2015 en

- <http://www.satellite-audiovideo.com/index.php?topic=12629.0:wap2>
- Cobertura del satélite Eutelsat 113W en banda C1. (En Línea). Consultado el 22 de Julio del 2015 en
<http://www.eutelsatamericas.com/en/satellites/americas/EUTELSAT-113WA-downlink-coverage.html>
- Coberturas del satélite Eutelsat 113W en banda C2. (En línea) Consultado el 22 de Julio del 2015 en
<http://www.eutelsatamericas.com/en/satellites/americas/EUTELSAT-113WA-downlink-coverage.html>
- Astronoo-el universo en todos sus estados (En línea). Consultado el 30 de julio del 2015 en
<http://www.astronoo.com/es/articulos/orbita-geoestacionaria.html>
- Enciclopedia Jurídica (En línea). Consultado el 30 de julio del 2015 en
<http://www.encyclopedia-juridica.biz14.com/d/orbita-geoestacionaria/orbita-geoestacionaria.htm>
- Spaceplace-NASA (En línea). Consultado el 30 de julio del 2015 en
<http://spaceplace.nasa.gov/geo-orbits/sp/>
- Satélites y comunicaciones (En línea). Consultado el 30 de julio del 2015 en
<http://satelitesycomunicaciones.blogspot.mx/2010/05/ventajas-y-desventajas-de-los-satelites.html>
- Dinámica de una partícula (En línea). Consultado el 30 de julio del 2015 en
<http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/dinam1p/sa biasgrav.html>
- ¿Qué es el PIRE? (En línea). Consultado el 30 de Julio de 2015 en
<http://ftapinamar.blogspot.mx/2013/03/que-es-el-pire.html>
- Redes por satélites (En línea). Consultado el 30 de Julio de 2015 en
<http://es.slideshare.net/edisoncoimbra/71-redes-por-satlite-sh>

- RECOMENDACIÓN UIT-R P.838-3 obtenida de la página oficial de la UIT (En línea). Consultado el 21 de Agosto del 2015 en <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838-0-199203-S/es>.
- Método gráfico para estimar la atenuación por lluvia en el sistema satelital Mexsat 3. (En línea). Consultado el 20 de julio de 2014 en <http://tesis.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/13947/1/Metodo%20grafico%20para%20estimar%20la%20atenuacion%20por%20lluvia%20en%20el%20sistema%20satelital%20MEXSAT%203.pdf>
- Universidad Tecnológica de la Selva (En línea). Consultado el 8 de Agosto del 2015 <http://www.utselva.edu.mx/jruizs/wp-content/uploads/2011/10/Control-de-acceso-al-medio.pdf>
- Soluciones informática (En línea). Consultado el 8 de Agosto del 2015 <https://solucionesinfomatica.wordpress.com/2012/09/21/capa-enlace-de-datos-control-de-acceso-al-medio/>
- Velocidad de transferencia (En línea). Consultado el 5 de Agosto del 2015 en <http://cesarcabrera.info/blog/%C2%BFvelocidad-transferencia-o-ancho-de-banda/comment-page-1/>
- Comunicaciones móviles satelitales (En línea). Consultado el 7 de Agosto del 2015 en http://caterina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/campos_v_da/capitulo2.pdf
- Calculo de enlaces (En línea). Consultado el 8 de Agosto del 2015 en <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/172/A6.pdf?sequence=6>
- Índice UV solar del mundo, (En línea). Consultado el 2 de Septiembre del 2015 en <http://www.who.int/uv/publications/en/uvispa.pdf>
- PROYECCIONES DE POBLACION MÉXICO 2010-2030, (En línea). Consultado el 2 de Septiembre de 2015 en <http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones>

- Geostationary Satellital footprints (En línea). Consultado el 10 de septiembre del 2015 en <http://satbeams.com/footprints>
- Viasat services, (En línea). Consultado el 12 de Septiembre del 2015 en <https://www.viasat.com/services>
- Wildblue functions, (En línea). Consultado el 14 de Septiembre del 2015 en <http://www.wildblue.com/overview/how-it-works>
- México y sus satélites (En línea). Consultado el 4 de Noviembre del 2015 en <http://www.politicadigital.com.mx/?P=leernota&Article=20777&c=9>