



Universidad Nacional Autónoma de
México
Facultad de Ingeniería

**Calidad de las señales digitales de la televisión
utilizando satélites con cobertura nacional**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTAN:

**EVA ARELI REBOLLEDO MORALES
HEIDI CATALINA MEZA CABRERA
JOSÉ ROBERTO RAMÍREZ ROMERO**

DIRECTOR DE TESIS: Dr. Salvador Landeros Ayala



Ciudad Universitaria, México, D.F.

Mayo 2008.

Agradecimientos

A mi padre,

Papá. Desde hace años he dejado de pronunciar esa bella palabra, pero el tiempo no ha impedido mantenerte presente en mi alma, te amo, te siento, te veo, te escucho y te extraño tanto como el primer día. Este esfuerzo es dedicado a ti, gracias por impulsar mis ilusiones.

A mi madre,

Nacer de ti, es la bendición más hermosa que Dios me brindó, eres mi luz y fuerza de vivir, gracias por acompañarme en mi camino, te amo.

Areli Rebolledo Morales

Agradecimientos

A Dios: Por la hermosa vida y las maravillas que encuentro en mi camino.

A mis abuelas y abuelos: Sus bendiciones, su ejemplo me motiva a no darme por vencida. Gracias por las bellas aportaciones en los corazones de mi familia.

Mamá: Por tu ejemplo de fortaleza, lealtad, amor incondicional, nobleza. Mi vida será poca para honrarte, ésta es solo una manera de decirte cuánto te amo y correspondo a todo lo que has hecho por mí. Admiro el amor con el que logras lo que sueñas...

Papá: Era muy importante para mí darte este regalo, confiaste en mí y luchaste para impulsarme. Eres un campeón y valoro mucho los caminos y la manera en que los recorriste para darnos lo mejor. Todos tus consejos, pláticas, las noches que llegabas cansado y muy tarde y me cargabas para llevarme a mi cama se van conmigo siempre.

Lalo: Que te sintieras orgulloso de mí era mi motivación, mi primer motorcito, las lecciones me las diste a mí, por tu noble carácter, tu sentido del humor y el empeño con el haces lo que te gusta, siempre estaré contigo...

Helder: Siendo el menor me has enseñado muchas cosas, tu energía llenó espacios que solo con tu presencia se podían cubrir. Sigue alcanzando tus objetivos, siempre logras lo que te propones. Estaré a tu lado cuando me necesites.

A mis tías, tíos, primas, primos, sobrinas y sobrinos... Gracias por el cariño, su confianza y los ánimos que siempre me dan. Son mi motivación.

Areli y Roberto: A pesar de todo lo que hemos vivido este tiempo, aprendimos, crecimos y terminamos juntos uno de los proyectos más importantes de nuestra vida.

Sara: Siempre estás conmigo en los momentos más importantes y lo seguirás estando.

Ayi: Por escucharme, por tu apoyo, tu compañía, los paseos, consejos y cariño.

Magali: Porque tu fuerza y energía me han iluminado y enseñado nuevos caminos.

Nini: Eres un ejemplo de cómo salir adelante y de cómo seguir creyendo en el amor.

Maki: Sigues aprendiendo y enseñándonos que las cosas pueden mejorar siempre.

Kike: Tu lealtad y sinceridad me han cobijado. Gracias por tu apoyo, por mostrarme tu sensibilidad... Admiro las metas que te propones y la manera en la que vas logrando y disfrutando lo que quieres en tu vida.

Luis: Buen amigo, increíble tu nobleza y cómo cuidas lo tuyo.

A mis jefes: Por su buen humor, gran apoyo y comprensión.

A mi **UNAM**, la **Facultad de Ingeniería**, a todos los **maestros** y **sinodales** por la formación y noble labor.

A **TODAS** las personas que hasta hoy o que en algún momento han estado a mi lado y me han dado palabras de aliento, gracias por todo.

Heidi Catalina Meza Cabrera

Agradecimientos

A Dios: Por la oportunidad de vivir, por darme la familia que tengo, rodearme de amigos y bendiciones y porque siempre te he sentido cerca de mí.

Mamá: Por darme la vida, por quererme y cuidarme. También por motivarme y hasta por regañarme, porque gracias a eso soy el hombre que soy y sin tu ayuda nada de lo que tengo o he logrado sería una realidad. Te quiero mucho.

Papá: Por inculcar en mí las ganas de conocer más, porque gracias a tu ejemplo me interesé en la ingeniería y jamás le tuve miedo a las matemáticas. Pero sobre todo por cuidar de mi mamá, de mi hermana y de mí y continuar haciéndolo desde el cielo. Te quiero y te extraño.

Luz: Por que siempre has estado a mi lado, porque tomaste el peso de sacar adelante a la familia en el momento más difícil y porque eres para mí el mejor ejemplo de lo lejos que se puede llegar.

Heidi y Areli: Porque gracias a ustedes no dejé inconcluso este proyecto. He aprendido mucho de las dos.

A mis profesores: Porque la responsabilidad y moral no sólo se aprende en casa, todos han sido un gran ejemplo para mí.

A la UNAM: Porque nos dió a mi hermana y a mí profesión y porque en ella encontré a mis mejores amigos.

José Roberto Ramírez Romero

ÍNDICE

Objetivos	xix
Introducción	xx
Capítulo 1. Frecuencias asignadas	1
1.1. Bandas y sub-bandas.....	1
1.2. Bandas asignadas por tipo de servicio.....	2
Capítulo 2. Conceptos básicos	5
2.1. Satélites.....	5
2.1.1. Historia de los satélites artificiales	5
2.1.2. Órbitas y lanzamiento.....	6
2.1.2.1. En la órbita de estacionamiento	8
2.1.2.2. En la órbita de transferencia	9
2.1.2.3. En la órbita geoestacionaria	10
2.1.3. Funcionamiento del satélite.....	11
2.1.3.1. Subsistemas de un satélite.....	13
2.1.3.1.1. Subsistema de estructura.....	13
2.1.3.1.2. Sistema de propulsión.....	13

2.1.3.1.3. Subsistema de control de orientación.....	13
2.1.3.1.4. Subsistema de potencia	14
2.1.3.1.5. Subsistema de telemetría	14
2.1.4. Clasificación de los satélites	15
2.1.4.1. Clasificación por tipo de servicio.....	15
2.1.4.2. Por tipo de órbita.....	16
2.1.4.3. Por su aplicación.	16
2.1.4.3.1. Satélites científicos.....	16
2.1.4.3.2. Satélites de comunicaciones.....	17
2.1.4.3.3. Satélites meteorológicos	17
2.1.4.3.4. Satélites de navegación.....	18
2.1.4.3.5. Satélites de teledetección	19
2.1.4.3.6. Satélites militares	19
2.1.5. Parámetros de un enlace satelital.....	20
2.1.5.1. Ganancia de una antena	20
2.1.5.2. Ángulos de elevación y azimut	24
2.1.5.3. Rango.....	28
2.1.5.4. Atenuación por absorción atmosférica.....	29
2.1.5.5. Atenuación por lluvia	33

2.1.5.6. Atenuación por desapuntamiento.....	43
2.1.5.7. Otras atenuaciones	44
2.1.6. Configuración básica de un enlace en RF	45
2.1.6.1. Densidad de flujo, PIRE y atenuación en el espacio libre.	47
2.1.6.2. Ruido.....	51
2.1.6.2.1. Ruido térmico	52
2.1.6.2.2. Figura de ruido para amplificadores y atenuadores....	53
2.1.6.2.3. Temperatura de ruido para amplificadores en cascada	53
2.1.6.2.4. Temperatura de ruido de una antena (enlace de bajada)	54
2.1.6.2.5. Temperatura de ruido de una antena (enlace de subida).....	56
2.1.6.2.6. Temperatura de ruido de un sistema.....	57
2.1.6.3. Figura de mérito.....	58
2.1.6.4. Contorno de PIRE.....	63
2.1.6.5. Ruido de intermodulación.....	64
2.1.6.6. Densidad de flujo de saturación, G/T y enlace de subida	65
2.1.6.7. Tasa de bits erróneos (BER) y E_b/N_0	68
2.1.6.8. Tasa de bits y Eficiencia espectral.....	70

2.1.6.9. Codificación y corrección de errores.	71
2.1.6.10. Relación total de potencias.	71
Capítulo 3. Televisión	75
3.1. Descripción mínima de la televisión mexicana.	75
3.1.1. Breve historia de la televisión en México	75
3.1.2. Sistemas para TV en blanco y negro.....	80
3.1.3. Hacia lo digital.....	81
3.1.4. Compresión.....	81
3.1.5. Normas de compresión de video.....	82
3.1.6. El sistema DVB.....	82
3.1.6.1.1. El formato DVB-S	84
Capítulo 4. Satélites utilizados en México.....	85
4.1. Satélites mexicanos	85
4.1.1. Aplicaciones de banda ancha.....	85
4.1.2. 2. Internet de alta velocidad (acceso, broadcast, distribución, caching).....	86
4.1.3. 3. Broadcasting (televisión, radio y noticias)	86
4.1.4. 4. Redes privadas VSAT	86
4.1.5. 5. Telefonía rural.....	86

4.2. Flota satelital	87
4.2.1. Solidaridad II	87
4.2.2. Satmex 5	89
4.2.3. Satmex 6	92
4.3. Otros satelites utilizados en México	96
4.3.1. El Galaxy IIC	96
4.3.2. El PAS 9	97
Capítulo 5. Servicios de televisión en México	99
5.1. Sistema de televisión educativa (Edusat)	99
5.1.1. Localización de los satélites que transmiten la señal de Edusat.	101
5.1.2. Datos de la estación terrena Edusat	101
5.1.2.1. Diámetro de la estación terrena transmisora	101
5.1.2.2. Potencia de transmisión	101
5.1.2.3. Satélite utilizado.....	101
5.1.2.4. Diámetro de la antena receptora.....	101
5.1.2.5. Bandas de frecuencia	102
5.1.2.5.1. Solidaridad 2.....	102
5.1.2.5.2. Satmex 5.....	102

5.1.2.6. Forma en que sube y baja la señal del satélite.	102
5.2. Sistema de TV directa al hogar DirecTV	102
5.2.1. Datos de la estación terrena de DirecTV	103
5.2.1.1. Diámetro de la estación terrena.....	103
5.2.1.2. Diámetro de las antenas receptoras.....	103
5.2.1.3. Potencia de transmisión	104
5.3. Sistema de televisión directa al hogar SKY	104
5.3.1. Parámetros de su estación terrena	104
5.3.1.1. Diámetro de la estación terrena transmisora	104
5.3.1.2. Potencia de transmisión	104
5.3.1.3. Satélite utilizado	105
5.3.1.4. Diámetro de la antena receptora	105
5.3.1.5. Bandas de frecuencia	105
5.3.1.6. Forma en que sube y baja la señal del satélite.	105
5.3.1.7. Ancho de banda total y por canal.....	105
5.3.1.8. Número de transpondedores ancho de banda.....	105
5.3.1.9. Tipo y nivel de compresión de la señal	105
5.3.1.10. Tipo de modulación.....	105
5.4. Sistema de televisión abierta TV Azteca.....	105

5.4.1. Parámetros de su estación terrena.....	106
5.4.1.1. Diámetro de la estación terrena transmisora.....	106
5.4.1.2. Potencia de transmisión	106
5.4.1.3. Satélite utilizado.....	106
5.4.1.4. Diámetro de la antena receptora.....	106
5.4.1.5. Bandas de frecuencia	106
5.4.1.6. Forma en que sube y baja la señal del satélite.....	106
5.5. Sistema de televisión abierta Televisa	107
5.5.1. Parámetros de su estación terrena.....	107
5.5.1.1. Diámetro de la estación terrena transmisora.....	107
5.5.1.2. Potencia de transmisión	107
5.5.1.3. Satélite utilizado.....	107
5.5.1.4. Bandas de frecuencia	107
5.5.1.5. Forma en que sube y baja la señal del satélite.....	108
5.6. Cálculos de enlace.....	108
5.6.1. Cálculos para TV Azteca.....	108
5.6.1.1. Para la estación terrena de TV Azteca con el satélite Satmex 5	108
5.6.1.2. Enlace de subida	108

5.6.1.2.1. Rango de distancia	110
5.6.1.2.2. Pérdidas por propagación en el espacio libre.....	110
5.6.1.2.3. Pérdidas por absorción atmosférica.....	111
5.6.1.2.4. Potencia Isotrópica Radiada Efectiva o PIRE (EIRP)	112
5.6.1.2.5. Relación portadora a ruido enlace de subida	112
5.6.1.3. Enlace de bajada	113
5.6.1.3.1. Pérdidas por propagación en el espacio libre.....	113
5.6.1.3.2. Pérdidas por absorción atmosférica.....	113
5.6.1.3.3. Temperatura de ruido de la antena	115
5.6.1.3.4. Factor de calidad o figura de mérito.....	115
5.6.1.3.5. Relación portadora a ruido enlace de bajada.....	116
5.6.1.4. Relación total de potencias	116
5.6.2. Cálculos de Edusat.....	117
5.6.2.1. Para la estación terrena de Edusat con el satélite Satmex 5	117
5.6.2.1.1. Enlace de subida.....	118
5.6.2.1.2. Enlace de bajada	120
5.6.2.1.3. Relación total de potencias	123
5.6.3. Cálculos de Sky.....	124

5.6.3.1. Para la estación terrena de SKY con el satélite PANAMSAT 9	124
5.6.3.1.1. Enlace de subida	124
5.6.3.1.2. Enlace de bajada.....	127
5.6.3.1.3. Pérdidas debidas a la atenuación por lluvia	128
5.6.3.1.4. Relación total de potencias	132
5.6.4. Cálculos de Televisa.....	133
5.6.4.1. Para la estación terrena de Televisa con el satélite Satmex 5	133
5.6.4.1.1. Enlace de subida	133
5.6.4.1.2. Enlace de bajada.....	136
5.6.4.1.3. Relación total de potencias	139
5.6.5. Cálculo para DirecTV	140
5.6.5.1. Para la estación terrena de DirecTV en México con el satélite Galaxy 3C.....	140
5.6.5.2. Enlace de subida	140
5.6.5.2.1. Rango de distancia	142
5.6.5.2.2. Pérdidas por propagación en el espacio libre	142
5.6.5.2.3. Pérdidas por absorción atmosférica	142
5.6.5.2.4. Potencia Isotrópica Radiada Efectiva o PIRE (EIRP)	143

5.6.5.2.5. Relación portadora a ruido enlace de subida.....	143
5.6.5.3. Enlace de bajada.....	144
5.6.5.3.1. Pérdidas por propagación en el espacio libre.....	144
5.6.5.3.2. Pérdidas por absorción atmosférica.....	144
5.6.5.3.3. Pérdidas debidas a la atenuación por lluvia.....	144
5.6.5.3.4. Temperatura de ruido del sistema.....	147
5.6.5.3.5. Factor de calidad o figura de mérito.....	147
5.6.5.3.6. Relación portadora a ruido enlace de bajada.....	148
5.6.5.3.7. Relación total de potencias.....	148
5.6.6. Calculo de la Relación total de potencias esperada.....	149
5.7. Comparativo entre los servicios de televisión.....	151
Conclusiones.....	153
Bibliografía.....	155
Libros.....	155
Paginas de Internet.....	155
Apéndice A. Datos de los satélites.....	159
Satmex 5.....	159
PANAMSAT 9.....	162
Galaxy 3C.....	164

OBJETIVOS.

- Hacer un análisis comparativo en la calidad de la señal después del enlace satelital entre distintas empresas televisivas.
- Realizar un estudio de los distintos parámetros que intervienen en un enlace satelital.

INTRODUCCIÓN

Actualmente el mercado de las Telecomunicaciones es uno de los sectores con mayor crecimiento e inversión, un claro ejemplo de ello lo encontramos dentro de nuestro país con empresas como Telmex, Televisa, Telcel, entre otras; las cuales forman parte de los consorcios más sólidos y con mayor impacto económico no solo en el ámbito nacional sino también en el extranjero.

Las inversiones que destinan las compañías mexicanas de Televisión por cable están en el orden de millones de dólares e intentan incursionar en el mercado de la Telefonía aprovechando su infraestructura actual, para tal objetivo su inversión inicial sería de alrededor de 90 MDD. Telmex por su parte anuncio su interés por brindar servicio de Televisión por cable, lo cual es ejemplo de las oportunidades de negocios que actualmente ofrece este sector.

Dentro del mercado de las telecomunicaciones, uno de los más importantes segmentos es el de la televisión y sus servicios de distribución como la televisión por cable, Televisión directa al Hogar (DTH), Televisión abierta y Televisión educativa. Dentro de este rubro encontramos una gran diversidad de opciones, lo que obliga a las empresas a brindar una mejor calidad y precios en sus servicios, beneficiando directamente al consumidor.

Las distribuidoras de televisión ofrecen una diversidad de canales con diferentes contenidos: culturales, deportivos, musicales, de entretenimiento, etc. Estas señales las obtienen de compañías dedicadas a la producción televisiva, que en su mayoría cuentan con ubicaciones geográficas distintas. Por lo anterior, los gastos de cableado hacia cada una de estas compañías haría imposible brindar un servicio económicamente viable. La manera más barata de obtener tales señales es mediante el uso de enlaces satelitales.

Las redes satelitales se componen por una serie de estaciones terrenas conectadas entre sí por medio de satélites colocados en una órbita espacial que retransmiten señales por microondas a través del espacio atmosférico. El equipo instalado dentro de un satélite recibe las señales enviadas desde una estación terrestre, las amplifica y transmite a otra estación terrestre que las distribuye por pares de cables, cables coaxiales, guías de onda, fibras ópticas y sistemas de repetición de microondas.

La transmisión espacial fue concebida con más de diez años de anticipación al lanzamiento de los primeros satélites artificiales. En 1945 el científico inglés Arthur C. Clarke propuso el uso de un satélite terrestre para radiocomunicación entre varios puntos de la superficie

terrestre. Clarke sugirió en una publicación el diseño de una nave espacial tripulada que podría lanzarse como un cohete. La nave se posicionaría a una altitud aproximada de 35,900 kilómetros, giraría junto con la tierra (sería síncrono) y habría receptores y equipo de transmisión terrestres que llevarían las señales a una determinada zona ubicada en la tierra. Por su contribución, a la órbita geoestacionaria se conoce también como Cinturón de Clarke.

La fuerte demanda de servicios satelitales, han propiciado la multiplicación de satélites a tal grado que la órbita espacial sobre el ecuador, donde se estacionan, está casi saturada. Muy pronto diferentes países empezaron a lanzar satélites, a través de empresas privadas o los propios gobiernos. Entre otros países que cuentan con sistemas de satélites domésticos están: Brasil, Francia, Rusia, India, Japón, China, Australia, Gran Bretaña, Italia, Panamá, México y Argentina.

La ventaja de utilizar satélites de comunicaciones radica en que eluden las barreras naturales, permiten planear su uso a requerimientos reales, acortan los tiempos de instalación y complementan las redes terrestres para transmisiones internacionales, posibilitando el cubrimiento total de la tierra. Con ellos se pueden establecer transmisiones con equipo móvil desde puntos geográficos donde no existe infraestructura para telecomunicaciones.

Algunas desventajas en las transmisiones satelitales es que están sujetas a demoras de propagación, se debilitan con las lluvias intensas, nieve y manchas solares que afectan a las estaciones terrestres, también sufren interferencias de radio, microondas y aeropuertos. Además los costos de fabricación y lanzamiento son muy elevados. Una vez que los satélites están en órbita, el ahorro en cuanto a costos es máximo cuando la distancia entre los puntos excede a 1,800 kilómetros comparados con los de microondas y los 190 kilómetros con los de fibras ópticas.

Los satélites pueden ser ubicados a distintas distancias de la tierra y a velocidades diferentes con respecto a la de rotación, lo que permite coberturas locales, regionales y globales. De acuerdo a estos requerimientos se han desarrollado diferentes generaciones de satélites de comunicaciones.

Tomando en cuenta lo anterior, consideramos importante realizar un estudio comparativo en la calidad de las señales en el enlace satelital de distintas empresas pertenecientes a diferentes tecnologías y objetivos de distribución de televisión tales como Televisa y TV Azteca en televisión abierta comercial; DirecTV y SKY en televisión directa al hogar y Edusat en Televisión Educativa.

El presente estudio tiene como finalidad dar una visión general de los parámetros que intervienen en la calidad de la señal de televisión dentro de un sistema de comunicaciones satelitales.

En el Capítulo 1, se describen brevemente los rangos de frecuencia que son usados en un sistema satelital, así como las regiones en las que se ha dividido el planeta según los usos asignados a estas bandas.

El Capítulo 2, pretende dar a conocer las características y parámetros de los formatos de señales de televisión tanto en sistemas analógicos como digitales.

En el Capítulo 3, se estudia el enlace de radio frecuencia entre la estación terrena y el satélite de comunicaciones y viceversa.

Dentro del Capítulo 4, se mencionan los satélites que son usados en México, sus características y los servicios que brindan.

Los objetivos del Capítulo 5 son dar a conocer el perfil de diversas empresas que ofrecen el servicio de televisión y proporcionar los datos correspondientes a sus estaciones terrenas.

Finalmente, con el Capítulo 6 se ejemplifica el método para llevar a cabo el estudio del comportamiento de la señal en el enlace satelital. Con el propósito de hacer un comparativo entre las empresas que brindan el servicio de TV usando satélites, se diseñó un programa para computadora que entrega los principales parámetros que nos permiten obtener la calidad de la señal.

CAPÍTULO

1

FRECUENCIAS ASIGNADAS

1.1. BANDAS Y SUB-BANDAS

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) ha asignado para los satélites de comunicaciones las bandas VHF, UHF y SHF. Estas bandas son muy amplias y han sido divididas por conveniencia en sub-bandas, también conocidas como bandas, así UHF contiene a las bandas L y S, mientras que SHF incluye a las bandas C, X, Ku y Ka.

La banda C trabaja desde 5.725 hasta 7.075 GHz en subida hacia el satélite y desde 3.4 hasta 4.2 y desde 4.5 hasta 4.8 GHz en bajada. Para Ku las frecuencias van de 14–14.5 GHz en subida y 2.7-11.7 y 12.5-12.75 GHz en bajada.

Las bandas C y Ku son muy usadas actualmente por los satélites comerciales, pero como ya es casi imposible dar nuevas opciones para más satélites que trabajen en estas bandas sin interferir con otros satélites vecinos ya existentes, también ha comenzado a ser aprovechada la banda Ka la cual opera de 27.5-31 GHz en subida y 17.7-21.2 GHz en bajada, su ancho de banda es grande sin embargo su principal desventaja es que cuando llueve los niveles de atenuación a estas frecuencias son mucho mayores que en las bandas C y Ku por ello la disponibilidad de diseño de los enlaces en bajada Ku (típicamente 99.5 %) es menor que la de los correspondientes a banda C y Ku.

Las bandas de VHF y UHF y en particular la L son usadas generalmente para comunicaciones móviles con un ancho de banda limitado; la S también es empleada para comunicaciones móviles y ciertos servicios de recepción de TV; la L y la S tienen frecuencias centrales cercanas a 1.5 GHz y 2 GHz respectivamente, pero su ancho de banda disponible es muy pequeño en comparación con las bandas de frecuencia superiores. En 7.9 y 8.4 GHz ascendente y 7.25 a 7.75 GHz en bajada, la utilización es para aplicaciones

gubernamentales y militares. En satélites de radiodifusión directa se utilizan las bandas 11.7-12.5 GHz en bajada y 17.3-18.1 GHz en subida.

1.2. BANDAS ASIGNADAS POR TIPO DE SERVICIO.

Cada servicio tiene sus principales bandas de frecuencias asignadas, y los límites superior e inferior de cada una de ellas puede variar dependiendo de la región por ello la UIT ha dividido al mundo en tres regiones como se muestra en la figura.

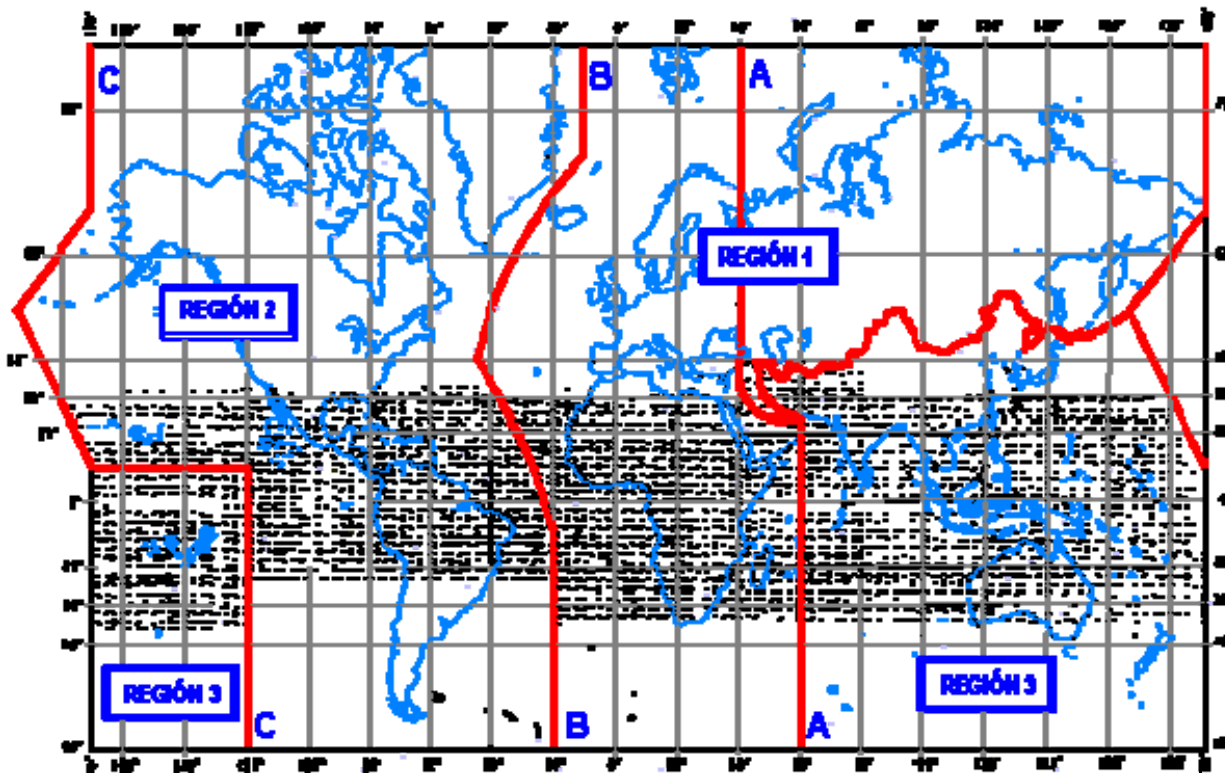


Fig. 1-1

Los tres principales tipos de servicios definidos por la UIT como por la FCC de los Estados Unidos son conocidos por las siglas FSS (*Fixed Satellite Service*), MSS (*Mobile Satellite Service*) y BSS (*Broadcast Satellite Service*).

FSS o Servicio Fijo por Satélite es un término genérico que se aplica a todo servicio de comunicaciones que no sea ni móvil ni de radiodifusión. La mayoría de los satélites de comunicaciones corresponden a esta categoría.

MSS o Servicio Móvil por Satélite se refiere a toda comunicación entre dos puntos arbitrarios en tierra firme, aire o mar; uno de estos puntos puede estar combinado de posición o bien ambos.

BSS o Servicio de Radiodifusión por satélite es una categoría especial en la que las señales transmitidas son recibidas directamente en los hogares, también suelen llamarse DBS (*Direct to Home Service/Satellite*) o DTH (*Direct Broadcast Service/Satellite*).

Banda (GHz)	Enlace ascendente (GHz)	Enlace descendente (GHz)	Servicio
C: 4-6	5.925-6.425 (500 MHz)	3.700-4.200 (500 MHz)	Servicio Fijo por Satélite (FSS)
X: 7-8	7.900-8.400 (500 MHz)	7.250-7.750 (500 MHz)	Comunicaciones militares
Ku: 12-14	14.0-14.5 (500 MHz)	11.7-12.2 (500 MHz)	Servicio fijo por satélite
Ku: 12-17	17.3-17.8 (500 MHz)	12.2-12.7 (500 MHz)	Servicio de Radiodifusión por satélite
Ka: 20-30	27.5-31.0 (3500 MHz)	17.7-21.2 (3500 MHz)	Servicio Fijo por Satélite
Q/V: 40-50	47.2-50.2 (3000 MHz)	39.5-42.5 (3000 MHz)	Servicio Fijo por Satélite
	Banda V	Banda Q	

Tabla 1-1 Asignación de frecuencias para región 2 (Continente Americano)

Frecuencias asignadas

Bandas asignadas por tipo de servicio.

CAPÍTULO

2

CONCEPTOS BÁSICOS

2.1. SATÉLITES

2.1.1. HISTORIA DE LOS SATÉLITES ARTIFICIALES

El origen de los satélites artificiales está íntimamente ligado al desarrollo de los cohetes que fueron creados, primero, como armas de larga distancia; después, utilizados para explorar el espacio y luego, con su evolución, convertidos en instrumentos para colocar satélites en el espacio.

No fue sino hasta 1945, cuando el entonces Secretario de la Sociedad Interplanetaria Británica, Arthur C. Clarke, publicó un artículo que muchos calificaron como fantasioso—acerca de la posibilidad de transmitir señales de radio y televisión a través de largas distancias (transatlánticas) sin la necesidad de cables coaxiales (en el caso de la televisión o relevadores en el de la radio), proponiendo un satélite artificial ubicado a una altura de 36 mil Km., que girara alrededor de la Tierra una vez cada 24 horas, de tal forma que se percibiera como fijo sobre un punto determinado y, por lo tanto, cubriendo en su transmisión una fracción de la superficie terrestre. Este artefacto estaría equipado con instrumentos para recibir y transmitir señales entre él mismo y uno o varios puntos desde tierra; también, añadía que para hacer posible la cobertura de todo el planeta habrían de colocarse tres de estos satélites de manera equidistante a la altura mencionada, en la línea del Ecuador. El artículo presentaba, además, algunos cálculos sobre la energía que se requeriría para que dichos satélites funcionaran, y para ello proponía el aprovechamiento de la energía solar.

El primer experimento en comunicaciones desde el espacio fue en 1958, cuando Atlas-B, equipado con un transmisor y un reproductor, emitió hacia la Tierra un mensaje grabado

con anterioridad por el presidente Eisenhower. El *Atlas-Score* permitió demostrar que la voz humana podía propagarse superando la considerable distancia existente entre el planeta y el satélite. El concepto fundamental era sencillo: un repetidor colocado en un lugar suficientemente elevado podría dominar mucha mayor superficie que sus homólogos terrestres. El repetidor, por supuesto, sería colocado en órbita, aunque su limitación principal sería la movilidad del objeto en el espacio.

Fue así que el primer satélite activo que se puso en órbita fue el Courier, de propiedad estadounidense (lanzado en 1960), equipado con un paquete de comunicaciones o repetidor que recibía las señales de la Tierra, las traducía a frecuencias determinadas, las amplificaba y después las retransmitía al punto emisor.

Así, se sucedieron muchos otros lanzamientos de satélites con fines experimentales en el campo de las comunicaciones para transmisiones de radioaficionados y señales de televisión en diversas bandas de frecuencia o con propósitos militares, de tal forma que al terminar 1962, Estados Unidos contaba ya con 120 satélites puestos en órbita, mientras que Rusia tenía 33.

Gracias a la construcción de cohetes más potentes -que llevaron satélites a la altura adecuada- y al desarrollo de la electrónica como un elemento importante relacionado con muchas funciones de un satélite, en 1964 se logró colocar en órbita geostacionaria o Cinturón de Clarke primer satélite de este tipo (geostacionario): el Syncom 3.

En un poco más de 40 años los satélites artificiales han modificado sustancialmente nuestro modo de vivir y la manera de ver el universo. Sus usos y aplicaciones son innumerables.

2.1.2. ÓRBITAS Y LANZAMIENTO

Los satélites geostacionarios -como se había comentado anteriormente- se encuentran ubicados a 36 000 Km. de altura sobre el nivel del mar. El proceso para colocarlos a esa distancia es complejo, para ello se requiere de cohetes, los cuales tienen como función situar al satélite en perfectas condiciones en la denominada *órbita de transferencia*.

Con el fin de colocar correctamente al satélite, es necesario tomar en cuenta condiciones tales como lugar de lanzamiento, tipo de cohete y tipo de satélites, lo cual determinará la hora en la cual se debe realizar el lanzamiento. Éstas son las conocidas como *ventanas de lanzamiento*.

Las *ventanas de lanzamiento* se determinan básicamente por las duraciones máximas permisibles de los eclipses Solares que sufre el satélite durante la órbita de transferencia en relación a la alimentación eléctrica disponible (por paneles Solares y baterías del propio satélite).

El proceso de lanzamiento convencional es la transferencia de Hofmann que se caracteriza por ser un método de transferencia entre dos órbitas coplanares circulares con un gasto mínimo de energía. Sus pasos son:

- Lanzamiento del cohete hacia el Este aprovechando la velocidad de rotación terrestre (463 m/s aprox. en el ecuador).
- Colocación del satélite, en órbita baja de estacionamiento con perigeo alrededor de 200 Km.
- Impulso del satélite hacia la órbita elíptica, denominada de transferencia, con el apogeo alrededor de 36.000 Km.

Desde la zona de apogeo de la órbita de transferencia y con ayuda del motor de apogeo que forma parte del satélite, éste se desplaza hasta la órbita geoestacionaria definitiva.

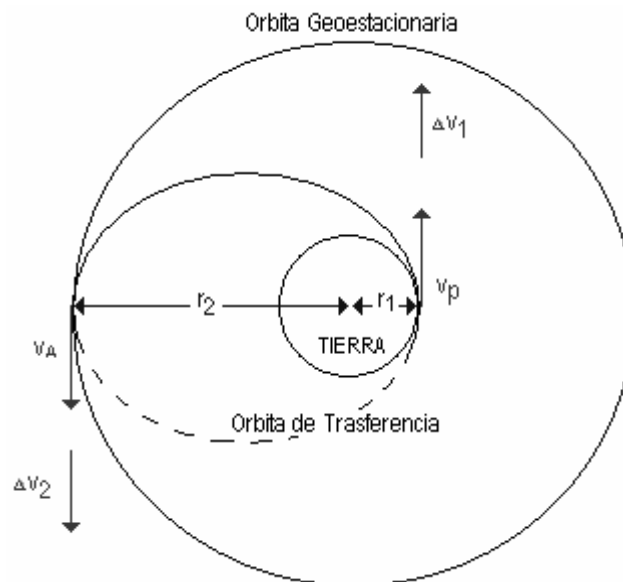


Fig. 2-1 Órbitas de colocación del satélite

Las variables que se muestran en la figura, se describen a continuación:

ΔV_1 = Incremento de velocidad para que el satélite pase de la órbita de estacionamiento a la órbita de transferencia.

ΔV_2 = Incremento de velocidad para que el satélite pase de la órbita de transferencia a la órbita geoestacionaria.

V_P = Velocidad en el Perigeo de la órbita de transferencia.

V_A = Velocidad en el Apogeo de la órbita de transferencia.

r_1 = Radio vector desde el centro de la Tierra hasta el Perigeo de la órbita de transferencia.

r_2 = Radio vector desde el centro de la Tierra hasta el Apogeo de la órbita de transferencia.

2.1.2.1. EN LA ÓRBITA DE ESTACIONAMIENTO

El satélite pasa por esta órbita en el caso de haber sido lanzado mediante nave tripulada ya que si se usa un cohete, el satélite es depositado directamente en la órbita de transferencia.

Para conseguir pasar de la órbita de estacionamiento a la de transferencia es necesario dotar al satélite de un incremento de velocidad ΔV_1 dado por la siguiente expresión:

$$\Delta V_1 = \sqrt{\frac{\mu}{r_p}} \left(\sqrt{\frac{r_A}{a}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

Donde:

ΔV_1 = Incremento de velocidad para que el satélite pase de la órbita de estacionamiento a la órbita de transferencia.

$$GM = \mu = 3.98601 \times 10^{14} \text{ m/s}^2$$

r_p Radio vector r desde el centro de la Tierra hasta el perigeo.

r_A Radio vector r desde el centro de la Tierra hasta el apogeo.

a representa el Radio de la Tierra

2.1.2.2. EN LA ÓRBITA DE TRANSFERENCIA

Una vez que el satélite se halla en la órbita de transferencia se mantiene girando a velocidad controlada de unas decenas de revoluciones por minuto con objeto de estabilizar y determinar su orientación.

Estando el satélite en esta órbita se lleva a cabo el despliegue de una antena omnidireccional cuya misión es la de proporcionar un enlace para telemidas y telemando de forma que se pueda gobernar el satélite desde estaciones terrenas situadas en puntos distintos de la Tierra.

La órbita de transferencia suele formar un pequeño ángulo con el plano del ecuador en función de la latitud de la base del lanzamiento, y su periodo oscila sobre las doce horas. En esta órbita el satélite efectúa unas pocas circunvalaciones mientras desde las estaciones terrenas se está procediendo a la verificación del estado de los sistemas del satélite tras el lanzamiento. Al mismo tiempo se estudia la trayectoria exacta del satélite y sobre todo los instantes en que se sitúa sobre el apogeo.

- Al pasar por tercera vez el satélite por el apogeo conocemos:
- Localización angular y dirección de movimiento (error del orden de 0.001°)
- Distancia (error del orden de decenas de metros)
- Velocidad (error del orden de algunos cm/s)

También se toman datos para estimar la dirección del eje del satélite y se maniobra para que éste viaje orientado, con el fin de que al encender el motor de apogeo se pueda conseguir una impulsión precisa.

Una vez que se determinan las características de la órbita donde se encuentra el satélite se identifica el punto de apogeo, donde la velocidad del satélite es menor y por tanto es ideal para realizar las maniobras de cambio de órbita, optimizando la cantidad de combustible y alargando la vida útil de satélite, esto se consigue generalmente en la tercera o cuarta vez que el satélite pasa por el apogeo de la órbita de transferencia es ahí donde el motor elevador de apogeo desplaza el satélite hacia la órbita geoestacionaria. Esta fuerza de

impulsión es muy importante puesto que en ella se consume en combustible, aproximadamente, el 40 % del peso del satélite. Este proceso puede hacerse en una o más fases dependiendo de flexibilidad y complejidad del sistema.

Mediante este motor se le dota al satélite del incremento de velocidad ΔV_2 necesario, cuya expresión es:

$$\Delta V_2 = \sqrt{\frac{\mu}{r_A}} \left(1 - \sqrt{\frac{r_P}{a}} \right) \quad (2.2)$$

2.1.2.3. EN LA ÓRBITA GEOESTACIONARIA

Una vez llegado a la órbita geoestacionaria se toman medidas y se inician maniobras para corregir altura y otras operaciones tendentes a orientar el satélite respecto a Tierra y se procede también al despliegue y posicionado de antenas y paneles Solares. Multitud de medidas y verificaciones durante días se llevan a cabo mientras dura el viaje hacia la posición nominal asignada a la órbita. La órbita geoestacionaria se caracteriza por tener visión permanente y recíproca del satélite con un área fija que supone el 42.5 % de la superficie terrestre.

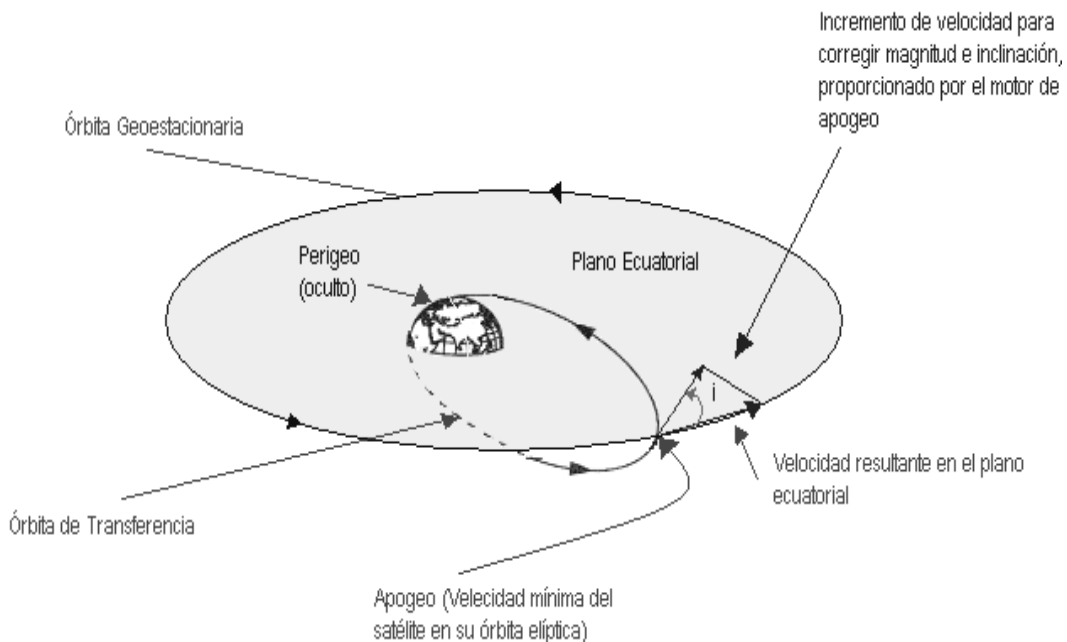


Fig. 2-2

Tipos de órbitas	Altura sobre el nivel del mar	Velocidad del satélite	Función del satélite	Ventajas
Órbita baja	250 – 1,500 km	25,000 – 28,000 km/hr.	Comunicaciones y observación de la Tierra.	Poco retraso en las comunicaciones. Se requiere menor potencia.
Órbita polar	500 – 800km sobre el eje polar	26,600 – 27,300 km/hr.	Clima Navegación.	Están perpendiculares sobre la línea del Ecuador, por lo que pueden observar distintas regiones de la Tierra.
Órbita geoestacionaria	35,786 km sobre el Ecuador	11,000 km/hr.	Comunicaciones Clima. Navegación GPS.	Al dar la vuelta a la Tierra a su misma velocidad, siempre observa el mismo territorio
Órbita elíptica	Perigeo 200 - 1000 km. Apogeo ~39,000 km	~34,200 km/hr. ~5,400 km/hr.	Comunicaciones	Servicios a grandes latitudes.

Tabla 2-1

2.1.3. FUNCIONAMIENTO DEL SATÉLITE

Dado que las microondas (tipo de onda de radio) viajan en línea recta, como un fino rayo a la velocidad de la luz, no debe haber obstáculos entre las estaciones receptoras y emisoras.

Por la curvatura de la Tierra, las estaciones localizadas en lados opuestos del globo no pueden conectarse directamente, sino que han de hacerlo vía satélite. Un satélite situado en la órbita geoestacionaria (a una altitud de 36 mil km) tarda aproximadamente 24 horas en dar la vuelta al planeta, lo mismo que tarda éste en dar una vuelta sobre su eje, de ahí que el satélite permanezca más o menos sobre la misma parte del mundo.

Como queda a su vista un tercio de la Tierra, pueden comunicarse con él las estaciones terrenas -receptoras y transmisoras de microondas- que se encuentran en ese tercio.

Una estación terrena que está bajo la cobertura de un satélite le envía una señal de microondas, denominada enlace ascendente. Cuando la recibe, el transpondedor (aparato emisor-receptor) del satélite simplemente la retransmite a una frecuencia más baja para que la capture otra estación, esto es un enlace descendente. El camino que recorre esa comunicación, comparándolo con la longitud que ocuparía un cable, es de unos 70 mil km, lo cual equivale, más o menos, al doble de la circunferencia de la Tierra, y sólo le toma alrededor de 1/4 de segundo cubrir dicha distancia.

En la ingeniería de los satélites, como en cualquier otra área de la Astronáutica, confluyen múltiples aspectos. No sólo se trata de construir una máquina, sino también de conseguir que, a pesar de sus delicados elementos electrónicos, sea capaz de resistir los rigores y presión de un lanzamiento, las ondas acústicas durante el mismo y, sobre todo, funcionar en el ambiente del espacio, donde las temperaturas oscilan entre los 200° C bajo cero durante periodos de sombra y 200° C a la luz del Sol.

El diseño de los satélites ha evolucionado desde aquellos años del Sputnik I hasta la actualidad; sin embargo, su razón de ser sigue siendo la misma, así como la de la mayor parte de sus elementos. El paso del tiempo y los logros en las tecnologías han proporcionado instrumentos más precisos, sistemas de provisión de energía eléctrica más potentes y componentes de menor peso.

En otras palabras el funcionamiento de un satélite, queda resumido de la siguiente manera:

- Recibir y transmitir señales.
- Aumenta la potencia de las mismas, proceso indispensable, ya que sin una potencia suficiente la información llegaría en forma deficiente, o simplemente no llegaría.
- Disminuye la frecuencia e invierte la polaridad: dos maneras de evitar que las señales, tanto de subida como de bajada, se interfieran y existan pérdidas en la información.
- Los satélites pueden dividirse de manera conveniente en dos elementos principales, *la carga útil y la plataforma*. La carga útil es la razón de ser del satélite, es aquella parte del satélite que recibe, amplifica y retransmite las señales con información útil; pero para que la carga útil realice su función, la plataforma debe proporcionar ciertos recursos:
- La carga útil debe estar orientada en la dirección correcta.

- La carga útil debe ser operable y confiable sobre cierto periodo de tiempo especificado.
- Los datos y estados de la carga útil y elementos que conforman la plataforma deben ser enviados a la estación terrestre para su análisis y mantenimiento.
- La órbita del satélite debe ser controlada en sus parámetros.
- La carga útil debe de mantenerse fija a la plataforma en la cual está montada.
- Una fuente de energía debe estar disponible, para permitir la realización de las funciones programadas.



Fig. 2-3

Cada uno de estos requerimientos es proporcionado por los siguientes conglomerados de elementos conocidos como subsistemas:

2.1.3.1. SUBSISTEMAS DE UN SATÉLITE.

2.1.3.1.1. SUBSISTEMA DE ESTRUCTURA.

Misma que puede tener muy distintas formas, pero que siempre se construye con metales muy ligeros que a la vez tienen gran resistencia.

2.1.3.1.2. SISTEMA DE PROPULSIÓN.

Compuesto por múltiples motores o impulsores de bajo empuje, que sirven al satélite para realizar pequeñas correcciones y cambios de velocidad para controlar su orientación en el espacio y proporcionar el control adecuado de los parámetros de la órbita.

2.1.3.1.3. SUBSISTEMA DE CONTROL DE ORIENTACIÓN

Trabaja contra las perturbaciones a las que está sometido el aparato. Este sistema permite al satélite saber constantemente donde está y hacia donde debe orientarse para que las emisiones lleguen a la zona deseada, considerando su natural movimiento Norte-Sur y Este-Oeste alrededor de un punto. Además, orienta los paneles solares hacia el Sol, sin importar cómo esté posicionado el satélite. La computadora a bordo, que lleva una serie de

programas capaces de reaccionar ante una variada gama de problemas: si algo grave o inesperado ocurre, desconectará automáticamente todos los sistemas no esenciales, se orientará hacia el Sol para garantizar una adecuada iluminación de las celdas solares e intentará comunicarse con la Tierra o esperar órdenes procedentes de ella. Esta fase se denomina modo seguro y puede salvar la vida a muchos satélites dando tiempo a la intervención humana.

2.1.3.1.4. SUBSISTEMA DE POTENCIA

Como fuente de energía secundaria, las baterías proveen energía suficiente para alimentar a los sistemas e instrumentos cuando la energía proveniente del Sol no puede ser aprovechada, esto ocurre por ejemplo, durante eclipses; éstas son cargadas poco antes del lanzamiento y de ellas depende la vida del satélite. La fuente primaria de energía para el satélite lo constituyen las celdas solares que son colocadas en grupos para conformar lo que se conoce como panel solar. Los paneles, por sus grandes dimensiones y su relativa fragilidad, deben permanecer plegados durante el despegue. Su apertura añade otro factor de incertidumbre durante la puesta en órbita del satélite. Una vez en posición y perfectamente orientados, empiezan a proporcionar energía a los sistemas, que hasta entonces han debido usar baterías. Esta energía es administrada por un sistema especial que regula el voltaje y la distribuye de forma adecuada al resto de componentes. Cuanto mayor es el número de celdas agrupadas, más potencia puede generarse. Aunque es verdad que éstas suelen deteriorarse con el paso del tiempo, ahora los constructores de satélites colocan un número suplementario de ellas para garantizar que proporcionarán suficiente electricidad, incluso, durante el último periodo de su vida útil.

2.1.3.1.5. SUBSISTEMA DE TELEMETRÍA

Seguimiento y órdenes es el encargado de hacer contacto con las estaciones terrenas con el fin de recibir órdenes de ellas y darles seguimiento. Esto permite el correcto mantenimiento de los subsistemas del satélite.

El módulo de carga útil es aquel en que están instalados los instrumentos que justifican la misión espacial. Algunos de ellos son muy sofisticados: podemos encontrar desde cámaras hasta telescopios, pasando por detectores sensibles a fenómenos atmosféricos, antenas y amplificadores para comunicaciones, entre otros. Para los satélites de comunicaciones, la carga útil esta conformada por los transpondedores.

Un transpondedor esta formado por un filtro de entrada que selecciona la frecuencia a amplificar, un controlador de ganancia para el amplificador y su respectiva fuente de alimentación, estos transpondedores reciben la señal desde la Tierra a través de antenas y

receptores, la amplifican y la envían a su destinatario; si el satélite no hace esto, la señal llegará tan débil que no se percibirá en las estaciones receptoras.

Aunque el satélite es sometido a pruebas exhaustivas durante su construcción y antes de su lanzamiento, siempre es probable que algo falle y esto, entonces, significa afrontar pérdidas considerables; es por ello que desde hace algunos años los propietarios de los satélites suelen adquirir pólizas de seguro que cubran las principales eventualidades (lanzamiento fallido, menor eficiencia de la prevista en órbita, duración en activo inferior a la prevista, etcétera). Se calcula que el precio actual de un satélite está entre 700 y 2 000 millones de pesos, y si a eso le sumamos el mencionado seguro, el precio sube a 3 500 millones de pesos. Afortunadamente, el futuro de la construcción de los satélites implica mayor tiempo en órbita, mismo que fluctúa entre 10 y 15 años.

2.1.4. CLASIFICACIÓN DE LOS SATÉLITES

2.1.4.1. CLASIFICACIÓN POR TIPO DE SERVICIO

Dada su gran variedad, existen diversas clasificaciones; la UIT los divide de acuerdo con el tipo de servicio que éstos prestan, de tal manera que los hay fijos, móviles, de radiodifusión, de radionavegación y de exploración de la Tierra.

Servicio de Satélite Fijo (*Fixed Satellite Service - FSS*). Entre estaciones terrenas en posiciones dadas, cuando uno o más satélites son usados; la posición dada puede ser un punto fijo o bien cualquier punto fijo dentro de áreas específicas. En algunos casos este servicio incluye la comunicación satélite a satélite la cual también puede ser operada en el servicio intersatelital. El servicio FSS puede incluir enlaces de alimentación para otros servicios.

Servicio de Satélite Móvil (*Mobile Satellite Service - MSS*). Entre estaciones terrenas móviles y una o más estaciones espaciales (incluyendo varios satélites usando enlaces intersatelitales). Este servicio puede incluir los enlaces de alimentación para su operación.

Servicio de Radiodifusión Satelital (*Broadcasting Satellite Service - BSS*). Servicio en el cual las estaciones espaciales transmiten o retransmiten sus señales directamente al público en general. En el servicio BSS, el término “recepción directa” engloba tanto a la recepción individual como a la recepción colectiva.

Enlace Intersatelital (*Intersatellite Link - ISL*). Servicio que provee enlaces entre satélites artificiales.

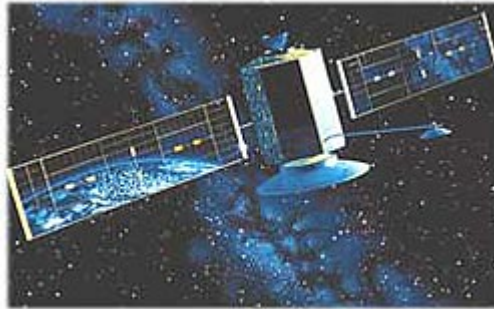


Fig. 2-4

2.1.4.2. POR TIPO DE ÓRBITA

Para propósitos de estudio es conveniente clasificar los diferentes tipos de misiones satelitales basándose en las características principales de sus órbitas respectivas:

- **Satélites geoestacionarios (GEO).** Son los que se ubican en la órbita del mismo nombre, sobre la línea del Ecuador y a una altitud de 36 mil km. Son utilizados para la transmisión de datos, voz y video.

- **Satélites no geoestacionarios.** Que a su vez se dividen en dos:
 - Los *Medium Earth Orbit* (MEO), ubicados en una órbita terrestre media a 10 mil km de altitud.
 - Los *Low Earth Orbit* (LEO), localizados en órbita más baja, entre 250 y 1500 km de altitud. Tanto los satélites MEO como los LEO, por su menor altitud, tienen una velocidad de rotación distinta a la terrestre y, por lo tanto, más rápida; se emplean para servicios de percepción remota, telefonía etc., por mencionar algunos de sus usos.

2.1.4.3. POR SU APLICACIÓN.

2.1.4.3.1. SATÉLITES CIENTÍFICOS

Empezaron a lanzarse en la década de los años 50 y hasta ahora tienen como principal objetivo estudiar la Tierra -superficie, atmósfera y entorno- y los demás cuerpos celestes. En el inicio de la exploración espacial, se consideró prioritario conocer las condiciones que imperaban sobre un objeto que girara repetidamente alrededor del planeta. Esto era necesario, pues poco tiempo más tarde el propio hombre debería viajar al espacio. Estos aparatos permitieron que el conocimiento del Universo sea mucho más preciso en la

actualidad. Una rama de la ciencia que se ha visto beneficiada por las actividades en el espacio es la Geodesia. Los satélites geodésicos han permitido conocer con exactitud la forma de los continentes, así como el lentísimo pero constante movimiento de las placas terrestres. Asimismo, los satélites oceánicos han explorado el fondo marino, revelando gran cantidad de información: el Seasat (lanzado en 1978), equipado con un radar especial, fue uno de los aparatos dedicados a este tipo de investigación.

2.1.4.3.2. SATÉLITES DE COMUNICACIONES

Se ubican en la intersección de la tecnología del espacio y la de las comunicaciones. Constituyen la aplicación espacial más rentable y, a la vez, más difundida en la actualidad. Las transmisiones en directo vía satélite ya son parte de nuestra cotidianeidad, por lo que no tienen ningún carácter especial. Para la difusión directa de servicios de televisión y radio, telefonía y comunicaciones móviles sólo son necesarios sencillos receptores y antenas parabólicas cada día más pequeñas.



Fig. 2-5

2.1.4.3.3. SATÉLITES METEOROLÓGICOS

Estos satélites, aunque se puede afirmar que son científicos, son aparatos especializados que se dedican exclusivamente a la observación de la atmósfera en su conjunto. La comprensión de la física dinámica atmosférica, el comportamiento de las masas nubosas o el movimiento del aire frío o caliente resultan indispensables para realizar predicciones del clima, pues sus efectos impactan de manera irremediable las actividades de los seres humanos aquí en la Tierra.

El primer satélite meteorológico fue el Tiros-1 (lanzado en abril de 1960); luego le siguieron los ESSA, ITOS, Nimbus, NOAA y Meteor, por mencionar algunos. A estos artefactos se debe el descubrimiento del agujero en la capa de ozono. Algunos de éstos se

colocan en órbitas no geoestacionarias, como los que pasan sobre los polos de la Tierra y posibilitan una cobertura de toda la superficie de ella. Otros satélites meteorológicos de órbita geoestacionaria como el SMS, GOES y Meteosat pueden cubrir todo un hemisferio y permiten seguir el comportamiento de fenómenos como la temporada de huracanes, el avance de las grandes borrascas, los frentes fríos, el conocimiento de la temperatura de la atmósfera en cada nivel altimétrico, la presión, la distribución del vapor de agua y, con ello, el porqué de las sequías o los efectos de la contaminación, entre muchos otros fenómenos más.

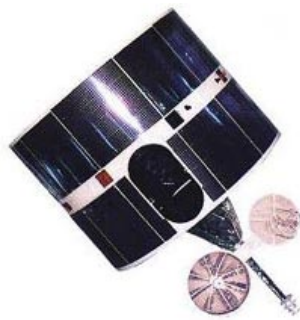


Fig. 2-6

2.1.4.3.4. SATÉLITES DE NAVEGACIÓN

Desarrollados originalmente con fines militares al marcar el rumbo de misiles, submarinos, bombarderos y tropas, ahora se usan como sistemas de posicionamiento global (GPS, *Global Positioning System*) para identificar locaciones terrestres mediante la triangulación de tres satélites y una unidad receptora manual que puede señalar el lugar donde ésta se encuentra y obtener así con exactitud las coordenadas de su localización geográfica.

Los satélites actuales dedicados a esta tarea (Transit, Navstar GPS, Tsikada, Parus, Uragan, etc.) utilizan frecuencias bajas y medias que están abiertas al público, lo cual ha posibilitado la aparición de múltiples receptores comerciales. Una de las aplicaciones de estos satélites la realiza con éxito la navegación aérea, que está empezando a aprovecharla en los aterrizajes de las aeronaves, ello le supone una guía económica y muy segura para esas actividades.

En los sistemas GPS, tanto el satélite como el equipo receptor en Tierra emiten una señal con una determinada frecuencia, ambas sincronizadas gracias a los relojes atómicos que dichas unidades poseen, el receptor recibe la señal del satélite que se halla a gran altitud, la distancia entre ambos equipos hace que la señal proveniente del satélite llegue con una

diferencia de fase con respecto a la señal emitida por el receptor. La medición de esta diferencia en las fases permite calcular la distancia que separa al equipo en Tierra del satélite. Utilizando tres satélites a la vez, podemos obtener las coordenadas de latitud, longitud y altitud del equipo receptor en Tierra. Usando un cuarto satélite es, incluso, posible conseguir datos sobre la velocidad con la que nos desplazamos y el nivel de precisión aumenta mucho.

2.1.4.3.5. SATÉLITES DE TELEDETECCIÓN

Éstos observan el planeta mediante sensores multispectrales, esto es que pueden sensar diferentes frecuencias o "colores", lo que les permite localizar recursos naturales, vigilar las condiciones de salud de los cultivos, el grado de deforestación, el avance de la contaminación en los mares y un sinfín de características más.

Para un mejor aprovechamiento de sus capacidades, los satélites de teledetección se suelen colocar en órbitas bajas y polares, a menudo sincronizadas con el Sol. Desde ellas, enfocan sus sensores, que son capaces de tomar imágenes en varias longitudes de onda o bandas espectrales.

2.1.4.3.6. SATÉLITES MILITARES

Son aquellos que apoyan las operaciones militares de ciertos países, bajo la premisa de su seguridad nacional. La magnitud de sus programas espaciales militares es tan grande y secreta que hasta hace poco sólo se podía valorar por el número de lanzamientos que suponía.



Satélite militar

Fig. 2-7

Existen además los satélites dedicados a vigilancia y reconocimiento que comprenden dos grandes grupos: los ópticos y los receptores de señales radioeléctricas. Entre los ópticos sobresalen aquellos que fotografían la Tierra a baja altura, entre 250 y 500 Km. Son utilizados con fines eminentemente militares. Se estima que el satélite espía más poderoso, el KH 12, de los Estados Unidos, puede tomar fotografías que permiten distinguir objetos con tamaños de hasta unos 10 cm. Las fotografías son enviadas digitalmente a un satélite de comunicaciones militar en órbita geoestacionaria el cual a su vez se encarga de enviarlo a una estación terrestre situada en el estado de Virginia, de tal forma que es posible conocer los movimientos y actividades de cualquier potencia hostil en menos de una hora. Estos satélites tienen un período de duración de dos a tres años. El mismo país también dispone de una red de satélites diseñados para poder fotografiar zonas cubiertas por las nubes y en la oscuridad mediante la emisión y recepción de ondas de radar. Con esta técnica la sonda Magallanes logró fotografiar detalladamente la superficie del planeta Venus que se encuentra siempre rodeado de una espesa capa de nubes. Entre los ópticos están también los satélites de alerta temprana, los cuales son telescopios infrarrojos en órbita geoestacionaria (en el caso de los Estados Unidos) o en órbita de tipo Molniya (en el caso de Rusia) encargados de detectar el despegue de misiles balísticos y de pacíficos cohetes civiles, rastreando el calor generado por los gases de combustión. Los satélites de recepción de señales radioeléctricas se ocupan de interceptar una gran gama de ondas de radio, desde conversaciones telefónicas hasta telemetría de misiles, incluyendo también la determinación de las frecuencias de los radares en tierra. Existen satélites a baja altura que fotografían la Tierra con menor detalle con fines eminentemente civiles.

2.1.5. PARÁMETROS DE UN ENLACE SATELITAL.

2.1.5.1. GANANCIA DE UNA ANTENA

La dimensión eléctrica de una antena es igual a su dimensión física dividida entre lo que mide la longitud de onda a la frecuencia de operación, o sea, es el número de longitudes de onda que cabrían alineadas a lo largo del diámetro o la dimensión mayor en su apertura o boca.

En general, la ganancia máxima $G_{m\acute{a}x}$ de una antena de apertura está dada por:

$$G_{m\acute{a}x} = \eta \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \right) \quad (2.3)$$

Donde:

η es la eficiencia de la antena

A es el área física de su apertura (limitada por la trayectoria cerrada de su borde)

λ es la longitud de onda a la frecuencia de trabajo

Al producto de la eficiencia por el área física se le llama apertura o área o área efectiva ($A_e = \eta A$). Los platos parabólicos son iluminados desde su foco geométrico por antenas de corneta de banda ancha, y la eficiencia del conjunto es normalmente de 55% o mayor (hasta un 70% o 75%) y casi constante con la frecuencia. Calcular la eficiencia total no es fácil, ya que depende de la iluminación que el plato tenga, de los errores de la fase y del grado de polarización cruzada, así como del acabado de la superficie y las pérdidas en sus bordes. La eficiencia final la especifica el fabricante, ya que proporciona las dimensiones físicas y la ganancia máxima a una determinada frecuencia, de donde, usando la ec. (2.3) se puede calcular η .

El ancho del haz del lóbulo principal de radiación de un plato parabólico definido como el ángulo entre los dos puntos de media potencia, se puede calcular en forma muy aproximada como:

$$\theta_{-3dB} = \frac{75 \lambda}{D} \quad [\text{grados}] \quad (2.4)$$

Donde:

D es el diámetro del plato

Como la dimensión de una antena parabólica se especifica en términos de su diámetro (Fig. 2-8), conviene expresar la ecuación (2.3) en función de D :

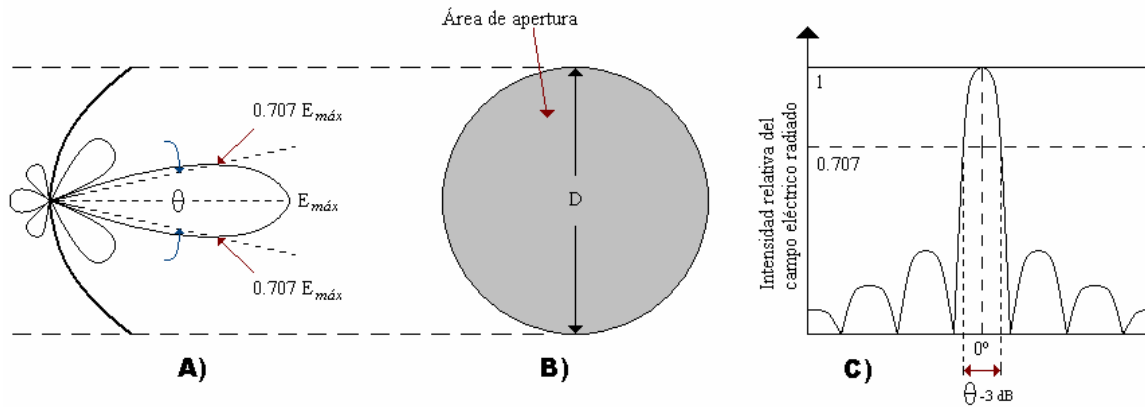


Fig. 2-8 Geometría y patrón de radiación típico de una antena parabólica. A) Antena de perfil y representación polar de su patrón de radiación; B) antena de frente; C) representación cartesiana de su patrón de radiación en uno de sus dos planos principales.

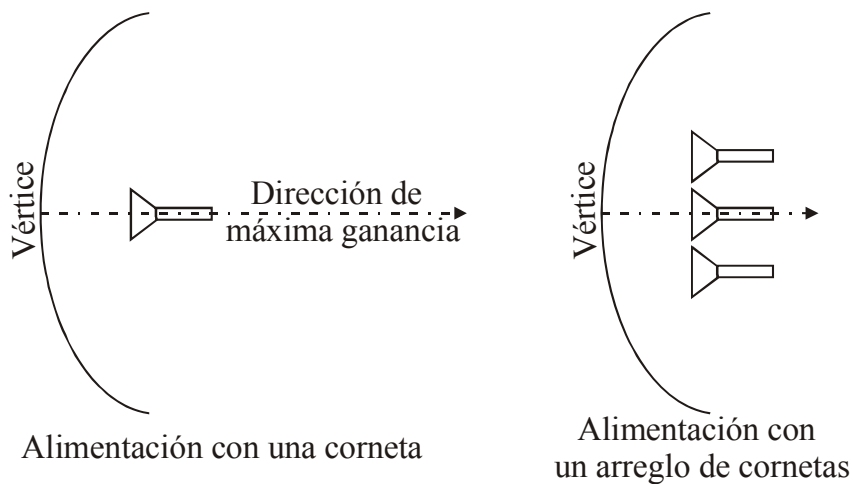


Fig. 2-9

La alimentación con una corneta es usada a menudo con platos parabólicos cuya forma ha sido modificada a fin de achatar o alargar la forma del haz, mientras que la alimentación con un arreglo de cornetas se utiliza para radiar a regiones específicas, de este modo la energía se aprovecha mejor.

$$A = \pi \text{radio}^2 = \frac{\pi D^2}{4}$$

de modo que:

$$G_{m\acute{a}x} = \eta \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \right) \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)$$

o sea

$$G_{m\acute{a}x} = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (2.5)$$

En la Fig. 2-8 la direcci3n máxima de radiaci3n coincide con el eje del plato parab3lico, mismo que pasa por el vértice y el foco de la antena. En el foco se coloca el alimentador, que puede ser, por ejemplo, una sola antena de corneta o un arreglo con varias cornetas (Fig. 2-9). La ganancia máxima dada por la ecuaci3n (2.5) se obtiene cuando el campo elétrico radiado también es máximo y, como la ganancia es proporcional al cuadrado del campo elétrico, cuando éste es igual a $\frac{E_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}$ la ganancia es igual a la mitad de la máxima; o sea que el ángulo θ_{-3dB} dado por la ecuaci3n (2.4) es el mismo indicado por la Fig. 2-8 a) y c).

Por observaci3n de las ecuaciones (2.4) y (2.5) se deduce que, si la frecuencia se mantiene fija y el diámetro aumenta, el ancho del haz de la antena disminuye proporcionalmente a D y su ganancia máxima aumenta proporcionalmente al cuadrado de D . Lo común es expresar dicha ganancia en decibeles con relaci3n a la ganancia unitaria de la antena isotr3pica [dBi], que se calcula por la sencilla relaci3n siguiente:

$$[G_{\alpha}]_{dBi} = 10 \log G \quad (2.6)$$

Hoy en día la mayoría de los satélites geoestacionarios, si no todos, tienen haces conformados o perfilados que poseen huellas de iluminaci3n irregulares de cobertura nacional, regional o hemisférica. Por su parte los haces puntuales o pincel, dada la naturaleza de cobertura reducida, sí tienen una huella más o menos simétrica.

2.1.5.2. ÁNGULOS DE ELEVACIÓN Y AZIMUT

Es importante calcular la orientación de una estación terrena hacia el satélite geoestacionario con el que debe comunicarse, ya que su ángulo de elevación es necesario para poder cuantificar varios de los efectos del medio de propagación sobre las señales transmitidas.

Para orientar la antena de una estación terrena en la dirección correcta hacia donde está el satélite con el que desea comunicarse, se definen los ángulos de elevación y azimut. Estos ángulos son medidos tomando como referencia a la línea a la cual la antena tiene máxima ganancia, y en el caso de una antena parabólica, que es la más comúnmente usada, dicha referencia es el plato parabólico. Este eje contiene al vértice y al foco, tal como se ilustra en la Fig. 2-10. Tanto el ángulo de elevación θ como el ángulo de azimut ϕ dependen de las coordenadas geográficas de la estación terrena y de la posición orbital del satélite. Para calcularlos basta seguir un largo procedimiento geométrico.

El ángulo de elevación θ es el ángulo que se forma entre el plano horizontal y la línea imaginaria que contiene al foco y al vértice de la antena.

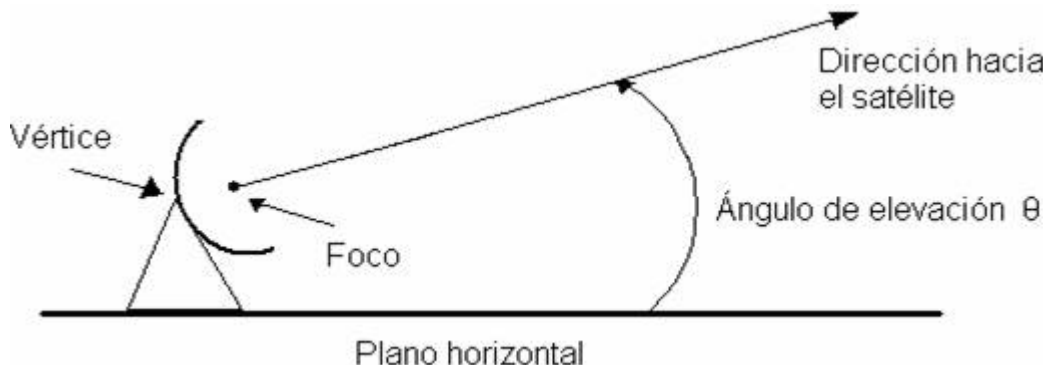


Fig. 2-10

El ángulo azimut ϕ es el ángulo medido en 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 Fig. 2-11.

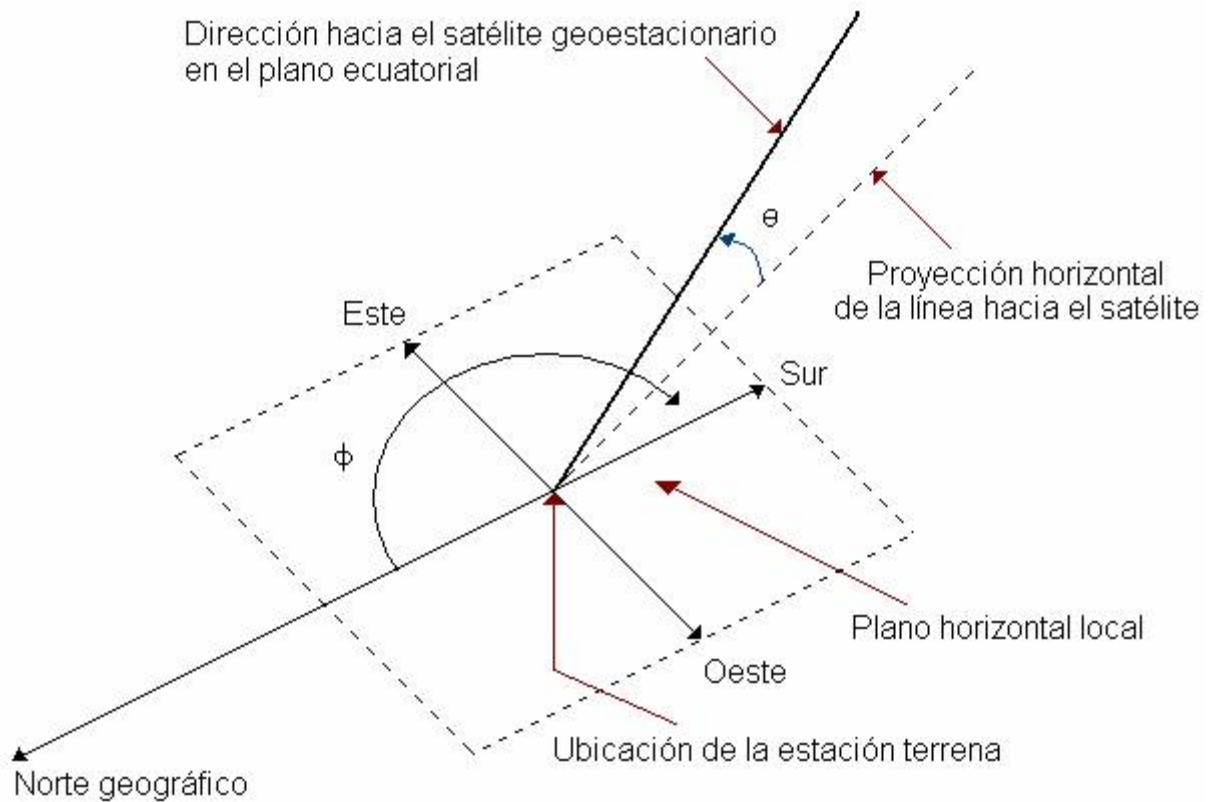


Fig. 2-11 Definición del ángulo de azimut

Las fórmulas a las que se llega finalmente para calcular estos ángulos son, para el ángulo de elevación:

$$\theta = \arctan \left\{ \frac{(\cos l)(\cos \Delta L) - \frac{R_e}{h}}{\sin[\arccos(\cos l \cos \Delta L)]} \right\}$$

Si $c = \cos l \cos \Delta L$ y $\theta' = \arccos c$:

$$\theta = \arctan \left[\frac{c - \frac{R_e}{h}}{\sin \theta'} \right] \quad (2.7)$$

en donde:

l es la Latitud de la estación terrena

ΔL es la Longitud del satélite – Longitud de la estación terrena

R_e es el Radio de la Tierra = 6,378 Km.

h es el Radio de la órbita = 42,164 km

y para el ángulo de azimut:

$$\text{Si } \phi' = \arctan \left[\frac{\sin \Delta L}{\sin l \cos \Delta L} \right]$$

Que se puede reducir a:

$$\phi' = \arctan \left[\frac{\tan \Delta L}{\sin l} \right] \quad (2.8)$$

Dependiendo de la localización de la estación terrena con relación al satélite, el ángulo de azimut ϕ es:

$\phi = 180^\circ - \phi'$ Estación en el hemisferio norte y al oeste del satélite.

$\phi = 180^\circ + \phi'$ Estación en el hemisferio norte y al este del satélite.

$\phi = \phi'$ Estación en el hemisferio sur y al oeste del satélite.

$\phi = 360^\circ - \phi'$ Estación en el hemisferio sur y al este del satélite.

Las fórmulas anteriores suponen que la latitud del satélite es exactamente 0° .

En la Fig. 2-12 se ilustra de una manera alternativa el concepto del ángulo de elevación y en la Fig. 2-13 del ángulo de azimut. Con relación a este último, conviene aclarar que si se usa una brújula como instrumento manual para orientar la antena, hay que tomar en cuenta la declinación magnética correspondiente al lugar geográfico en donde esté la estación. Recuérdese que la brújula mide el ángulo que hay entre el eje magnético de la Tierra y cualquier línea visual.

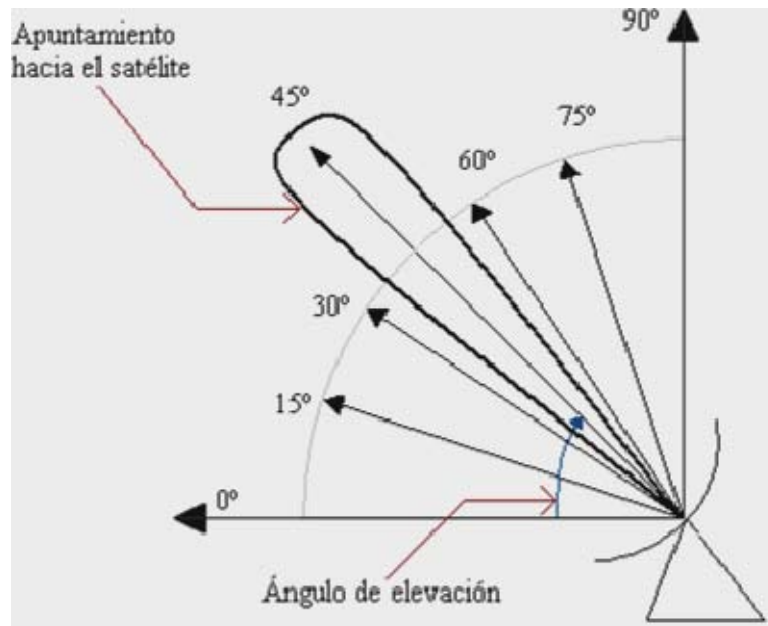


Fig. 2-12

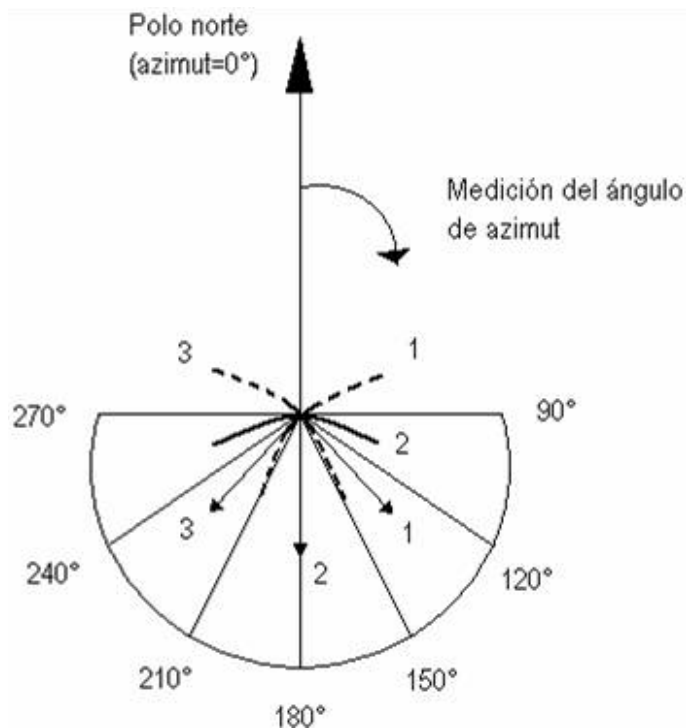
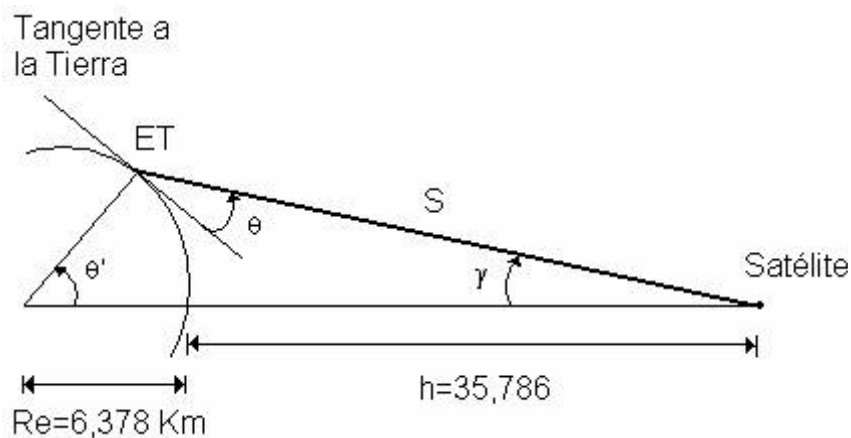


Fig. 2-13

2.1.5.3. RANGO

La distancia que hay entre una estación terrena y un satélite se denomina rango. Esta distancia puede ser calculada a partir de la geometría de la Fig. 2-14

Fig. 2-14 Geometría para calcular el Rango S

El ángulo de elevación θ se obtiene a partir de la ecuación (2.7), conocidas las coordenadas geográficas l y L de la estación terrena (ET) y la posición del satélite geoestacionario. A los ángulos θ' y γ se les llama, respectivamente “ángulo de cobertura o central” y “ángulo de nadir”. El ángulo de cobertura θ' se obtiene como:

$$\theta' = \arccos[\cos l \cos \Delta L] \quad (2.9)$$

En donde, al igual que en la sección anterior, ec. (2.7), l es la latitud de la estación terrena y ΔL es el valor absoluto de la diferencia de longitudes del satélite y de la estación terrena. Conocido θ' , el rango S es igual a:

$$S = 35,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos \theta'} \quad [\text{km}] \quad (2.10)$$

Nótese que para mayor exactitud, habría que tomar en cuenta la altitud de la estación terrena sobre el nivel de mar y modificar ligeramente el triángulo de la Fig. 2-14. Sin embargo, la diferencia que se obtiene en el rango S es muy pequeña y generalmente se despreciaría en los cálculos de niveles de potencia. En cambio, para los cálculos de atenuación por lluvia sí es muy importante considerar dicha altitud.

2.1.5.4. ATENUACIÓN POR ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA

Cuando las frecuencias de transmisión son lo suficientemente altas, las ondas electromagnéticas interactúan con las moléculas de los gases en la atmósfera. Estas interacciones reducen la potencia de las señales conforme atraviesan la atmósfera, y se intensifican en las frecuencias de resonancia del vapor de agua (H_2O), oxígeno (O_2) y bióxido de carbono (CO_2). Si consideramos exclusivamente el rango de frecuencias empleado por los satélites de comunicaciones, las únicas resonancias de interés son las del vapor de agua, que esta centrada en 22.2 GHz, y la del oxígeno, que esta en los 60 GHz. Más arriba en el espectro radioeléctrico existen otras frecuencias de resonancia para el vapor de agua, el oxígeno y el bióxido de carbono, pero para nuestro estudio su conocimiento no es relevante. Lo que sí es importante señalar es que las bandas de frecuencias que la Unión Internacional de Telecomunicaciones ha asignado para los satélites de comunicaciones (1 a 30 GHz) fueron cuidadosamente elegidas para evitar las zonas de mayor atenuación.

En dirección al cenit o para los ángulos de elevación altos, y en las bandas C y Ku, estas pérdidas atmosféricas son muy pequeñas y pueden ser despreciadas, ya que no afectan la incertidumbre de cualquier balance de potencias en un enlace satelital. En la banda Ka son

un poco mayores, pero cuando mucho de unos 0.4 dB. Sin embargo, si el ángulo de elevación θ de una estación terrena es muy bajo, dichas pérdidas sí son más significativas y pueden ser del orden de 1 dB en las bandas más altas.

Estrictamente, la atenuación total acumulada depende de la longitud exacta del trayecto de la señal a través de las capas atmosféricas responsables de esta absorción. Es decir, depende del ángulo de elevación de la estación terrena, de la altitud a la que está sobre el nivel de mar, la temperatura y la densidad de vapor de agua.

El contenido de Oxígeno en la atmósfera es constante a lo largo del año, las pérdidas debidas a este gas dadas en dB/Km cuando la frecuencia es expresada en GHz, se puede calcular mediante la expresión:

$$\gamma_o = \left[\frac{7.1}{f^2 + 0.36} + \frac{4.5}{(f - 57)^2 + 0.98} \right] f^2 \times 10^{-3} \quad (2.11)$$

El contenido de vapor de agua en la atmósfera varía dependiendo de la zona, época del año, temperatura etc. Pero se suele utilizar un valor promedio de la densidad de vapor de agua (ρ_w), típicamente este valor se encuentra entre los 7.5 y 10 g/m³. Las pérdidas debidas al vapor de agua se pueden aproximar mediante la ecuación:

$$\gamma_w = \left(0.067 + \frac{3}{(f - 22.3)^2 + 73} \right) \rho_w f^2 \times 10^{-4} \quad (2.12)$$

Las alturas equivalentes en la atmósfera para el oxígeno y para el agua son:

$$\begin{aligned} h_o &= 6 [Km] \\ h_w &= 2.2 + \frac{3}{(f - 22.3)^2 + 3} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Entonces, para una estación terrena ubicada a una altura h_s , la atenuación atmosférica se puede calcular mediante:

$$L_{a.a.} = \frac{\gamma_o h_o e^{\left(\frac{h_s}{h_o}\right)} + \gamma_w h_w}{\sin(\theta)} \quad (2.14)$$

Esta última figura se puede deducir de la geometría de la Fig. 2-15.

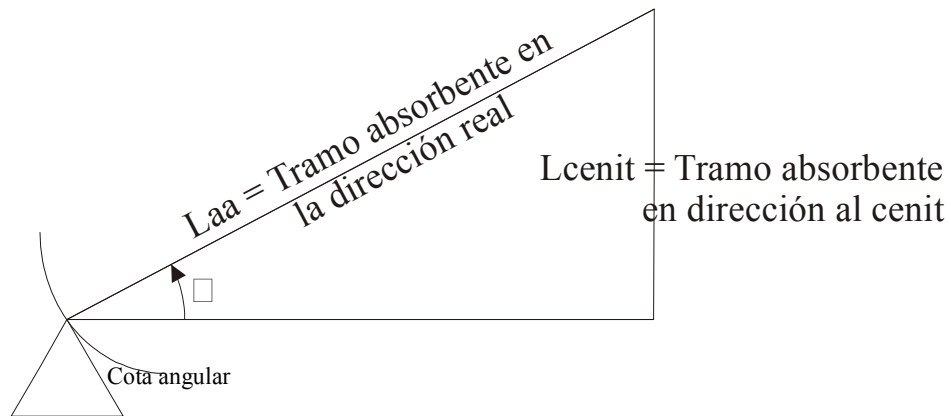


Fig. 2-15

La gráfica de la Fig. 2-16 corresponde a las pérdidas por atenuación atmosférica en una trayectoria en dirección del cenit, o sea, directamente cuando el ángulo de elevación es 90° . Por lo que, el valor de este tipo de atenuación se puede calcular directamente de la gráfica tan sólo aplicando la fórmula siguiente:

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \csc \theta \quad (2.15)$$

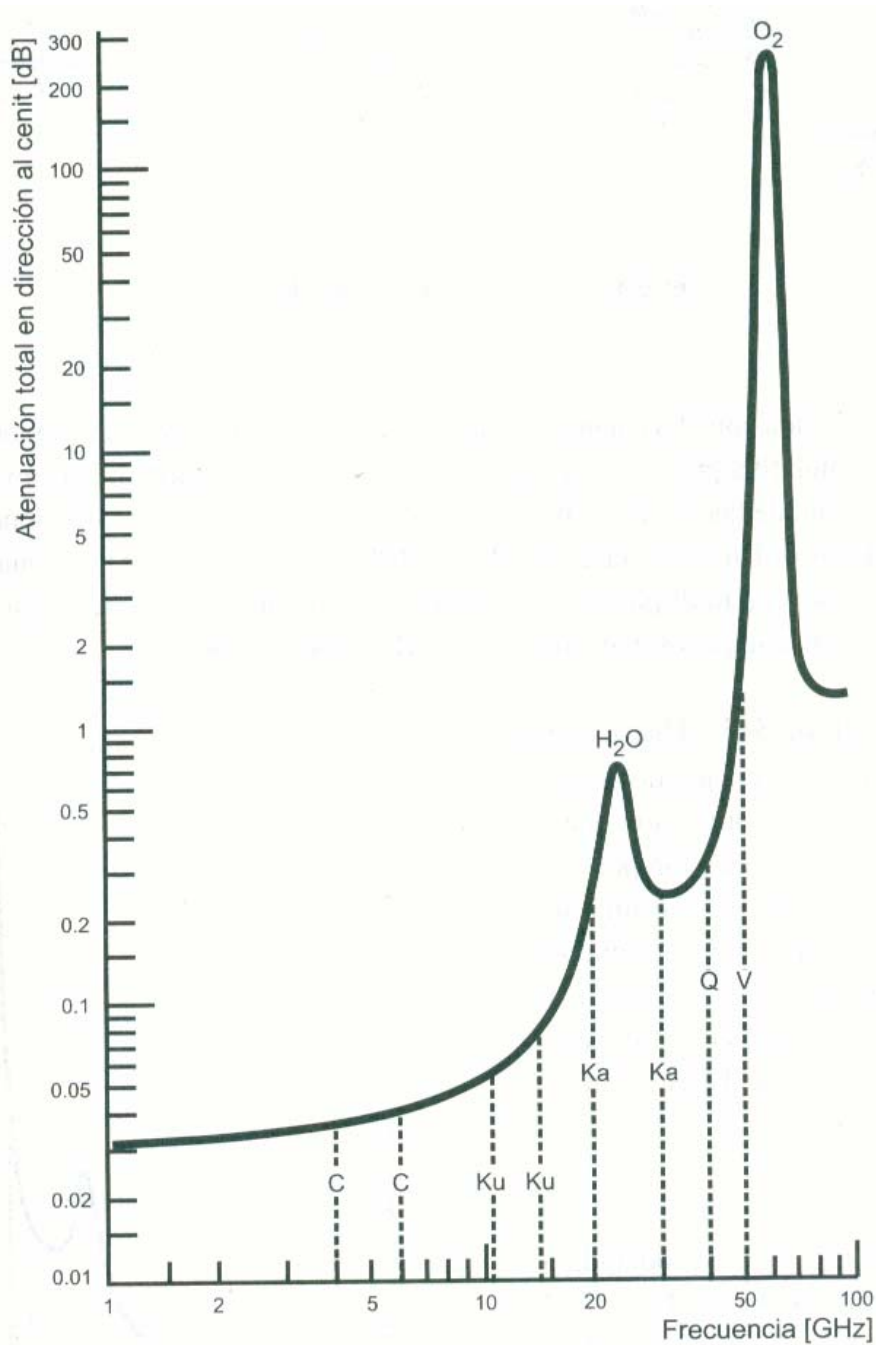


Fig. 2-16 Atenuación Producida por Absorción Atmosférica, en dirección al cenit a 20° C y 7.5 g/m³ de densidad de vapor de agua.

2.1.5.5. ATENUACIÓN POR LLUVIA

El patrón de tiempo y espacio de la ocurrencia de lluvia es considerado como un proceso aleatorio. Por esta razón, la atenuación por lluvia en un enlace satelital tiene un comportamiento inherentemente probabilístico, el cual depende de la frecuencia, la posición geográfica de la estación terrena, el clima, el tipo de terreno, la estación, la intensidad de lluvia, etc.

La consideración de lluvia en el diseño y plantación de un sistema de comunicaciones es importante debido a que los sistemas de comunicaciones pueden experimentar una pérdida en la señal debido a la atenuación causada por la lluvia y provocar que el sistema se torne indisponible para su uso temporalmente. La dispersión provocada por la lluvia produce, además, señales de ruido indeseables que interfieren en un sistema de recepción y que pueden envolver u ocultar la señal recibida.

En la Fig. 2-17 se ilustran las variables que intervienen en el recorrido de las señales portadoras que son atenuadas conforme atraviesan la lluvia, d es la distancia que las señales recorren entre dicho fenómeno, a su vez ésta distancia depende de la altura (h) entre las nubes y la superficie terrestre de la estación transmisora o receptora; así como del ángulo θ de la antena de la estación.

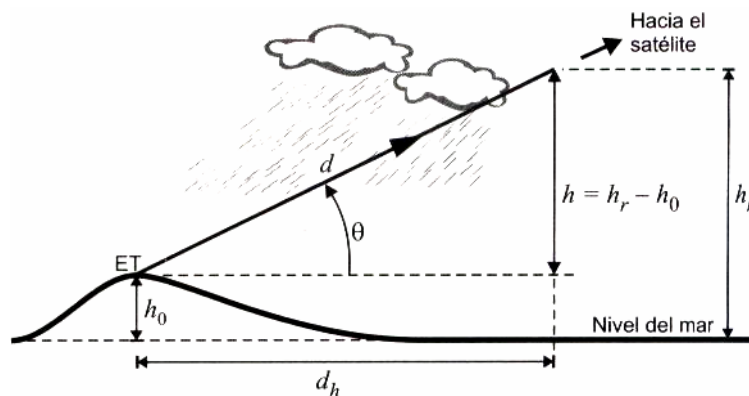


Fig. 2-17 Distancia que recorre la señal a través de la lluvia.

La propagación de las ondas electromagnéticas en la lluvia se debe a que la señal se atenúa en función de la frecuencia y de la intensidad de la lluvia que es medida en milímetros por hora (mm/h). Las gotas de lluvia absorben energía al ser calentadas por las señales de microondas y conforme la longitud de onda se hace comparable al tamaño de las gotas el efecto es más significativo lo cual causa mayor atenuación en la banda Ka ($\lambda = 1$ cm a 30

GHz) que en la banda Ku ($\lambda = 2$ cm a 14 GHz) o en la C ($\lambda = 5$ cm a 6 GHz), cuando la señal choca con las gotas de lluvia una parte la energía se dispersa.

La atenuación producida por la lluvia tiene un comportamiento casi cuadrático en función de la frecuencia en el rango de 3 a 100 GHz y es mayor a ángulos bajos de elevación de las antenas en las estaciones terrenas. En la Fig. 2-18 se muestra la atenuación específica en función de las frecuencias para razones de lluvia de 1, 10 y 100mm/h.

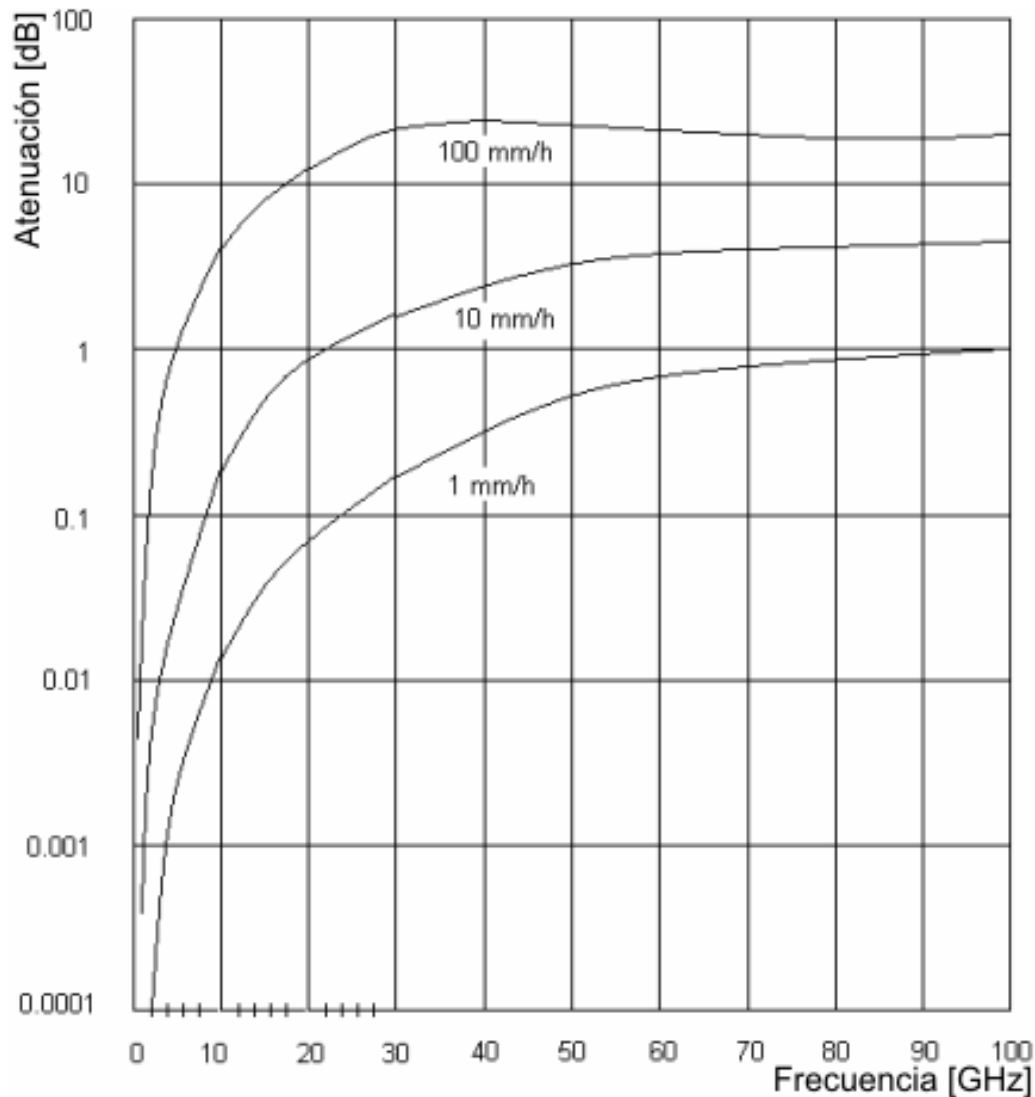


Fig. 2-18 Atenuación por lluvia en función de la frecuencia para razones de lluvia de 1, 10 y 100mm/h.

A 100 mm/h el máximo de atenuación ocurre en 40 GHz. Afortunadamente, el hablar de 100mm/h es hablar de condiciones que no se dan siempre. Para razones menores de lluvia, el máximo se encuentra localizado a frecuencias mayores de 100GHz. Para frecuencias menores de 100 GHz la atenuación específica provocada por la lluvia no es máxima, sin embargo, en este rango, la atenuación debida a la lluvia no crece de forma muy rápida con el valor de la frecuencia. Este comportamiento es igual para las distintas tasas de lluvia. Para frecuencias menores a 3 GHz, la atenuación causada por la lluvia no es significativa. En contraste, para frecuencias mayores la atenuación por lluvia representa un factor importante a considerar en el diseño de los sistemas de comunicaciones. Para frecuencias mayores a 10 GHz, la atenuación por lluvia representa más del 40% de la atenuación en el sistema y en sistemas que trabajan entre los 20 y 30 GHz, esta repretenda una parte aun más grande.

Para resolver la problemática a la que se enfrentan los sistemas de comunicación en la presencia de lluvia se deben recurrir a datos estadísticos tomados con base en la probabilidad acumulativa de las tasas de lluvia según la zona geográfica de interés. Para lograr dichas estadísticas, se han subdividido los continentes en regiones climáticas o hidrometeorológicas, cada región tiene su propia tasa de lluvia que es sobrepasada cierto porcentaje del tiempo en un año. En la Fig. 2-19 se muestran las regiones designadas con letras por la UIT-R (Unión Internacional de Telecomunicaciones sección de Radiocomunicaciones) para el mapa de América, los valores estadísticos publicados para dicha figura se proporcionan en la Tabla 2-2.

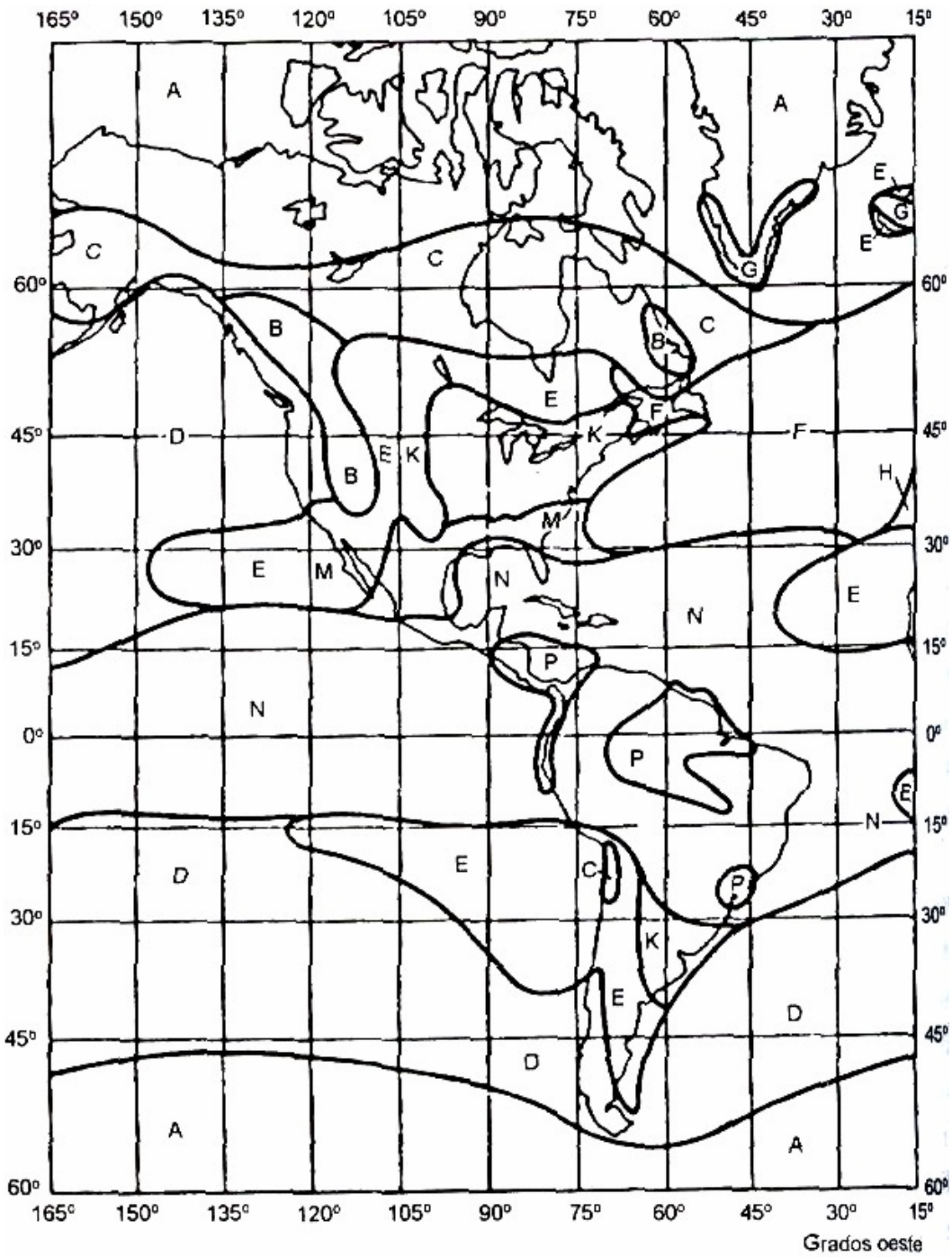


Fig. 2-19 Regiones de América divididas según la intensidad de lluvia.

% del tiempo excedido en un año Equivalencia en minuto acumulados		Intensidad de lluvia que es excedida (mm/h)													
		A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P
0.1 %	526 [min.]	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65
0.01 %	53 [min.]	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	6,mm<3	95	145
0.001 %	5.3 [min.]	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250

Tabla 2-2 Intensidad de lluvia excedida según su región.

Para realizar los cálculos con menor margen de error, la UIT-R también publica algunos mapas de contornos de intensidad de lluvia que es excedida por ciertos porcentajes de tiempo; la Fig. 2-20 muestra de forma más precisa estos contornos para un enlace con disponibilidad de 99.99% del tiempo.

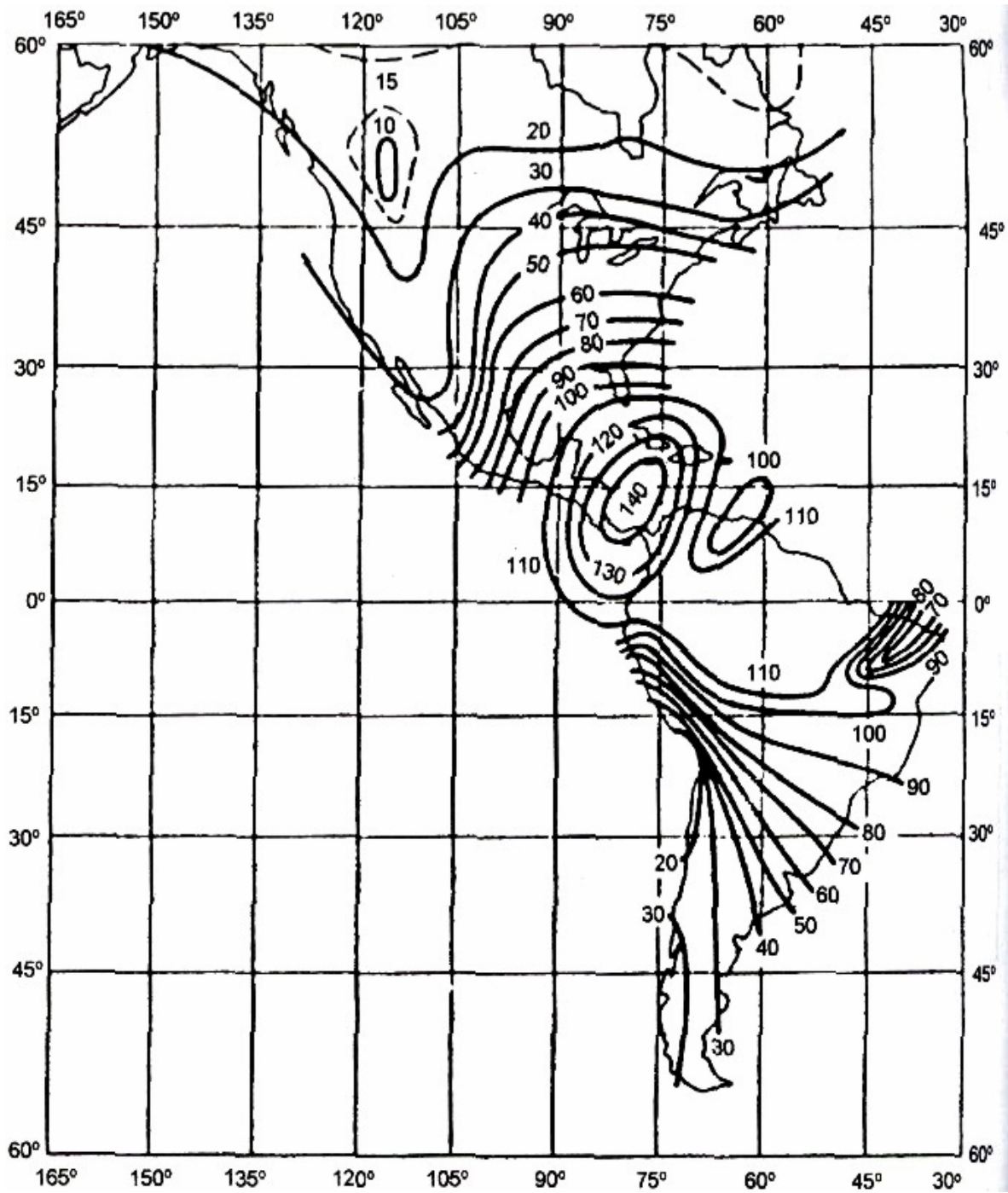


Fig. 2-20 Contornos de intensidad de lluvia [mm/h] que es excedida durante 0.01% de un año.

La UIT-R, en su reporte 564-4 publicado en 1990 recomienda un método para estimar la longitud d del trayecto oblicuo en el que una señal satelital es afectada en forma efectiva por la lluvia, éste método ha comprobado ser el mejor en cuanto a precisión para las bandas C y Ku; los pasos se indican a continuación:

1. Calcular la altura h_r de la Fig. 2-17 como:

$$h_r = 3 + 0.028l \quad 0^\circ \leq l \leq 36^\circ [km] \quad (2.16)$$

$$h_r = 4 - 0.075(l - 36) \quad l \geq 36^\circ [km] \quad (2.17)$$

l .- Latitud de la estación terrena en grados, ya sea norte o sur.

Se observa que h_r tiene valores entre 3 y 4 km, con un punto máximo de 4 km para $l = 36^\circ$.

2. Conocida h_r , la longitud física del trayecto oblicuo d por el cual la señal pasa bajo la lluvia se obtiene por simple trigonometría, de la misma Fig. 2-17 como:

$$d = \frac{h_r - h_0}{\text{sen } \theta} \quad (2.18)$$

h_0 .- Altitud de la estación terrena sobre el nivel de mar en kilómetros.

3. Calcular un factor reductor $r_{0.01}$, que es aplicable a una disponibilidad de 99.99% y que sirve para ajustar d y obtener la longitud efectiva de la trayectoria oblicua. Dicho factor toma en cuenta la no uniformidad de la distribución de la lluvia a diferentes alturas, y se obtiene de la siguiente forma:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + \left(\frac{d}{35 e^{-0.015 R_{0.01}}} \right) \cos \theta} \approx 1 \quad (2.19)$$

$R_{0.01}$.-Intensidad de la lluvia en mm/h excedida 0.01% en un año, según los contornos de la Fig. 2-19 y la Tabla 2-2.

4. Obtener el coeficiente de atenuación específica γ , dado en dB/km. El valor de este coeficiente depende de la intensidad con la que llueve y de otros coeficientes a y b , según la relación siguiente:

$$\gamma = a R_{0.01}^b \quad [\text{dB/km}] \quad (2.20)$$

Los valores de los coeficientes a y b se calculan teóricamente a partir de consideraciones sobre la propagación electromagnética a través de las gotas de lluvia, y dependen de la polarización de la señal y de su frecuencia. En la Tabla 2-3 se proporcionan algunos de estos coeficientes de atenuación específica publicados por la UIT-R, los cuales fueron obtenidos usando el modelo de distribución del tamaño de las gotas establecido por Laws y Parsons. Si la polarización de la señal es circular, se hace un promedio usando coeficientes de la Tabla 2-3, con las fórmulas siguientes:

$$a_c = \frac{a_h + a_v}{2}$$

$$b_c = \frac{a_h b_h + a_v b_v}{2a_c}$$

Frecuencia (GHz)	a_h	a_v	b_h	b_v
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
4	0.000650	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.200
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
30	0.187	0.167	1.021	1.000

Tabla 2-3 Coeficientes de atenuación específica para polarización vertical y horizontal.

Los valores de los coeficientes a y b de la Tabla 2-3 también pueden ser aproximados por las siguientes expresiones empíricas con f en GHz para ciertos rangos de frecuencia:

$$\begin{aligned} a &= 4.21 \times 10^{-5} f^{2.42} & 2.9 \text{ GHz} \leq f \leq 54 \text{ GHz} \\ b &= 1.41 f^{-0.0779} & 8.5 \text{ GHz} \leq f \leq 25 \text{ GHz} \end{aligned}$$

Al emplear estas últimas aproximaciones se supone que los coeficientes valen lo mismo para la polarización horizontal y vertical, lo cual indica que dependen en mayor parte de la frecuencia que de la polarización.

La UIT-R también publicó otra forma de calcular γ usando el nomograma que se muestra en la Fig. 2-21 auxiliándose de una regla o escuadra, se unen con una recta el punto de intensidad de lluvia y el punto de la frecuencia de transmisión, según la polarización empleada; el valor de γ se lee sobre la vertical central, donde cruza la recta trazada. Si la señal tiene polarización circular, se obtiene una buena aproximación promediando las atenuaciones específicas leídas con polarización horizontal y vertical a la misma frecuencia.

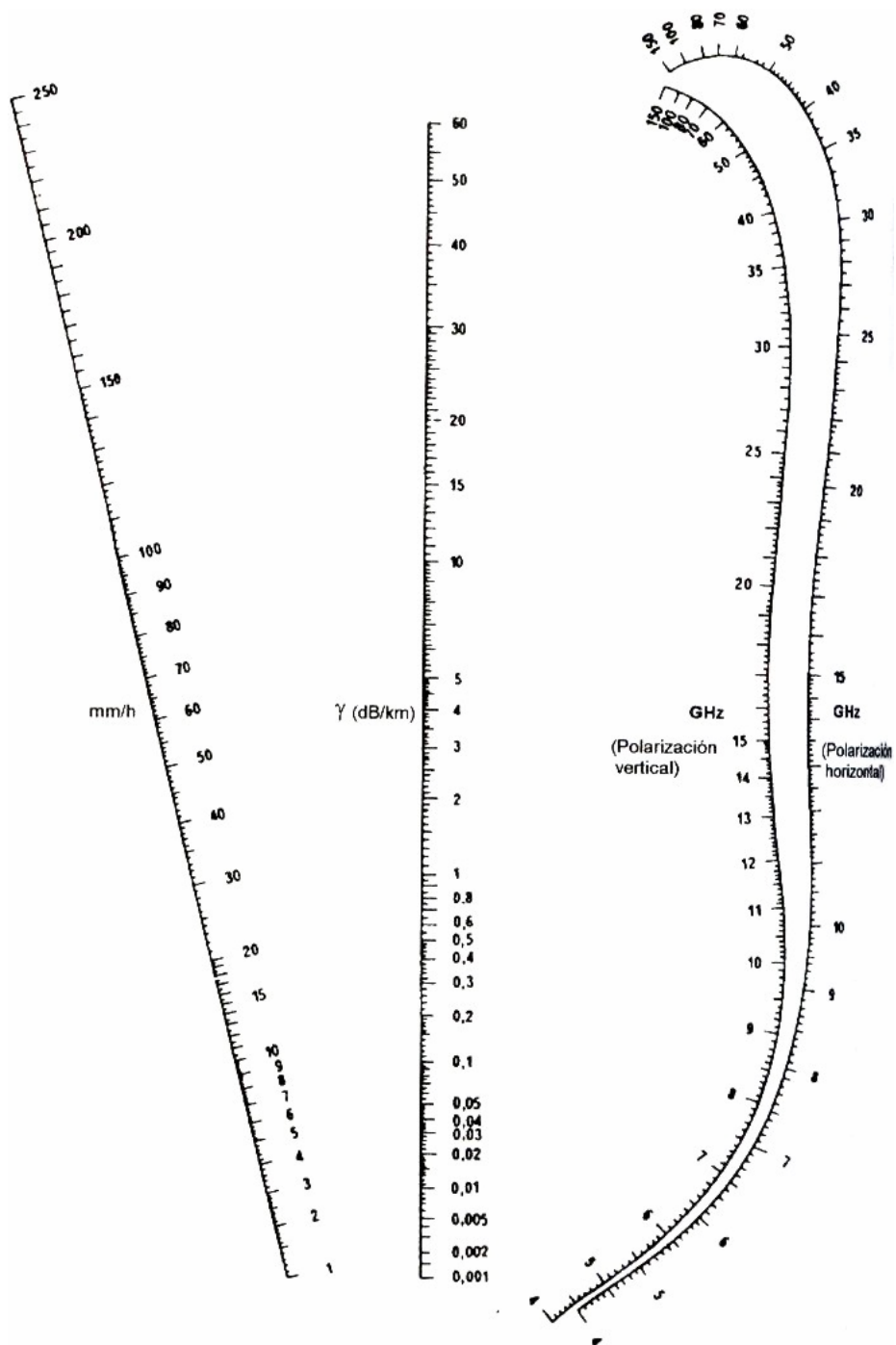


Fig. 2-21 Nomograma para calcular gráficamente el coeficiente γ de atenuación específica.

5. La atenuación L se calcula de la siguiente forma:

$$L_{lluvia_{0,01}} = \gamma \underbrace{(d)(r_{0,01})}_{\substack{\text{longitud efectiva} \\ \text{de la trayectoria} \\ \text{oblicua}}} \quad [\text{dB}] \quad (2.21)$$

Nótese que la atenuación obtenida con la ecuación anterior sería excedida durante 0.01% de un año, dando una disponibilidad de 99.99%. Si se desea estimar la atenuación excedida durante otros porcentajes del año, se puede usar la fórmula del siguiente paso.

6. Para una disponibilidad de $(100\% - p)$, la atenuación obtenida en el paso 5 se multiplica por un factor de acuerdo con la siguiente relación:

$$L_{lluvia_p} = \left[0.12 p^{-(0.546+0.043 \log p)} \right] L_{lluvia_{0,01}} \quad [\text{dB}] \quad (2.22)$$

2.1.5.6. ATENUACIÓN POR DESAPUNTAMIENTO

Los patrones de radiación y recepción de una antena no son uniformes en todas las direcciones, existe una dirección donde la ganancia es máxima y conforme nos alejamos de ese punto, la ganancia disminuirá.

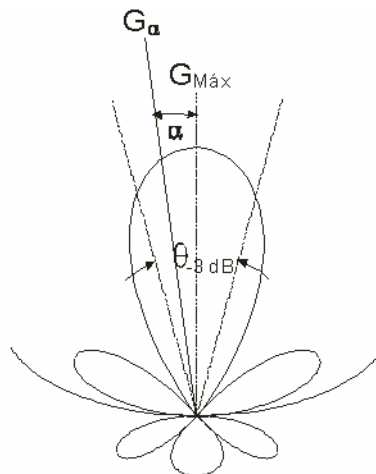


Fig. 2-22

En el caso ideal la antena transmisora y receptora se encuentran con sus ejes de máxima radiación alineados, entonces las ganancias de ambas antenas se aprovechan al máximo. Sin

embargo esta situación rara vez ocurre en la práctica, por lo que es normal tener pérdidas por desapuntamiento de las antenas.

$$\begin{aligned}
 [L_{transmisor}]_{dB} &= [L_T]_{dB} = 12 \left(\frac{\alpha_T}{\theta_{-3dB}_T} \right)^2 [dB] \\
 [L_{receptor}]_{dB} &= [L_R]_{dB} - 12 \left(\frac{\alpha_R}{\theta_{-3dB}_R} \right)^2 [dB] \\
 \text{para } &\left(0^\circ \leq \alpha \leq \frac{\theta_{-3dB}}{2} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

En donde α_T es el ángulo en grados entre los ejes de la antena terrestre transmisora y la antena del satélite; α_R es el ángulo comprendido entre los dos puntos de media potencia del lóbulo principal del patrón de radiación de la estación terrena. Esto se ilustra en la Fig. 2-22

Las ecuaciones anteriores, determinan las pérdidas por desapuntamiento en el enlace ascendente y el descendente respectivamente y deberán ser restadas a la potencia de una señal resultante durante el cálculo del enlace.



Fig.2-23

2.1.5.7. OTRAS ATENUACIONES

Aun cuando la absorción atmosférica y la atenuación causada por la lluvia, nieve, granizo, etc., constituyen el principal problema de la propagación de las ondas milimétricas, es necesario tener una idea de los efectos de esparcimiento debido a partículas de materia, por ejemplo partículas de polvo y arena en el aire. Sin embargo se ha encontrado que los efectos de las partículas de arena, humo y de polvo producen una atenuación despreciable sobre las longitudes de onda milimétricas.

2.1.6. CONFIGURACIÓN BÁSICA DE UN ENLACE EN RF

En la Fig. 2-24 se muestra la configuración básica de un enlace en RF. En la estación terrena transmisora son importantes el amplificador de potencia (AP) y la antenna que radia la señal portadora amplificada. Cuando la señal llega al satélite, hay que considerar las características de la antenna receptora y de preamplificador de bajo ruido (ABR) conectado después de ella. En el trayecto de subida, la señal portadora sufrirá atenuación por propagación en el espacio libre, por absorción en la atmósfera, por lluvia, por despolarización, y por desajuste o desalineación de los ejes de las antenas de transmisión y recepción. Asimismo, dentro de su propio ancho de banda, tal vez recibirá interferencias de RF y, sin lugar a dudas, la introducción de ruido. De allí que, al desconectar las atenuaciones en RF a la potencia original de la señal portadora que partió del punto 1 y añadirle la ganancia de la antenna receptora del satélite, quedará “algo”. El ruido acumulado se puede englobar como un “ruido total equivalente”. Todo este ruido debe estar referido a un mismo punto, que por convención se toma como el punto 2 de la Fig. 2-24, a la entrada del ABR. Conocida la potencia C que quedo en el punto 2 y la potencia del ruido total referido en el mismo punto, se obtiene el cociente $(C/N)_s$; el subíndice s indica que corresponde al enlace de subida.

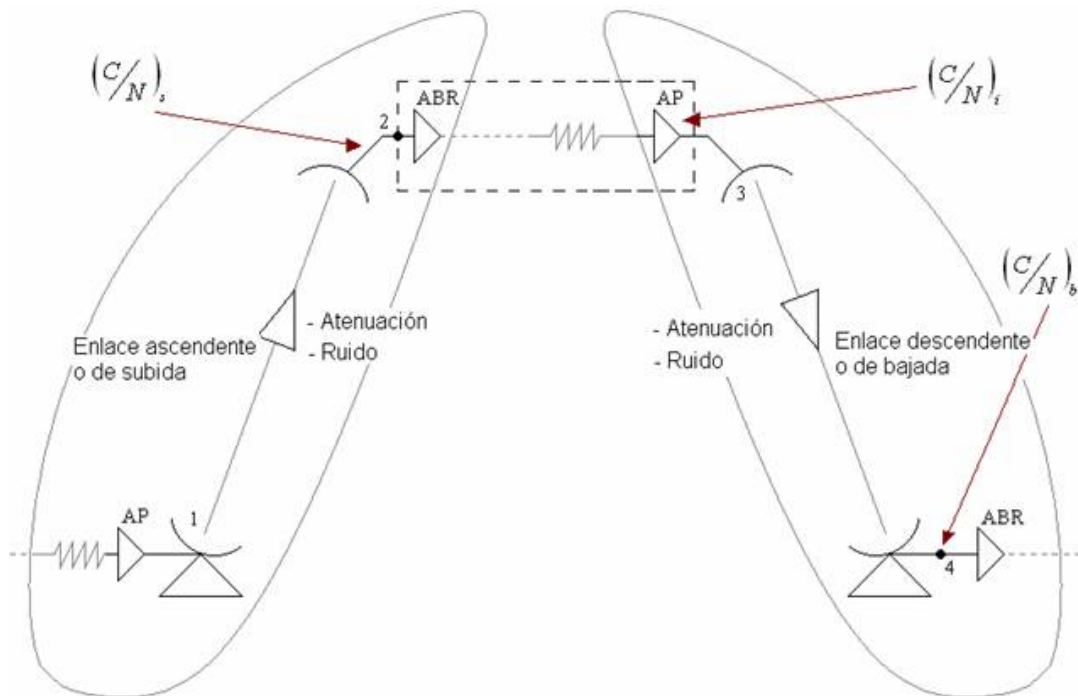


Fig. 2-24 Configuración Básica de un Enlace de RF

La señal portadora, junto con todo el ruido acumulado, es procesada en el interior del satélite, y poco antes de partir de regreso a la Tierra, es amplificada en el transpondedor que le corresponda, por su propio amplificador de potencia (AP). Si hay más de una sola portadora dentro del amplificador, irremediablemente se producirá ruido de intermodulación; el punto óptimo de operación del amplificador se controla ajustando el atenuador de microondas. Como regla, se tiene que a mayor potencia de salida del amplificador, habrá mayor ruido de intermodulación, por lo que, a bordo del satélite, se define un cociente de potencia de la portadora sobre el ruido de intermodulación, designado como $(C/N)_i$. El subíndice i indica la etapa de intermodulación, y el valor del cociente de potencias lo especifica, por medio de gráficas o tablas, el propio fabricante del satélite. Cabe mencionar que en la estación terrena transmisora también se debe elegir cierto punto de operación en su amplificador de potencia, según el número de portadoras que transmita, con el fin de reducir el ruido de intermodulación; la reducción de potencia a la salida debe ser tomada en cuenta a la hora de seleccionar el amplificador de dicha estación.

Como última etapa del enlace de RF, tenemos la trayectoria de bajada. Aquí sucede lo mismo que en el enlace ascendente, sólo que a la inversa. Del punto 3 de la señal portadora revitalizada, después de ser amplificada por el AP del transpondedor y la ganancia directiva de la antena del satélite. Conforme descende, se atenúan por las mismas razones que en el enlace de subida, y al llegar a la estación terrena receptora, después de ser amplificada por la antena, queda “algo” de potencia inmediatamente antes de la entrada al ABR, indicada el punto 4 en l Fig. 2-24. Obviamente, también se introducirá ruido de diversas fuentes dentro del ancho de banda de RF de la señal portadora, y se puede calcular otro cociente de potencias $(C/N)_b$, en donde b indica que se trata del enlace de bajada. Se debe recordar que la frecuencia de la portadora en el enlace descendente es diferente a la del enlace ascendente, por lo que los niveles de atenuación y de ruido también son diferentes.

En cuanto a componentes o equipos se refiere, en los extremos transmisores del enlace ascendente y del descendente hay que considerar al amplificador de potencia y a la antena transmisora, con sus correspondientes conectores; y en los extremos receptores de ambos enlaces importa la pareja formada por la antena receptora y el preamplificador de bajo ruido (ABR o LNA), también con sus conectores asociados. Dentro del satélite hay que tomar en cuenta las características del amplificador de potencia, según el transpondedor al que corresponda y la posición del atenuador de microondas a su entrada, ya que éste controla el punto de operación y el nivel de ruido de intermodulación.

2.1.6.1. DENSIDAD DE FLUJO, PIRE Y ATENUACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE

Las pérdidas de potencia más grandes en un enlace satelital ascendente o descendente se deben a la enorme distancia que hay entre el satélite y las estaciones terrenas. Aunque su valor exacto depende de la frecuencia (para satélites geoestacionarios tales pérdidas son del orden de 200 dB en la subida y otros 200 dB en la bajada). A dicha disminución de potencia debida a la distancia viajada por una señal portadora, se le refiere como atenuación por propagación en el espacio libre. La deducción de la fórmula que permite calcular esta atenuación es muy sencilla. Veamos cómo hacerlo apoyándonos en la Fig. 2-25. En el extremo del transmisor, la potencia de salida del amplificador P_T es radiada por la antena transmisora, concentrándola en cierta región frente a ella; el grado de esta concentración depende de su ganancia, G_T . El subíndice T indica que se trata de equipo en el extremo transmisor.

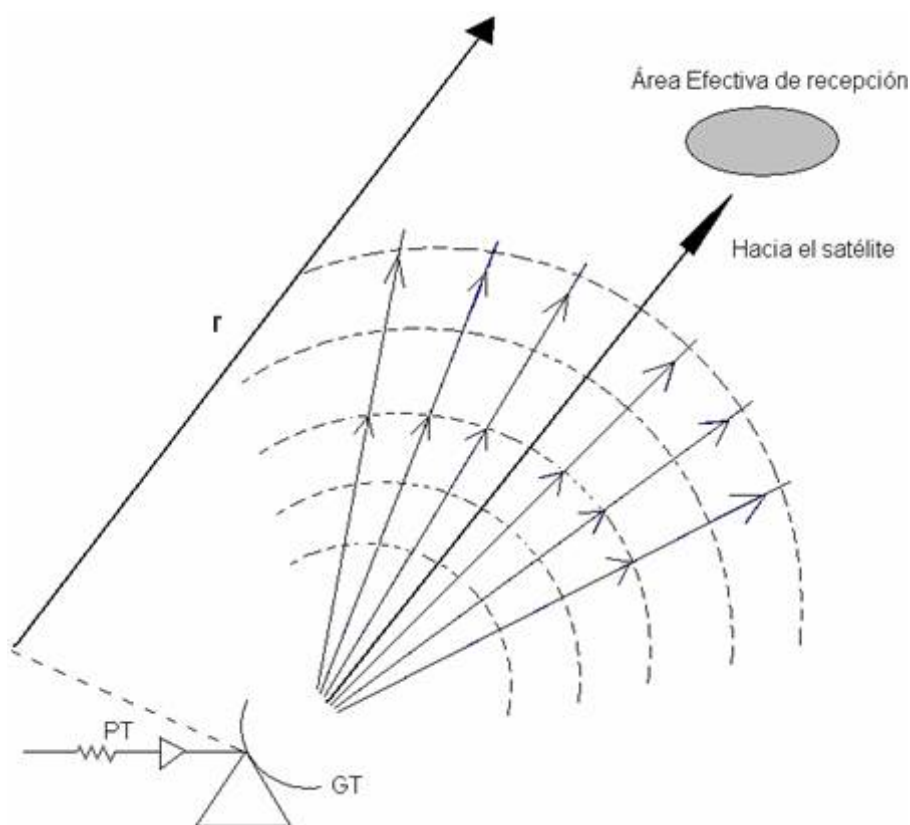


Fig. 2-25 Definición del PIRE y cálculo de atenuación por propagación en el espacio libre

Si la antena transmisora no fuera directiva, sino isotrópica, entonces la potencia P_T se distribuiría de manera uniforme en un frente de onda esférico; a una distancia o radio r desde la antena, la superficie esférica sobre la que dicha potencia estaría distribuida tendría un área igual a $4\pi r^2$, y por cada unidad de superficie habría una cierta densidad de flujo de potencia, F_d igual a:

$$F_d = \frac{P_T}{4\pi r^2} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.24)$$

suponiendo una antena isotrópica

Sin embargo, la antena transmisora no es isotrópica, sino directiva, con una ganancia G_T , que es máxima en dirección hacia el satélite, siempre y cuando esté bien orientada. Esta ganancia “amplifica” la densidad de flujo de potencia de la ecuación (2.24), por lo que, en la dirección hacia el satélite realmente es igual a:

$$F_d = \left(\frac{P_T}{4\pi r^2} \right) G_T \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.25)$$

con una antena directiva

Al producto $P_T G_T$ se le designa como potencia isotrópica radiada efectiva, o simplemente PIRE, por sus siglas:

$$PIRE = P_T G_T \quad [\text{W}] \quad (2.26)$$

que en decibeles es igual a:

$$[PIRE]_{dBW} = 10 \log P_T + 10 \log [G_T]_{dBi} \quad [\text{dBW}] \quad (2.27)$$

Suponiendo ahora que la antena receptora tiene un área efectiva A_{ef} entonces la potencia total que la antena captura será el producto de la densidad de flujo por el área efectiva.

$$Potencia\ Capturada = \underbrace{C}_{[W]} = \underbrace{(F_d)}_{[W/m^2]} \underbrace{(A_{ef.})}_{[m^2]} = \left(\frac{P_T G_T}{4\pi r^2} \right) \cdot (A_{ef.}) \quad (2.28)$$

Sin embargo sabemos de la ecuación (2.3) que:

$$G_{m\acute{a}x} = \eta \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \right)$$

y considerando que el área efectiva de la antena es:

$$A_{efectiva} = \eta A_{f\acute{is}ica} = \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} [m^2]$$

entonces obtenemos la ecuación:

$$C = \left(\frac{P_T G_T}{4\pi r^2} \right) \cdot \left(\frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \right) = (PIRE) \cdot (G_R) \cdot \left(\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 r^2} \right) [W] \quad (2.29)$$

De esta ecuación vemos que tanto el PIRE como G_R son ganancias positivas que se tienen sobre la señal, pero que el tercer factor al ser mucho menor que uno, provoca que la potencia de la señal disminuya, por lo que se trata de una ganancia de pérdidas, es decir una atenuación a cuyo inverso se le denota como atenuación por espacio libre designada como $L_{e.l}$:

$$L_{e.l} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \quad (2.30)$$

De esta forma:

$$C = \frac{(PIRE)(G_R)}{L_{e.l}} [W] \quad (2.31)$$

Expresado en decibeles:

$$C_{dBW} = [PIRE]_{dBW} + [G_R]_{dBi} - [L_{e.l.}]_{dB} \quad (2.32)$$

o bien:

$$C_{dBW} = 10 \log P_T + [G_T]_{dBi} + [G_R]_{dBi} - [L_{e.l.}]_{dB} \quad (2.33)$$

Esta ecuación es aplicable tanto para un enlace ascendente como descendente. En el caso ascendente la estación transmisora se ubica en la tierra y la receptora en el satélite. En el enlace descendente se tiene el caso inverso, sin embargo no hay que olvidar que las frecuencias en los enlaces de subida y bajada son distintas; es por ello que es común expresar las pérdidas por espacio libre en términos de la frecuencia f en vez de la longitud de onda:

$$L_{e.l.} = \left(\frac{4\pi r f}{c} \right)^2 \quad (2.34)$$

El PIRE, combina a la ganancia G de la antena transmisora en una determinada dirección con la potencia total P_T que recibe del amplificador conectado a ella: $PIRE = P_T \cdot G$. El PIRE o potencia isotrópica radiada efectiva es simplemente el producto de la potencia entregada a la antena por la ganancia de ésta en cierta dirección. Los contornos de PIRE, es decir los lugares geométricos en los que el PIRE es constante e igual a un determinado valor, tienen trayectorias irregulares cuando los haces de radiación son asimétricos. Los valores de los contornos se dan en dBW:

$$PIRE_{del\ satélite} = \underbrace{P_T}_{\substack{\text{Potencia} \\ \text{entregada} \\ \text{a la antena}}} \times \underbrace{G}_{\substack{\text{Ganancia} \\ \text{de la antena} \\ \text{en cierta} \\ \text{dirección}}} [W] \quad (2.35)$$

$$[PIRE]_{dBW} = 10 \log PIRE_W = 10 \log P_{T_w} + [G]_{dBi} \quad (2.36)$$

De la ecuación (2.36) se observa que si se conoce el valor del $PIRE$ en dBW, y dado que P_T es constante, es fácil deducir el valor de la ganancia de la antena en dBi mediante una simple resta, para la misma dirección que corresponde a dicho $PIRE$:

$$[G]_{dBi} = [PIRE]_{dBW} - 10 \log P_{T_w} \quad (2.37)$$

En otras palabras los contornos del PIRE son similares a los de la ganancia de la antena, a la misma frecuencia. Los contornos de PIRE proporcionados por el fabricante u operador corresponden a una determinada frecuencia, y la ganancia de la antena cambia con la frecuencia dentro del rango de los enlaces descendentes; también es posible tener ligeros cambios en la forma del patrón de radiación de la antena conforme a la frecuencia aumenta o disminuye, dentro del ancho de banda de 500 MHz normalmente empleado, tanto porque su dimensión eléctrica cambia como por el efecto de la superficie perfilada (si es parabólica) o de su red alimentadora con desplazamiento de fases.

Es importante calcular la orientación de una estación terrena hacia el satélite geoestacionario con el que debe comunicarse, ya que su ángulo de elevación es necesario para poder cuantificar varios de los efectos del medio de propagación sobre las señales transmitidas.

2.1.6.2. RUIDO

La señal que llega al punto receptor, así se trate del enlace de subida o del de bajada, es de un nivel muy bajo, su potencia es del orden de nanowatts o picowatts. A pesar de esto, el problema quedaría resuelto simplemente amplificando las señales, hasta que alcanzasen los valores necesarios para ser utilizables, sin embargo, como en todo sistema de comunicaciones, la señal sufre a lo largo de su trayectoria de la adición de señales no deseadas provocadas por diferentes fenómenos y por distintas condiciones sobre las cuales no se tiene control. Estas señales, llamadas ruido, tienen su origen principalmente en fuentes de radiación como los astros o la Tierra que entran en el sistema por la antena, en el ruido generado por los propios componentes de los equipos y en interferencias de otros sistemas radio. Las principales fuentes de ruido tanto para el enlace de subida como para el de bajada se presentan en la Tabla 2-4. Todos estos tipos de ruido deben ser calculados con su equivalente referido a un mismo punto o nodo, que generalmente se toma como el punto de entrada al amplificador de bajo ruido del extremo receptor

Enlace de subida	Enlace de bajada
ABR del satélite y demás amplificadores	ABR de la estación terrena y demás amplificadores
Guías de ondas y conectores de la estación terrena transmisora	Guías de ondas y conectores de la antena transmisora del satélite
Guías de ondas y conectores de la antena receptora del satélite	Guías de ondas y conectores de la estación terrena receptora
Radiaciones indeseables capturadas por la antena del satélite	Radiaciones indeseables capturadas por la antena de la estación terrena
Lluvia en la zona del enlace ascendente	Lluvia en la zona del enlace descendente

Tabla 2-4 Principales fuentes de ruido para enlaces satelitales de subida y bajada.

El ruido en un sistema de comunicaciones es un parámetro que no es posible suprimir en su totalidad. Un enlace satelital bien diseñado debe garantizar que la proporción de potencias entre la señal deseada o portadora y el ruido sea mayor o igual que cierto valor de umbral, de tal modo que la señal recuperada sea útil.

2.1.6.2.1. RUIDO TÉRMICO

También es conocido como ruido Blanco debido a que su distribución es plana en el espectro de frecuencias. Tiene su origen en el movimiento aleatorio de los electrones dentro de un material producido por la temperatura.

La potencia N del ruido producido por una fuente de ruido térmico se obtiene mediante:

$$N = kTB \quad [\text{W}] \quad (2.38)$$

Donde:

k es la constante de Boltzman $k = 1.379 \times 10^{-23}$ [J/K]

T = Temperatura equivalente de ruido (K)

B = Ancho de Banda del ruido

Definimos Densidad de ruido como:

$$N_0 = \frac{N}{B} = kT \left[\frac{W}{Hz} \right] \quad (2.39)$$

2.1.6.2.2. FIGURA DE RUIDO PARA AMPLIFICADORES Y ATENUADORES

Se define como el cociente entre la potencia de ruido a la salida del amplificador y la potencia de ruido que habría si dicho amplificador no generara ruido y las fuentes de ruido estuviesen a la entrada a una temperatura de referencia T_0 la cual se considera de 290 K.

$$F = \frac{GkT_0B + GkT_eB}{GkT_0B} = \frac{T_0 + T_e}{T_0} = 1 + \frac{T_e}{T_0} \quad (2.40)$$

La temperatura de ruido es entonces:

$$T_e = T_0 (F - 1) = 290(F - 1) \quad (2.41)$$

Para un atenuador con perdidas igual a L su figura de ruido es $F = L$, esto se deduce de considerar al atenuador como un amplificador cuya ganancia es $G = 1/L$.

Para calcular la temperatura de ruido de las nubes y de la lluvia se consideran estos como atenuadores, pero en vez de considerar $T_0 = 290$ K considerado para cualquier objeto en la superficie terrestre, se toma $T_0 = 270$ K para las nubes y $T_0 = 280$ K para la lluvia.

2.1.6.2.3. TEMPERATURA DE RUIDO PARA AMPLIFICADORES EN CASCADA

Consideremos los amplificadores en cascada de la Fig. 2-26 a la salida de 1 segundo amplificador el ruido total amplificado es igual a:

$$T_{Amp2} = (T_1 G_1) G_2 + T_2 G_2$$

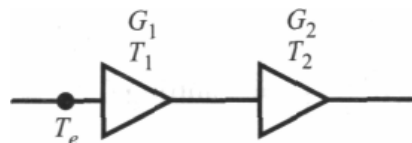


Fig. 2-26

Si consideramos a la pareja como un bloque tenemos que:

$$T_{Amp2} = T_e (G_1 G_2)$$

Igualando obtenemos T_e :

$$T_e = T_1 + \frac{T_2}{G_1} \quad (2.42)$$

De la misma manera se puede llegar a la expresión:

$$T_e = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 G_2} + \frac{T_4}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{T_n}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad (2.43)$$

Se puede concluir del análisis de esta expresión que la mayor parte de la temperatura de ruido del conjunto es introducida por el primer amplificador, por lo que se requiere que este sea el de mejor calidad.

2.1.6.2.4. TEMPERATURA DE RUIDO DE UNA ANTENA (ENLACE DE BAJADA)

La temperatura de ruido de la antena forma parte de la temperatura de ruido de todo el sistema de recepción, afectando directamente al factor de calidad del mismo. Dicha temperatura de ruido de la antena esta determinada por los siguientes factores:

- Ruido cósmico en RF.
- Ruido Galáctico.
- Precipitaciones.
- Ruido Solar.
- Presencia de la tierra o Ruido de Tierra caliente.
- Contribución de objetos cercanos (Otros enlaces, etc.)
- Temperatura de bloqueo (alimentadores, etc.)

El ruido cósmico proviene de radiaciones que se originaron desde partes muy profundas del universo y tiene una temperatura de 2.76 K en frecuencias de radio. El ruido galáctico se origina en nuestra galaxia y es proporcional con la concentración de estrellas en la dirección hacia donde apunta la antena. Este ruido es dependiente de la frecuencia, su orden es de varias decenas de grados Kelvin en el rango de los MHz. Para banda L (1-2 GHz) es

aproximadamente de 10 K; pero disminuye para mayores frecuencias, al grado de ser despreciable en las bandas C, Ku y Ka. Por otra parte, el ruido generado por la atmósfera y que es captado en su mayoría por el lóbulo principal, depende tanto de la frecuencia como del ángulo de elevación de la antena aunque generalmente es bajo.

La temperatura de ruido de la lluvia se obtiene al considerar a la lluvia como un atenuador, por lo que usamos la ec. (2.41) usando como temperatura física la temperatura de la lluvia, es decir, $T_0 = 280$ K.

$$T_0 = 280(L_{lluvia} - 1) \quad (2.44)$$

El ruido solar puede considerarse despreciable excepto cuando el sol está exactamente en la dirección del lóbulo principal de la antena, en este caso, la temperatura de ruido de la antena es tan grande que el enlace se pierde (puede llegar ser de hasta 25000 K); afortunadamente este fenómeno dura sólo unos cuantos minutos durante los equinoccios de primavera y otoño.

Las interferencias terrestres, que se pueden introducir en un enlace a través de los lóbulos laterales y posteriores, se pueden minimizar si la antena tiene un ángulo de elevación grande. Sin embargo, esto no siempre es posible y para estos casos se procura instalar la antena en lugares donde se tenga poca interferencia local, por ejemplo, donde exista algún tipo de blindaje natural o artificial contra este tipo de interferencias. Es por ello que es común encontrar estaciones terrenas en medio de bosques ya que los árboles sirven como barreras naturales contra ruidos e interferencias que pudieran ser captados por los lóbulos laterales.

El ruido introducido por la tierra, para ángulos de elevación menores a 10° tiene un valor de aproximadamente 50 K y para ángulos entre 10° y 90° es aproximadamente 10 K, pero varían dependiendo de la geometría de la antena. De tal modo que la forma más exacta de encontrar este valor es midiéndolo. Los fabricantes de antenas suelen proporcionar tablas donde se consideran todos los ruidos anteriores excepto por el de la temperatura de ruido de la lluvia. A continuación se muestra una tabla con valores típicos.

Diámetro	Frecuencia	Ganancia [dBi]	TA[K]						
			9:1	15	20	30	40	50	60
3.8 m	4 GHz	42.9	36.	29	27	26	24	22	22.
5 m	4 GHz	44.9	33.	27	25	23	21	20	20.
7.3 m	4 GHz	47.5	32.	26	24	21	20	19	19.
1.8 m	12 GHz	45.4	46.	-	37	-	37	-	-
3.5 m	12 GHz	50.7	43.	36	31	27	26	25	25.

Tabla 2-5

Además de los datos proporcionados por los fabricantes, la UIT ha publicado algunas gráficas típicas como la de la Fig. 2-27. Adicionalmente, se cuenta con algunas fórmulas empíricas como la de la, que es válida para la banda Ku.

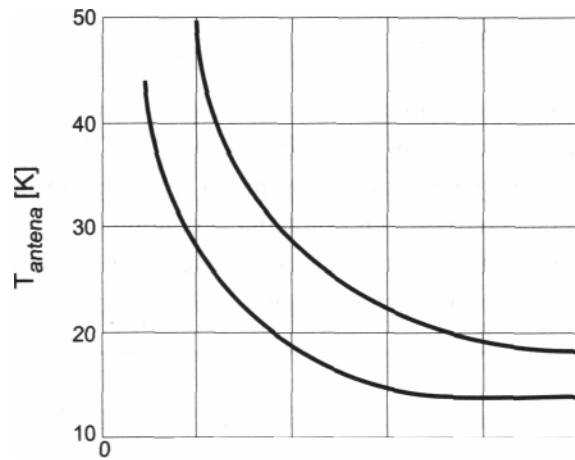


Fig. 2-27

$$T_{antena} = 15 + \frac{30}{D} + \frac{180}{\theta} \quad [K] \quad (2.45)$$

2.1.6.2.5. TEMPERATURA DE RUIDO DE UNA ANTENA (ENLACE DE SUBIDA)

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 geoestacionaria; 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. Entonces, la temperatura de ruido del sistema en un receptor satelital es del orden de unos 700 K. El enlace ascendente es afectado únicamente por la atenuación, la cual es mayor que en el enlace de bajada debido a que tiene una frecuencia más alta.

2.1.6.2.6. TEMPERATURA DE RUIDO DE UN SISTEMA

Para determinar la temperatura de ruido de un sistema se toma como punto de referencia la terminal de la antena o la entrada del amplificador. Por lo regular, cuando existe un elemento atenuador entre las terminales de la antena y la entrada del amplificador de bajo ruido se toma como punto de referencia la entrada de éste. Esto es por la conveniencia que representa el que éste amplificador tenga una alta ganancia con una temperatura de ruido relativamente baja (representada por la Figura de ruido) provocando que las temperaturas de ruido de los elementos conectados posteriormente a él no representen una cantidad considerable en el ruido del sistema.

El sistema siguiente representa a un sistema receptor.

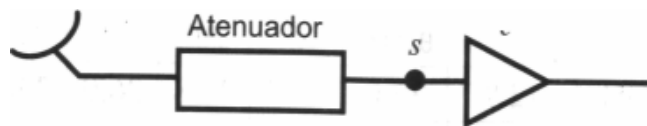


Fig. 2-28

Su Temperatura de ruido total, o temperatura de ruido del sistema referido a la entrada del LNA será la suma de las diferentes temperaturas de ruido referidas a la entrada del LNA.

$$T_s = \frac{T_a}{L} + T_0(L-1) + T_0(F-1) \tag{2.46}$$

En donde el primer término representa la temperatura de ruido de la antena pasando por el atenuador (L es el valor numérico de la atenuación), el segundo término representa la temperatura de ruido del atenuador a la entrada del LNA y el tercer término representa la temperatura de ruido del LNA a la entrada. Debe de considerarse que la temperatura de ruido de la antena tiene que ser calculada previamente con las condiciones de cielo despejado y precipitación en las distintas condiciones de disponibilidad que de consideren. Es decir, se obtiene una temperatura del sistema diferente para las distintas condiciones de

disponibilidad. Es aquí donde se refleja la importancia que tiene la lluvia en el funcionamiento de un sistema de comunicaciones.

2.1.6.3. FIGURA DE MÉRITO

El valor de la figura de mérito o factor de calidad dependerá de las características de su antena, tales como su ganancia, junto con las pérdidas que sufre la señal hasta que llega a la entrada del receptor. Estas pérdidas, se deben al desapuntamiento del haz en recepción. Entre otras de las características que influyen en el valor de la figura de mérito se encuentra presente el patrón de radiación, así también los demás elementos del subsistema de comunicaciones como el número de transpondedores, la posición de la estación terrena transmisora dentro de la huella de iluminación del satélite.

En el enlace de subida, la figura de Mérito o factor de calidad del satélite se puede obtener si primero calculamos el ángulo de elevación θ de la estación terrena.

Si $c = \cos l \cdot \cos \Delta L$ y $\theta' = \arccos c$

Podemos obtener el valor de θ por medio de la siguiente expresión que ya había sido analizada anteriormente

$$\theta = \arctan \left[\frac{c - \frac{R_e}{h}}{\text{sen} \theta'} \right]$$

En donde:

l = Latitud de la estación terrena

ΔL = | Longitud del satélite – Longitud de la estación terrena |

R_e = Radio de la Tierra = 63,780 Km

h = Radio de la órbita = 42,164 Km

Ahora obtenemos el rango o distancia usando la ecuación (2.10)

$$d = 35786\sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos \theta'}$$

Por lo tanto, las pérdidas por propagación en el espacio libre se obtienen con ayuda de la ecuación (2.34)

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 10 \log \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2$$

Las pérdidas por absorción atmosférica se calculan por medio de la expresión (2.15)

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \cos ec \theta$$

Usando la ec.(2.27), podemos determinar el PIRE de la ecuación terrena

$$[PIRE]_{dB} = 10 \log P_T + 10 \log G_T \quad [dBW]$$

Se supone que la dirección de máxima ganancia de la antena apunta exactamente hacia el satélite. Si hubiese algún margen o error de apuntamiento, habría que calcular las pérdidas por medio de las siguientes expresiones, y restárselas al valor del PIRE obtenido anteriormente.

$$L_{\text{extremo}}^{\text{transmisor}} = L_T = 12 \left(\frac{\alpha_T}{\theta_{-3dB}} \right)_T^2 \quad [dB]$$

Y, si la antena del satélite no apunta exactamente hacia la estación terrena.

$$L_{\text{extremo}}^{\text{receptor}} = L_R = 12 \left(\frac{\alpha_R}{\theta_{-3dB}} \right)_R^2 \quad [dB]$$

De esta forma podríamos obtener las pérdidas totales durante la subida.

$$L = L_{e.l.} + L_{a.a.} \quad [dB]$$

La temperatura de ruido a la entrada del equipo receptor es:

$$T_s = \frac{290}{L} + 290 \left(1 - \frac{1}{L} \right) + T_{ABR}$$

por lo que la figura de mérito o factor de calidad del satélite se define:

$$\left[\left(\frac{G}{T} \right)_{sat} \right]_{dB/K} = \left[\left(\frac{G_R}{T_s} \right)_{m\acute{a}x} \right] - \left(\begin{array}{l} \text{P\acute{e}rdidas por desapuntamiento} \\ \text{y de los conectores en el extremo} \\ \text{receptor} \end{array} \right) \quad (2.47)$$

Pueden presentarse algunos casos en donde G/T se encuentre cercana a 0dB/K o negativo, o ligeramente positivo pero nunca demasiado grande. Un rango para el factor de Mérito de un satélite va de -20 a +10 dB/K.

Finalmente obtenemos el cociente de potencia a la subida

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{subida} = PIRE - L_{propagaci\acute{o}n} + \left(\frac{G}{T} \right)_{sat} - 10 \log k \quad (2.48)$$

Si se añade una atenuación por lluvia sobre la estación transmisora, las pérdidas totales durante la subida se verían reflejadas de la siguiente forma:

$$L = L_{e.l.} + L_{a.a.} + L_{lluvia} \quad [dB]$$

El cociente de potencias estaría expresado como se indica a continuación:

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{subida} \left(\text{con lluvia} \right) = \left(\frac{C}{N_0} \right)_{subida} \left(\text{cielo despejado} \right) - L_{lluvia}$$

Para poder determinar en el enlace de bajada la figura de Mérito o factor de calidad, se requiere, realizar un análisis muy similar al desarrollado anterior, por ello de igual forma, se deberá calcular el ángulo de elevación θ .

$$\text{Si } c = \cos l \cdot \cos \Delta L \quad \text{y} \quad \theta' = \arccos c$$

Podemos obtener el valor de θ

$$\theta = \text{ang tan} \left[\frac{c - \frac{R_e}{h}}{\text{sen} \theta'} \right]$$

De igual forma el rango o distancia empleando la ecuación (2.10)

$$d = 35786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos \theta'}$$

De esta forma llegamos a las pérdidas por propagación en el espacio libre (2.34)

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 10 \log \left(\frac{4\pi d f}{c} \right)^2$$

Y las pérdidas por absorción atmosférica, se calcula por medio de la expresión

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \cos ec \theta$$

Por lo que ahora podemos obtener el PIRE

$$PIRE = (P_T G_T)_{dBW}$$

De igual forma que en el enlace de subida, se deben tomar en consideración las pérdidas por desapuntamiento

$$[L_T]_{dB} = 12 \left(\frac{\alpha_T}{\theta_{-3dB}} \right)_T^2$$

y,

$$[L_R] = 12 \left(\frac{\alpha_R}{\theta_{-3dB}} \right)_R^2 \quad [dB]$$

Las pérdidas estarían dadas por la siguiente ecuación:

$$L = L_{e.l.} + L_{a.a.} \quad [dB]$$

En la estación terrena, el factor de calidad o figura de mérito queda definido como;

$$\left(\frac{G}{T} \right)_{estación\ terrena} = \left[\frac{(G_R)_{máx}}{T_s} \right]_{dB/K} - \left(\begin{array}{l} \text{Pérdidas por conectores} \\ \text{y desapuntamiento} \end{array} \right) \quad (2.49)$$

Si las pérdidas por desapuntamiento no fuesen despreciables habría que restarlas, pero sin descontárselas al PIRE del satélite, ya que sólo se puede restar una vez.

La temperatura total del ruido del sistema T_s , a la entrada del ABR de la estación terrena, es:

$$T_s = \frac{290}{L} + 290 \left(1 - \frac{1}{L} \right) + T_{ABR}$$

Finalmente se tiene el cociente de potencia a la bajada, el cual esta dado por la siguiente expresión:

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{bajada} = PIRE - L + \left(\frac{G}{T} \right)_{est.terr} - 10 \log k \quad (2.50)$$

Analizando ahora el enlace de bajada con lluvia.

Las pérdidas durante el trayecto de bajada se incrementarían, esto debido a la lluvia, mientras que la temperatura de ruido de la antena T_A , también se incrementa debido al ruido introducido por la lluvia.

$$[T_A]_{lluvia} = \frac{(T_A)_{c.d.}}{L_{lluvia}} + 280 \left(1 - \frac{1}{L_{lluvia}} \right)$$

La temperatura del sistema esta dada por:

$$T_S = \underbrace{\frac{T_A}{\text{anti log } 0.05}}_{\text{antena}} + 290 \underbrace{\left(1 - \frac{1}{\text{anti log } 0.05} \right)}_{\text{atenuador}} + \underbrace{120}_{ABR}$$

La figura de mérito o factor de calidad en la estación terrena, se determina por la siguiente expresión

$$\left(\frac{G}{T} \right)_{\text{estación terrena}} = \left[\frac{(G_R)_{\text{máx}}}{T_s} \right]_{dB/K} - \left(\begin{array}{l} \text{Pérdidas por conectores} \\ \text{y desapuntamiento} \end{array} \right) \quad (2.51)$$

Finalmente se puede obtener el cociente de potencia, por medio de la siguiente expresión:

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{\text{bajada (conlluvia)}} = PIRE - L + \left(\frac{G}{T} \right)_{\text{est.terr}} - 10 \log k \quad (2.52)$$

$$\text{Donde } L = L_{e.l.} + L_{a.a.} + L_{lluvia}$$

2.1.6.4. CONTORNO DE PIRE

Los entornos de PIRE pueden ser explicados mostrando la siguiente figura, en donde el punto central, marcado con una cruz, es donde va dirigido el PIRE máximo, en otras palabras la trayectoria de máxima potencia de la antena del satélite, donde la forma va de acuerdo con el patrón que esta produzca con respecto a su arreglo de alimentadotes.

Alrededor de dicha trayectoria se encuentran varios entornos de PIRE constante, y el valor de este va disminuyendo conforme abarca mayor área.

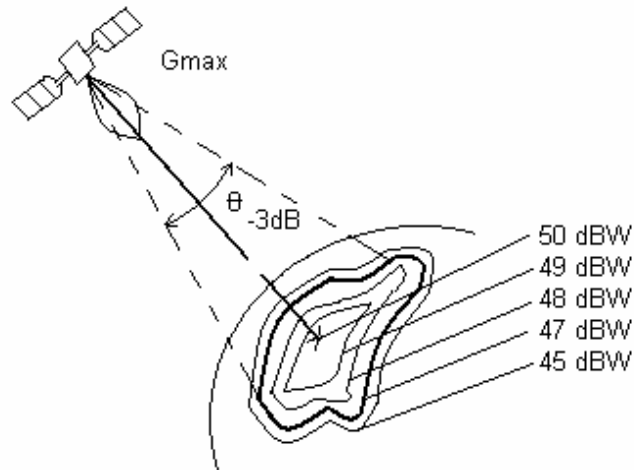


Fig. 2-29

La potencia de salida máxima de cada amplificador, menos las pérdidas entre conectores, más la ganancia de la antena transmisora en diversas direcciones, dan el valor de PIRE que es ejemplificado en la anterior figura.

No es importante conocer cuántas atenuaciones producen los conectores, guías de onda y otros elementos que hay entre cada amplificador del satélite y la antena transmisora, porque el fabricante proporciona el mapa de contornos de PIRE con los niveles de dBW que son radiados hacia diferentes puntos de la zona de cobertura. Estos entornos ya incluyen las pérdidas mencionadas, así como el desapuntamiento, y esto facilita el cálculo del enlace.

2.1.6.5. RUIDO DE INTERMODULACIÓN

Esta clase de ruido aparece cuando el sistema de transmisión es no lineal, lo que provocará la aparición de nuevas frecuencias. Las nuevas frecuencias se suman o restan con las originales dando lugar a componentes frecuenciales que antes no existían y que distorsionan la verdadera señal.

El ruido de intermodulación ocurre tanto en los amplificadores de un satélite como en los de las estaciones terrenas transmisoras cuando trabajando con más de una portadora

modulada en su interior. A esta situación se le llama operación multiportadora. Mientras más portadoras haya simultáneamente, mayor será el ruido de intermodulación.

Como regla, se tiene que a mayor potencia de salida del amplificador, habrá mayor ruido de intermodulación, por lo que, a bordo del satélite, se define un cociente de potencia de la portadora sobre el ruido de intermodulación, designado como $(C/N)_i$. El subíndice i indica la etapa de intermodulación, y el valor del cociente de potencias lo especifica, por medio de gráficas o tablas, el propio fabricante del satélite.

2.1.6.6. DENSIDAD DE FLUJO DE SATURACIÓN, G/T Y ENLACE DE SUBIDA

Con base en la siguiente ecuación que ya fue analizada con anterioridad, podemos retomar que la densidad de flujo de potencia (F_d) que llega al satélite y el PIRE de la estación terrena, están relacionados como a continuación se muestra:

$$F_d = \frac{PIRE}{4\pi r^2} \quad [W/m^2] \quad (2.53)$$

en donde

$r =$ Distancia entre la estación terrena y el satélite.

$F_d =$ Densidad de flujo, generalmente se le designa con la letra ϕ y por esa razón

La ecuación anterior la podemos describir de la siguiente manera.

$$\phi = \frac{PIRE}{4\pi r^2} \quad [W/m^2]$$

Las pérdidas por propagación en el espacio libre están dadas por la ecuación:

$$L_{e.l.} = \left(\frac{4\pi r^2}{\lambda} \right)^2$$

despejando r^2 :

$$r^2 = \frac{\lambda^2 L_{e.l.}}{(4\pi)^2}$$

Sustituyendo r^2 en ϕ :

$$\phi = PIRE \left[\frac{4\pi}{\lambda^2 L_{e.l.}} \right] \quad [\text{W/m}^2]$$

La expresión anterior en decibeles se calcula de la siguiente forma:

$$[\phi]_{dB} = \underbrace{PIRE}_{[\text{dBW}]} - \underbrace{L_{e.l.}}_{[\text{dB}]} + \underbrace{10 \log \left[\frac{4\pi}{\lambda^2} \right]}_{[\text{dB/m}^2]} \quad [\text{dBW/m}^2] \quad (2.54)$$

Es importante tener bajo consideración el hecho de que $L_{e.l.}$ y $L_{\text{propagación}}$ son atenuaciones distintas y no se deben confundir. $L_{\text{propagación}}$ incluye las pérdidas por propagación en el espacio libre, las pérdidas por absorción atmosférica (casi despreciables), las concernientes a atenuación por lluvia (que según el caso pueden ser muy significativas) y las pérdidas por despolarización y desapuntamiento.

Para poder relacionar las atenuaciones antes mencionadas, se debe considerar despreciables las pérdidas por despolarización y desapuntamiento, así como las pérdidas por absorción atmosférica, ya que son del orden de 0.1 dB, ver Fig. 2-15 y Fig. 2-16 y tomar en cuenta el cielo despejado, y de esa manera la expresión queda de la siguiente forma:

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{subida} = \underbrace{[\phi]}_{[\text{dBW/m}^2]} - \underbrace{10 \log \left[\frac{4\pi}{\lambda^2} \right]}_{[\text{dB W/m}^2]} + \underbrace{\left(\frac{G}{T} \right)_{sat}}_{[\text{dB/K}]} + 228.6 \quad [\text{dBHz}]$$

Cuando el valor de ϕ satura al amplificador de alta potencia (*high power amplifier* o HPA) del transpondedor, sin atenuar nada para controlar la ganancia del mismo, dicha variable se designa como ψ y se le conoce como densidad de flujo de saturación. Dicha variable depende de las características del HPA, así como de todos los elementos que componen la

interfaz entre la antena receptora del satélite y el HPA. Este valor depende también de la posición relativa entre las estaciones terrenas y el satélite, así como de las propiedades de recepción de la antena del satélite por lo cual podemos entender que la forma y la extensión de la huella de iluminación tiene un efecto importante sobre el valor de ψ , que generalmente tiene un rango que varia entre -70 y -110 dB W/m².

Para escribir la ecuación anterior en términos de la frecuencia se hace de la siguiente manera:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = [\phi] - 10 \log \left[\frac{4\pi f^2}{c^2} \right] + \frac{G}{T} + 228.6$$

de donde f en GHz:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = \underbrace{[\phi]}_{[dBW/m^2]} - 21.45 - 10 \log(f) + \frac{G}{T} + 228.6$$

Considerando que ϕ tiene el valor de saturación y que el cielo está despejado, se tiene:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = \underbrace{[\psi]}_{[dBW/m^2]} - \underbrace{20 \log f}_{[dBHz]} + \underbrace{\left(\frac{G}{T}\right)_{sat.}}_{[dB/K]} + 207.15 \quad [dBHz]$$

Para calcular el PIRE con el que las estaciones terrenas deben transmitir en un conjunto para saturar el transpondedor, se debe emplear como dato la densidad de flujo de saturación ψ proporcionada por el fabricante, ya que el rango de valores en el que se encuentra es amplio y para obtener los datos precisos se debe consultar al propietario de cada satélite, según la banda, el ancho de banda del transpondedor y las coordenadas geográficas de las estaciones terrenas.

Si una sola estación terrena ocupa el transpondedor completo, entonces de la ecuación (2.54) tenemos lo siguiente:

$$PIRE = \psi + \underbrace{L_{e,l}}_{[dB]} - 10 \log \left[\frac{4\pi}{\lambda^2} \right]$$

o bien:

$$PIRE = \underbrace{[\psi]}_{[\text{dB W/m}^2]} - \underbrace{20 \log f}_{[\text{dBHz}]} + \underbrace{L_{e.l.}}_{[\text{dB}]} - 21.45 \quad [\text{dB W}]$$

f debe estar en GHz.

Para que el resultado de la ecuación tenga mayor precisión, habría que sumarle en decibeles las pérdidas por absorción atmosférica, por despolarización y por desapuntamiento. Esto es, bajo condiciones de cielo despejado.

2.1.6.7. TASA DE BITS ERRONEOS (BER) Y E_b/N_0

La tasa de bits erróneos (*bit error rate* o BER) puede definirse como la probabilidad de que un bit de la señal digital sea interpretado de manera errónea por el receptor. Esta probabilidad de error está relacionada directamente con el cociente de la energía promedio de un bit y la densidad espectral de ruido (E_b/N_0).

Cuando una réplica de la señal portadora es generada localmente en el receptor, en fase con la señal proveniente del satélite y usada para demodularla se dice que la demodulación es coherente, bajo estas circunstancias la relación entre el BER y (E_b/N_0) queda expresada de la siguiente manera para modulaciones BPSK y QPSK (las cuales son las modulaciones más comúnmente usadas en transmisiones de señales de televisión vía satélite).

$$BER = Q \left(\sqrt{2 \left(\frac{E_b}{N_0} \right)} \right) \quad (2.55)$$

Donde la función Q es:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt$$

La función Q se encuentra en tablas estadísticas y en textos de telecomunicaciones, pero también existen ya curvas trazadas del BER contra (E_b/N_0) , como la mostrada en la Fig. 2-30

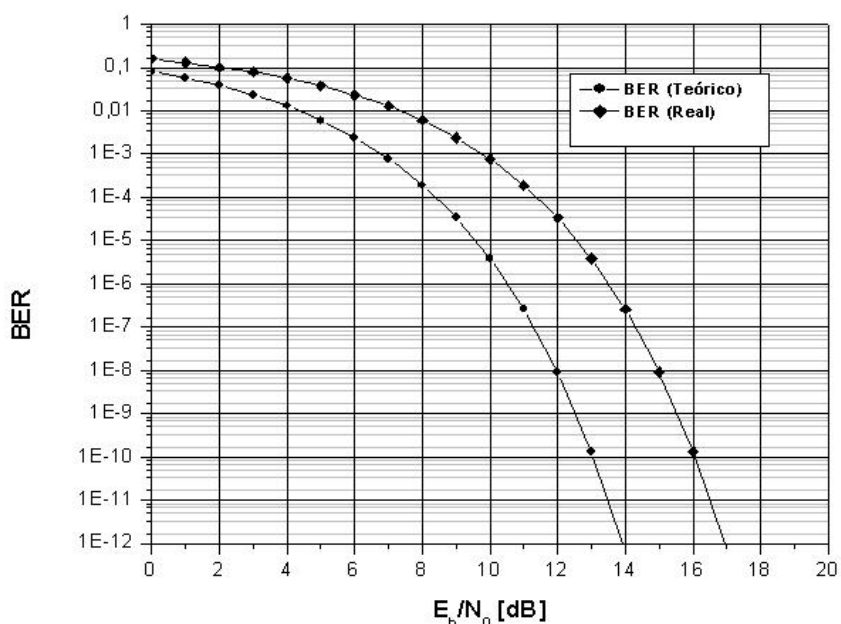


Fig. 2-30 BER en función del cociente E_b/N_0 para señales moduladas en BPSK y QPSK.

El BER es indispensable para el diseño de enlaces satelitales, ya que se parte de él para determinar la relación portadora/ruido permisible para tener una tasa de error razonable. En sistemas digitales existe la siguiente relación entre el cociente (E_b/N_0) , el cociente de portadora ruido (C/N_0) y la tasa de bits (R_{bits}) , la cual analizaremos en la siguiente sección.

$$\frac{C}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log(R_{bits}) \quad [\text{dBHz}] \quad (2.56)$$

De esta manera es posible determinar la relación portadora sobre ruido permisible para que se tenga una determinada tasa de error.

El valor deseado de BER depende del tipo de señal transmitida y del uso que se le vaya a dar. Así por ejemplo, un BER de 10^{-4} es aceptable en telefonía, pero muy alto para

transmisión de datos, que lo requiere de 10^{-8} . En el caso de transmisión de TV digital el BER debe estar entre 10^{-10} y 10^{-11} .

2.1.6.8. TASA DE BITS Y EFICIENCIA ESPECTRAL.

En un sistema de modulación PSK la fase de la portadora cambia en concordancia con los bits de la banda base de la señal modulada. Como los trenes de bits consisten en niveles discretos de voltaje (unos y ceros), es de esperarse que la fase de la portadora modulada también cambie o se desplace en pasos discretos. El número M de estados o fases que la portadora puede tomar depende del número N de bits de información original que sea usado para formar cada símbolo, a través de la relación siguiente:

$$M = 2^N$$

De esta forma, si cada símbolo consiste de un solo bit ($N=1$), entonces $M=2$; lo cual significa que cada que haya un cambio en la forma de un bit (de uno a cero o de cero a uno), la fase de la portadora cambia $360^\circ/2$ es decir 180° . A este tipo de modulación que consiste en dos estados se le llama BPSK; donde la B indica que se trata de una modulación de dos fases.

En el caso de modulación por cuadratura se tiene que $M=4$, es decir la fase de la portadora puede tomar cuatro estados.

La tasa R_{bits} de la banda base original se mide en bits/s y la tasa $R_{símbolos}$ de símbolos de la portadora modulada es cuantificada en símbolos/seg o bauds.

$$R_{símbolos} = \frac{R_{bits}}{\log_2 M} \quad [\text{bauds}] \quad (2.57)$$

Para el caso de BPSK ($M = 2$) la tasa de bits y de símbolos son idénticas numéricamente. Sin embargo, en QPSK ($M=4$) la tasa de símbolos es la mitad de la tasa de bits de banda base, es decir que el ancho de banda de RF necesario para transmitir la información se reduce a la mitad. De esta forma se puede introducir el concepto de eficiencia espectral η :

$$\eta = \frac{R_{bits}}{BW} \left[\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right] \left[\frac{1}{\text{Hz}} \right] \quad (2.58)$$

Se puede ver entonces que la modulación BPSK tiene una eficiencia teórica de 1 bit/s/Hz, mientras que QPSK tiene el doble. En la práctica, estas eficiencias son menores, porque hay que aumentar el ancho de banda para reducir la interferencia entre símbolos producidos por usar filtros no ideales al limitar la banda de los trenes de pulsos; considerando esto, las eficiencias máximas y prácticas BPSK y QPSK son, respectivamente, de 0.8 a 1.6 bits/s/Hz. De esta forma se puede emplear la siguiente fórmula empírica para calcular el ancho de banda necesario para transmitir ambas modulaciones.

$$B_{RF} = 1.2R_{símbolos} [Hz] \quad (2.59)$$

2.1.6.9. CODIFICACIÓN Y CORRECCIÓN DE ERRORES.

Hemos visto que para un determinado nivel de potencia recibido en la estación de destino, los bits son detectados con una cierta probabilidad de error, y que si deseamos que esta última disminuya, entonces el nivel de potencia debe aumentar. Esto significaría transmitir con una mayor potencia desde el satélite o reducir la temperatura de ruido del enlace. Como tal caso puede resultar imposible o muy caro de implementar, se recurre a otro método para reducir la tasa de errores llamado “codificación para corrección de errores”. Existen varios tipos de codificación, pero todos tienen dos características en común, se insertan bits de redundancia al mensaje de interés y dichos bits dependen de otros del mensaje original, lo cual resulta en promediar el ruido dentro de los bloques transmitidos.

Debido a que la tasa de transmisión aumenta por la presencia de los bits de redundancia, la relación de codificación FEC (*Forward Error Correction*) entre la velocidad binaria de información R_b y la velocidad binaria de transmisión (también llamada relación de codificación) R_c , depende del método de codificación:

$$FEC = \frac{R_b}{R_c} \quad (2.60)$$

2.1.6.10. RELACIÓN TOTAL DE POTENCIAS.

La potencia del ruido que se suma a una portadora en todo el trayecto del enlace proviene de varias fuentes, dicha suma se debe hacer empleando valores absolutos. El procedimiento es el siguiente:

Convertir las relaciones parciales (C/N_0) de decibeles a valores absolutos.

- Obtener sus recíprocos.
- Sumar los recíprocos.
- Obtener el recíproco de la suma anterior.
- Convertir el resultado del paso 4 a decibeles.

La expresión a calcular con valores absolutos es:

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total}} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{intermodulación}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{bajada}} \quad (2.61)$$

El cociente $\left(\frac{C}{N_0}\right)_{intermodulación}$ puede consistir en dos términos, uno debido al amplificador de la estación terrena transmisora y el otro debido al transpondedor del satélite. También se puede presentar algún grado de interferencia debida a enlaces de microondas terrestres o satélites cercanos, en tal caso habría que considerar otro cociente de potencias $\left(\frac{C}{N_0}\right)_{interferencias}$. Para el caso antes mencionado la ecuación a usar sería con valores absolutos y para casos con interferencia:

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total}} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{intermodulación\ de\ la\ estación\ terrena}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{intermodulación\ del\ transpondedor}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{interferencias}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{bajada}}$$

Para el diseño preliminar de enlaces basta con utilizar la ecuación (2.61), que permite estimar los parámetros de los equipos necesarios. Esta ecuación tiene un punto máximo que corresponde al mejor cociente $(C/N_0)_{Total}$, dicho punto corresponde a un determinado *back-off* de entrada en el transpondedor del satélite que se ajusta en el atenuador, tal como se muestra en la siguiente figura. También hay curvas similares graficadas contra el *back-off* de salida, sin embargo, la relación no es lineal entre ambos *back-off*.

Como se mencionó en secciones anteriores, la relación total de potencia comúnmente es un parámetro de diseño, el cual se especifica a partir de la tasa de errores requerida y del ancho de banda a usarse. Lo anterior se ilustra en la siguiente expresión válida para modulación QPSK:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log(R_{bits}) = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log(2(R_{simbolos})(FEC)) \quad (2.62)$$

Donde:

R_{bits} = Velocidad de transferencia de bits (*bit rate*)

$R_{simbolos}$ = Tasa de transmisión de símbolos (*symbol rate*)

FEC = Codificación FEC o relación de codificación para corrección de errores.

E_b/N_0 = Energía de un bit por densidad de ruido espectral.

CAPÍTULO

3

TELEVISIÓN

3.1. DESCRIPCIÓN MÍNIMA DE LA TELEVISIÓN MEXICANA.**3.1.1. BREVE HISTORIA DE LA TELEVISIÓN EN MÉXICO**

A pesar de que las transmisiones de televisión en México se iniciaron oficialmente en 1950, la historia de este medio de comunicación en nuestro país se remonta varios años atrás. Dos décadas antes de ese comienzo formal, técnicos mexicanos ya experimentaban con la transmisión de imágenes a distancia, a veces con sus propios (y generalmente muy modestos) recursos o con apoyo gubernamental.

A partir del último bienio de la década de los veinte, y de manera especial a partir de los años cincuenta en que la televisión comienza a funcionar de manera cotidiana y a transformarse en una presencia de singular importancia en la vida cultural, política y económica de México, ocurren una gran cantidad de acontecimientos que van conformando el complejo fenómeno en que la TV se ha convertido en nuestros días.

1931 La primera transmisión de televisión en México se llevo a cabo con base en los primeros experimentos que corrieron a cargo de los ingenieros Francisco Javier Stavoli y Miguel Fonseca, ambos profesores de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) y del Instituto Técnico Industrial.

1934 Un destacado alumno del ingeniero Stavoli, el joven Guillermo González Camarena comienza a realizar por su cuenta programas experimentales de televisión.

1940 El 19 de agosto el ingeniero González Camarena patenta un sistema de televisión tricromático basado en los colores verde, azul y rojo. Además, diseña una cámara con tubo orticón e ingresa a la XEW como operador.

1942 Guillermo González Camarena patenta en Estados Unidos el sistema de televisión tricromático, e inicia la realización de transmisiones experimentales.

1948 Se constituye una recomendación formal para que México adopte el sistema estadounidense. Las razones expuestas son de índole técnica y económica: se argumenta que todos los experimentos hechos en México hasta ese momento se han realizado con base en las especificaciones técnicas vigentes en Estados Unidos, que los aparatos fabricados en México funcionan de acuerdo con esas especificaciones y, por último, que para poner a funcionar la televisión en el país será necesario importar una gran cantidad de aparatos receptores y resultará mucho más fácil traerlos de Estados Unidos que de Europa.

Se realiza la primera demostración de televisión en blanco y negro con fines educativos

1949 Se otorga la primera concesión para operar comercialmente un canal de televisión. Se trata de XHTV.

En el marco de la IX Asamblea de Cirujanos se realiza por primera vez en México una transmisión de televisión a colores. Se trata de una intervención quirúrgica a través de un circuito cerrado. El ingeniero González Camarena es quien dirige la transmisión cuya importancia consiste en ser una transmisión en circuito cerrado para un auditorio integrado por médicos.

1950 El 11 de febrero se publica en el Diario Oficial de la Federación el "Decreto que fija las normas que deberán observar para su instalación y funcionamiento las estaciones radiodifusoras de televisión".

El día 1 de septiembre el Canal 4 inicia sus transmisiones regulares

1960 El Diario Oficial de la Federación publica el 19 de enero la Ley Federal de Radio y Televisión, ordenamiento jurídico específico para estos dos medios antes regidos por la Ley de Vías Generales de Comunicación y por reglamentos derivados de ésta.

El ingeniero Guillermo González Camarena obtiene en México y Estados Unidos la patente de un nuevo sistema de TV a colores llamado kaleidoscopio.

1962 Guillermo González Camarena patenta en México, Estados Unidos y otras naciones otro sistema de televisión a colores: el bicolor simplificado, que se establece a base de los colores verde-naranja y verde-azul.

1963 En noviembre de 1962, el ingeniero Guillermo González Camarena obtiene la autorización para efectuar a través de un canal abierto transmisiones de televisión a colores.

Surgen las primeras transmisiones internacionales en vivo. Se trata de imágenes transmitidas a México por microondas (todavía no por satélite) provenientes de Estados Unidos. Este último acontecimiento se transmite de Roma a Nueva York por satélite y de ahí a México por microondas.

1964 En octubre el satélite estadounidense Syncom III transmite desde Tokio, Japón, los Juegos Olímpicos realizados ese año. Las imágenes de la inauguración llegan a Estados Unidos vía satélite y luego a México por microondas.

1965 En abril es colocado en órbita el Pájaro Madrugador (*Early Bird*), primer satélite comercial de comunicaciones. México aún no tiene infraestructura propia para la comunicación vía satélite, por lo que las imágenes provenientes de Europa llegan primero a Estados Unidos y luego se envían a nuestro país por microondas; asimismo, las señales que tienen su origen en México viajan primero vías microondas al país vecino en donde son "subidas" al satélite.

Se inicia formalmente la televisión educativa en México al ponerse en práctica, por parte de la Secretaría de Educación Pública, a través de circuito cerrado, gracias al cual mil quinientas personas aprenden a leer y escribir. En 1967 se empieza a utilizar la televisión abierta como medio de educación a distancia.

Se inicia en nuestro país la Telesecundaria mediante la transmisión en circuito cerrado.

Al concluir el primer lustro de los años sesenta, las estaciones repetidoras, comúnmente llamadas de microondas, llevan la imagen televisiva a 26 estados de la república.

En 1965, el gobierno decide ampliar esta infraestructura y crear una Red Federal de Microondas que abarque todo el territorio nacional. La nueva red se integra por dos rutas centrales que van de frontera a frontera, rutas costaneras en el Golfo y el Pacífico, así como por rutas transversales. Para 1970 cuenta ya con 65 estaciones terminales, 207 repetidoras y 12 mil 800 kilómetros de longitud.

1966 México ingresa a la Organización Internacional de Comunicaciones por Satélite (INTELSAT), con lo cual obtiene el derecho de utilizar los artefactos espaciales propiedad de ese consorcio.

1968 Se concluyen los trabajos de la Red Nacional de Telecomunicaciones iniciados desde 1963. El sistema incluye la Red Federal de Microondas, la Estación Terrestre para Comunicaciones Espaciales de Tulancingo (para envío y recepción de señales por satélite) conectada a los satélites INTELSAT II y III, y la Torre de Telecomunicaciones en la Ciudad de México.

México se integra de lleno a la comunicación vía satélite. Para tal efecto se utiliza el satélite ATS-3, propiedad de la NASA y rentado por INTELSAT. A partir de 1969 se establece una conexión internacional permanente de nuestro país con el exterior a través del satélite INTELSAT III colocado sobre el océano Atlántico.

1981 El 3 de abril se inaugura la primera etapa de la Red Nacional de Estaciones Terrenas, la cual consta de 14 estaciones para envío y recepción de señales vía satélite y 21 estaciones que sólo reciben señales.

El 16 de octubre el presidente José López Portillo autoriza la ejecución del proyecto del satélite mexicano.

Debido a que México está ampliando su infraestructura de comunicación por satélite, pero aun no cuenta con uno propio, el gobierno de la república solicita al consorcio INTELSAT que modifique la órbita de uno de sus artefactos (el INTELSAT IV AF3) para que pueda dar cobertura al territorio mexicano con sus señales. El alquiler de tres transpondedores en este satélite permite a México efectuar por esa vía una parte sustancial de sus telecomunicaciones internas las cuales realizaba antes por microondas. En 1984, al concluir la vida útil de este satélite, México renta los servicios del INTELSAT V F8 para efectuar sus comunicaciones domésticas.

1982 Se inaugura el 22 de junio la segunda etapa de la Red Nacional de Estaciones Terrenas, que consiste en 71 estaciones. De ellas 39 han sido instaladas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y 32 por Televisa. La participación del consorcio en la instalación de esta infraestructura se fundamenta en un convenio con la SCT, mediante el cual la televisora se compromete a financiar 44 estaciones terrenas a cambio de que el gobierno le proporcione descuentos en el pago del alquiler de la infraestructura de telecomunicaciones y derecho preferencial para transmitir sus señales.

1983 En junio la Secretaría de Comunicaciones y Transportes informa que el sistema mexicano de satélites llevará el nombre de Morelos. La empresa estadounidense *Hughes International Communications* quedará a cargo de la construcción; la Mc Donnell Douglas del servicio de propulsión; y la Agencia Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), de Estados Unidos, se encarga del lanzamiento. La firma *Comsat General Corporation* se ocupará de supervisar el proceso de construcción, pruebas y lanzamiento.

1985 El 17 de junio el transbordador Discovery de la NASA coloca en órbita el primer satélite de comunicaciones mexicano, el Morelos I.

El 26 de noviembre el Morelos II, segundo satélite del sistema mexicano, es enviado al espacio. En el transbordador Atlantis, la nave que lo coloca en órbita, va como miembro de la tripulación el doctor Rodolfo Neri Vela, quien de esa forma se convierte en el primer astronauta mexicano.

1990 Ante la proximidad de la finalización del periodo de vida útil del satélite Morelos I, prevista para 1994, y la inminente saturación del Morelos II, cuyo lapso de utilización llegará a su término en 1998; el gobierno de la república da a conocer, el 28 de julio, su proyecto de ubicar en el espacio un nuevo sistema de satélites, también integrado por dos artefactos, que llevará el nombre de Solidaridad y cuya vida útil será de 14 años

1991 El 19 de marzo el gobierno da a conocer que el constructor de los satélites Solidaridad será la empresa *Hughes Communications*, también fabricante de los Morelos.

El 19 de julio se anuncia que la empresa Arianespace ha ganado la licitación pública convocada por el gobierno mexicano y será la encargada de poner en órbita los satélites Solidaridad desde Kourou, Guyana Francesa.

1992 La Unidad de Televisión Educativa (UTE) inicia la transmisión de la telesecundaria y otros programas educativos a través del sistema de satélites Morelos. En 1993 pone en marcha su proyecto de transmitir teleconferencias a diversas instituciones de educación en la república.

El 19 de noviembre es lanzado al espacio desde Guyana Francesa, a bordo de un cohete Ariane, el nuevo satélite mexicano Solidaridad I.

1994 En marzo, Televisa anuncia su proyecto de iniciar el servicio de televisión vía satélite directa al hogar, conocido como *Direct to Home* o DTH. Se trata de un nuevo sistema que

permite la transmisión de señales de TV a los hogares directamente desde un satélite. La diferencia entre el sistema DTH y otros servicios de TV directa al hogar vía satélite es que permite transmitir audio y video digitales, es decir, el sonido tiene la calidad de un *compact disc*, y la imagen una definición mucho mayor que la TV normal. Además, el nuevo sistema posee la ventaja de operar con pequeñas antenas semiparabólicas con diámetros de entre 45 y 90 centímetros, y la de tener capacidad para transmitir más de 150 canales.

Según los planes originales, el servicio se proporcionaría a través del satélite PAS III, de la empresa Panamsat, en el cual Televisa rentaría 8 transpondedores. Se planeaba colocar en órbita este satélite a finales de noviembre o principios de diciembre de 1994.

El 7 de octubre de 1994, el satélite Solidaridad II es colocado en órbita. Construido también por la empresa *Hughes Communications* es enviado al espacio, desde Guyana Francesa, a bordo de un cohete de la compañía Ariane.

Se consolida la Red Satelital de Distribución de Televisión Educativa (EDUSAT), planeada desde 1989, mediante la cual se transmiten seis canales de TV educativa a 11 mil escuelas en todo el país a través del sistema Solidaridad.

1995 En mayo, el Congreso de la Unión aprueba una Ley Federal de Telecomunicaciones en la que se establecen las condiciones para que el capital privado participe en la comunicación por satélite, actividad que había sido hasta ese momento exclusiva de Estado. La Ley Federal de Telecomunicaciones fue aprobada por el Congreso de La unión el 18 de mayo de 1995 y publicada en el Diario Oficial de la Federación el 7 de junio del mismo año.

3.1.2. SISTEMAS PARA TV EN BLANCO Y NEGRO

Por razones prácticas debidas a aislamientos imperfectos de las fuentes de alimentación de los primeros televisores, la frecuencia de campo está relacionada con la frecuencia de la red eléctrica, de este modo en Estados Unidos y México en los que la frecuencia de la red de distribución eléctrica es de 60 Hz la frecuencia de Campo es también igual a 60 Hz y en países como Francia o Inglaterra donde la frecuencia de la red es de 50 Hz, usan un formato de televisión con 50 cuadros por segundo.

Esta es una de las principales razones de porqué unos países usan un formato u otro. Las normas vigentes de televisión en la actualidad, NTSC (*National Television Systems Committee*) originario de Estados Unidos, PAL (*Phase Alternation Line*) de Inglaterra y

Alemania y SECAM (*Système Electronique Collor Avec Mémoire*) Francés, se derivan directa o indirectamente, de los formatos en blanco y negro definidos en los años 40 y 50.

Parámetro \ Sistema	NTSC	PAL	SECAM
País de Origen	EEUU	Alemania	Francia
Líneas por Cuadro	525	625	625
Relación de aspecto	4:3	4:3	4:3
Frec. Horizontal [Hz]	15.734	15.625	15.625
Frec. Vertical [Hz]	59.94	50	50
Ancho de Banda de Video [MHz]	4.2	De 4.2 a 6.0	De 5.0 a 6.0
Portadora de sonido [MHz]	4.5	5.5	5.5 ó 6.5

Tabla 3-1 Formatos de televisión analógica

Los tres formatos operan en principio de la misma manera con algunas deferencias, básicamente PAL y SECAM son mejoras al NTSC, México usa este ultimo.

3.1.3. HACIA LO DIGITAL

A finales de los 70 y comienzos de los 80 era prácticamente imposible, imaginarse la transmisión de video digital para varios usuarios, debido a que el flujo de información para transmitir la imagen de video digitalizada era de 108 a 270 Mbits/seg, esto se convirtió en un campo para nuevas investigaciones, debido a la necesidad de transmitir información por un canal con ancho de banda razonable, es entonces a finales de los 80, cuando comienza la exploración para desarrollar técnicas de compresión de video como el JPEG (*Join Photographics Experts Group*) para imágenes fijas y MPEG (*Motion Pictures Expert Group*) para imágenes en movimiento. Esto cambio radicalmente el enfoque de las cosas ya que la cantidad de información a trasmitir así también como los costos fueron reducidos a niveles aceptables.

3.1.4. COMPRESIÓN

Compresión implica disminuir el número de parámetros requerido para representar la señal, manteniendo una buena calidad percibida. Estos parámetros son codificados para almacenarse o transmitirse. El resultado de la compresión de video digital es que se convierte a un formato de datos que puede transmitirse a través de las redes de comunicaciones actuales y ser procesadas por computadoras.

3.1.5. NORMAS DE COMPRESIÓN DE VIDEO

La digitalización proporciona grandes ventajas con respecto a la señal analógica, como por ejemplo en la calidad y resolución muy superiores, edición y efectos muy sofisticados, etc., pero esta digitalización origina una cantidad de información que supera con creces las posibilidades de proceso de nuestros sistemas.

El proceso de homogenización de los algoritmos de compresión (o como mínimo de su sintaxis) es de vital importancia y esta es la virtud de los formatos MPEG. Originalmente pensado para almacenar y reproducir señales de video digital surgió MPEG-1 con una velocidad mínima de 1,5 Mbps y calidad comparable a VHS, luego surgió MPEG-2 como evolución de MPEG-1 y pensado para la transmisión de TV digital (y audio) a través de cualquier medio (cable, satélite, terrestre) con calidad comparable a NSTC/PAL hasta HDTV, siendo elegido como la norma de transmisión por el proyecto de transmisión de TV digital DVB (*Digital Video Broadcasting*).

Actualmente disponemos de MPEG-4 pensado para aplicaciones multimedia con gran capacidad de interacción y MPEG-7 para búsqueda de información. Con anterioridad, y a partir del mismo comité, surgió la especificación H.261 utilizada para videoconferencia, que se puede considerar como un subconjunto de MPEG-1.

Para MPEG-2, se consideran distintos niveles los cuales especifican el rango de los parámetros que soporta una implantación, por ejemplo, el tamaño de la imagen, velocidad de cuadros o de transmisión, como se muestra en la siguiente tabla.

NIVEL	PARÁMETROS			
	Muestras/línea	líneas/cuadro	cuadros/s	Max. vel. Mbps
High	1920	1152	60	80
HIGH 1440	1440	1152	60	60
MAIN	720	576	30	15
LOW	352	288	30	4

Tabla 3-2 Niveles de compresión para MPEG2

3.1.6. EL SISTEMA DVB

La serie de formatos MPEG fueron el resultado de la cooperación entre diversas organizaciones internacionales, a partir de estos se deben crear los productos e

implementaciones que permitan al público disfrutar de la versatilidad del video digital. Sin embargo, los primeros productos basados en estas especificaciones no eran compatibles entre sí, por lo que en Europa se creó el DVB (*digital video broadcasting*), una familia de formatos para los sistemas de difusión de televisión, por cable, directa vía satélite (DBS) o al-aire.

El sistema DVB utiliza el sistema MPEG-2 para la compresión de audio, datos y video, así como para el multiplexado de las señales. Adicionalmente, el DVB considera la modulación y el formato de transmisión RF necesarios para soportar la variedad de sistemas de difusión terrestres y satelitales.

El sistema DVB incluye las siguientes características:

Contenedores de información para transportar una gran variedad de combinaciones de video, audio e información compresos bajo el formato MPEG-2.

Un sistema de multiplexado para ofrecer un paquete de transporte MPEG-2 de transmisión continua.

Un servicio de información común que proporciona detalles de los programas transmitidos para la guía de programación en pantalla.

Un esquema de codificación de bloques usando el sistema de corrección de errores de avance (FEC) Reed-Solomon.

Incluye dispersión de energía e intercalado de información en capas para mejorar el desempeño en caso de cadenas de errores.

Un esquema de codificación que usa principalmente el algoritmo Viterbi con la habilidad de modificar la tasa de codificación entre $R = 1/2$ y $7/9$.

Modulación y sistemas de codificación de canal adicionales para cumplir con los requerimientos de diferentes medios de transmisión (distribución vía satélite, TV por cable, radiodifusión convencional, etc.)

Sistemas de cifrado de señal (*Scrambling*).

Un sistema de acceso condicionado, para limitar el acceso a los canales contratados.

Entre los formatos del sistema DVB se incluyen los siguientes:

- DVB-S: Sistema de difusión vía satélite, para servicios como DTH.
- DVB-C: Sistemas por cable CATV.
- DVB-T: Sistema terrestre, usado en televisión abierta.
- DVB-MC / S: Sistema de distribución multipunto por microondas como el servicio proporcionado en México por Multivisión.
- DVB-SI: Sistema de información del servicio que permita al usuario navegar entre las transmisiones.
- DVB-CI: Internase común para acceso condicional, proporciona acceso sólo al servicio contratado.

3.1.6.1.1. EL FORMATO DVB-S

Se usa para la difusión de señales a través de satélites usando anchos de banda de transpondedor entre 26 y 72 MHz para sistemas BSS y FSS.

En las transmisiones bajo este formato, se multiplexan uno o más canales de audio y video a fin de transmitirlos usando una sola portadora, de este modo se evita introducir ruido de intermodulación entre estos canales. DVB-S es una arquitectura de transmisión por capas, en la cual encontramos en la capa más alta a la información útil, contenida en tramas MPEG-2; a esta información se le añadirán en capas inferiores bits de redundancia haciendo a la señal menos sensible a errores. El sistema utiliza modulación QPSK y multiplexado por división de tiempo (TDM). La tasa de bits y el ancho de banda pueden ser ajustados durante la operación para satisfacer las necesidades del enlace satelital y el ancho de banda del transpondedor.

CAPÍTULO

4

SATÉLITES UTILIZADOS EN MÉXICO.

4.1. SATÉLITES MEXICANOS

En la actualidad, México tiene asignados tres segmentos espaciales, o posiciones orbitales, para el servicio nacional y de casi todo el continente, empleando para ello tres satélites con diferentes tipos de coberturas: Solidaridad II, Satmex 5 y Satmex 6, este último fue lanzado en mayo del 2006 para sustituir al Solidaridad 1, mismo que falló en agosto del 2000.

Los satélites mexicanos se encuentran ubicados sobre el arco satelital, situado a una latitud 0° donde está el Ecuador. El satélite Satmex 6 está colocado en la posición orbital de 113° Oeste, el satélite Solidaridad II tiene una longitud de 114.9° Oeste, mientras que el satélite Satmex 5 se encuentra en 116.8° Oeste, con referencia al meridiano de Greenwich.

Satmex es el proveedor de comunicaciones satelitales que opera los satélites mexicanos Solidaridad II, Satmex 5 y Satmex 6. Su flota satelital ofrece cobertura regional y continental en banda C y Ku, y abarca desde Canadá hasta Argentina. Satmex es miembro de la Alianza Global de Loral y ofrece a sus usuarios las ventajas de una red mundial de capacidad satelital, al proporcionar soluciones globales con enfoque en las necesidades y requisitos de América.

4.1.1. APLICACIONES DE BANDA ANCHA

Satmex ofrece a sus clientes mayor capacidad (ancho de banda) y potencia del satélite que les permite implementar plataformas de telecomunicaciones capaces de transmitir grandes volúmenes de información hacia múltiples puntos dispersos geográficamente. De esta forma, pueden incluir diversos servicios tales como voz, datos, video, contenido e Internet

en una sola plataforma, optimizando el uso del satélite y de su infraestructura terrestre, ubicándolos además en la vanguardia tecnológica que demanda el mercado.

4.1.2. 2. INTERNET DE ALTA VELOCIDAD (ACCESO, BROADCAST, DISTRIBUCIÓN, CACHING)

Satmex cuenta con una flota de satélites con alta potencia y cobertura continental que favorece los servicios de conectividad integral al *backbone* de Internet a primer nivel evitando así los cuellos de botella terrestres, la alta probabilidad de fallas en múltiples puntos de conexión y optimizando el uso asimétrico requerido por este tipo de servicios. Adicionalmente, representa una solución ideal para asegurar el funcionamiento de cualquier red terrestre con un alto grado de confiabilidad, en caso de desastres.

4.1.3. 3. BROADCASTING (TELEVISIÓN, RADIO Y NOTICIAS)

Satmex es un excelente canal de teledifusión de señales simultáneas a través del continente americano para transmisiones en vivo, eventos especiales, deportes, noticias y entretenimiento. Su excelente calidad en banda C como Ku, posiciona al servicio como líder de radiodifusión en las Américas. Adicionalmente, apoya a nuestros usuarios en la distribución/recepción de su contenido, programación, noticias, comerciales, entre la fuente generadora y la cadena receptora. Es ideal para enviar simultáneamente información relevante que requiere ser incorporada al instante o caduca. Las modalidades de este servicio pueden ser servicio permanente u ocasional.

4.1.4. 4. REDES PRIVADAS VSAT

Satmex tiene la capacidad de ofrecerle un espacio satelital para la implementación de redes privadas conforme a las necesidades específicas de cada usuario. A través de la tecnología VSAT, se alcanzan puntos geográficos distantes a un bajo costo por medio de una sencilla instalación. Esta solución es ideal para empresas corporativas nacionales o internacionales con requerimiento de comunicación desde 1 ó 2 enlaces hasta miles de ellos.

4.1.5. 5. TELEFONÍA RURAL

Satmex representa tecnológicamente la solución ideal para las poblaciones rurales con escasas o nulas probabilidades de contar con otro tipo de infraestructura. A través de sus canales, Satmex ofrece la comunicación de telefonía local, de larga distancia nacional e

internacional a través de estaciones terrenas. Este tipo de soluciones requiere instalaciones muy sencillas y son accesibles desde cualquier parte del mundo.

4.2. FLOTA SATELITAL

4.2.1. SOLIDARIDAD II

Solidaridad II pertenece a la segunda generación de comunicaciones espaciales para México y cuenta con 18 transpondedores en banda C y 16 en banda Ku, equivalentes a 24 transpondedores de 36 MHz en cada banda. Se encuentra ubicado en la órbita 114.9° W.

La cobertura de Solidaridad II en banda C incluye México, el sur de los Estados Unidos, El Caribe, Centro y Sudamérica. Por otro lado, la cobertura en banda Ku incluye México, la Costa Este de los Estados Unidos y las ciudades de San Francisco y Los Ángeles.

El Solidaridad II, provee:

- Cobertura de alta potencia sobre México
- Conectividad entre los Estados Unidos y Latinoamérica
- Ángulos de elevación excelentes en Norteamérica y la mayor parte de Latinoamérica



Fig. 4-1

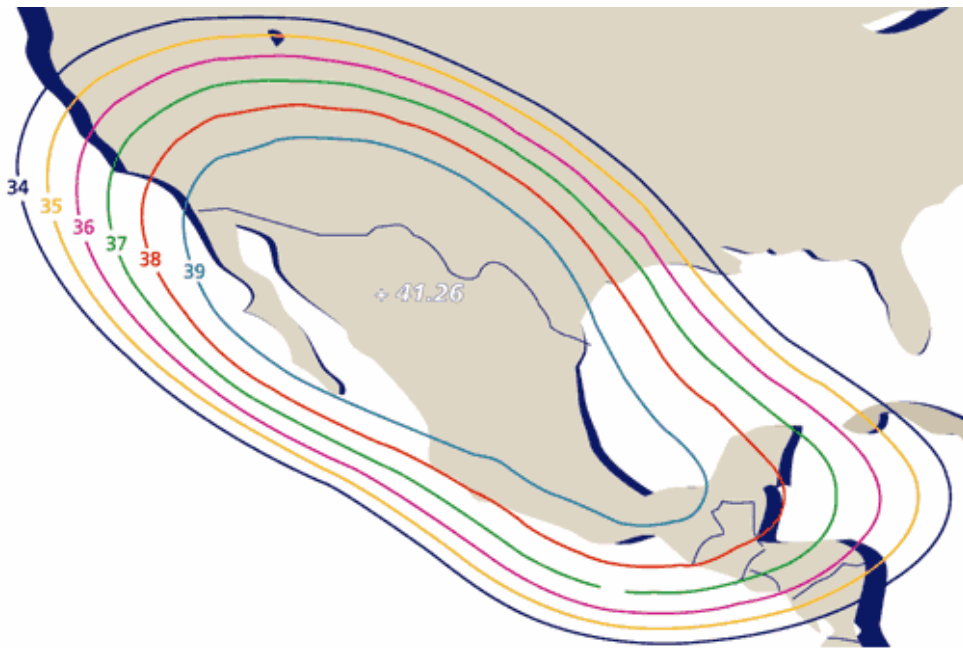


Fig. 4-2 Huella para la banda C1

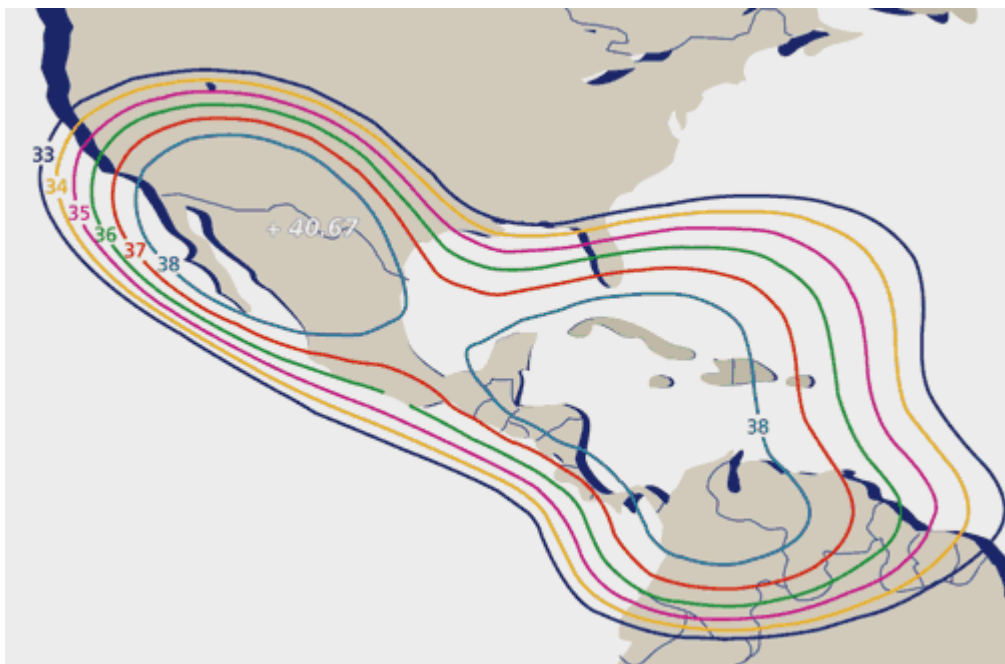


Fig. 4-3 Huella para la banda C2

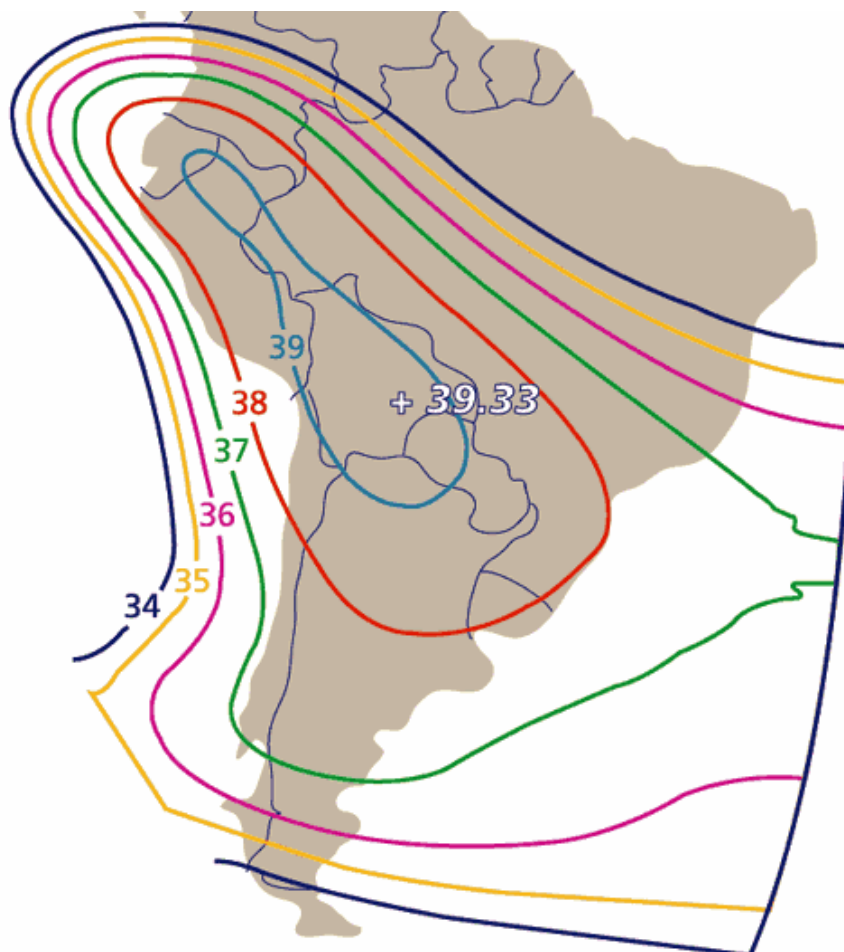


Fig. 4-4 Huella para la banda C3

4.2.2. SATMEX 5

Es un satélite geostacionario que proporciona servicios de comunicaciones comerciales como Internet, telefonía internacional, televisión analógica y digital, transmisión de datos y distribución de contenido multimedia. Se encuentra ubicado en la órbita 116.8° W. Satmex 5 pertenece a la familia B-601HP de alta potencia y de estabilización triaxial. Su diseño lo dota con más de 7000 watts de potencia para la operación de la carga útil.

Algunas ventajas útiles del Satmex 5 son:

- Cobertura continental en banda C y banda Ku

- Alta potencia en ambas bandas, ideal para nuevas aplicaciones con antenas más pequeñas
- Flexibilidad en la configuración de redes de usuarios
- Huella en banda Ku dedicada a Norteamérica con excelente ángulo de elevación

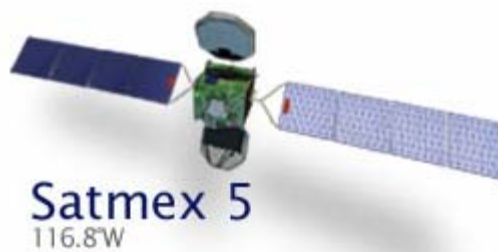


Fig. 4-5

Especificaciones técnicas:

SATMEX 5	36 MHz Banda C	36 MHz Banda Ku
PIRE (dBW)	39	Ku 1:49.0
En la orilla de la cobertura		Ku 2: 46.0
G/T (dB°/K)	-2	Ku 1: 0
En la orilla de la cobertura		Ku 2: -1.5
Densidad de flujo a saturación (dBW/m ²)	-93	Ku 1: -93
		Ku 2: -95
No. De transpondedores	24	24
Redundancia	30 TWTAs para 24 canales	30 TWTAs para 24 canales
Rango de atenuación de entrada	0 a 15 dB en pasos de 1 dB	0 a 20 dB en pasos de 1 dB
Inicio de operación	Enero de 1999	
Vida estimada de operación	Más de 15 años	

Tabla 4-1 Especificaciones Técnicas para el satélite Satmex 5

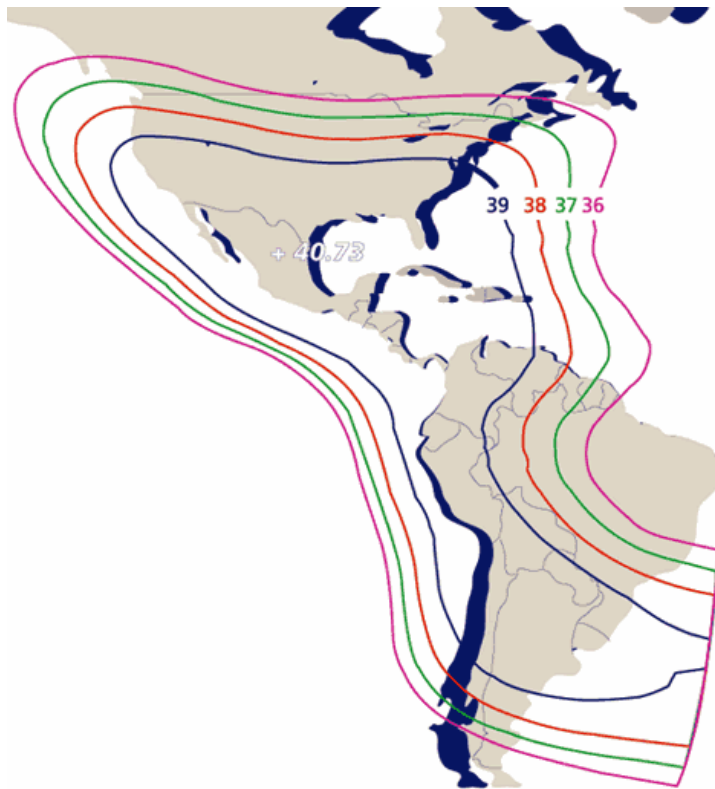


Tabla 4-2 Huella para banda C

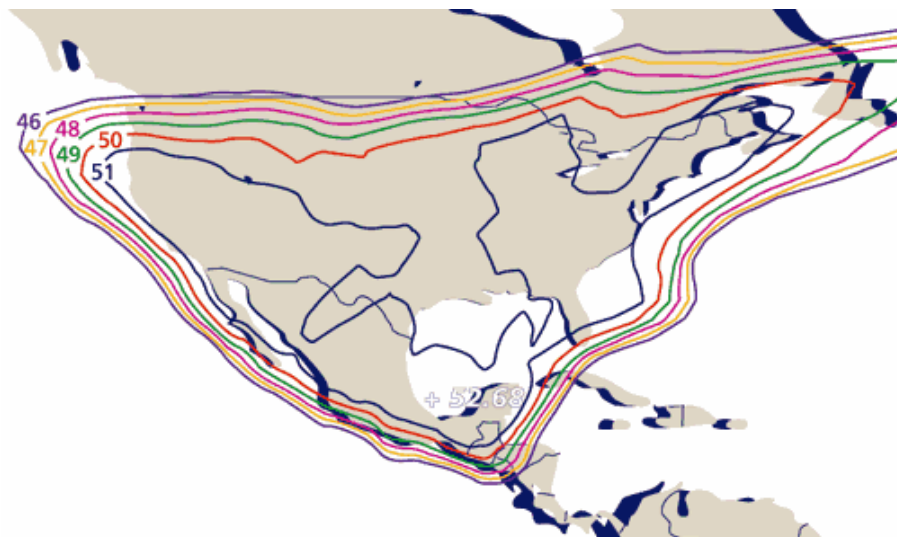


Fig. 4-6 Huella para banda Ku1

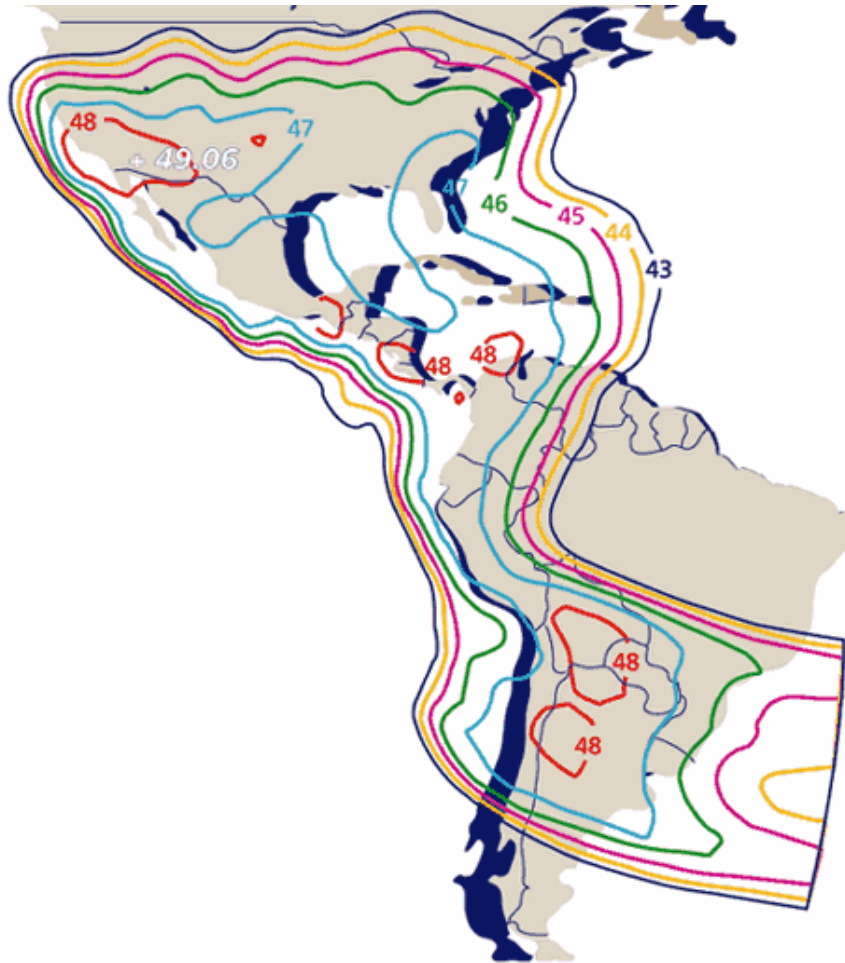


Fig. 4-7 Huella para banda Ku2

4.2.3. SATMEX 6

Satmex 6 es un satélite moderno, modelo FS-1300X, que por su diseño ofrece grandes beneficios. Es capaz de generar 14.1 KW (BOL) con un total de 60 transpondedores que dan servicio en las bandas C y Ku con diferentes coberturas:

- Banda C: Estados Unidos, Sudamérica y continental
- Banda Ku: NAFTA y continental, con un haz de alta potencia sobre las principales ciudades de Sudamérica

Beneficios adicionales:

Reducción del tamaño de antenas

- Linealizador en cada canal
- Coberturas configurables
- Alta potencia en Sudamérica y el Caribe



Fig. 4-8

SATMEX 6	Banda C 36 MHz		Banda Ku 36 MHz		
Cobertura	C1 CONUS	C2 Sudamérica	C3 Continental	Ku-1 Estados Unidos y México	Ku-2 Continental + haz regional en Sudamérica
PIRE a la orilla de la cobertura	40 dBW	39 dBW	38 dBW	49 dBW	Continental: 46 Sudamérica: 49
Número de transpondedores	12	12	12	12 fijos + 6 conmutables	6 fijos + 6 conmutables
G/T a la orilla de la cobertura (dBW/m ²)	-98	-98	-98	-98	Continental: -98 Sudamérica: -98
Redundancia	16:12	16:12	16:12	16:12	16:12
Potencia nominal	42 W	33 W	47 W	150 W	250 W
Rango del atenuador	0 a 15 dB en pasos de 1 dB			0 a 20 dB en pasos de 1 dB	
Control Automático de Nivel (ALC)	0 a 15 dB en pasos de 0.5 dB				
Tolerancia de deriva (station keeping)	+ 0.05° N-S + 0.05° E-W				
Vida útil estimada	>15 años				

Tabla 4-3 Especificaciones técnicas Satmex 6

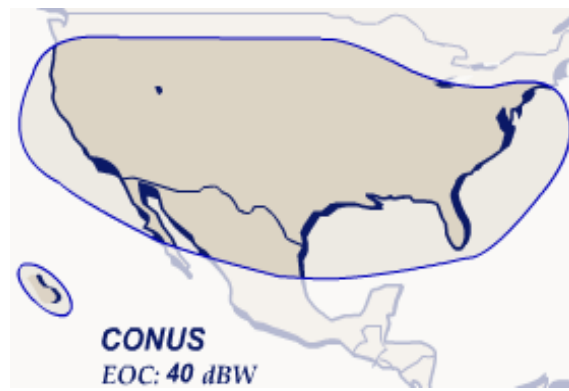


Fig. 4-9 Huella para banda C1



Fig. 4-10 Huella para banda C2



Fig. 4-11 Huella para banda C3

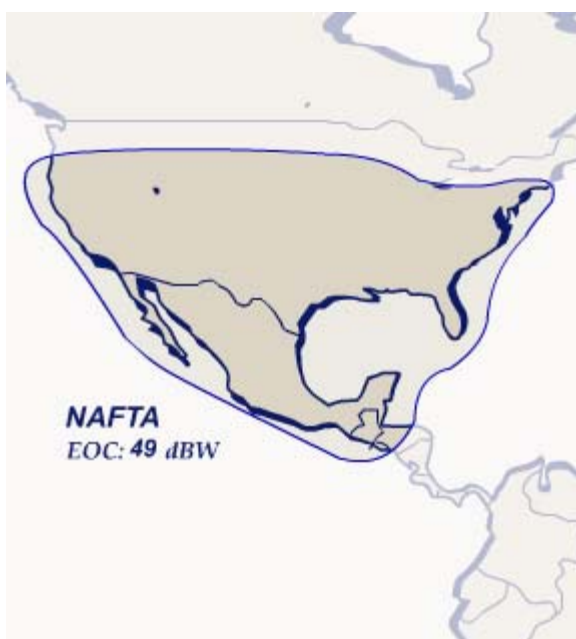


Fig. 4-12 Huella para banda Ku1

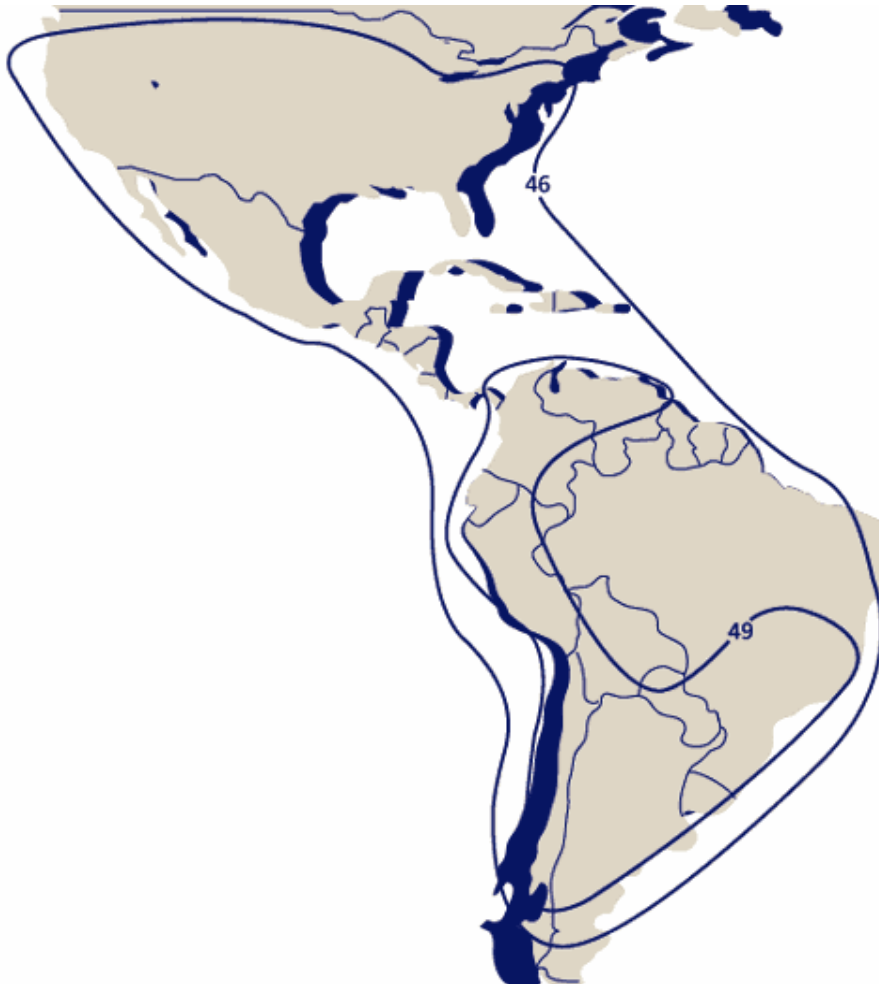


Fig. 4-13 Huella para banda Ku2

4.3. OTROS SATELITES UTILIZADOS EN MÉXICO

4.3.1. EL GALAXY IIC

El Galaxy IIC forma parte de la flotilla de PanAmSat Corporation's. Este satélite brinda servicio a América Latina y al Caribe. A través de compresión digital incluye más de 300 canales entre español y portugués. Las transmisiones son bajo la norma Hughes 601 y otorga servicios a DirecTV. Se encuentra ubicado en la órbita 95° W. Fue lanzado en junio del 2002, cuenta con 77 transpondedores; 24 para banda C y 53 para Ku.

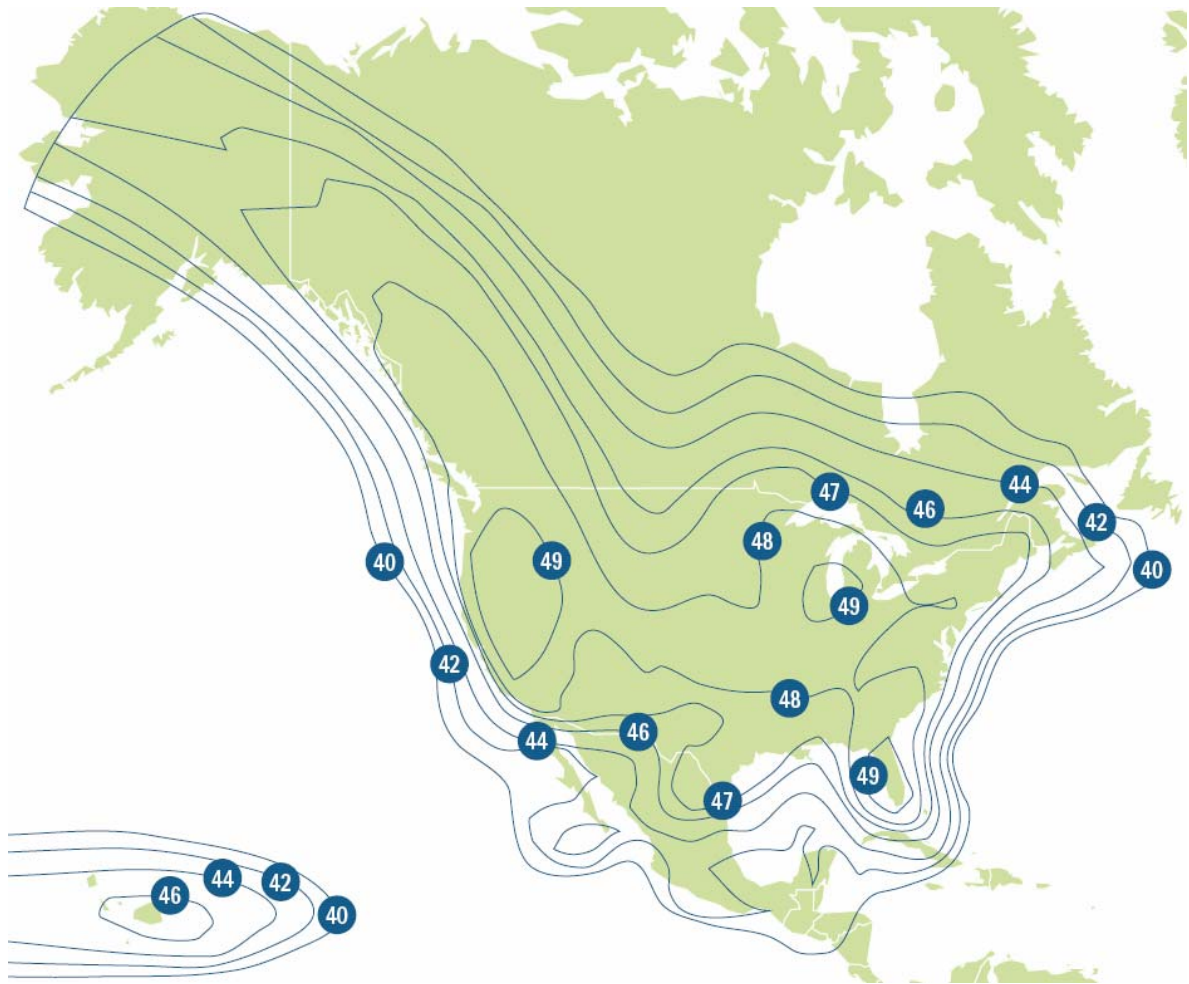


Fig. 4-14 Huella Galaxy 3C para Norteamérica en banda Ku

4.3.2. EL PAS 9

Este satélite Panamsat 9 es un satélite geoestacionario ubicado en la posición 58° Oeste, opera con 24 transpondedores de 55 watts en Banda C y otros 24 de 108 watts en la banda Ku, cada uno con un ancho de banda de 36 MHz. El PAS 9 fue lanzado en julio del 2000 desde una plataforma marina Zenith. Este satélite es usado principalmente para la transmisión de programas de televisión y de música digital. Entre sus usuarios destacan SKY, la cadena Fox y Multivisión.

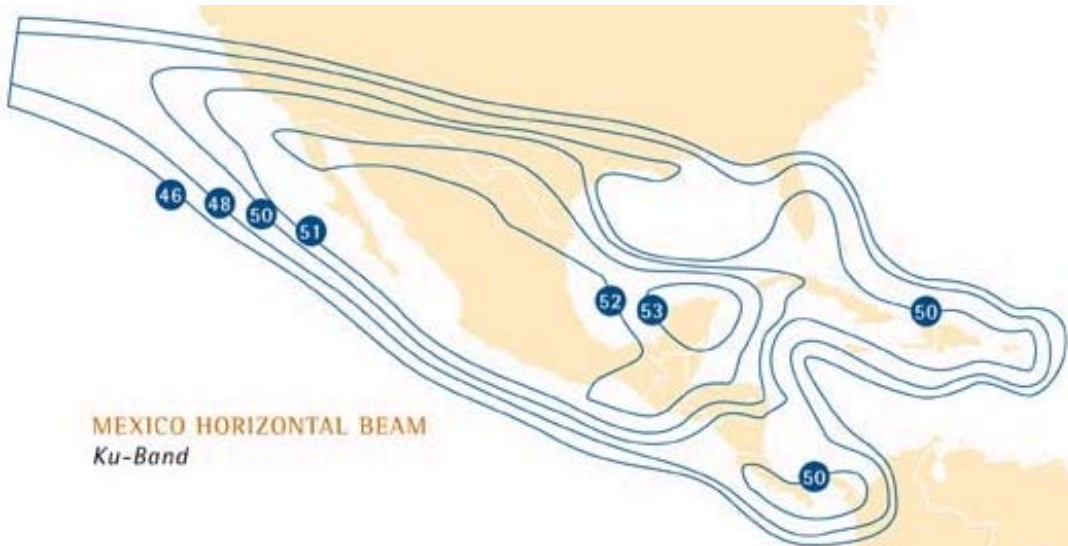


Fig. 4-15

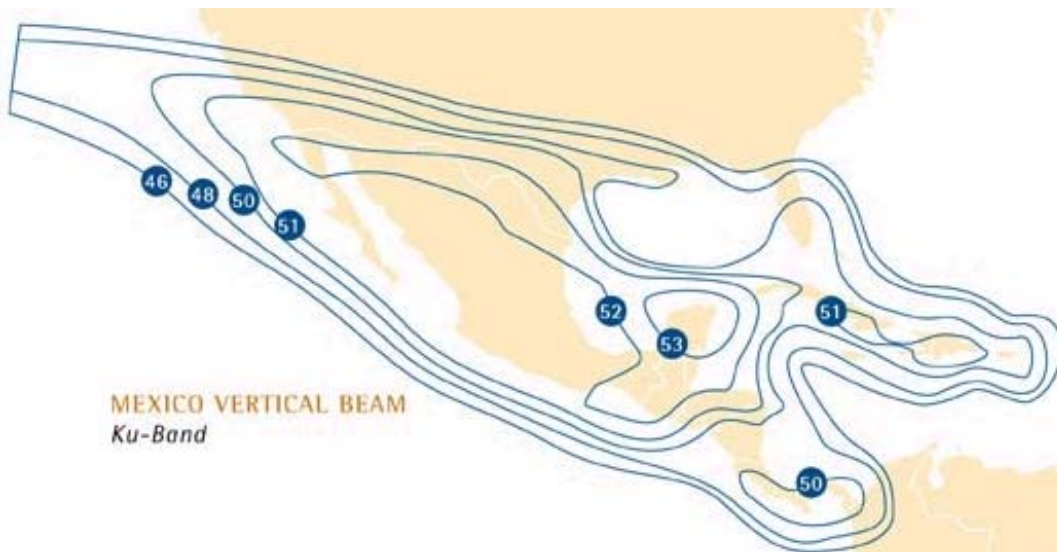


Fig. 4-16

CAPÍTULO

5

SERVICIOS DE TELEVISIÓN EN
MÉXICO

5.1. SISTEMA DE TELEVISIÓN EDUCATIVA (EDUSAT)

En diciembre de 1995, al inaugurarse la Red Edusat, se estableció por primera vez un sistema nacional de televisión educativa, basado en tecnología satelital digitalizada con un potencial extraordinario en términos de cobertura. Edusat, en su etapa inicial, de finales de 1994 a 1995, pasó de ser una plataforma analógica en el satélite Morelos II, a una plenamente digital con el Satélite Solidaridad I. Su segunda etapa, entre 1995 y 1998, logra un proceso de consolidación para dar inicio a la migración hacia Satmex 5 y Digicipher II, con la que Edusat logró un desarrollo cuantitativo y cualitativo excepcional (mediados de 1998 a la fecha). Actualmente Edusat tiene una potencia diez veces superior a la que tenía con el satélite Morelos II y tres veces superior a la que tuvo en Solidaridad I.

La Red Satelital de Televisión Educativa (Edusat), sistema digitalizado de señal restringida, tiene su base en las instalaciones del ILCE (Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa) en las de la Dirección General de Televisión Educativa (DGTVE). El sistema de transmisión opera con apoyo de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y Telecomunicaciones de México (Telecom). Edusat cuenta con más de 35,000 equipos receptores en el sistema educativo mexicano y aproximadamente con 1,000 distribuidos en diversos países del continente.

ILCE desarrolla importantes esfuerzos técnicos para enriquecer la televisión educativa con la convergencia de otras aplicaciones tecnológicas y el diseño de nuevos ambientes de aprendizaje. La intención ha sido y es, renovar la presentación y el manejo de los contenidos educativos provocando, en consecuencia, cambios en la conducción del proceso y en los patrones de interacción en el aula.

El número de canales del sistema y su área de cobertura se han incrementado de manera significativa. En 1994 tenía un solo canal, en 1995 EDUSAT transmitía 6 canales, su cobertura llegaba al sur de los Estados Unidos y Centroamérica. Actualmente transmite 10 canales y está en posibilidad de generar seis más. Su huella tiene alcance continental, desde los territorios de Canadá a la Patagonia Argentina, incluyendo el Caribe, con excepción de algunas zonas del oriente de Brasil.

Edusat es un sistema de señal digital comprimida que se transmite vía satélite, siendo el más importante de su naturaleza en Latinoamérica; depende de la Secretaría de Educación Pública, y su función principal es poner a disposición de los mexicanos una amplia oferta de televisión y radio con fines educativos.

Transmite diariamente 12 canales de televisión y cuatro de radio, aunque tiene capacidad para levantar hasta 16 canales de televisión.

De los 12 canales que se transmiten actualmente ocho cuentan con programación propia y diferenciada y cuatro son de enlace de señal (Discovery Kids/Canal 21, Cl@se/Canal 22, Conaculta/Canal 23 y History Channel/Canal 24).

Se transmite también a través de un canal de señal abierta (Canal 16), cuenta con enlaces parciales con 24 televisoras regionales y con cuatro canales de cable en cuatro entidades.

Edusat reporta 24 mil horas de transmisión anual y 100 horas de transmisión diaria con programación diferenciada.

Son alrededor de 30 mil los puntos de recepción en el territorio nacional y en casi todo el continente americano. Entre éstos destacan: escuelas telesecundarias, secundarias técnicas y generales, centros de maestros, institutos tecnológicos, universidades, escuelas normales para maestros y centros de educación tecnológica.

Se cuenta con la participación de más de 80 instituciones y centros de educación superior en todo el país, además de los sistemas miembros de la Red Nacional de Radiodifusoras y Televisoras Educativas y Culturales.

Los públicos meta de la Red Edusat son docentes y alumnos del Sistema Educativo Nacional, en todos los niveles de enseñanza, desde los iniciales hasta postgrado, en modalidades presenciales, a distancia y mixtas.

De los ocho canales con programación propia, la Dirección General de Televisión Educativa (DGTVE) administra: 11, 12, 14 y 17 y el Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa (ILCE) tiene a su cargo 13, 15, 16 y 18.

5.1.1. LOCALIZACIÓN DE LOS SATÉLITES QUE TRANSMITEN LA SEÑAL DE EDUSAT.

La órbita donde se encuentran localizados los satélites se conoce como "órbita geoestacionaria" y en ella están en equilibrio las fuerzas de gravedad y las espaciales. Se encuentra aproximadamente a 36000 Km. de la Tierra sobre el nivel del mar.

La órbita del Satélite Solidaridad II está ubicada en los 113 grados Oeste con referencia al Meridiano de Greenwich. Dentro de este satélite, la Red Edusat opera en el Transponder 3N.

La órbita del Satélite Satmex 5 se encuentra ubicada en los 116.8 grados Oeste con referencia al Meridiano de Greenwich. Dentro de este satélite, la Red Edusat opera en el Transponder 24 C.

5.1.2. DATOS DE LA ESTACIÓN TERRENA EDUSAT

5.1.2.1. DIÁMETRO DE LA ESTACIÓN TERRENA TRANSMISORA

Antena Tx: 11 m de diámetro

5.1.2.2. POTENCIA DE TRANSMISIÓN

En la transmisión se tienen 15 W de potencia (Satmex 5)

En la transmisión se tienen 75 W de potencia (Solidaridad)

5.1.2.3. SATÉLITE UTILIZADO

Satélite Solidaridad 2, transponder 3N completo, polaridad vertical

Satmex 5, transponder 24C completo polaridad horizontal

5.1.2.4. DIÁMETRO DE LA ANTENA RECEPTORA

Antena Rx: 1.8 m de diámetro

5.1.2.5. BANDAS DE FRECUENCIA

5.1.2.5.1. SOLIDARIDAD 2

Frecuencia de subida: 6025 MHz

Frecuencia de bajada: 3800 MHz

5.1.2.5.2. SATMEX 5

Frecuencia de subida: 6405 MHz

Frecuencia de bajada: 4180 MHz

5.1.2.6. FORMA EN QUE SUBE Y BAJA LA SEÑAL DEL SATÉLITE.

La señal de los canales de Edusat es generada por la Dirección General de Televisión Educativa y el Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa, la cual se manda en forma analógica a través de microondas al centro de control operativo, ubicado en Contel Iztapalapa, en la Ciudad de México.

La señal de Contel es comprimida y enviada a los satélites en forma digital. Los satélites la distribuyen a todas las instituciones receptoras.

5.2. SISTEMA DE TV DIRECTA AL HOGAR DIRECTV

Nota: DirecTV operó en México compitiendo con SKY, empresa propiedad de Televisa en un 70%. Sin embargo, DirecTV contaba con muy pocos suscriptores (260 mil suscriptores) respecto a su competencia (980 mil suscriptores) y la acumulación de costos fijos era relativamente alta. Es por eso que en octubre de 2004 la empresa se declaró en quiebra. De este modo, mediante un acuerdo entre ambas compañías, SKY tomó posesión de la base de clientes de DirecTV en México. La información presentada en este documento, tanto para este sistema como para el resto, era la más vigente disponible en el tiempo en que se realizó la investigación (finales del 2003 y principios del 2004). En dicho período, DirecTV aún se encontraba en funcionamiento.

El sistema Satelital Digital DirecTV es un sistema satelital de difusión directa que transporta al hogar del cliente, video, audio y datos digitales, mediante satélites de banda Ku de alta potencia, permitiendo programación digital en la mayor parte del continente incluyendo: América del Sur, América Central, México y el área del Caribe.

Los sistemas satelitales están constituidos por tres elementos básicos:

1. Una instalación terrestre, conocida como Telepuerto, envía las señales de la programación hacia los satélites en órbita sobre el ecuador, mediante una antena parabólica de gran tamaño la cual concentra esas señales de microondas y las dirige hacia ellos.
2. EL satélite está formado por dos grupos de transpondedores y dos antenas: una de entrada y otra de salida

La antena receptora del satélite, captura las señales entrantes y las envía a un receptor para ser procesadas.

Estas señales, que contienen la información de imagen y sonido original, se convierten en el grupo de frecuencias de microondas que luego se envían a un amplificador para su transmisión de regreso a tierra. Este conjunto receptor / transmisor se denomina transpondedor.

La señal de salida del transpondedor se envía a la antena de salida, que la enfoca y la envía de regreso hacia la tierra.

3. La antena instalada en la casa del suscriptor, recoge esa señal que contiene la información de imagen y sonido original y la enfoca hacia un bloque convertidor de bajo ruido llamado LNB. Este amplifica y convierte las señales de microondas, que pueden transmitirse mediante cables coaxiales comunes hacia un receptor-decodificador-integrado satelital llamado, IRD, situado en el interior de la vivienda del usuario.

5.2.1. DATOS DE LA ESTACIÓN TERRENA DE DIRECTV

5.2.1.1. DIÁMETRO DE LA ESTACIÓN TERRENA

13.2 metros, hay 5 estaciones terrenas: California, México, Venezuela, Brasil y Argentina.

5.2.1.2. DIÁMETRO DE LAS ANTENAS RECEPTORAS

Depende del PIRE en las zonas geográficas y del número de usuarios por antena. Regularmente son platos de 60 cm, 90 cm o 120 cm.

5.2.1.3. POTENCIA DE TRANSMISIÓN

Depende de las condiciones climáticas, en un día despejado y soleado es de alrededor de 25 watts a la salida en los HPAs (klistrones), pero con lluvia puede dispararse a 800, 900 watts. La salida máxima es de 2 kilowatts, pero comúnmente no funcionan más allá de 1 kilowatt.

Las antenas de clientes son platos en off-set, la estación terrena es una Cassegrain con ganancia aproximada de 65 dBi, para la banda Ku.

Las huellas del satélite y plan de frecuencias es información pública que está en Internet.

Este sistema utiliza Galaxy 3c el cual sustituyó al Galaxy 8i mismo que salió de línea en febrero del 2004 por problemas en sus motores. Se hace una compresión 12:1, con codificación MPEG2 y modulación QPSK, además de la señal de video también se multiplexan datos extras para servicios de valor agregado y autenticación (seguridad).

5.3. SISTEMA DE TELEVISIÓN DIRECTA AL HOGAR SKY

SKY es una empresa que ofrece el servicio de televisión vía satélite. Se formó gracias a una alianza entre cuatro empresas cuyo propósito en conjunto fue el lanzamiento de un servicio de Televisión Directa al Hogar (DTH) de habla hispana y portuguesa, dicha alianza esta formada por, Grupo Televisa, News Corp, TCI 2, O'Globo.

El servicio se proporcionará a nivel latinoamericano por medio de los satélites Panamsat, aunque en México, Televisa decide hacerlo inicialmente a través del sistema Solidaridad. El nombre que se asigna a este nuevo proyecto es el de Sky *Entertainment Services*, sin embargo para fines publicitarios se le conoce simplemente como Sky.

5.3.1. PARÁMETROS DE SU ESTACIÓN TERRENA

5.3.1.1. DIÁMETRO DE LA ESTACIÓN TERRENA TRANSMISORA

Diámetro de la estación terrena - 9 y 11 m de diámetro

5.3.1.2. POTENCIA DE TRANSMISIÓN

Potencia de Transmisión - de 100 a 120 watts dependiendo de variables como el clima y con Control automático de potencia.

5.3.1.3. SATÉLITE UTILIZADO

Panamsat 9 en Banda Ku -high-

5.3.1.4. DIÁMETRO DE LA ANTENA RECEPTORA

Diámetro de las antenas de Transmisión y Recepción

1.2, 1, 0.9 Y 0.75 m de Rx y 11 m de Tx

5.3.1.5. BANDAS DE FRECUENCIA

Frecuencia de subida y bajada - 14260 de subida y 11960 de bajada para la frecuencia más baja y 14480 y 12180 para la más alta respectivamente, estas frecuencias corresponden a los transpondedores del 13 al 24 del satélite.

5.3.1.6. FORMA EN QUE SUBE Y BAJA LA SEÑAL DEL SATÉLITE.

Sube en forma digital, baja también en forma digital y después la convierte a analógica.

5.3.1.7. ANCHO DE BANDA TOTAL Y POR CANAL

480 MHz y de 4 a 10 Mb/s por canal por demanda en grupos 34 Mb/s de video reflex.

5.3.1.8. NÚMERO DE TRANSPONEDORES ANCHO DE BANDA

12 transpondedores de 36 MHz

5.3.1.9. TIPO Y NIVEL DE COMPRESIÓN DE LA SEÑAL

MPEG 2

5.3.1.10. TIPO DE MODULACIÓN

QPSK

5.4. SISTEMA DE TELEVISIÓN ABIERTA TV AZTECA

TV Azteca es una empresa que ofrece servicio de televisión abierta e inició operaciones el 2 de agosto de 1993 como empresa privatizada. En esa fecha, los clientes eran pocos, la imagen bastante deficiente y la señal llegaba a menos estaciones de las que figuraban en el papel. La programación transmitida por las redes 7 y 13 era la misma.

Una estrategia empresarial agresiva y metas ambiciosas forjaron las bases para realizar producciones propias de calidad, crecer tecnológicamente para cubrir la totalidad de la República con la mejor señal de transmisión.

La Red de Estaciones Locales también se preocupa por garantizar y optimizar todos sus procedimientos, como ejemplo se encuentra el desarrollo tecnológico propio, creando sistemas para transmitir y comercializar sus señales, buscando el avance constante para garantizar una óptima transmisión y resultados palpables.

5.4.1. PARÁMETROS DE SU ESTACIÓN TERRENA

5.4.1.1. DIÁMETRO DE LA ESTACIÓN TERRENA TRANSMISORA

Antena Tx: 6.1 m de diámetro

5.4.1.2. POTENCIA DE TRANSMISIÓN

En la transmisión se tienen 35 Mbits para no sobrepasar las bandas de guarda, las bandas de guarda ocupan 40 MHz y cada transponder tiene 36MHz de capacidad

Potencia de subida: 550 W en forma digital

5.4.1.3. SATÉLITE UTILIZADO

Satmex 5 Éste satélite tiene 24 transponders en banda C

5.4.1.4. DIÁMETRO DE LA ANTENA RECEPTORA

Antena Rx: 3 m de diámetro

5.4.1.5. BANDAS DE FRECUENCIA

Transponder en banda C, 13C (se utiliza el transpondedor completo)

Frecuencia de subida: 6185 MHz

Frecuencia de bajada: 3960 MHz

5.4.1.6. FORMA EN QUE SUBE Y BAJA LA SEÑAL DEL SATÉLITE.

Sube en forma digital, baja también en forma digital y después la convierte a analógica.

5.5. SISTEMA DE TELEVISIÓN ABIERTA TELEVISIVA

Grupo Televisa es la compañía de medios de comunicación más grande en el mundo de habla hispana. Es una de las principales participantes en la industria del entretenimiento. Entre los servicios que ofrece se encuentra televisión directa al hogar, vía satélite brindando calidad de imagen y sonido digital cuenta con presencia en varios continentes y en decenas de países por ello significa más que una cadena televisora o radial.

En mayo Televisa contrata, con autorización de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, los servicios del satélite estadounidense Westar III con lo cual adquiere la posibilidad de cubrir el territorio mexicano, pues la huella del artefacto cubre nuestro país, y de transmitir directamente a Estados Unidos.

5.5.1. PARÁMETROS DE SU ESTACIÓN TERRENA

5.5.1.1. DIÁMETRO DE LA ESTACIÓN TERRENA TRANSMISORA

Antena Tx: 7 m de diámetro

5.5.1.2. POTENCIA DE TRANSMISIÓN

La Potencia oscila entre 35 W y 75 W

5.5.1.3. SATÉLITE UTILIZADO

Satmex 5 todo el transponder 12 de la banda C

Diámetro de la Antena Receptora

Antena Rx: 7 m de diámetro

Antena Rx: 3.5 m de diámetro

5.5.1.4. BANDAS DE FRECUENCIA

Transponder en banda C (12C)

Frecuencia de subida: 6165 MHz

Frecuencia de bajada: 3940 MHz

5.5.1.5. FORMA EN QUE SUBE Y BAJA LA SEÑAL DEL SATÉLITE.

Sube en forma digital, baja también en forma digital y después la convierte a analógica.

5.6. CÁLCULOS DE ENLACE

5.6.1. CÁLCULOS PARA TV AZTECA

5.6.1.1. PARA LA ESTACIÓN TERRENA DE TV AZTECA CON EL SATÉLITE SATMEX 5

Posición de Satmex 5: 116.8°

Posición geográfica de la ciudad de México:

Latitud: 19.43° N

Longitud: 99.133° O

Altitud: 2.240°

Para llevar a cabo el cálculo de enlace de subida (de la estación terrena de TV Azteca al satélite Satmex 5), se realizan los siguientes cálculos:

5.6.1.2. ENLACE DE SUBIDA

Longitud de onda

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Donde:

$c =$ Velocidad de la luz 3×10^8 [m/s]

$f =$ Frecuencia de subida, que en la estación terrena de TV Azteca es igual a 6,185 MHz

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{6.185 \times 10^9} = 4.85044 \times 10^{-2} [m]$$

Obteniendo los ángulos

$$c = \cos l \cos \Delta L$$

Donde:

l = Latitud de la estación terrena

ΔL = Longitud del satélite – Longitud de la estación terrena

$$c = \cos(19.43^\circ) \cos(116.8^\circ - 99.133^\circ) = 0.899$$

$$\theta' = \arccos c$$

$$\theta' = \arccos(0.899) = 26.031^\circ$$

Del análisis anterior se determina el θ'

$$\theta' = 26.031^\circ$$

Para calcular el ángulo θ , se emplea la siguiente expresión

$$\theta = \arctan \left[\frac{c - \frac{R_e}{h}}{\sin \theta'} \right]$$

Donde:

R_e = Radio de la Tierra = 6,378 km

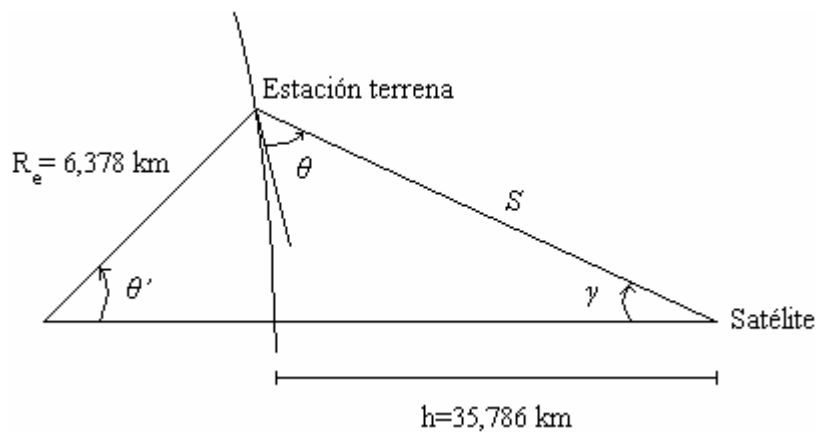
h = Radio de la órbita = 42,164 km

$$\theta = \arctan \left[\frac{0.899 - \frac{6,378 \times 10^3}{42,164 \times 10^3}}{\sin(26.031^\circ)} \right] = 59.578$$

De esta manera se tiene

$$\theta = 59.578^\circ$$

5.6.1.2.1. RANGO DE DISTANCIA



$$d = 35,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos \theta'}$$

$$d = 35,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos(26.031)} = 36,540.22 [km]$$

Se obtiene

$$d = 36,540.22 [km]$$

5.6.1.2.2. PÉRDIDAS POR PROPAGACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE

$$L_{e.l.} = \left(\frac{4 \pi d f}{c} \right)^2$$

$$L_{e.l.} = \left(\frac{4\pi(36,540.22 \times 10^3)(6,185 \times 10^6)}{3 \times 10^8} \right)^2$$

Finalmente se obtiene la pérdida de propagación en el espacio libre.

$$[L_{e.l.}]_{dB} = [199.53]_{dB}$$

5.6.1.2.3. PÉRDIDAS POR ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \cos \sec \theta$$

Donde:

$L_{cenit dB}$ = Este valor se encuentra en tablas

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [0.04]_{dB} \cos \sec(59.575) = 0.046 \quad [dB]$$

Finalmente se obtiene la pérdida de propagación en el espacio libre.

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [0.046]_{dB}$$

Ganancia

$$G_{Tx} = \frac{100}{9} \eta \pi^2 (Df)^2$$

Sustituyendo valores y para una η de 0.6, obtenemos lo siguiente:

$$G_{Tx} = \frac{100}{9} (0.6) \pi^2 [(6.1)(6.185)]^2 = 93658$$

$$G_{Tx} 10 \log(93658) = 49.715$$

Finalmente

$$[G_{Tx}]_{dB} = [49.715]_{dB}$$

5.6.1.2.4. POTENCIA ISOTRÓPICA RADIADA EFECTIVA O PIRE (EIRP)

$$[PIRE]_{dB} = 10 \log(P_{Tx} G_{Tx})$$

Donde:

P_{Tx} = Potencia de subida de la estación terrena

$$[PIRE]_{dB} = 10 \log((550)(93658)) = 77.119 \quad [dBW]$$

Finalmente

$$[PIRE]_{dB} = [77.119]_{dBW}$$

5.6.1.2.5. RELACIÓN PORTADORA A RUIDO ENLACE DE SUBIDA

De la siguiente expresión

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = PIRE - L_{propagación} + \left(\frac{G}{T}\right)_{sat} - \underbrace{10 \log K}_{cte. de Boltzman}$$

Donde:

$\left(\frac{G}{T}\right)_{sat} = 0.37 \quad [dBW/K]$ Valor de hojas de especificación de Satmex, del transponder 13C y tablas de la ciudad de México.

Considerando pérdidas por 1 dB por conectores entonces,

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = 77.119 - [199.53 + 0.046 + 1] + 0.37 - 10 \log(1.379 \times 10^{-23})$$

Finalmente se obtiene la relación portadora a ruido para el enlace de subida.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = [105.59]_{dBHz}$$

5.6.1.3. ENLACE DE BAJADA

Considerando:

5.6.1.3.1. PÉRDIDAS POR PROPAGACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 10 \log \left\{ \left[\frac{4\pi d f}{c} \right]^2 \right\}$$

Sustituyendo valores, se tiene:

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 10 \log \left\{ \left[\frac{4\pi (36540.22 \times 10^3) (3960 \times 10^6)}{3 \times 10^8} \right]^2 \right\}$$

Finalmente

$$[L_{e.l.}]_{dB} = [195.65]_{dB}$$

5.6.1.3.2. PÉRDIDAS POR ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \operatorname{cosec} \theta$$

Sustituyendo valores, se tiene:

$$[L_{a.a.}]_{dB} = \underbrace{[0.035]_{dB}}_{\text{valor de tablas}} \operatorname{cosec} (59.575)$$

Finalmente

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [0.04]_{dB}$$

Longitud de onda

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Donde:

$c =$ Velocidad de la luz 3×10^8 [m/s]

$f =$ Frecuencia de bajada, que en la estación terrena de TV Azteca es igual a 3,960 MHz

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{3.960 \times 10^9} = 0.075[m]$$

Ganancia

$$G_{Rx} = n \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

$$G_{Rx} = 0.6 \left(\frac{\pi(3)}{0.075} \right)^2 = 9286.271$$

$$(G_{Tx})_{dB} = 10 \log(G_{Tx})$$

$$(G_{Tx})_{dB} = 10 \log(9286.2713) = 39.67 \quad [dB]$$

Finalmente se obtiene el valor de la ganancia

$$[G_{Tx}]_{dB} = [39.67]_{dB}$$

En hojas de especificación de Satmex 5 se encuentra el siguiente valor de *PIRE*

$$[PIRE]_{dB_{bajada}} = 40.78 \quad [dB]$$

Para obtener el valor de la temperatura de ruido de la antena real, se realiza una interpolación.

$$m = \frac{(5-3.8)}{(20.5-22.4)} \frac{[m]}{[K]} = -0.6315, \quad b = y - mx, \quad b = 5 - (0.6315)(20.5) = 17.94,$$

Ahora

$$y = mx + b, \quad x = \frac{y-b}{m}, \quad x = \frac{3-17.94}{-0.6315} = 23.66$$

De esta manera se ha obtenido el valor real para la Temperatura de la antena.

$$T_{ant} = 23.66[K]$$

5.6.1.3.3. TEMPERATURA DE RUIDO DEL SISTEMA

$$T_s = \frac{23.66}{\text{anti log}(0.1)} + 290[K] \left[1 - \frac{1}{\text{anti log}(0.1)} \right] + 120$$

Finalmente

$$T_s = 198.4386[K]$$

5.6.1.3.4. FACTOR DE CALIDAD O FIGURA DE MÉRITO

$$\left(\frac{G}{T} \right)_{\text{estación terrena}} = \left[\frac{(G_R)_{\max}}{T_s} \right]_{\text{dB/K}} - \underbrace{\left(\text{Pérdidas por conectores y desapuntamiento} \right)}_{\text{en este caso las pérdidas por desapuntamiento se consideran despreciables}} \quad [\text{dB/K}]$$

$$\left(\frac{G}{T} \right)_{\text{estación terrena}} = (G_R)_{\max} - T_s [\text{dB}] - L_{\text{conectores}}$$

$$\left(\frac{G}{T} \right)_{\text{estación terrena}} = (G_R)_{\max} - L_{\text{conectores}} - 10 \log T_s [K]$$

Sustituyendo valores

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{estación terrena}} = (36.75 - 1) - 10 \log(198.4386) = 15.69 \text{ dB/K}$$

Finalmente se obtiene el valor de la figura de mérito

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{estación terrena}} = [15.69]_{\text{dB/K}}$$

5.6.1.3.5. RELACIÓN PORTADORA A RUIDO ENLACE DE BAJADA

De la siguiente expresión

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{bajada}} = PIRE - L + \left(\frac{G}{T}\right)_{\text{estación terrena}} - \underbrace{10 \log K}_{\text{cte. de Boltzman}}$$

Sustituyendo valores, obtenemos:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{bajada}} = 40.78 - [195.65 + 0.04] + 15.69 - 10 \log(1.379 \times 10^{-23})$$

Finalmente

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{bajada}} = [89.38]_{\text{dBHz}}$$

5.6.1.4. RELACIÓN TOTAL DE POTENCIAS

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{total}}} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{subida}}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{intermodulación}}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{bajada}}}$$

Considerando que TV Azteca utiliza todo el transpondedor:

$$(C/N_0)_{intermodulación} = \infty \quad [dBHz]$$

Por lo que su recíproco es cero, sustituyendo valores

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total}} = \frac{1}{10^{\frac{105.59}{10}}} + \frac{1}{10^{\frac{89.38}{10}}}$$

Finalmente para TV AZTECA obtenemos

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total} = 89.295 \text{ dBHz}$$

5.6.2. CÁLCULOS DE EDUSAT

5.6.2.1. PARA LA ESTACIÓN TERRENA DE EDUSAT CON EL SATÉLITE SATMEX 5

Posición de Satmex 5: 116.8°

Posición geográfica de la ciudad de México:

Latitud: 19.43° N

Longitud: 99.133° O

Altitud: 2.240°

Para llevar a cabo el cálculo de enlace de subida (de la estación terrena de Edusat al satélite Satmex 5), se realizan los siguientes cálculos:

5.6.2.1.1. ENLACE DE SUBIDA

Longitud de onda

$f =$ Frecuencia de subida, que en la estación terrena de Edusat es igual a 6.405 GHz

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{6.405 \times 10^9} = 4.68 \times 10^{-2} [m]$$

Cómo en el cálculo para el enlace de Edusat, se obtiene:

$$c = \cos(19.43^\circ) \cos(116.8^\circ - 99.133^\circ) = 0.899$$

$$\theta' = \arccos(0.899) = 26.031^\circ$$

$$\theta = 59.578^\circ$$

$$d = 36,540.22 [km]$$

5.6.2.1.1.1. Pérdidas por propagación en el espacio libre

$$L_{e.l.} = \left(\frac{4 \pi d f}{c} \right)^2$$

$$L_{e.l.} = \left(\frac{4 \pi (36,540.22 \times 10^3) (6.405 \times 10^9)}{3 \times 10^8} \right)^2$$

Finalmente se obtiene la pérdida de propagación en el espacio libre.

$$[L_{e.l.}]_{dB} = [199.83]_{dB}$$

5.6.2.1.1.2. Pérdidas por absorción atmosférica

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \operatorname{cosec} \theta$$

Substituyendo valores:

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [0.046]_{dB}$$

Ganancia

$$G_{Tx} = \frac{100}{9} \eta \pi^2 (Df)^2$$

Substituyendo valores y para una η de 0.6, obtenemos lo siguiente:

$$G_{Tx} = \frac{100}{9} (0.6) \pi^2 [(6.1)(6.185)]^2 = 326611.99$$

$$G_{Tx} 10 \log(326611.99) = 55.14$$

Finalmente

$$[G_{Tx}]_{dB} = [55.14]_{dB}$$

5.6.2.1.1.3. Potencia Isotrópica Radiada Efectiva o PIRE (EIRP)

$$[PIRE]_{dB} = 10 \log(P_{Tx} G_{Tx})$$

Donde:

P_{Tx} = Potencia de subida de la estación terrena

$$[PIRE]_{dB} = 10 \log((15)(326611.99)) = 66.9 \text{ [dBW]}$$

Finalmente

$$[PIRE]_{dB} = [66.9]_{dBW}$$

5.6.2.1.1.4. Relación portadora a ruido enlace de subida

De la siguiente expresión

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = PIRE - L_{propagación} + \left(\frac{G}{T}\right)_{sat} - \underbrace{10 \log K}_{cte. de Boltzman}$$

Donde:

$\left(\frac{G}{T}\right)_{sat} = 0.84$ [dBW/K] Valor de hojas de especificación de Satmex, del transponder 24 y tablas de la ciudad de México.

Considerando pérdidas por 1 dB por los conectores entonces,

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = 66.9 - [199.83 + 0.046 + 1] + 0.84 - 10 \log(1.379 \times 10^{-23})$$

Finalmente se obtiene la relación portadora a ruido para el enlace de subida.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = [95.46]_{dBHz}$$

5.6.2.1.2. ENLACE DE BAJADA

Considerando:

5.6.2.1.2.1. Pérdidas por propagación en el espacio libre

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 10 \log \left\{ \left[\frac{4\pi d f}{c} \right]^2 \right\}$$

Sustituyendo valores, se tiene:

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 10 \log \left\{ \left[\frac{4\pi (36540.22 \times 10^3)(4.18 \times 10^9)}{3 \times 10^8} \right]^2 \right\}$$

Finalmente

$$[L_{e.l.}]_{dB} = [196.13]_{dB}$$

5.6.2.1.2.2. Pérdidas por absorción atmosférica

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \operatorname{cosec} \theta$$

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [0.04]_{dB}$$

$f =$ Frecuencia de bajada, que en la estación terrena de Edusat es igual a 4.18 GHz

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{4.18 \times 10^9} = 0.071[m]$$

Ganancia

$$G_{Rx} = n \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

$$G_{Rx} = 0.6 \left(\frac{\pi (1.8)}{0.017} \right)^2 = 3729.98$$

$$(G_{Tx})_{dB} = 10 \log(G_{Tx})$$

$$(G_{Tx})_{dB} = 10 \log(3729.98) = 35.71 \quad [dB]$$

Finalmente se obtiene el valor de la ganancia

$$[G_{Tx}]_{dB} = [35.71]_{dB}$$

En hojas de especificación de Satmex 5 se encuentra el siguiente valor de *PIRE*

$$[PIRE]_{dB_{bajada}} = 41.18 \text{ [dB]}$$

De esta manera se ha obtenido el valor real para la Temperatura de la antena.

$$T_{ant} = 24.4908[K]$$

5.6.2.1.2.3. Temperatura de ruido de la antena

$$T_s = \frac{24.4908}{\text{anti log}(0.1)} + 290[K] \left[1 - \frac{1}{\text{anti log}(0.1)} \right] + 120$$

Finalmente

$$T_s = 199.0986[K]$$

5.6.2.1.2.4. Factor de calidad o figura de mérito

$$\left(\frac{G}{T} \right)_{\text{estación terrena}} = (G_R)_{\text{max}} - L_{\text{conectores}} - 10 \log T_s [K]$$

Sustituyendo valores

$$\left(\frac{G}{T} \right)_{\text{estación terrena}} = (35.71 - 1) - 10 \log(199.0986) = 11.71 \text{ dB/K}$$

Finalmente se obtiene el valor de la figura de mérito

$$\left(\frac{G}{T} \right)_{\text{estación terrena}} = [11.71]_{dB/K}$$

5.6.2.1.2.5. Relación portadora a ruido enlace de bajada

De la siguiente expresión

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{bajada} = PIRE - L + \left(\frac{G}{T}\right)_{estación\ terrena} - \underbrace{10 \log K}_{cte. de Boltzman}$$

Sustituyendo valores, obtenemos:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{bajada} = 41.18 - [199.09 + 0.04] + 15.69 - 10 \log (1.379 \times 10^{-23})$$

Finalmente

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{bajada} = [86.34]_{dBHz}$$

5.6.2.1.3. RELACIÓN TOTAL DE POTENCIAS

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total}} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{intermodulación}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{bajada}}$$

Considerando que Edusat utiliza todo el transpondedor:

$$(C/N_0)_{intermodulación} = \infty \quad [dBHz]$$

Por lo que su recíproco es cero, sustituyendo valores

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total}} = \frac{1}{10^{\frac{95.46}{10}}} + \frac{1}{10^{\frac{86.34}{10}}}$$

Finalmente para Edusat obtenemos

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{total} = 84.9 \text{ dBHz}$$

5.6.3. CÁLCULOS DE SKY

5.6.3.1. PARA LA ESTACIÓN TERRENA DE SKY CON EL SATÉLITE PANAMSAT 9

Posición de Panamsat 9: 58° O

Posición geográfica de la ciudad de México:

Latitud: 19.43° N

Longitud: 99.133° O

Altitud: 2.240°

Para llevar a cabo el cálculo de enlace de subida (de la estación terrena de Sky al satélite Panamsat 9), se realizan los siguientes cálculos:

5.6.3.1.1. ENLACE DE SUBIDA

Longitud de onda

$f =$ Frecuencia de subida, que en la estación terrena de Sky es igual a 14.26 GHz

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{14.26 \times 10^9} = 2.1 \times 10^{-2} [m]$$

Cómo en el cálculo para el enlace de Sky, se obtiene:

$$c = \cos(19.43^\circ) \cos(58^\circ - 99.133^\circ) = 0.71$$

$$\theta' = \arccos(0.71) = 44.74^\circ$$

Por lo que,

$$\theta = 38.44^\circ$$

Para la distancia tenemos:

$$d = 35,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos \theta}$$

$$d = 35,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos(44.74)} = 37,900.08 [km]$$

5.6.3.1.1.1. Pérdidas por propagación en el espacio libre

$$L_{e.l.} = \left(\frac{4\pi d f}{c} \right)^2$$

$$L_{e.l.} = \left(\frac{4\pi(37,900.08 \times 10^3)(14.26 \times 10^9)}{3 \times 10^8} \right)^2$$

Finalmente se obtiene la pérdida de propagación en el espacio libre.

$$[L_{e.l.}]_{dB} = [208.10]_{dB}$$

5.6.3.1.1.2. Pérdidas por absorción atmosférica

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \cos \sec \theta$$

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [0.1330]_{dB}$$

Ganancia

$$G_{Tx} = \frac{100}{9} \eta \pi^2 (Df)^2$$

Sustituyendo valores y para una η de 0.6, obtenemos lo siguiente:

$$G_{Tx} = \frac{100}{9} (0.6) \pi^2 [(9)(14.29)]^2 = 1088323.38$$

$$G_{Tx} 10 \log(1088323.38) = 60.36$$

Finalmente

$$[G_{Tx}]_{dB} = [60.36]_{dB}$$

5.6.3.1.1.3. Potencia Isotrópica Radiada Efectiva o PIRE (EIRP)

$$[PIRE]_{dB} = 10 \log(P_{Tx} G_{Tx})$$

Donde:

P_{Tx} = Potencia de subida de la estación terrena

$$[PIRE]_{dB} = 10 \log((100)(1088323.38)) = 80.36 \quad [dBW]$$

Finalmente

$$[PIRE]_{dB} = [80.36]_{dBW}$$

5.6.3.1.1.4. Relación portadora a ruido enlace de subida

De la siguiente expresión

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = PIRE - L_{propagación} + \left(\frac{G}{T}\right)_{sat} - \underbrace{10 \log K}_{cte. de Boltzman}$$

Donde:

$\left(\frac{G}{T}\right)_{sat} = 4$ [dBW/K] Valor de hojas de especificación de Panamsat 9, y la huella para México.

Considerando pérdidas por 1 dB por los conectores entonces,

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = 80.36 - [208.1 + 0.133 + 1] + 4 - 10 \log(1.379 \times 10^{-23})$$

Finalmente se obtiene la relación portadora a ruido para el enlace de subida.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = [104.73]_{dBHz}$$

5.6.3.1.2. ENLACE DE BAJADA

Considerando:

5.6.3.1.2.1. Pérdidas por propagación en el espacio libre

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 10 \log \left\{ \left[\frac{4\pi d f}{c} \right]^2 \right\}$$

Sustituyendo valores, se tiene:

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 10 \log \left\{ \left[\frac{4\pi (37900.08 \times 10^3)(14.26 \times 10^9)}{3 \times 10^8} \right]^2 \right\}$$

Finalmente

$$[L_{e.l.}]_{dB} = [207.10]_{dB}$$

5.6.3.1.2.2. Pérdidas por absorción atmosférica

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \operatorname{cosec} \theta$$

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [0.1072]_{dB}$$

5.6.3.1.3. PÉRDIDAS DEBIDAS A LA ATENUACIÓN POR LLUVIA

Primero se calcula la distancia desde el nivel del mar hasta arriba de las nubes:

$$h_r = 3 + 0.028l \quad 0^\circ \leq l \leq 36^\circ [km]$$

Donde:

l .- Latitud de la estación terrena.

$l = 19.433^\circ$ N (Ciudad de México)

Sustituyendo l :

$$h_r = 3 + 0.028(19.433) = 3.544 \quad [km]$$

Para calcular la distancia que recorre la señal bajo la lluvia:

$$d = \frac{h_r - h_0}{\operatorname{sen} \theta}$$

Donde:

h_0 .- Altitud de la estación terrena.

$h_0 = 2,240$ [m]

$\theta = 38.44^\circ$ (Ángulo de elevación obtenido con anterioridad)

Sustituyendo valores para obtener la distancia:

$$d = \frac{3.544 - 2.240}{\text{sen}(38.44)} = 2.097 \text{ [km]}$$

Para calcular un factor reductor $r_{0.01}$:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + \left(\frac{d}{35 e^{-0.015 R_{0.01}}} \right) \cos \theta} \approx 1$$

$R_{0.01}$.- Intensidad de la lluvia en mm/h excedida 0.01% en un año. Según los contornos de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para la ciudad de México dicho factor es:

$$R_{0.01} = 63 \text{ (mm/h)}$$

Sustituyendo datos:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2.097}{35 e^{-0.015(63)}} \right) \cos(38.44)} = 0.892$$

Para obtener el coeficiente de atenuación específica γ se empleará el nomograma publicado por la UIT-R, considerando la intensidad de lluvia para la ciudad de México que aproximadamente es de 80 (mm/h) y la frecuencia de bajada 11.96 GHz. Con estos datos y trazando la recta que une dichos valores, el resultado es:

$$\gamma = 3.4 \text{ (dB/km)}$$

El cálculo de la atenuación por lluvia excedida en un año para una disponibilidad de 99.99% es el siguiente:

$$L_{\text{lluvia}_{0.01}} = \gamma \underbrace{(d)(r_{0.01})}_{\substack{\text{longitud efectiva} \\ \text{de la trayectoria} \\ \text{oblicua}}} \text{ [dB]}$$

Sustituyendo

$$L_{lluvia_{0,01}} = (3.4) (2.097)(0.892) = 6.3598 \text{ [dB]}$$

El cálculo de la atenuación por lluvia excedida en un año para una disponibilidad de 99.9% se obtiene de la siguiente manera:

$$L_{lluvia_p} = \left[0.12 p^{-(0.546+0.043 \log p)} \right] L_{lluvia_{0,01}} \text{ [dB]}$$

Donde, para este caso $p = 0.1$

$$L_{lluvia_{0,1}} = \left[0.12 (0.1)^{-(0.546+0.043 \log(0.1))} \right] (6.3598) = 2.43 \text{ [dB]}$$

Finalmente:

$$L_{lluvia_{0,1}} = 2.43 \text{ [dB]}$$

$f =$ Frecuencia de bajada, que en la estación terrena de Sky es igual a 11.96 GHz

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{11.96 \times 10^9} = .0025 \text{ [m]}$$

Ganancia

$$G_{Rx} = n \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

$$G_{Rx} = 0.6 \left(\frac{\pi (0.75)}{0.025} \right)^2 = 5329.58$$

$$(G_{Tx})_{dB} = 10 \log(G_{Tx})$$

$$(G_{Tx})_{dB} = 10 \log(5329.58) = 37.26 \text{ [dB]}$$

Finalmente se obtiene el valor de la ganancia

$$[G_{Tx}]_{dB} = [37.26]_{dB}$$

En hojas de especificación de Panamsat 9 se encuentra el siguiente valor de *PIRE*

$$[PIRE]_{dB_{bajada}} = 51 \text{ [dB]}$$

De esta manera se ha obtenido el valor real para la Temperatura de la antena.

$$T_{ant} = 59.6810[K]$$

5.6.3.1.3.1. Temperatura de ruido de la antena

$$T_s = \frac{59.6810}{\text{anti log}(0.1)} + 290[K] \left[1 - \frac{1}{\text{anti log}(0.1)} \right] + 120$$

Finalmente

$$T_s = 227.05[K]$$

5.6.3.1.3.2. Factor de calidad o figura de mérito

$$\left(\frac{G}{T} \right)_{\text{estación terrena}} = (G_R)_{\text{max}} - L_{\text{conectores}} - 10 \log T_s [K]$$

Sustituyendo valores

$$\left(\frac{G}{T} \right)_{\text{estación terrena}} = (37.26 - 1) - 10 \log(227.05) = 12.69 \text{ dB/K}$$

Finalmente se obtiene el valor de la figura de mérito

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\substack{\text{estación} \\ \text{terrena}}} = [12.69]_{dB/K}$$

5.6.3.1.3.3. Relación portadora a ruido enlace de bajada

De la siguiente expresión

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{bajada}} = PIRE - L + \left(\frac{G}{T}\right)_{\substack{\text{estación} \\ \text{terrena}}} - \underbrace{10 \log K}_{\text{cte. de Boltzman}}$$

Sustituyendo valores, obtenemos:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{bajada}} = 51 - [207.10 + 0.1072 + 2.43] + 12.69 - 10 \log (1.379 \times 10^{-23})$$

Finalmente

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{bajada}} = [82.871]_{dBHz}$$

5.6.3.1.4. RELACIÓN TOTAL DE POTENCIAS

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{total}}} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{subida}}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{intermodulación}}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{bajada}}}$$

Considerando que Sky utiliza varios transpondedores completos, se tiene:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{intermodulación}} = \infty \quad [dBHz]$$

Por lo que su recíproco es cero, sustituyendo valores

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total}} = \frac{1}{10^{\frac{104.73}{10}}} + \frac{1}{10^{\frac{82.871}{10}}} = \frac{1}{192,432,555.357}$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total} = 10 \log(192,432,555.357) = 82.84 [dBHz]$$

Finalmente para SKY obtenemos

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total} = 82.8427 [dBHz]$$

5.6.4. CÁLCULOS DE TELEVISA

5.6.4.1. PARA LA ESTACIÓN TERRENA DE TELEVISA CON EL SATÉLITE SATMEX 5

Posición de Satmex 5: 116.8°

Posición geográfica de la ciudad de México:

Latitud: 19.43° N

Longitud: 99.133° O

Altitud: 2.240°

Para llevar a cabo el cálculo de enlace de subida (de la estación terrena de Televisa al satélite Satmex 5), se realizan los siguientes cálculos:

5.6.4.1.1. ENLACE DE SUBIDA

Longitud de onda

$f =$ Frecuencia de subida, que en la estación terrena de Televisa es igual a 6.165 GHz

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{6.165 \times 10^9} = 4.86 \times 10^{-2} [m]$$

Cómo en el cálculo para el enlace de Televisa, se obtiene:

$$c = \cos(19.43^\circ) \cos(116.8^\circ - 99.133^\circ) = 0.899$$

$$\theta' = \arccos(0.899) = 26.031^\circ$$

$$\theta = 59.578^\circ$$

$$d = 36,540.22 [km]$$

5.6.4.1.1.1. Pérdidas por propagación en el espacio libre

$$L_{e.l.} = \left(\frac{4 \pi d f}{c} \right)^2$$

$$L_{e.l.} = \left(\frac{4 \pi (36,540.22 \times 10^3) (6.165 \times 10^9)}{3 \times 10^8} \right)^2$$

Finalmente se obtiene la pérdida de propagación en el espacio libre.

$$[L_{e.l.}]_{dB} = [199.5]_{dB}$$

5.6.4.1.1.2. Pérdidas por absorción atmosférica

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \cos \sec \theta$$

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [0.046]_{dB}$$

Ganancia

$$G_{Tx} = \frac{100}{9} \eta \pi^2 (Df)^2$$

Sustituyendo valores y para una η de 0.6, obtenemos lo siguiente:

$$G_{Tx} = \frac{100}{9} (0.6) \pi^2 [(7)(6.165)]^2 = 122537.98$$

$$G_{Tx} 10 \log(122537.98) = 50.88$$

Finalmente

$$[G_{Tx}]_{dB} = [50.88]_{dB}$$

5.6.4.1.1.3. Potencia Isotrópica Radiada Efectiva o PIRE (EIRP)

$$[PIRE]_{dB} = 10 \log(P_{Tx} G_{Tx})$$

Donde:

P_{Tx} = Potencia de subida de la estación terrena

$$[PIRE]_{dB} = 10 \log((35)(122537.89)) = 66.32 \quad [dBW]$$

Finalmente

$$[PIRE]_{dB} = [66.32]_{dBW}$$

5.6.4.1.1.4. Relación portadora a ruido enlace de subida

De la siguiente expresión

Se tiene:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = PIRE - L_{propagación} + \left(\frac{G}{T}\right)_{sat} - \underbrace{10 \log K}_{cte. de Boltzman}$$

Donde:

$\left(\frac{G}{T}\right)_{sat} = 0.84$ [dBW/K] Valor de hojas de especificación de Satmex, del transponder 12c y tablas de la ciudad de México.

Considerando pérdidas por 1 dB por los conectores entonces,

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = 66.32 - [199.5 + 0.046 + 1] + 0.84 - 10 \log(1.379 \times 10^{-23})$$

Finalmente se obtiene la relación portadora a ruido para el enlace de subida.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = [95.22]_{dBHz}$$

5.6.4.1.2. ENLACE DE BAJADA

Considerando:

5.6.4.1.2.1. Pérdidas por propagación en el espacio libre

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 10 \log \left\{ \left[\frac{4\pi d f}{c} \right]^2 \right\}$$

Sustituyendo valores, se tiene:

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 10 \log \left\{ \left[\frac{4\pi (36540.22 \times 10^3)(3.94 \times 10^9)}{3 \times 10^8} \right]^2 \right\}$$

Finalmente

$$[L_{e.l.}]_{dB} = [195.5]_{dB}$$

5.6.4.1.2.2. Pérdidas por absorción atmosférica

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \operatorname{cosec} \theta$$

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [0.0507]_{dB}$$

$f =$ Frecuencia de bajada, que en la estación terrena de Televisa es igual a 3.94 GHz

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{3.94 \times 10^9} = 0.076[m]$$

Ganancia

$$G_{Rx} = n \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

$$G_{Rx} = 0.6 \left(\frac{\pi (3.5)}{0.076} \right)^2 = 12559.13$$

$$(G_{Tx})_{dB} = 10 \log(G_{Tx})$$

$$(G_{Tx})_{dB} = 10 \log(12559.13) = 40.98 \quad [dB]$$

Finalmente se obtiene el valor de la ganancia

$$[G_{Tx}]_{dB} = [40.98]_{dB}$$

En hojas de especificación de Satmex 5 se encuentra el siguiente valor de *PIRE*

$$[PIRE]_{dB_{bajada}} = 41.18 \text{ [dB]}$$

De esta manera se ha obtenido el valor real para la Temperatura de la antena.

$$T_{ant} = 21.8485[K]$$

5.6.4.1.2.3. Temperatura de ruido del sistema

$$T_s = \frac{21.8485}{\text{anti log}(0.1)} + 290[K] \left[1 - \frac{1}{\text{anti log}(0.1)} \right] + 120$$

Finalmente

$$T_s = 196.9997[K]$$

5.6.4.1.2.4. Factor de calidad o figura de mérito

$$\left(\frac{G}{T} \right)_{\text{estación terrena}} = (G_R)_{\text{max}} - L_{\text{conectores}} - 10 \log T_s [K]$$

Sustituyendo valores

$$\left(\frac{G}{T} \right)_{\text{estación terrena}} = (40.98 - 1) - 10 \log(196.9997) = 17.04 \text{ dB/K}$$

Finalmente se obtiene el valor de la figura de mérito

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\substack{\text{estación} \\ \text{terrena}}} = [17.04]_{dB/K}$$

5.6.4.1.2.5. Relación portadora a ruido enlace de bajada

De la siguiente expresión

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{bajada}} = PIRE - L + \left(\frac{G}{T}\right)_{\substack{\text{estación} \\ \text{terrena}}} - \underbrace{10 \log K}_{\text{cte. de Boltzman}}$$

Sustituyendo valores, obtenemos:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{bajada}} = 41.18 - [195.5 + 0.05] + 17.04 - 10 \log (1.379 \times 10^{-23})$$

Finalmente

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{bajada}} = [91.15]_{dBHz}$$

5.6.4.1.3. RELACIÓN TOTAL DE POTENCIAS

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{total}}} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{subida}}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{intermodulación}}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{bajada}}}$$

Considerando que Televisa utiliza todo el transpondedor:

$$(C/N_0)_{\text{intermodulación}} = \infty \quad [dBHz]$$

Por lo que su recíproco es cero, sustituyendo valores

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total}} = \frac{1}{10^{\frac{95.22}{10}}} + \frac{1}{10^{\frac{91.15}{10}}}$$

Finalmente para Televisa obtenemos

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total} = 89.72dBHz$$

5.6.5. CÁLCULO PARA DIRECTV

5.6.5.1. PARA LA ESTACIÓN TERRENA DE DIRECTV EN MÉXICO CON EL SATÉLITE GALAXY 3C.

Posición del Galaxy 3C: 95° Oeste

Posición geográfica de la Ciudad de México:

Latitud: 19.43° N

Longitud: 99.133° O

Altitud: 2.240°

5.6.5.2. ENLACE DE SUBIDA

Longitud de onda

DirecTV utiliza 15 transpondedores que van desde los 11.48 a los 11.685 [GHz] para el enlace descendente. Analizaremos el transponder cuyas frecuencias son $f_{down}=11.51$ y $f_{up}=13.81$ [GHz].

Se tiene:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{13.81 \times 10^9} = 2.1708 \times 10^{-2} [m]$$

Obteniendo los ángulos, considerando que:

l = Latitud de la estación terrena

ΔL = Longitud del satélite – Longitud de la estación terrena

Entonces:

$$c = \cos l \cos \Delta L = \cos(19.43^\circ) \cos(99.133^\circ - 95^\circ) = 0.941$$

$$\theta' = \arccos c = \arccos(0.941) = 19.848^\circ$$

Para calcular el ángulo de elevación θ , se emplea la expresión:

$$\theta = \arctan \left[\frac{c - \frac{R_e}{h}}{\sin \theta'} \right]$$

Donde:

R_e = Radio de la Tierra = 6,378 km

h = Radio de la órbita = 42,164 km

$$\theta = \arctan \left[\frac{0.941 - \frac{6,378 \times 10^3}{42,164 \times 10^3}}{\sin(19.848^\circ)} \right] = 66.725^\circ$$

5.6.5.2.1. RANGO DE DISTANCIA

$$d = 35,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos \theta'}$$

$$d = 35,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos(19.848)} = 36,229.568 [km]$$

5.6.5.2.2. PÉRDIDAS POR PROPAGACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE

$$L_{e.l.} = \left(\frac{4 \pi d f}{c} \right)^2$$

$$L_{e.l.} = \left(\frac{4 \pi (36,229.568 \times 10^3) (13.81 \times 10^9)}{3 \times 10^8} \right)^2 = 4.398 \times 10^{20}$$

Finalmente se obtiene la pérdida de propagación en el espacio libre.

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 10 \log(4.398 \times 10^{20}) = 206.433 [dB]$$

5.6.5.2.3. PÉRDIDAS POR ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \csc \theta$$

Donde:

$L_{cenit dB}$ = Este valor se encuentra en tablas

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [0.08]_{dB} \csc(66.725) = 0.0858 [dB]$$

Finalmente se obtiene la pérdida por absorción atmosférica.

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [0.0858]_{dB}$$

De la información obtenida, la Ganancia

$$G_{Tx}=65 \text{ [dBi]}$$

5.6.5.2.4. POTENCIA ISOTRÓPICA RADIADA EFECTIVA O PIRE (EIRP)

$$[PIRE]_{dB} = 10 \log(P_{Tx}) + G_{Tx} = 10 \log(25) + 65 = 78.979 [dBW]$$

5.6.5.2.5. RELACIÓN PORTADORA A RUIDO ENLACE DE SUBIDA

De la siguiente expresión

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = PIRE - L_{propagación} + \left(\frac{G}{T}\right)_{sat} - \underbrace{10 \log K}_{cte. de Boltzman}$$

Donde:

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{sat} = 0 \text{ [dBW/K]} \quad \text{De huellas para el satélite Galaxy 3C.}$$

Considerando pérdidas entre el amplificador de potencia y la antena $L= 1$ [dB]

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = 78.979 - [206.433 + 0.0858 + 1] + 0 - 10 \log(1.379 \times 10^{-23}) = 100.066 [dBHz]$$

Finalmente se obtiene la relación portadora a ruido para el enlace de subida.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida} = [100.066]_{dBHz}$$

5.6.5.3. ENLACE DE BAJADA

5.6.5.3.1. PÉRDIDAS POR PROPAGACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE

$$[L_{e.l.}]_{dB} = 10 \log \left[\frac{4\pi d f}{c} \right]^2 = 10 \log \left[\frac{4\pi (36540.22 \times 10^3)(11.51 \times 10^9)}{3 \times 10^8} \right]^2 = 204.845 [dB]$$

5.6.5.3.2. PÉRDIDAS POR ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \operatorname{cosec} \theta$$

Sustituyendo valores, se tiene:

$$[L_{a.a.}]_{dB} = \underbrace{[0.065]_{dB}}_{\text{valor de tablas}} \operatorname{csc}(66.725) = 0.0701 [0.08]_{dB} \operatorname{csc}(66.725) = 0.0858 [dB]$$

Finalmente

$$[L_{a.a.}]_{dB} = [0.0858]_{dB}$$

5.6.5.3.3. PÉRDIDAS DEBIDAS A LA ATENUACIÓN POR LLUVIA

Primero se calcula la distancia desde el nivel del mar hasta arriba de las nubes:

$$h_r = 3 + 0.028l \quad 0^\circ \leq l \leq 36^\circ [km]$$

Donde:

l - Latitud de la estación terrena.

$l = 19.433^\circ$ N (Ciudad de México)

Sustituyendo l :

$$h_r = 3 + 0.028(19.433) = 3.544 [km]$$

Para calcular la distancia que recorre la señal bajo la lluvia:

$$d = \frac{h_r - h_0}{\text{sen } \theta}$$

Donde:

h_0 .- Altitud de la estación terrena.

$$h_0 = 2,240 \text{ [m]}$$

$$\theta = 66.725^\circ \text{ (Ángulo de elevación obtenido con anterioridad)}$$

Sustituyendo valores para obtener la distancia:

$$d = \frac{3.544 - 2.240}{\text{sen}(66.725)} = 1.419 \text{ [km]}$$

Para calcular un factor reductor $r_{0.01}$:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + \left(\frac{d}{35 e^{-0.015 R_{0.01}}} \right) \cos \theta} \approx 1$$

$R_{0.01}$.- Intensidad de la lluvia en mm/h excedida 0.01% en un año. Según los contornos de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para la ciudad de México dicho factor es:

$$R_{0.01} = 63 \text{ (mm/h)}$$

Sustituyendo datos:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1.419}{35 e^{-0.015(63)}} \right) \cos(66.725)} = 0.960$$

Para obtener el coeficiente de atenuación específica γ se empleará el nomograma publicado por la UIT-R, considerando la intensidad de lluvia para la ciudad de México que aproximadamente es de 80 (mm/h) y la frecuencia de bajada 11.51 GHz. Con estos datos y trazando la recta que une dichos valores, el resultado es:

$$\gamma = 3 \text{ (dB/km)}$$

El cálculo de la atenuación por lluvia excedida en un año para una disponibilidad de 99.99% es el siguiente:

$$L_{lluvia_{0,01}} = \gamma \underbrace{(d)(r_{0,01})}_{\substack{\text{longitud efectiva} \\ \text{de la trayectoria} \\ \text{oblicua}}} \text{ [dB]}$$

$$L_{lluvia_{0,01}} = (3) (1.419)(0.960) = 4.086 \text{ [dB]}$$

El cálculo de la atenuación por lluvia excedida en un año para una disponibilidad de 99.9% se obtiene de la siguiente manera:

$$L_{lluvia_p} = \left[0.12 p^{-(0.546+0.043 \log p)} \right] L_{lluvia_{0,01}} \text{ [dB]}$$

Donde, para este caso $p = 0.1$

$$L_{lluvia_{0,1}} = \left[0.12 (0.1)^{-(0.546+0.043 \log(0.1))} \right] (4.086) = 1.5615 \text{ [dB]}$$

Finalmente:

$$L_{lluvia_{0,1}} = 1.5615 \text{ [dB]}$$

Longitud de onda

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{11.51 \times 10^9} = 0.026 \text{ [m]}$$

Ganancia

$$G_{Rx} = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

$$G_{Rx} = 0.6 \left(\frac{\pi(.9)}{0.026} \right)^2 = 7095.603$$

$$(G_{Rx})_{dB} = 10 \log(7095.603) = 38.51 \quad [dB]$$

Finalmente se obtiene el valor de la ganancia

En huellas del Galaxy 3C se encuentra el siguiente valor de *PIRE* para la Cd. De México.

$$[PIRE]_{dB_{bajada}} = 43 \quad [dB]$$

Para la banda Ku, la temperatura de ruido de la antena es:

$$T_{ant} = 15 + \frac{30}{D} + \frac{180}{\theta} = 15 + \frac{30}{0.9} + \frac{180}{66.722} = 51.031 [K]$$

5.6.5.3.4. TEMPERATURA DE RUIDO DEL SISTEMA

$$T_s = \frac{51.031}{\text{anti log}(0.1)} + 290 [K] \left[1 - \frac{1}{\text{anti log}(0.1)} \right] + 120 = 220.18 [K]$$

5.6.5.3.5. FACTOR DE CALIDAD O FIGURA DE MÉRITO

$$\left(\frac{G}{T} \right)_{\text{estación terrena}} = \left[\frac{(G_R)_{\max}}{T_s} \right]_{dB/K} - \underbrace{(Pérdidas por conectores y desapuntamiento)}_{\text{en este caso las pérdidas por desapuntamiento se consideran despreciables}} \quad [dB/K]$$

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{estación terrena}} = (G_R)_{\text{max}} - L_{\text{conectores}} - 10 \log T_s [K]$$

Sustituyendo valores

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{estación terrena}} = (38.51 - 1) - 10 \log(220.18) = 14.082 \text{ dB/K}$$

Finalmente se obtiene el valor de la figura de mérito

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{estación terrena}} = [14.082]_{\text{dB/K}}$$

5.6.5.3.6. RELACIÓN PORTADORA A RUIDO ENLACE DE BAJADA

De la siguiente expresión

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{bajada}} = PIRE - L + \left(\frac{G}{T}\right)_{\text{estación terrena}} - \underbrace{10 \log K}_{\text{cte. de Boltzman}}$$

Sustituyendo valores, obtenemos:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{bajada}} = 43 - [204.845 + 0.0858 + 1.5615] + 14.082 - 10 \log(1.379 \times 10^{-23}) = 79.194$$

Finalmente

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{bajada}} = [79.194]_{\text{dBHz}}$$

5.6.5.3.7. RELACIÓN TOTAL DE POTENCIAS

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total}} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{subida}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{intermodulación}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{bajada}}$$

Considerando que DirecTV utiliza todo el transpondedor:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{intermodulación} = \infty \text{ [dBHz]}$$

Por lo que su recíproco es cero, sustituyendo valores

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total}} = \frac{1}{10^{\frac{100.066}{10}}} + \frac{1}{10^{\frac{79.194}{10}}} = \frac{1}{82,387,541.4848}$$

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total} = 10 \log(82,387,541.4848) = 79.158 \text{ [dBHz]}$$

Finalmente para DirecTV obtenemos

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total} = 79.158 \text{ [dBHz]}$$

5.6.6. RELACIÓN TOTAL DE POTENCIAS ESPERADA.

A partir de la Tabla 5-1 y la relación de codificación para corrección de errores FEC, podemos encontrar el E_b/N_0 requerido para que, después de aplicar los algoritmos de corrección viterbi y Reed-Solomon, mantener una tasa de errores entre 10^{-11} y 10^{-10} . Lo cual cumple con los niveles especificados en la Norma ETS 3000 421. Adicionalmente, usando este E_b/N_0 requerido y la información de la Tabla 5-2 sobre la ecuación (2.62), encontramos la relación total de potencias que se espera en los cálculos satelitales.

FEC	Eb/No[dB]
1/2	4.5
2/3	5.0
3/4	5.5
5/6	6.0
7/8	6.4
1	9.0

Tabla 5-1 Nivel de Eb/No especificado en ETS 300 421

$$\frac{C}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} + 10 \log(2(R_{\text{símbolos}})(FEC)) \quad (2.62)$$

Proveedor	Satélite	Frec. Transponder	Pol.	Codificación de video	R _{símbolos} - FEC	Huella
Televisa	Satmex 5	3940 H tp 12		DVB	28125 - 3/4	América
TV Azteca	Satmex 5	3960 V tp 13		DVB	25325 - 3/4	América
Edusat	Satmex 5	4180 H tp 24		Digicipher 2	19510 - 3/4	América
Sky México	Panamsat 9	11960 H tp 13		DVB Videoguard	30000 - 3/4	México
DirecTV Latin America	Galxy 3C	11480 L		DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica

Tabla 5-2 Información de los transpondedores en uso por los servicios analizados.

$$\frac{C}{N_{0 \text{ DirecTV}}} = 5 + 10 \log \left(2(20 \text{ Msps}) \left(\frac{2}{3} \right) \right) = 79.2597 [\text{dBHz}]$$

$$\frac{C}{N_{0 \text{ Edusat}}} = 5.5 + 10 \log \left(2(19.51 \text{ Msps}) \left(\frac{3}{4} \right) \right) = 80.163 [\text{dBHz}]$$

$$\frac{C}{N_{0 \text{ SKY}}} = 5.5 + 10 \log \left(2(30 \text{ Msps}) \left(\frac{3}{4} \right) \right) = 82.032 [\text{dBHz}]$$

$$\frac{C}{N_{0 \text{ TvAzteca}}} = 5.5 + 10 \log \left(2(25.325 \text{ Msps}) \left(\frac{3}{4} \right) \right) = 81.296 [\text{dBHz}]$$

$$\frac{C}{N_{0 \text{ Televisa}}} = 5.5 + 10 \log \left(2(28.125 \text{ Msps}) \left(\frac{3}{4} \right) \right) = 81.752 [\text{dBHz}]$$

5.7. COMPARATIVO ENTRE LOS SERVICIOS DE TELEVISIÓN.

La siguiente tabla resume para los diferentes servicios sus relaciones totales de potencias esperadas (calculadas a partir relación de codificación para corrección de errores FEC) y sus relaciones totales de potencia reales (calculadas a partir de los cálculos de enlaces). Así como la diferencia entre estos dos parámetros.

Televisora	C/No _{Total} Esperado	C/No _{Total} Real	Diferencia
Edusat	80.1635	84.926	4.7625
DirecTV	79.2597	79.158	-0.1017
SKY	82.0321	82.8427	0.8106
TV Azteca	81.2964	89.295	7.9986
Televisa	81.7518	89.713	7.9612

Tabla 5-3 Tabla comparativa del cociente C/N₀ para los servicios analizados.

CONCLUSIONES

A partir de la tabla comparativa de las diferentes empresas analizadas en este texto podemos apreciar que los sistemas de televisión abierta Televisa y TV Azteca son los que presentan la mejor relación portadora a ruido. Esto es coherente con el hecho de que las señales no han llegado aun a su destino final pues serán retransmitidas mediante un enlace de radio frecuencia a los televidentes.

En el caso de DirecTV encontramos que la relación total de potencias es ligeramente menor que el valor esperado, esto no significa que la calidad de su señal sea deficiente, simplemente que al tratarse de un sistema alternativo al DVB, sus parámetros de diseño son similares pero no iguales a los que usa su contraparte. En este caso, la tasa de error de bits será un poco mayor que el de los demás sistemas analizados, sin embargo los usuarios percibirán una señal con buena calidad de imagen.

Debido a que las señales emitidas por SKY y DirecTV son productos comerciales de alto costo, se podría haber esperado que nuestro parámetro comparativo, relación portadora a ruido, fuera mayor para estos dos que el manejado por Edusat cuya misión es la de ofrecer un servicio cultural sin fines de lucro. Esto puede deberse a que SKY y DirecTV entregan la señal al usuario final mientras que las transmisiones de Edusat pueden ser almacenadas, retransmitidas o entregadas directamente al televidente.

Con base al análisis de los resultados de la tabla comparativa, observamos que la diferencia es mayor para los casos de TV Azteca, Edusat y Televisa lo cual los hace menos vulnerables a los fenómenos meteorológicos y demás fuentes de ruido e interferencia que podrían degradar la señal; lo anterior se puede apreciar comparándolo con los casos de DirecTV o Sky que pierden la señal con facilidad en casos de lluvia intensa, esto no ocurre con los dos primeros.

Vemos que la calidad de la señal, aunque este relacionada con la potencia de transmisión inicial, este no es el único factor que influye en ella, por ejemplo en el caso de Televisa la potencia de transmisión es de tan solo 75 W mientras que en el caso de TV Azteca, la potencia está alrededor de los 2000 W, a pesar de esto, ambos tienen relación de señal a ruido del mismo orden. Esto se debe a que Televisa utiliza equipo de mayor tecnología y antenas de mayor ganancia. Otros aspectos que pueden influir en la calidad de la señal son el satélite empleado, el número de señales que comparten el mismo amplificador, el tipo de

compresión y tratamiento que se dé a la señal, e incluso las zonas geográficas de donde es transmitida y recibida la información.

Al margen de los objetivos de este documento, podemos mencionar que los resultados obtenidos a partir de los cálculos para cada una de las estaciones terrenas de las televisoras en cuestión, se tomaron en consideración los parámetros de propagación contenidos en las recomendaciones de la UIT-R que son de mayor importancia considerando la banda en la que estos operan.

Finalmente y retomando los dos objetivos planteados al inicio de esta investigación, el primero de ellos, realizar un análisis comparativo en la calidad de la señal después del enlace satelital entre distintas empresas televisivas, se concluye que la calidad que estas ofrecen es buena y coherente con el tipo de servicio al que son orientadas.

En tanto, el segundo objetivo que fue el estudio de los distintos parámetros que intervienen en un enlace satelital, se encontró que estos están relacionados de tal forma que se pueden obtener los mismos resultados modificando un solo parámetro, o bien, manteniéndolo fijo mientras se modifican los demás. Tal es el caso de la potencia, que en caso de ser mínima, se puede compensar ajustando las dimensiones de las antenas transmisora y receptora.

APENDÍCE

A

DATOS DE LOS SATÉLITES

SATMEX 5

Frec. Transponder	Pol.	Proveedor	Codificación de video	SR - FEC	Huella
3940 H tp 12		Televisa	DVB	28125 - 3/4	América
3960 V tp 13		TV Azteca	DVB	25325 - 3/4	América
4164 H tp 24		(Edusat feeds)	DVB	1733 - 3/4	América
4180 H tp 24		Edusat	Digicipher 2	19510 - 3/4	América

Tabla A-1 Transpondedores del satélite Satmex 5 usados por Televisa, TV Azteca y Edusat.

LOCATION	COORDINATES		ANTENNA ALIGNMENT		HORIZONTAL / VERTICAL			VERTICAL / HORIZONTAL		
	LAT.	LONG.	AZIM.	ELEV.	Tp. 1,3,5,7,9,11,13, 25,17,19,21,23			Tp. 2,4,6,8,10,12,14, 16,18,20,22,24		
	(°)	(°W)	(°)	(°)	EIRP	G/T	SFD	EIRP	G/T	SFD
	(°)	(°W)	(°)	(°)	dBW	dB/K	dBW/m	dBW	dB/K	dBW/m
Acapulco, Gro.	16.85	99.92	226.31	62.29	40.32	-0.76	-94.3	40.7	-0.43	-94.77
Cancun,Q.Roo	21.08	86.77	238.11	48.08	41.29	3.16	-98.2	41.64	2.81	-98.01
Cd. Juárez, Chih	31.73	106.48	199.1	51.38	40.95	-1.09	-94	40.94	-0.28	-94.92
Culiacan,Sin	24.8	107.4	213.43	56.42	41.17	0.45	-95.5	41.38	1.02	-96.22
Chihuahua	28.63	106.08	238.61	48.55	41.26	3.18	-98.2	41.62	2.9	-98.1
Chilpancingo	17.55	99.5	224.29	60.09	40.72	0.2	-95.3	41.11	0.68	-95.88
Guadalajara,Jal	20.67	103.33	214.16	61.33	40.74	-0.54	-94.5	40.89	0.37	-95.57
Hermosillo,Son	29.07	110.97	191.87	55.48	40.93	-0.85	-94.2	40.51	-0.04	-95.16
Leon,Gto	21.17	101.7	216.77	59.84	40.88	0.01	-95.1	41.16	0.76	-95.96
Mazatlan,Sin.	23.22	106.42	204.92	60.4	40.8	-0.42	-94.6	40.72	0.55	-95.75
Merida,Yuc.	20.97	89.62	235.13	50.66	41.12	3.01	-98.1	41.64	2.81	-98.01
Mexicali,BCN	32.67	115.48	182.44	51.96	40.74	-1.75	-93.3	40.28	-0.52	-94.68
México, D.F.	19.4	99.15	223.77	59.62	40.78	0.37	-95.4	41.18	0.84	-96.04
Monterrey,N.L.	25.67	100.32	214.33	54.8	41.22	0.57	-95.6	41.47	1.02	-96.22
Morelia, Mich.	19.7	101.12	219.79	60.78	40.75	-0.22	-94.8	41.04	0.48	-95.68
Oaxaca,Oax.	17.05	96.72	231.27	59.48	40.51	0.58	-95.6	41.04	0.74	-95.94
Puebla, Pue	19.05	98.2	210.13	62.48	40.57	-1.02	-94	40.6	0.08	-95.28
Tampico,Tamps	22.22	97.85	222.24	56.3	41.05	1.2	-96.3	41.52	1.52	-96.72
Tijuana, BCN	32.37	117.02	179.59	52.32	40.66	-1.92	-93.1	40.11	-0.67	-94.53
Veracruz,Ver	19.2	96.13	228.92	57.4	40.81	1.35	-96.4	41.36	1.56	-96.76
Villahermosa,Tab	17.98	92.92	235.11	55.52	40.74	2.13	-97.2	41.36	2.19	-97.39

A-2 Información de Cobertura para el Satmex 5.

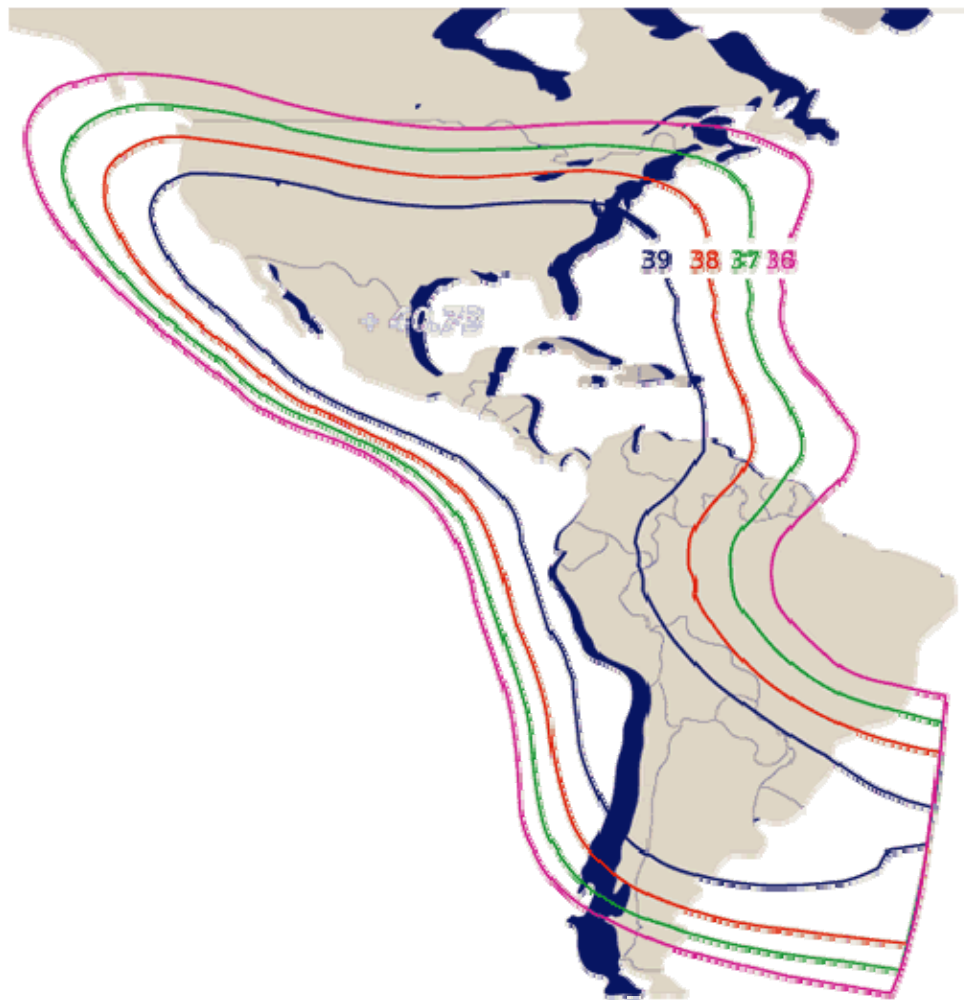


Fig. A-1 Huella del PIRE del Satmex 5 para América en banda C.

PANAMSAT 9

Frec. Transponder	Pol.	Proveedor	Codificación de video	SR - FEC	Huella
11960 H tp 13		Sky México	DVB Videoguard	30000 - 3/4	México
11980 V tp 14		Sky México	DVB Videoguard	30000 - 3/4	México
12000 H tp 15		Sky México	DVB Videoguard	30000 - 3/4	México
12020 V tp 16		Sky México	DVB Videoguard	30000 - 3/4	México
12040 H tp 17		Sky México	DVB Videoguard	30000 - 3/4	México
12060 V tp 18		Sky México	DVB Videoguard	30000 - 3/4	México
12080 H tp 19		Sky México	DVB Videoguard	30000 - 3/4	México
12100 V tp 20		Sky México	DVB Videoguard	30000 - 3/4	México
		MuchMusic		521	
12120 H tp 21		Sky México	DVB Videoguard	30000 - 3/4	México
12140 V tp 22		Sky México	DVB Videoguard	30000 - 3/4	México
12160 H tp 23		Sky México	DVB Videoguard	30000 - 3/4	México
		Mosaico Sky Premiere 2		514	
12180 V tp 24		Sky México	DVB Videoguard	30000 - 3/4	México

Tabla A-3 Transpondedores del satélite PAS 9 usados por SKY.

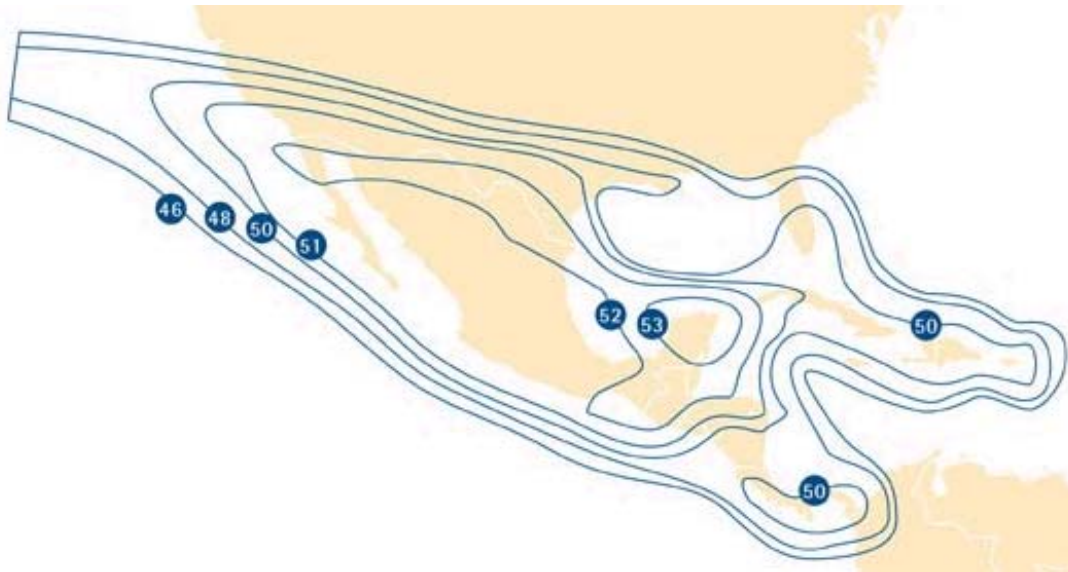


Fig. A-2 PIRE (dBW) del satélite PAS-9 en la Banda Ku-1 para México, Centro América y el Caribe

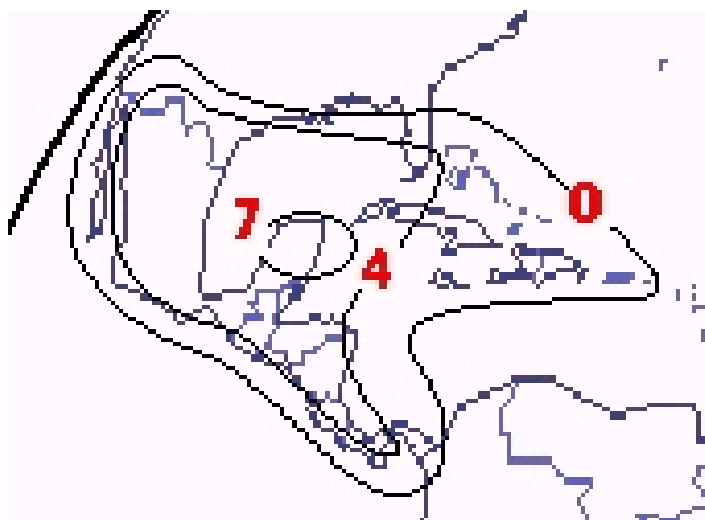


Fig. A-3 G/T (dB/K) del satélite PAS-9 en la Banda Ku-1 para México, Centro América y el Caribe

GALAXY 3C

Frec. Pol.	Proveedor	Codificación	SR - FEC	Huella
11480 L	DirecTV Latin America	DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica
11510 L	DirecTV Latin America	DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica
11510 R	DirecTV Latin America	DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica
11539 L	DirecTV Latin America	DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica
11539 R	DirecTV Latin America	DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica
11568 L	DirecTV Latin America	DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica
11568 R	DirecTV Latin America	DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica
11597 L	DirecTV Latin America	DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica
11597 R	DirecTV Latin America	DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica
11627 L	DirecTV Latin America	DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica
11627 R	DirecTV Latin America	DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica
11657 L	DirecTV Latin America	DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica
11657 R	DirecTV Latin America	DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica
11685 L	DirecTV Latin America	DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica
11685 R	DirecTV Latin America	DSS	20000 - 2/3	Latinoamérica

Tabla A-4 Transpondedores del satélite Galaxy 3C usados por DirecTV en Latinoamérica.

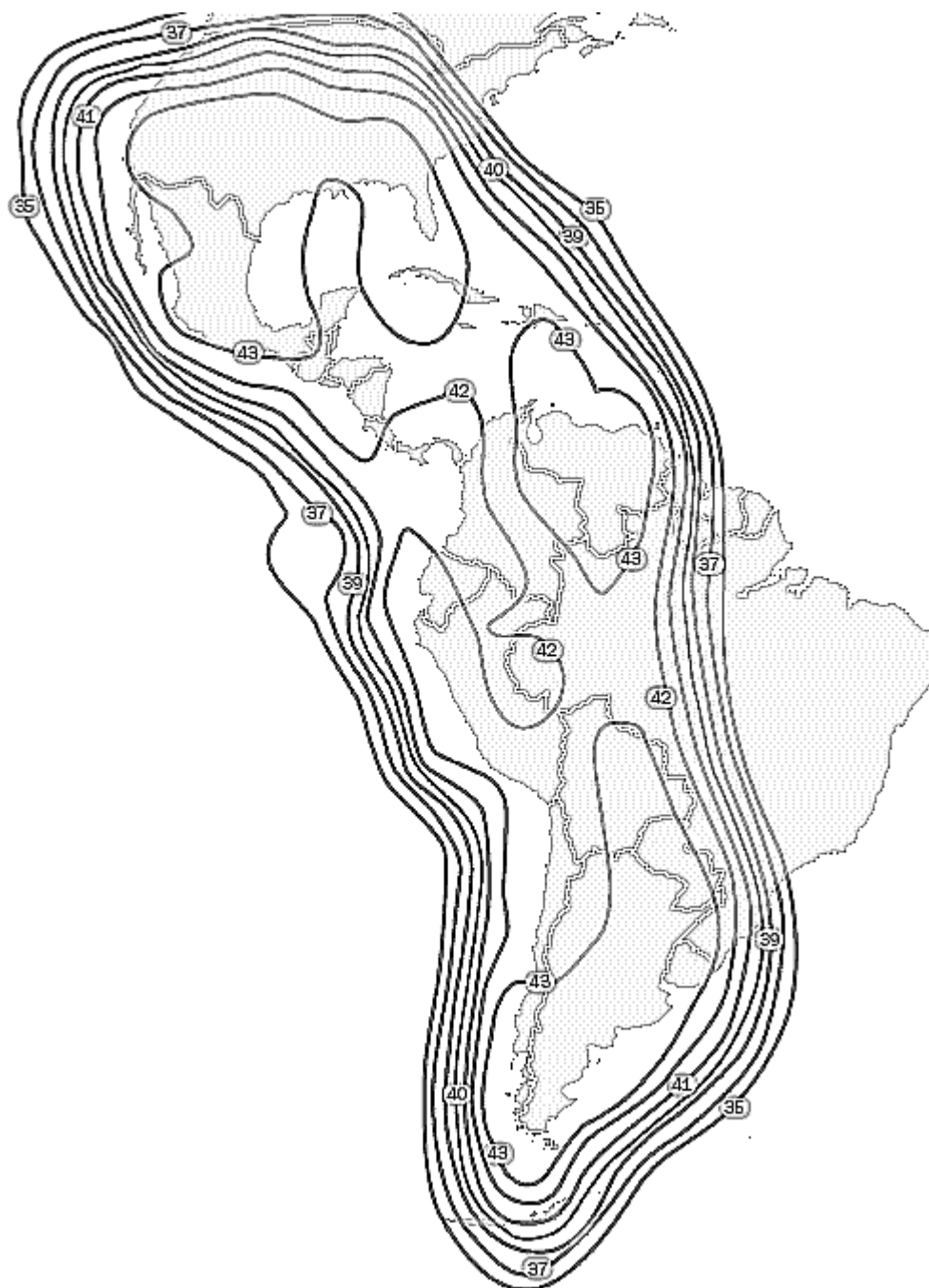


Fig. A-4 PIRE (dBW) del satélite Galaxy 3C en la Banda Ku para Latinoamérica.

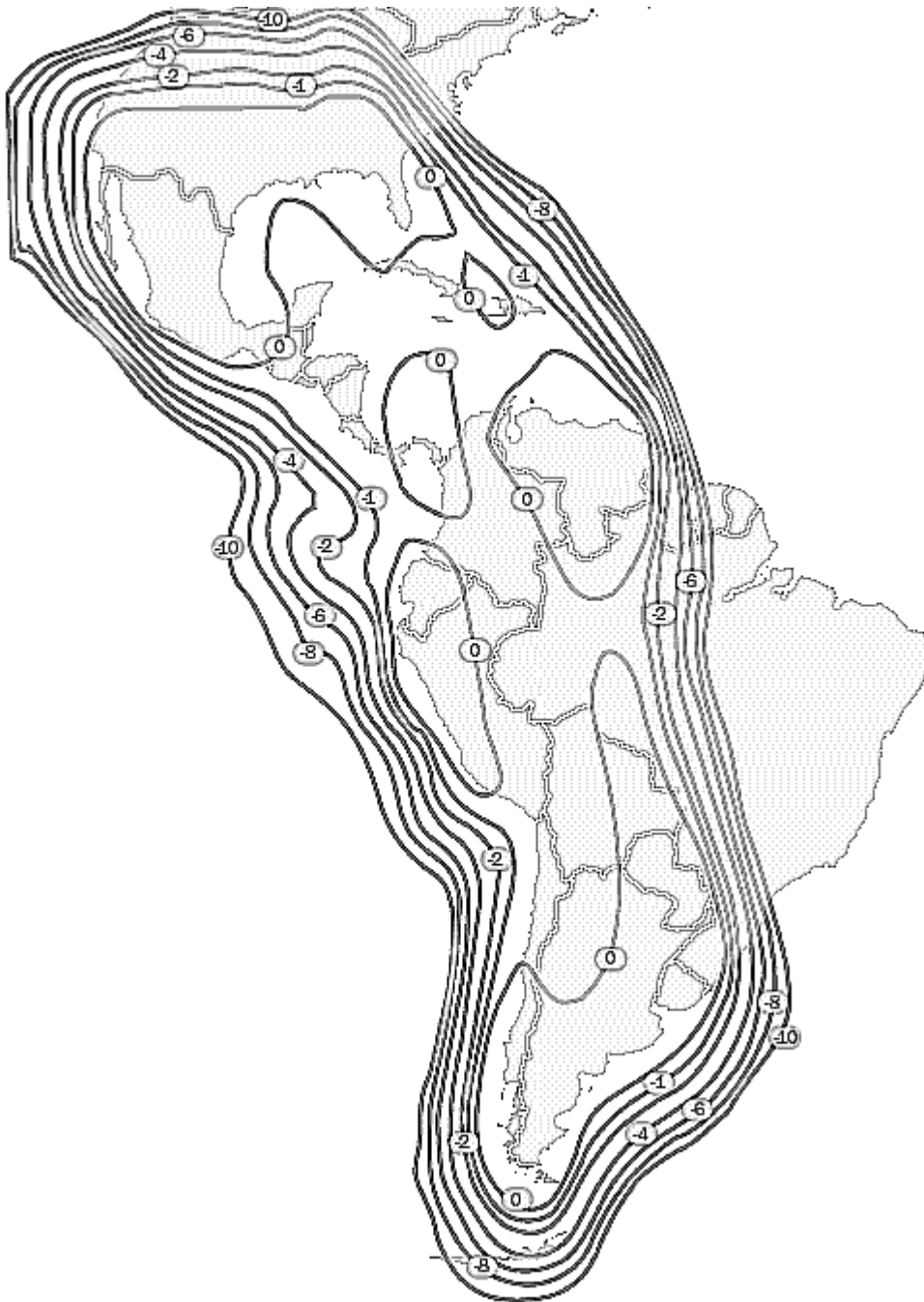


Fig. A-5 Huella G/T (dB/K) del satélite Galaxy 3C en la Banda Ku para Latinoamérica.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- Long, Mark E.; "The Digital Satellite TV Handbook", Edit. Newnes Mark Long Enterprises, Boston 1999.
- Roddy, Dennis; Satellite Communications Systems, Edit. McGraw-Hill, 7ª Ed., Estados Unidos 2001
- Neri Vela, Rodolfo; Comunicaciones Por Satélite, Edit Thomson, 1ª Ed., México 2002
- Bruce R. Elbert; The Satellite Communication Applications Handbook, 2ª Ed. Edit. Artech House, Inc. USA 2004.
- Sklar, B., Digital Communications—Fundamentals and Applications, 2ª ed., Upper Saddle River, Nueva Jersey: Prentice Hall, 2001.
- Elbert, B. R., The Satellite Communication Ground Segment and Earth Station Handbook,
Norwood, MA: Artech House, 2001.
- ITU Telecommunication Development Bureau, Digital Radio Guide, Document 1/014-E, Geneva: ITU, August 31, 1998.
- Measat-2 Satellite users Handbook, Binariang Satellite Systems, Malasia 2003
- ITU-R Recommendation S.580-5.
- EIA/TIA, "Electrical Performance for Television Relay Facilities," EIA/TIA-250-C, 1977.

PAGINAS DE INTERNET

Sachdev, D. K., "The WorldSpace System: Architecture, Plans, and Technologies,"
<http://www.sadiba.co.za/PDFfiles/worldspace.pdf>.

Cruising to Orbit – XM-2, http://www.sea-launch.com/special/sea-launch/past_xm2.html.

Televisa Networks, <http://www.visat.com/cobertura.asp?bg=n>

Direct Video Broadcasting <http://www.dvb.com>

Comunicaciones Espaciales. <http://www.upv.es/satellite/>

Producción de Televisión, http://www.cybercollege.com/span/tvp_sind.htm

Curso 3R15-CSA Comunicaciones por Satélite, <http://www.gr.ssr.upm.es/rcii/transp.htm>

Televisión digital terrenal <http://www.asenmac.com/tvdigital/marcos.htm>

Transmisión de televisión (NTSC). <http://www.geocities.com/mil2u/tesisweb.html>

Ku Satellites <http://www.kusat.com/go.php?path=/install/locate.php>

Curso de compresión MPEG,

<http://www.fuac.edu.co/autonoma/pregrado/ingenieria/ingelec/proyectosgrado/compresvideo/>

Telesistema Mexicano <http://www.telesistema.televisa.com.mx/>

Sistemas de Comunicaciones Vía Satélite de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Vigo. <http://www.com.uvigo.es/asignaturas/scvs/>

MPEG 2 <http://www.coolstf.com/mpeg/>

Online Satellite Calculations <http://www.satellite-calculations.com/>

LingSat <http://www.lyngsat.com/>

Satellite Tracking Software Index <http://www.celestrak.com/software/satellite/sat-trak.asp>

The Satellite Encyclopedia <http://www.tbs-satellite.com/tse/online/>

Satélites de México <http://www.satmex.com/flota/satmex5.php#>

DirecTV Latin América <http://www.directvla.com/newcc/spanish/>

DirecTV México <http://directstage.directvla.com/paises/mexico/que/>

Enciclopedia Wikipedia en español <http://es.wikipedia.org/wiki/DirecTV>

Panamsat <http://www.panamsat.com/news/pressview.asp?article=1022>

Edusat http://edusat.ilce.edu.mx/que_es_edusat.htm

TV Azteca <http://www.tvazteca.com.mx>

COFETEL http://www.cofetel.gob.mx/inf_telecom_apuntes.shtml

COFETEL <http://www.canitec.org/noticia.php?idNoticia=448>

