

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS
EN SISTEMAS DE
TELEVISIÓN DIGITAL POR SATÉLITE

TÉSIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTAN:

SERGIO ALEJANDRO CHÁVEZ CÁRDENAS

JUAN CARLOS GONZÁLEZ SÁNCHEZ

TUTOR:

DR. SALVADOR LANDEROS AYALA



Ciudad Universitaria, septiembre de 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

De Sergio:

A mis padres que siempre me han apoyado y creído en mí. Son el mejor ejemplo de vida que tengo.

A mis hermanos, quienes siempre me han alentado a seguir creciendo como persona y admiro mucho.

A la Universidad, cuyas aulas emanan sabiduría y a mis profesores que me han abierto las puertas del conocimiento.

A los compañeros y amigos que han fortalecido mi espíritu y con quienes he compartido innumerables experiencias.

De Juan Carlos:

Expreso mi agradecimiento a aquellas personas que estuvieron a mi lado a lo largo de toda la carrera y con quienes comparto este logro tan importante de mi vida:

A mis padres, quienes con su trabajo, actitud y amor me motivan día a día a realizar todo lo que me propongo, me dan su apoyo incondicional y siempre me hacen sentir pleno y amado.

A mi hermano, quien con su ejemplo siempre me ha impulsado a superarme y a guiarme por el respeto y las reglas.

A mi abuela, quien es para mí una segunda madre, por implantarme muchos de los valores que me hacen el hombre que soy, por cuidarme y por siempre tener un consejo para mí.

A los profesores quienes me enseñaron mucho más que solo Ingeniería, y a mis compañeros quienes vivieron conmigo todas las alegrías y preocupaciones de la carrera.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	4
Estructura	5
Objetivo	5
Descripción del problema	6
CAPÍTULO 1: TELEVISIÓN DIGITAL VIA SATÉLITE	7
1.1. Antecedentes.....	7
1.2. Panorama general	12
1.3. Sistemas de televisión digital.....	14
1.4. Códecs de audio y video	17
1.5. Multiplexaje, Modulación y Técnicas de Acceso Múltiple	25
1.6. Códigos para corrección de errores	34
CAPÍTULO 2: ESTÁNDARES DE TELEVISIÓN DIGITAL VIA SATÉLITE	38
2.1. Múltiplex MPEG	39
2.2. DVB-S.....	42
2.3. DVB-DSNG	45
2.4. DVB-S2.....	47
2.5. DVB-RCS y DVB-SH	52
2.6. ISDB-S	55
2.7. ATSC A/81	57
2.8. Otros estándares de televisión digital por satélite	58
2.9. Comparativa de estándares principales.....	61
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE SISTEMAS DE TELEVISIÓN DIGITAL VIA SATÉLITE	62
3.1. Método para el cálculo de enlace.....	64
3.2. Cálculo de las pérdidas por propagación	68
3.3. Análisis de la eficiencia de los estándares de transmisión de TV por satélite	74

CAPÍTULO 4: SISTEMAS SATELITALES PARA TELEVISIÓN DIGITAL.....	90
4.1. Redes de televisión por satélite.....	91
4.2. Hardware en el segmento terrestre	93
4.3. Hardware del segmento espacial.....	103
4.4. Satélites por tipo de servicio.....	105
CAPÍTULO 5: ACTUALIDAD Y TENDENCIAS DE LOS SISTEMAS DE TELEVISIÓN DIGITAL VÍA SATÉLITE	109
5.1. Oferta de servicios y mercado de la televisión digital por región	113
5.2. Tendencias tecnológicas de la industria satelital y distribución de contenidos multimedia	114
CONCLUSIONES.....	118
ANEXOS	122
A. Código de MATLAB auxiliar para el cálculo de enlace en banda KU FSS.....	122
B. Código de MATLAB auxiliar para el cálculo de enlace en banda KU BSS	125
C. Código de MATLAB auxiliar para el cálculo de enlace en banda Ka FSS	128
D. Código de MATLAB auxiliar para el cálculo de enlace en banda Ka con TP regenerativo	131
E. Código de MATLAB auxiliar para calcular la atenuación por lluvia en 2 latitudes definidas	134
FUENTES CONSULTADAS	135
Referencias Bibliográficas.....	135
Sitios Web.....	138

INTRODUCCIÓN.

El desarrollo del servicio de televisión por satélite a lo largo del planeta ha ido en aumento en los últimos años. La competencia entre los proveedores de televisión por cable y satelital cada vez es más pareja. De acuerdo a lo observado, en gran parte del mundo el mercado de la televisión de paga está teniendo mayor penetración en la población, llegando inclusive a superar a los proveedores de televisión por cable.

Es por ello que para nosotros Ingenieros en Telecomunicaciones es importante conocer todos los aspectos tanto técnicos como comerciales en torno a la televisión satelital.

El desarrollo tecnológico de los estándares satelitales se ha ido dando conforme a regiones del planeta, principalmente la región Europea, Americana y Oriental. Cada región desarrolló diferentes estándares según sus necesidades. Algunas de sus características similares y otras muy diferentes. Esto permitió la pluralización del negocio de la televisión satelital, dando la oportunidad a cada gobierno de elegir el estándar que más le convenga.

Otro punto importante es que el negocio de la televisión satelital no solo incluye a los proveedores de programación. El negocio de la televisión satelital va mucho más lejos tratándose del desarrollo de equipo satelital. En general, un 50 % de los negocios del sector satelital tiene que ver con los servicios de radiodifusión de video.

En México, según un informe publicado por la empresa *Signals Telecom Consulting [69]*, las estrategias desarrolladas por las operadoras de telecomunicaciones de la región permitirá aumentar la participación en los servicios de pago de TV, de las tecnologías DTH a 33% para 2013. Telefónica y Telmex se llevarán el 27% de los ingresos. Por su parte 47% de los subscriptores de TV paga, lo serán de paquetes multi-servicio.

El mayor operador en servicios de televisión por satélite en México es SKY, que se posicionó como líder en el mercado gracias a ser un innovador en tecnología y proveer de contenido exclusivo a sus clientes. Por otro lado el lanzamiento de servicios DTH por operadores de telecomunicaciones como Telmex es visto como parte de su estrategia para lograr una amplia base de subscriptores de televisión paga.

Estructura.

En el capítulo 2 se hace una pequeña reseña histórica tanto de la transición de la televisión analógica a digital como del desarrollo de la tecnología satelital. Además se realiza la descripción técnica y detallada de los diferentes estándares de codificación de audio y video, técnicas de compresión, corrección de errores y modulación utilizados en la actualidad en los sistemas de televisión digital.

El capítulo 3 describe concretamente las características de los estándares de transmisión de televisión satelital, DVB-S, DVB-S2, ISDB, DVB-DSNG, DVB-RCS, DVB-SH, ISDB-S y ATSC A/81. También se efectúa una comparación entre los mismos.

En el capítulo 4 se hace una descripción de los métodos matemáticos empleados para el diseño de un enlace satelital. Adicionalmente se realiza un análisis comparativo de eficiencia de codificación y ancho de banda, así como la evaluación del enlace de los diferentes estándares satelitales descritos en el capítulo 2.

El capítulo 5 especifican los elementos que intervienen en el proceso de transmisión de un programa de televisión satelital y los tipos de servicios que comprenden esta. Se detallan los elementos físicos de una red de televisión así como de cada bloque de la etapa de transmisión y recepción de señales.

En el capítulo 6 se plantea la situación del negocio satelital en el mundo y en México y se presentan perspectivas del sector satelital así como tendencias tecnológicas del mismo.

Objetivo.

Describir los sistemas de televisión digital por satélite más utilizados, tratando sus características técnicas principales como las mejoras del ancho de banda, y analizando ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías.

Caracterizar y realizar cálculos de enlace para señales digitales de televisión considerando sistemas de comunicaciones operando en bandas Ku y Ka.

Realizar una investigación sobre las tendencias tecnológicas de los sistemas de televisión digital por satélite tanto en el segmento espacial como en el terrestre.

Descripción del problema

De acuerdo a la situación, tecnología y necesidades actuales de la televisión digital, la transmisión vía satélite se ha ido desarrollando como una alternativa para su difusión en diferentes partes del mundo, estableciendo diferentes sistemas y estándares. Cada uno de dichos estándares se considera funcional y todos ellos cuentan con diferencias significativas por lo cual se requiere de un análisis comparativo. Además, las nuevas tendencias tecnológicas se desarrollan rápidamente, requiriendo un recuento y caracterización de las técnicas y sistemas en desarrollo.

El encarecimiento del ancho de banda y la amplia competencia en torno a la explotación del espectro radioeléctrico nos impulsa a tener conocimiento de la actualidad y las tendencias de la televisión digital por satélite. Esto nos permitirá utilizar técnicas que optimicen el ancho de banda y el consumo de potencia en los satélites.

CAPITULO 1: TELEVISIÓN DIGITAL VIA SATÉLITE

1.1. Antecedentes

Un satélite de comunicaciones es un objeto artificial girando alrededor de la Tierra que recibe señales de radio provenientes de una estación terrena transmisora, las amplifica y, en algunos casos, las procesa para después retransmitirlas de regreso a la Tierra. Las señales de comunicación no se originan o terminan en el mismo satélite, sino que éste funciona como un repetidor activo.

La información que se emite a través de los satélites es convertida a radiofrecuencias en Tierra y se transmite a través de antenas parabólicas apuntadas hacia la posición orbital del satélite. Las señales se propagan a través del espacio en forma de ondas radioeléctricas.

Los satélites de comunicación actuales tienen diversas características y capacidades para aplicaciones como lo son la transmisión de datos, voz y video. Se ofrecen diversos tipos de servicios de acuerdo a las características de los satélites. Los más representativos [48] son el servicio fijo (FSS), el de broadcast (BSS), y el servicio móvil (MSS).

De acuerdo a la UIT, el FSS es un servicio de radiocomunicaciones entre dos estaciones dentro de la superficie de la Tierra cuando se usa uno o más satélites. Cada estación cuenta con un enlace ascendente (Tierra-espacio) y otro descendente (espacio-Tierra), permitiendo comunicaciones bidireccionales.

En el servicio BSS, las señales son transmitidas o retransmitidas por satélites con la intención de ser recibidas directamente al público en general usando terminales receptoras. La comunicación en este caso es unidireccional.

El MSS es un servicio entre estaciones terrenas móviles y uno o más satélites. Esto último depende de la órbita a través de la cual los satélites giran alrededor de la Tierra.

La distribución de video es un servicio proveído por satélites de tipo FSS y BSS. Las aplicaciones incluyen la re-emisión de señales provenientes de estaciones terrestres para su distribución a través de redes cableadas (CATV) y la implementación de servicios de *broadcast* directo al público (aplicaciones DTH).

La contribución de señales de video se da a través de satélites de tipo FSS. Permite a los radiodifusores captar eventos en video desde el lugar en que ocurre y entregarlo a los estudios para edición y emisión posterior. La inmediatez del servicio depende de la disponibilidad del enlace y la infraestructura con la que se cuente para su implementación. Para este tipo de servicio existen estaciones terrenas acopladas a vehículos y estaciones transportables (figura 1.1).

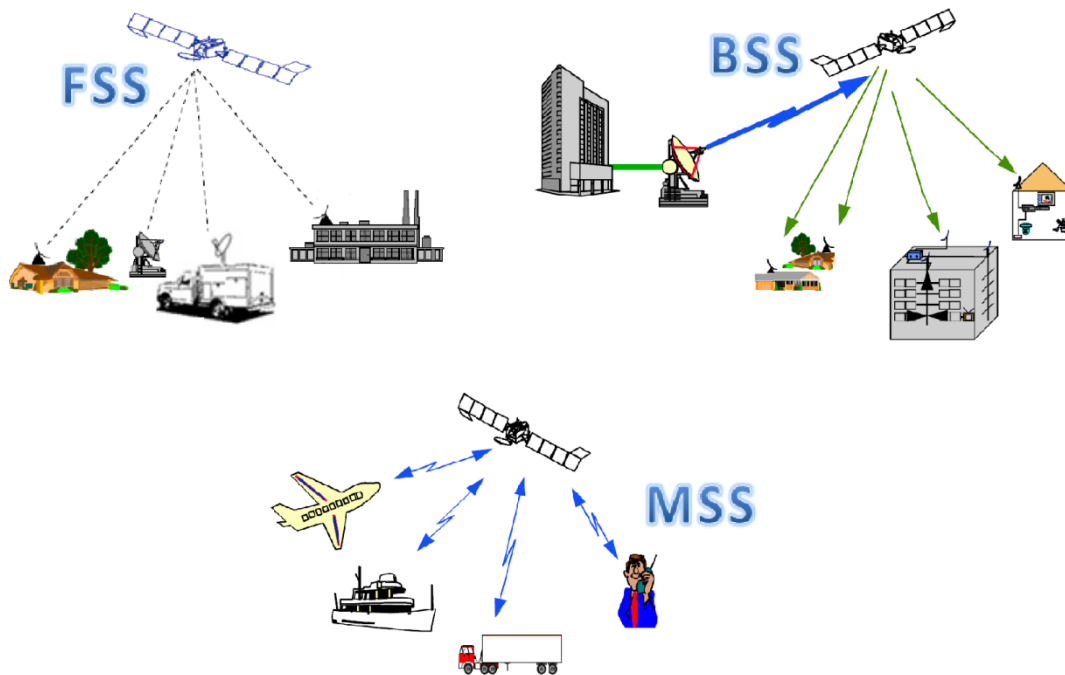


Figura 1.1. Tipos de servicio que se prestan por satélite.

La implementación exitosa de un sistema de comunicaciones vía satélite requiere de enlaces aéreos robustos que sean “visibles” tanto de manera ascendente (T-e) como en el enlace descendente (e-T). La transmisión a través de la atmósfera degrada las características de la señal no obstante, para determinadas condiciones, los enlaces son posibles tomando en cuenta las frecuencias de transmisión y otros parámetros de las ondas radioeléctricas.

Existe la posibilidad de colocar los satélites artificiales en una órbita tal que al observarlos desde un punto sobre la superficie de la Tierra pareciera que no se moviesen. Esto es, el periodo de traslación del satélite alrededor de la Tierra es igual al periodo de rotación de la Tierra sobre su propio eje. A esta órbita se le denomina órbita geoestacionaria (GEO) o cinturón de Clarke en honor a Arthur C. Clarke que realizó estudios sobre esta posibilidad en 1945. Las características de esta órbita, ubicada a 35 796 km de la Tierra traen consigo muchas ventajas como son la simplificación de los sistemas de comunicación en Tierra y la posibilidad de ofrecer servicios de manera continua sobre determinadas regiones.

Existen otras órbitas como la LEO, MEO y HEO que se destinan a servicios de comunicación particulares basados principalmente en la transmisión de paquetes. Los sistemas de TV por satélite actuales operan en la órbita geoestacionaria (figura 1.2).

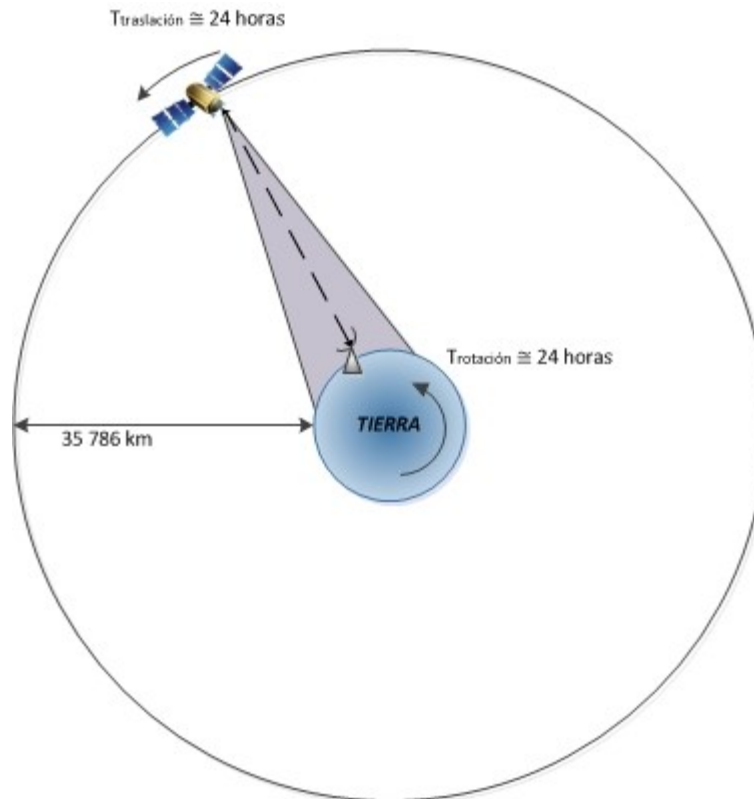


Figura 1.2. Órbita geoestacionaria o GEO

1.1.1. Reseña histórica de la televisión

La palabra televisión proviene de dos raíces [54], la primera del griego “*tele*” que significa “*lejos*” y la segunda del latín “*visio*” que significa “*visión*”, y generalmente se abrevia como TV. Esta palabra comenzó a utilizarse en el año 1900 en el Primer Congreso Internacional de Electricidad realizado en París, Francia.

A principio del siglo XIX surgieron los conceptos y principios de las imágenes en movimiento, lo cual nos llevó a las investigaciones y descubrimientos sobre sistemas de televisión en el siglo XX gracias al auge de la electricidad.

La televisión a lo largo de la historia ha sufrido cambios como toda tecnología debido a sus altos índices de penetración en la sociedad. Algunos de los cambios han sido más notables que otros, como lo fue el cambio de TV monocromática a TV de color.

Las primeras generaciones de televisión estaban basadas en sistemas electromecánicos y solamente transmitían imágenes en blanco y negro [52]. En Inglaterra, el año de 1926 John Logie Barid, fue quien desarrollo el primer conjunto de cámaras y televisión, el cual proporcionaba una imagen pequeña cuya resolución era 30 líneas (esta resolución es muy poca en comparación con los sistemas que surgieron después de más de 500 líneas).

Los avances continuaron con la llegada de los sistemas de TV electrónicos y el invento del iconoscopio¹. Estos avances trajeron consigo la necesidad de estandarizar los diferentes parámetros en la emisión de la señal.

En Norteamérica y algunos países de América del Sur, el sistema que se decidió usar fue el de 525 líneas, a una velocidad de 30 cuadros por segundo. Esto fue debido a la frecuencia de 60 Hz de la señal de AC que alimenta las líneas de distribución eléctrica. En Europa se tuvieron que adoptar sistemas con una velocidad un poco menor a 25 cuadros por segundo (24.97), ya que la señal de AC en esa zona es de 50 Hz. En cuanto al número de líneas, al principio existieron discrepancias, pero al final se adoptaron 625 líneas como estándar regional.

En la década de los 50s y los 60s fue cuando se desarrollaron los sistemas de TV a color comerciales. Anteriormente se habían intentado desarrollar sistemas a color pero ninguno se había completado lo suficiente para ser presentado al público. El aspecto más necesario para la implementación masiva de un estándar era lograr compatibilidad con los sistemas monocromáticos. Fue hasta el año 1953 que en Estados Unidos la FCC (*Federal Communications Commission*) aprobó el estándar NTSC (*National Television System Committee*) de televisión a color, usado en gran parte del mundo.

En Europa surgieron otros estándares. En Alemania a mediados de la década de los 60s surgió el estándar PAL (*Phase Alternating Line*), el cual contemplaba algunas mejoras a las carencias del sistema NTSC. Por otro lado, en Francia se desarrolló un sistema llamado SECAM (*Sequential Couleur avec Memoire*). Este sistema, a diferencia de los otros cambiaba la modulación en fase por una modulación en frecuencia, mitigando algunos problemas.

Con el auge de la televisión ligado al avance de las comunicaciones digitales, se empezaron a plantear alternativas que combatieran los problemas clásicos de la televisión analógica. Ejemplo de esto fue la optimización del espectro radioeléctrico, la calidad del video y del audio, el costo de los equipos, entre otros.

1.1.2. Reseña histórica de los satélites

La industria comercial de satélites de comunicación tuvo sus principios en el siglo XX a mediados de la década de los 60s y en un poco más de 50 años ha progresado de ser una tecnología alternativa y desconocida a una tecnología primaria y dominante con una infraestructura global que mejora las comunicaciones de hoy.

El primer satélite artificial puesto en órbita fue el ruso *Sputnik 1*. Este aparato fue capaz de transmitir datos por radio sobre algunos elementos de la ionosfera. En contraparte, Estados Unidos entró a la era espacial un año después con un satélite artificial con capacidad para retransmitir señales de radio. Al proyecto encabezado por la fuerza aérea se le denominó SCORE (*Signal*

¹ Iconoscopio: Tubo eléctrico en donde los electrones son acelerados a través de un ánodo hecho de un material sensible a la luz. La conductividad en el ánodo aumenta al igual que la corriente mientras el material es iluminado.

Communicating by Orbiting Relay Equipment). Este artefacto retransmitía una señal, pero no contaba con elementos activos que la amplificaran. Se siguieron desarrollando satélites de comunicaciones pasivos para el ejército como el *Echo 1* (1960), *Echo 2* (1964) y *Westford* (1960).

No fue sino hasta el año de 1962 cuando se lanzó el primer satélite con elementos de amplificación activos denominado *Telstar 1*, el cual fue también el primero en retransmitir una señal de televisión mediante técnicas analógicas en la banda C (4-6 GHz). En 1963, El *Syncom II* fue el primer satélite geosíncrono que transmitió exitosamente una señal de televisión. Un año más tarde (1964) INTELSAT y COMSAT lanzaron el *Earlybird* o *Intelsat I* que fue el primer satélite comercial operando en órbita síncrona. Con estos avances, la comercialización de los servicios de telecomunicaciones a través de satélite se hizo una realidad.

A finales de la década de los 60, la NASA llevó a cabo experimentos que proporcionaron valiosos datos sobre la propagación de las ondas radioeléctricas desde las frecuencias comprendidas en la banda VHF (30MHz-300MHz) hasta los 40GHz² (EHF). Los satélites *ATS-1*, *ATS-3*, *ATS-5* y *ATS-6* fueron los encargados de proporcionar dicha información que permitió mejorar la caracterización de los enlaces satelitales.

El primer satélite que se encargó de evaluar la aplicación de la banda Ku para emisiones punto-multipunto (*broadcast*) fue diseñado en conjunto por Canadá y EU. El satélite fue nombrado *CTS* (*Communicatons Technology Satellite*) y fue lanzado en 1976. [19]

En la década de los 80s se vio un incremento notable en los satélites y en los operadores. La órbita GEO fue ocupada con mayor afluencia y fue necesario que la UIT se encargara de establecer límites de separación entre las posiciones orbitales de los satélites a fin de disminuir la posibilidad de interferencias. El auge en los servicios satelitales también contribuyó al crecimiento de otros campos de las telecomunicaciones. Por ejemplo, los costos de la larga distancia se redujeron y las compañías que ofrecen servicios de televisión por cable aumentaron su oferta de canales nacionales e internacionales para sus suscriptores. En esta misma década, la banda Ku comenzó a ser utilizada con fines comerciales.

El primer sistema de difusión de televisión vía satélite se implementó en la década de los 70s en Japón y se volvió muy popular para el año de 1985 con todo y que solamente se ofrecían 2 canales de TV analógica por parte de la cadena *NHK*.

En Europa y Asia, el consorcio *ASTRA* hizo lo propio en la década de los 80s, pero no fue sino hasta la introducción del servicio *DIRECTV* en 1994 para América, que los sistemas DBS se volvieron populares. *DIRECTV* fue el primer proveedor de servicios de televisión vía satélite que empleó señales digitales basadas en los estándares MPEG teniendo la capacidad de originar más de 200 señales simultáneas [48,54].

² Existen de acuerdo a la IEEE diversas bandas de frecuencia desde los 12GHz hasta los 40GHz útiles para las comunicaciones vía satélite: La banda Ku (12-18GHz), que es una de las más explotadas actualmente; la banda K (18 a 26.5 GHz), que no se usa debido al pico de absorción de las moléculas de H₂O en la atmósfera, y la banda Ka (26.5 a 40GHz).que se encuentra en creciente desarrollo, marcando las nuevas tendencias de los servicios por satélite.

1.2. Panorama general.

Hoy en día, la Televisión es probablemente el medio de información, educación y entretenimiento más rentable alrededor del mundo. La transición de TV analógica a TV digital (DTV) representa un ingreso de miles de millones de dólares para empresas de radiodifusión, equipo electrónico, computadoras y de semiconductores. Se estima que para el año 2025 se hayan sustituido más de 1 400 millones de televisiones analógicas [52].

La era digital busca entre otras ventajas:

- Menor costo de transmisión: Permite reducir significativamente el ancho de banda ocupado por una emisión.
- Menor potencia de recepción: Las transmisiones digitales utilizan valores de potencia menores a sus equivalentes analógicos. Esto permite reducir el tamaño de las antenas utilizadas.
- Mayor flexibilidad: El uso de un único formato digital permite la convergencia de diferentes servicios (video, audio, datos, multimedia) a través de un mismo medio de transmisión.
- Mayor calidad en la recepción: Las transmisiones digitales mantienen una mayor resolución y son más estables.

En la actualidad existen varios sistemas de DTV los cuales se pueden clasificar respecto al medio de transmisión en terrestre, por cable y satelital.

1.2.1. Ventajas y desventajas de las comunicaciones vía satélite

Las comunicaciones por satélite ofrecen algunas características que no se pueden encontrar en otros sistemas de transmisión como lo son los sistemas de microondas terrestres, cableados o redes de fibra óptica [48]. Algunas ventajas de los sistemas de comunicación satelitales son:

- Costos independientes de la distancia. El costo de transmitir una señal desde cualquier parte del mundo a otra es básicamente el mismo sin importar la distancia entre las estaciones de transmisión y recepción. El costo del segmento satelital se define en base a 2 parámetros principales: ancho de banda requerido por la señal, y potencia requerida por el amplificador del satélite para que la señal sea recibida con niveles adecuados de potencia y calidad (definida por parámetros como E_b/N_0 , E_s/N_0 , BER, etc.) en las estaciones receptoras.
- Costos fijos de emisión o *broadcast*. El costo de un sistema de comunicaciones mediante una topología de *broadcast* es independiente del número de estaciones terrenas receptoras recibiendo la señal transmitida.
- Alta capacidad: Los enlaces de comunicación a través de satélite involucran señales portadoras de información a altas frecuencias y con anchos de banda de amplios (2 a 36

MHz para señales de TV digital) que son capaces transmitir grandes cantidades de información.

- Bajas tasas de error. Los errores binarios en un enlace satelital digital tienden a ser aleatorios, permitiendo usar técnicas de detección estadísticas y corrección de errores. Las tasas de error o *BER (Bit Error Rate)* varían de un error entre 10^6 bits o superiores, dependiendo de la fiabilidad requerida por los datos.
- Redes de usos diversos. Grandes áreas de la Tierra pueden ser visibles desde un satélite de comunicaciones típico, permitiendo compartir un enlace con diversos usuarios. Los satélites son particularmente útiles en áreas de acceso remoto o comunidades que de otra manera, no serían accesibles por medios terrestres. Las terminales satelitales pueden estar sobre la superficie terrestre, en el mar o en el aire y pueden ser del tipo fijo o móvil.

En contraparte, las desventajas de las comunicaciones a través de satélite son:

- Congestión del espectro radioeléctrico. El espectro radioeléctrico es un recurso finito. Las bandas de frecuencias asignadas a los servicios de comunicaciones por satélite están claramente delimitadas por los entes regulatorios y por tanto, existe un límite a la cantidad de señales que pueden difundirse a través de satélite.
- Potencia limitada en los amplificadores del satélite: Depende de la cantidad de potencia que el satélite sea capaz de convertir para la amplificación de señales y del *back-off* usado para reducir los efectos no lineales de los amplificadores a bordo.
- Congestión de la órbita geoestacionaria. Por características de las antenas en Tierra (diagrama de radiación). No es posible ubicar satélites muy próximos entre sí cuando estos trabajan en la misma banda de frecuencias.
- Dependencia del clima. La propagación de las ondas radioeléctricas en las bandas Ku y Ka depende de la lluvia, pues esta puede atenuar la señal a valores críticos que conduzcan a la pérdida temporal de la comunicación entre estaciones terrenas.
- Interferencias. Se pueden dar por errores humanos, fallas de equipos o intencionales que degraden y en el peor de los casos interrumpen la comunicación.
- Emisiones y accesos no autorizados a los datos. Si no existe un adecuado sistema de administración y monitoreo de las señales que transporta el satélite, puede darse el caso de emisiones no autorizadas al satélite. Por otro lado, sin una adecuada seguridad y formato de los datos transportados, puede llegar a darse el caso de robo o acceso no autorizado a la información.

1.3. Sistemas de televisión digital

Un sistema de televisión digital se puede definir por tres características principales [54]:

- Relación de aspecto. Se refiere a la relación entre el ancho y la altura de una imagen. Es expresada por dos números separados por dos puntos en donde el primer número se refiere a X unidades en el eje horizontal y el segundo a Y unidades en el eje vertical (por ejemplo 16:9 ó 4:3)
- Resolución. Se refiere al número de líneas que conforman a la imagen. Es expresada generalmente por el número de líneas verticales seguidas de la letra i o de la letra p dependiendo del método de escaneado. Del mismo modo, se puede expresar de la forma $A \times B$, siendo A el número de líneas verticales y B el número de líneas horizontales.
- Tipo de escaneado. Este término se refiere a la forma de barrido o la manera en la que se escanean las líneas que conforman una imagen, puede ser de dos tipos.
 - Progresivo. Se realiza un barrido sucesivo, es decir una línea tras otra desde la primera hasta la última, es abreviado con la letra p .
 - Entrelazado. Se realizan dos barridos, primero se barren las líneas impares formando una imagen y después las líneas pares para después conjuntar ambos escaneados y formar la imagen, por la traducción al inglés es abreviado i (*interlaced*).

1.3.1. Televisión De Definición Estándar.

Por sus siglas en inglés, este formato de televisión es conocido como SDTV (*Standard Digital Television*). Los sistemas de televisión analógicos, PAL, NTSC y SECAM son considerados de definición estándar, pero SDTV incluye de igual forma a la televisión digital. La calidad de la imagen digital es subjetivamente mejor que la recibida por estaciones de televisión analógica, puesto que la imagen digital no presenta problemas como el cruce de colores y estática que ocurre en la recepción doméstica de señales análogas.

Existen diferentes sistemas que se consideran SDTV, uno de ellos es con una resolución de 480 líneas con 640 pixeles por línea, y una frecuencia de 60 imágenes por segundo en modo entrelazado, 480i. Otro formato de televisión que entra dentro de la clasificación de SDTV es 576i.

Hoy en día, la mayoría de las transmisiones son hechas en el formato 4:3 sin embargo, la tendencia es migrar al formato 16:9.

1.3.2. Televisión De Definición Mejorada

Este formato surgió como mejora para los formatos SDTV. La principal diferencia entre EDTV (*Enhanced Definition Television*) y SDTV es que en EDTV se deja de utilizar el escaneado entrelazado, teniendo así dos diferentes formatos 480p y 576p.

Con la llegada de televisiones de mayor tamaño y la televisión digital, quedaron evidenciadas las deficiencias de la televisión analógica. Con un escaneado entrelazado se presentaban problemas con la imagen en forma de *aliasing* temporal (pestañeo de la imagen) y la sensación de estar contemplando una imagen borrosa e inestable debido a la poca resolución de la señal.

1.3.3 Televisión De Alta Definición.

Este formato es también conocido como HDTV (*High Definition Television*). La televisión de alta definición es un sistema de televisión digital que representa las imágenes con mayor calidad que el sistema tradicional. HDTV permite la transmisión de mejores y más detalladas imágenes, un mayor ancho de la pantalla (con una relación de aspecto de 16:9) y sonido estéreo o multicanal con hasta 6 canales de audio. Esto hace posible usar varios idiomas, entre otros servicios.

Las relaciones de aspecto con que ahora cuenta la televisión son 4:3 y 16:9 (figura 1.3). Las relaciones de aspecto usuales para la presentación de películas en cines son 1.85:1 y 2.39:1. La comparación más apropiada entre la televisión convencional y HDTV no es basada en la relación de aspecto, sino en los detalles de las imágenes.

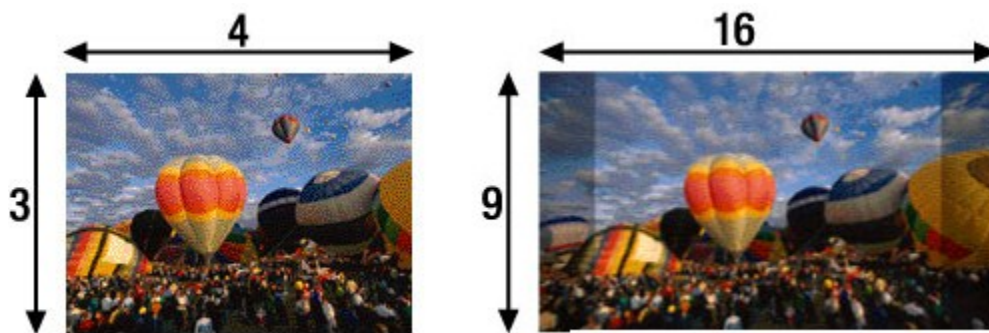


Figura 1.3. Comparación entre relaciones de aspecto 4:3 y 16:9

Hoy por hoy, los sistemas más populares de HDTV son:

- 720p o 1280x720 con escaneado progresivo, soportando ambas relaciones de aspecto 4:3 y 16:9.
- 1080i o 1920x1080 con escaneado entrelazado, con relación de aspecto de 16:9

A pesar del hecho de que hay una significativa diferencia entre el número de líneas horizontales escaneadas, las imágenes obtenidas en los sistemas 720p y 1080i son muy similares.

1.3.4. WQHD, QFHD y ULTRA HD.

La siguiente generación de formatos de televisión que está actualmente en desarrollo consiste en tres diferentes formatos:

- WQHD (*Wide Quand High Definition*) con una resolución de 2560x1440, con un escaneado progresivo y una relación de aspecto de 16:9
- QFHD (*Quand Full High Definition*) cuya resolución es de 3840x 2160 con escaneado progresivo y relación de aspecto de 16:9
- ULTRA HD, este formato sigue en desarrollo, pero tiene como objetivo alcanzar resoluciones de 7 680 × 4 320, lo que corresponde a una definición 16 veces mayor que la de HD.

1.3.5. Estructura de un sistema de Televisión Digital

Para la implementación de un sistema de televisión digital se llevan a cabo una serie de procesos sobre las señales de audio y video de origen que va a ser descrito a continuación.

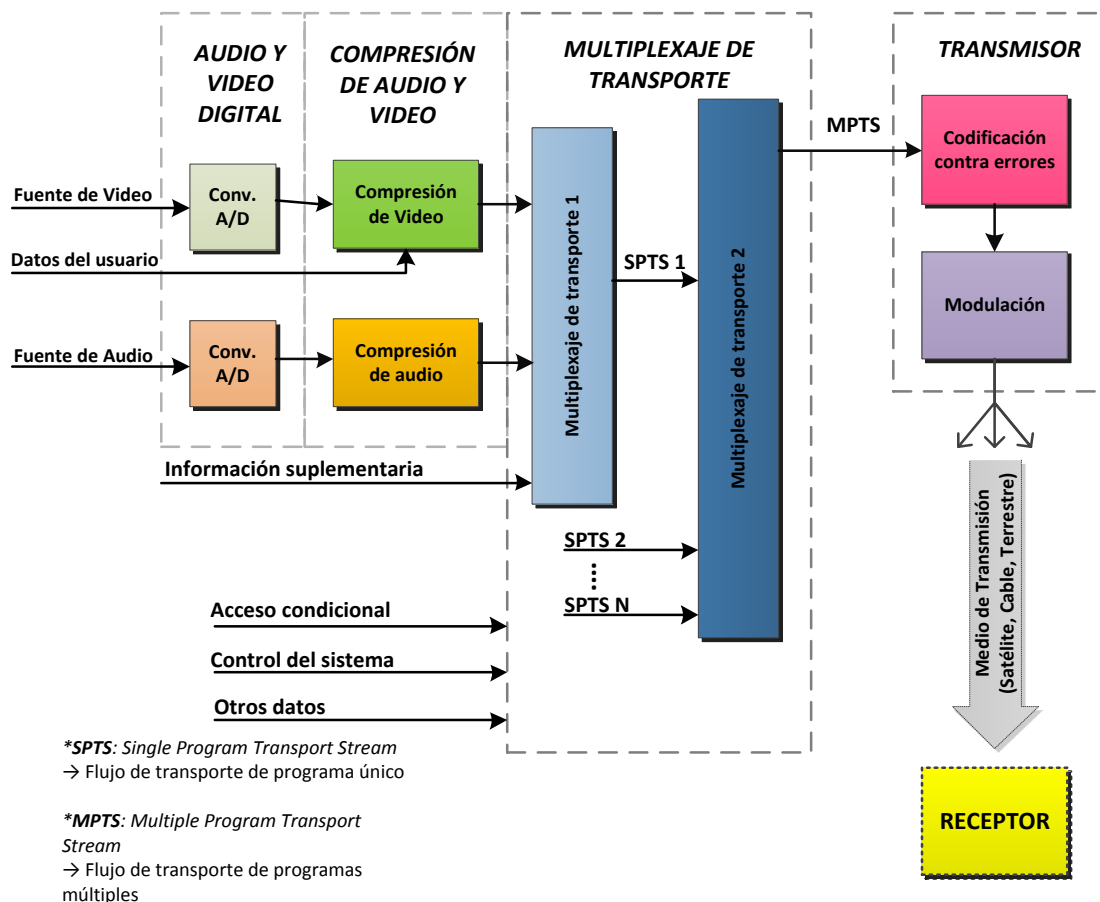


Figura 1.4. Esquema representativo de un sistema DTV.

La primera parte del proceso consiste en la obtención de las fuentes generadoras de audio y video que son digitalizadas para poder ser manipuladas. Luego, las señales digitalizadas pasan por una etapa de compresión que disminuye la cantidad de información para posteriormente pasar por una etapa denominada multiplexaje.

En el multiplexaje se obtiene una única señal con la información mezclada y codificada (flujo de transporte o *multiplex*). Puede llevarse a cabo en múltiples etapas y está limitado por la capacidad del sistema. En caso de requerirse un sistema que contenga múltiples canales de TV se crea un flujo de transporte con toda esta información combinada a través de otra etapa de multiplexaje.

Una vez multiplexado, el *multiplex* pasa por una nueva etapa de codificación. Esta codificación protege la señal contra alteraciones o errores debido a las características del canal real de comunicaciones.

El último paso requerido para la transmisión de la señal digital consiste en la transformación y adaptación de la señal al medio en que será difundida (modulación). Finalizada esta etapa, la señal es emitida para alcanzar su destino en el receptor, el cual lleva a cabo los procesos inversos a cada una de las etapas descritas anteriormente.

1.4 Códecs de audio y video

En radiodifusión de audio y televisión digitales, la compresión es usada principalmente para reducir la cantidad de información de manera que se ajuste al canal de comunicaciones real, limitado en ancho de banda.

La compresión, reducción de la tasa de transmisión o reducción de datos son términos que significan lo mismo en este contexto. Consiste esencialmente, en transportar la mayor cantidad de información utilizando menor cantidad o velocidad de datos. El proceso puede implicar pérdidas irrecuperables, sin embargo muchas señales digitales contienen información redundante o no necesaria que permite reconstruirlas sin una degradación aparente. Muchos de los procesos de compresión para imágenes, video y audio toman en cuenta las limitaciones de los sentidos y percepción humanos.

En toda tecnología de compresión de audio y video, existen dos partes que se complementan entre sí: el codificador y decodificador, juntos llamados “códec”. El codificador recibe una señal digital de video o audio sin procesar y la reproduce comprimida. Esto con el objetivo de transmitir a una tasa o *bitrate* menor. Por otro lado, el decodificador recibe la señal y trata de reconstruirla a semejanza de la señal original.

Hay varias razones que justifican la utilización de las técnicas de compresión:

- La compresión mejora la eficiencia de los dispositivos de almacenamiento.
- Una de las principales razones es la reducción en el ancho de banda, lo cual se traduce inmediatamente a reducción de costos. Gracias a este ahorro de ancho de banda es que algunas tecnologías actuales son posibles (tal es el caso de la televisión digital).
- En un mismo ancho de banda reservado para la transmisión de una señal sin compresión, la compresión puede ayudar a aumentar la cantidad de información o transmitir múltiples señales en el mismo espacio.

El espectro electromagnético es un recurso limitado y la demanda ejercida por otros servicios nos obliga a utilizar el ancho de banda de manera eficiente. En los sistemas de DTV, la codificación del audio y video reduce el ancho de banda y la potencia requerida en un factor cercano a 80% del requerimiento sin codificar.

Por definición, la compresión elimina la redundancia de las señales. Con todo, la redundancia es esencial para que los datos sean resistentes a los errores. En términos generales, los datos comprimidos son más sensibles a errores que los datos sin comprimir. Por lo anterior, la distorsión de las señales digitales aumenta conforme aumenta la tasa de compresión. En algunos casos, la distorsión es imperceptible para el ser humano, ventaja que se ocupa en el diseño de nuevos códecs de audio y video.

Así pues, los sistemas de transmisión que utilizan datos comprimidos tienen que valerse de potentes estrategias de corrección de errores y evitar técnicas de compresión que sean notoriamente sensibles.

1.4.1. Códecs de video

Las señales de video fueron desarrolladas principalmente para los sistemas de televisión pero en la actualidad esta tecnología abarca muchos sectores. Conceptualmente, el video se puede definir como una imagen en movimiento.

Para su codificación se aprovechan ciertas características como la redundancia espacial, o en otras palabras la correlación que existe entre puntos vecinos de una imagen, las características del ojo humano en cuanto a la poca sensibilidad para determinados detalles y por último la alta redundancia de tiempo que existe entre imágenes sucesivas. Las dos primeras características fueron usadas del mismo modo para el estándar JPEG de la ISO/IEC, el cual está enfocado en la compresión de imágenes sin movimiento [3].

A partir del siglo XX la necesidad de almacenar y reproducir imágenes en movimiento asociadas a audio digital llevó a la ISO/IEC a formar MPEG (*Moving Pictures Expert Group*). Este grupo está formado por diferentes comités de investigación y empresas. MPEG publicó su primer estándar MPEG-1 definido en ISO/IEC 11172-2 en 1993 [50].

MPEG-1 tuvo principal como principal objetivo almacenar video y audio estéreo en los CD-ROM alcanzando una tasa de transmisión de hasta 1.5Mbps. Solamente 1.15 Mbps son usados para video, el resto 350 Kbps fue reservado para audio e información adicional.

Una característica importante de la especificación MPEG-1 es la flexibilidad referida a las combinaciones posibles entre la complejidad de codificación, la calidad y la tasa de compresión.

El principio que ocupa la codificación de video en MPEG-1 es el mismo que JPEG con pérdidas, pero MPEG-1 cuenta con nuevas herramientas enfocadas en el uso de la correlación entre imágenes sucesivas para disminuir la cantidad de información a transmitir. Estas técnicas son conocidas como predicción con compensación de movimiento. En pocas palabras lo que hacen es predecir o deducir la mayor cantidad de imágenes basados en la diferencia entre imágenes siguientes o anteriores. Esto se logra gracias a un estimador de movimiento, el cual representa la función principal y más compleja de la codificación de MPEG.

La calidad de las imágenes de MPEG-1 no fue suficiente para que se utilizara en aplicaciones de radiodifusión. Otra importante desventaja del estándar MPEG-1 es que no soportó la evolución de la televisión hacia HDTV ya que no incluye la codificación para imágenes entrelazadas.

Por lo anterior, el grupo MPEG continuó trabajando en busca de establecer un estándar flexible y óptimo para la radiodifusión. Este estándar fue publicado como una extensión del anterior. Fue denominado como MPEG-2 o ISO/IEC 13818-2 y adoptado por el sistema de radiodifusión de TV europeo DVB.

MPEG-2 es definido por mucha gente como una caja de herramientas de compresión. Utiliza todas las herramientas de MPEG-1 y agrega algunas nuevas. Con esto se permite la compatibilidad entre MPEG-2 y MPEG-1, es decir un decodificador de MPEG-2 puede decodificar cualquier información de MPEG-1.

El estándar MPEG-2 en su parte de video (parte 2) está dividido en cuatro niveles y cinco perfiles (figura 1.5). Los primeros hacen referencia a la resolución de la imagen yendo desde SIF (*Source Intermediate Format*) hasta HDTV y los segundos determinan el set de herramientas de compresión, teniendo en cuenta la tasa de compresión y el costo del decodificador deseados.

Existen varias combinaciones de niveles y perfiles que no son usadas. La más importante debido a que es la combinación usada para las aplicaciones de radiodifusión en Europa es la MP@ML (*Main Profile at Main Level*), perfil principal con nivel principal [1].

Esta combinación corresponde a una codificación para imágenes entrelazadas con un formato de 4:2:0 y una resolución de 720x480 a 30Hz y 720x576 a 25Hz con codificación de imágenes I, P y B. Dependiendo del compromiso existente entre tasa de transmisión, la calidad de la imagen y el origen de las imágenes, la tasa de transmisión alcanzada es de 4Mbps con una calidad similar a PAL o SECAM y 9Mbps para una calidad de estudio.

		Profiles					
		Simple	Main	4:2:2	SNR	Spatial	High
Levels	High		4:2:0 1920 × 1152 90 Mb/S				4:2:0 or 4:2:2 1920 × 1152 100 Mb/S
	High 1440		4:2:0 1440 × 1152 60 Mb/S			4:2:0 1440 × 1152 60 Mb/S	4:2:0 or 4:2:2 1440 × 1152 80 Mb/S
	Main	4:2:0 720 × 576 15 Mb/S NO B	4:2:0 720 × 576 15 Mb/S	4:2:2 720 × 608 50 Mb/S	4:2:0 720 × 576 15 Mb/S		4:2:0 or 4:2:2 720 × 576 20 Mb/S
	Low		4:2:0 352 × 288 4 Mb/S		4:2:0 352 × 288 4 Mb/S		

Figura 1.5. Perfiles y niveles de codificación de video en MPEG-2.

Haciendo a un lado las nuevas funciones o herramientas agregadas a MPEG-2 la principal diferencia entre un estándar y otro es que MPEG-2 permite el procesamiento de imágenes entrelazadas y codifica audio con mayor eficiencia.

El avance en las técnicas de codificación siguió su marcha rápida y en 1998 se introdujo el estándar MPEG-4. En su parte de video, la unión entre un grupo de trabajo de la UIT y otro de MPEG dieron como resultado el surgimiento del códec AVC (*Advanced Video Coding*), H.264 o MPEG-4 Parte 10. La parte de video del estándar MPEG-4, registrada con el número ISO-IEC14496-10, provee un aumento considerable en la eficiencia de compresión respecto a MPEG-2 parte 2, obteniendo eficiencias de al menos el 50% comparado el primero con el último. Esta eficiencia es obtenida gracias a métodos de predicción más sofisticados como el uso de una transformada diferente en lugar de la conocida DCT, y el uso de técnicas de codificación de adaptiva.

El concepto de eficiencia se volvió de vital importancia para la codificación de video después de la inclusión definitiva del HDTV, para el cual MPEG-2 requiere una tasa de transmisión de hasta 100 Mbps por canal de televisión.

Esta fue la principal razón por la que en el Septiembre del 2004 el consorcio DVB aceptó la implementación de MPEG-4 parte 10 como alternativa a MPEG-2 parte 2 para la televisión por satélite cable y terrestre, así como para otras aplicaciones de banda ancha.

El estándar H.264/AVC consiste de dos capas: la capa de codificación de video VCL (*Video Coding Layer*) y la capa de abstracción de red NAL (*Network Abstraction Layer*). La primera capa está encargada de presentar el contenido de video de la manera más compacta posible y la segunda se enfoca a definir el formato destino del contenido. H.264 soporta codificación tanto de imágenes entrelazadas como progresivas [51].

De la misma manera que MPEG-2 parte 2, H-264 está dividido en diferentes niveles y perfiles de mayor complejidad y número. Los niveles utilizados para HDTV son el 4, 4.1 y 4.2. Los dos primeros con resoluciones de 720/1080i a 60 y 50 Hz con una tasa de bits de 20 y 50 Mbps respectivamente. El último con una resolución de 1920/1080p a 60 Hz y una tasa de bits de 50 Mbps.

La tabla de la figura 1.6 resume las características más importantes de los códecs de video descritos.

Estándar de video	Características	Resoluciones	Tasa de bits (Mbps)	Aplicaciones
MPEG-1 Parte 2	Solo soporta video progresivo. Utiliza predicción de compensación de movimiento.	CIF 352/288	1.5	CD-ROM Televisión satelital y por cable (antes de MPEG-2).
MPEG-2 Parte 2	Soporta un tipo video ya sea progresivo o de entrelazado. Formado por niveles y perfiles el más usado es MP@ML.	720/480 a 30Hz 720/576 a 25Hz	4 a 9	Estándar DVB Estándar ATSC/53
MPEG-4 Parte 10	Soporta ambos tipos de video, entrelazado y progresivo. Posee una eficiencia de más del 50% respecto a MPEG-2.	720/1080i a 60 y 50 Hz 1920/1080p a 60 Hz	Hasta 50	Estándar DVB-S2 Estándar ATSC/72 Estándar ISDB Streaming de Internet Blu-Ray

Figura 1.6. Tabla comparativa de estándares de codificación de video MPEG.

1.4.2. Códecs de Audio

Al igual que el video, la compresión de audio se volvió una necesidad. Haciendo uso de las particularidades del oído humano se fueron desarrollando métodos para la reducción de tasas de bits eliminando aquellos sonidos imperceptibles. Este método es conocido como codificación perceptiva o psicoacústica. Esta codificación se hace basada en un modelo de percepción del sonido por el oído humano conocido como modelo psicoacústico (figura 1.7).

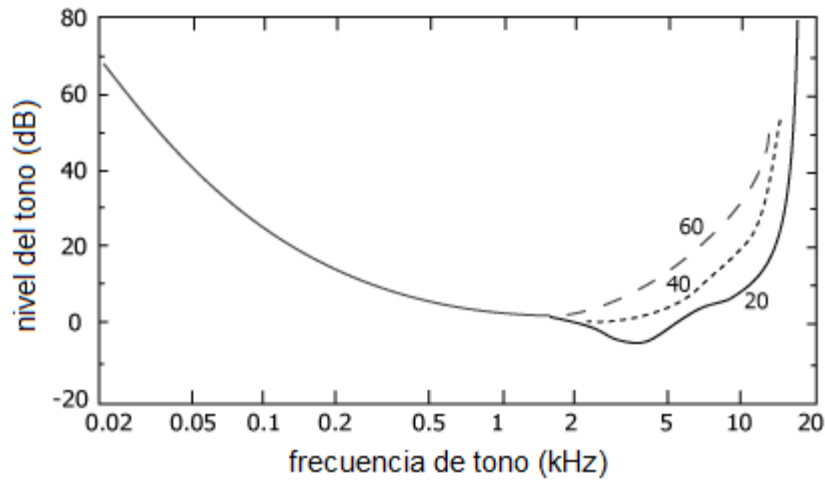


Figura 1.7. Modelo psicoacústico del oído humano.

La figura anterior representa la sensibilidad del oído humano contra la frecuencia. Desde hace tiempo es sabido que el humano tiene máxima sensibilidad en los rangos de 1 a 5 kHz, lo que representa el umbral de percepción del oído en función de la frecuencia.

En la presencia de dos sonidos de frecuencia cercana, si uno de ellos tiene más amplitud que otro se presenta lo que se conoce como enmascaramiento de frecuencia (figura 1.8).

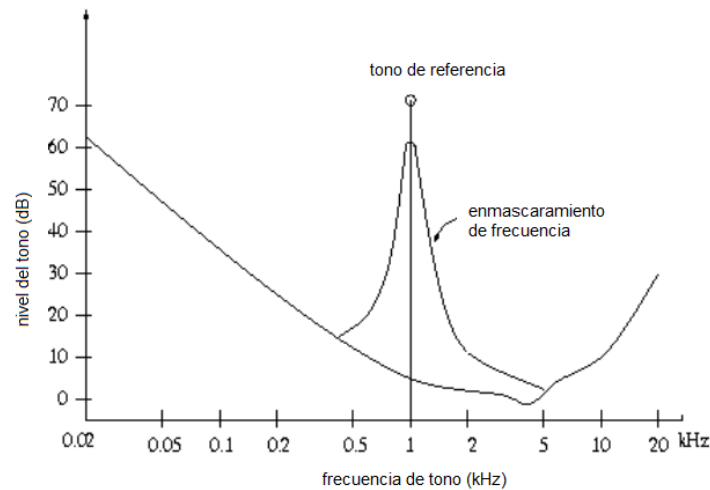


Figura 1.8. Enmascaramiento de frecuencias del oído humano.

El principio de codificación de audio que contiene el estándar MPEG consiste básicamente en dividir el audio en sub-bandas que después de haber pasado por un banco de filtros se convierten en muestras PCM. El modelo psicoacústico permite eliminar aquellas muestras cuya amplitud se considera por debajo del umbral auditivo.

El estándar MPEG-1 en su tercera parte ISO/IEC-11172-3 está enfocado a la codificación de audio y se divide en tres capas. Cada capa tiene una determinada tasa de compresión dependiendo de la calidad del audio.

La capa 1, también conocida como “pre-MUSICAM” utiliza una tasa de bits fija que puede variar por 14 rangos, desde 32 hasta 448 kb/s. Esta capa tiene la ventaja de ser la más sencilla.

La capa 2 es la más usada para sistemas de DVB y utiliza el algoritmo conocido como MUSICAM. Con una calidad equivalente a la capa anterior, esta capa requiere una tasa de bits entre un 30 a 50 % menor. La tasa de bits puede ser fija o variable y varía entre 32 y 192 Kb/s.

La capa 3 es conocida como MP3. Comparada con la capa 2, MP3 puede manejar tasas de compresión de hasta el doble. La complejidad por lo mismo es mayor.

La capa más utilizada para la radiodifusión de audio conjunto con video es la 2. La capa 3 se utiliza principalmente en audio digital cuyo destino o aplicación es el almacenamiento debido a que hay un retardo mayor en la codificación comparada con la capa 2.

La evolución del audio digital hacia el sonido multicanal permitió la incursión de nuevos estándares. El primero de ellos fue MPEG-2 parte 3 o ISO/IEC 13818-3. La principal característica de este estándar fue una extensión para el estándar MPEG-1 con la cual se amplió el sonido de dos a 5.1 canales. Por esta característica el estándar también es conocido como MPEG-2 BC (*Backwards Compatible*).

MPEG-2 Parte 3 permite frecuencias de muestreo mucho más bajas que los valores estándar (16, 22.05 y 24 kHz) con lo cual la tasa de bits se reduce en un factor de 2 al igual que el ancho de banda de audio.

Otro estándar dirigido especialmente al audio digital de 5.1 canales que DVB incluyó fue el estándar AC-3 o DTS desarrollado por Dolby Digital. El estándar trae consigo un nuevo concepto de codificación en el cual el sonido es dividido en paquetes para su transmisión.

AC-3 de la compañía Dolby Digital soporta frecuencias de muestreo de 32, 44.1 y 48 kHz y una tasa de bits entre 32 y 640 Kbps

Este estándar generalmente no es usado en la etapa de decodificación o recepción para evitarse el pago de derechos. Pese a esto, ha sido adoptado en cines, el formato de almacenamiento DVD, los sistemas de teatro en casa, entre otros.

Como sucesor de MP3 y MP2, surgió el estándar AAC (*Advanced Audio Coding*) con mejor calidad a la misma tasa de transmisión. Este estándar fue definido por la ISO y la IEC como MPEG-2 parte 7 o ISO/IEC 13818-7 y por en el estándar MPEG-4 como parte 3 o Audio ISO/IEC 14496-3.

MPEG-2 parte 7 también es conocido como MPEG-2 NBC (*Non Backwards Compatible*) por el hecho de que no es compatible con estándares anteriores. La principal característica de AAC es la

implementación de un banco de filtros híbridos con lo que se logra una mayor eficiencia. Además soporta entre 1 y 48 canales con frecuencias de muestreo de 8 a 96 kHz.

La característica esencial que incluye este estándar es el término de *Audio Format Types* que como su nombre lo indica, divide la codificación según el formato de audio deseado, esta característica es comparable con los niveles y perfiles de la codificación de video.

Por lo anterior MPEG-4 Audio no está enfocado a una única aplicación. Puede ser utilizado por cualquier aplicación que necesite compresión de audio avanzada con una tasa de bits baja y alta calidad.

Otro esquema de codificación de audio definido en MPEG-4 es HE-AAC (*High-Efficiency Advanced Audio Coding*). Este estándar es una extensión del AAC antes descrito y como su nombre lo indica tiene como objetivo mejorar la eficiencia de codificación.

HE-AAC Versión 1 utiliza un nuevo método llamado SBR (*Spectral Band Replication*) el cuál marca la diferencia con los esquemas de codificación anteriores en cuanto al uso de las frecuencias altas en la codificación. Con este estándar se puede alcanzar una tasa de bits de 32 Kbps a 48 Kbps con una frecuencia de muestreo de entre 8 a 98 kHz.

HE-AAC en su Versión 2, utiliza el método anteriormente descrito SBR adicionando con otro llamado PS (*Parametric Stereo*) que como su nombre lo indica parametriza la codificación de sonido estéreo. Esta versión permite tasas de bits de 16 a 24 kbit/s para frecuencias de muestreo de 8 a 98 kHz.

En la tabla de la figura 1.9 se resumen las características principales de los códecs de audio descritos en este trabajo.

Estándar de audio	Frecuencia de Muestreo (kHz)	Tasa de bits (Kbps)	Características.
MPEG-1 Parte 3	32-48	32 - 448	Cuenta con 3 capas, Las capas 1 y 2 son utilizadas para DVB. No soporta audio multicanal.
MPEG-2 Parte 3	16, 22.05, 34	32	Es una extensión de MPEG-1 parte 3 que soporta audio 5.1 Es compatible con el estándar anterior.
AC-3	32-48	32-640	Pertenece a Dolby Digital. Soporta audio multicanal. Es utilizado para cine teatro y DVD, DVB-S, ATSC
MPEG-2 Parte 7	8-98	32-48	Fue donde se definió inicialmente AAC. No es compatible con estándares anteriores. Es utilizado por ISDB-S, radio digital, teléfonos móviles, DVB-S.
MPEG-4 Parte 3	8-98	32-48 16-24	Está definido AAC y también HE-AAC. HE- AAC utiliza dos nuevas técnicas SBR y PS. Es utilizado por DVB-S2, DVB-H, radio, teléfonos móviles.

Figura 1.9: Características principales de los códecs de audio utilizados en radiodifusión.

1.5. Multiplexaje, Modulación y Técnicas de Acceso Múltiple

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

1.5.1. Multiplexaje por división de frecuencia (FDM)

Esta técnica, considerada la más simple, consiste en asignar una frecuencia a cada una de las señales que va a ser transmitida hacia el satélite dentro de su ancho de banda disponible sin importar su naturaleza (digital o analógica). De esta forma, se tienen bloques de señales limitadas en ancho de banda colocadas una al lado de otra. Un esquema representativo de esta técnica se puede observar en la figura 1.10.

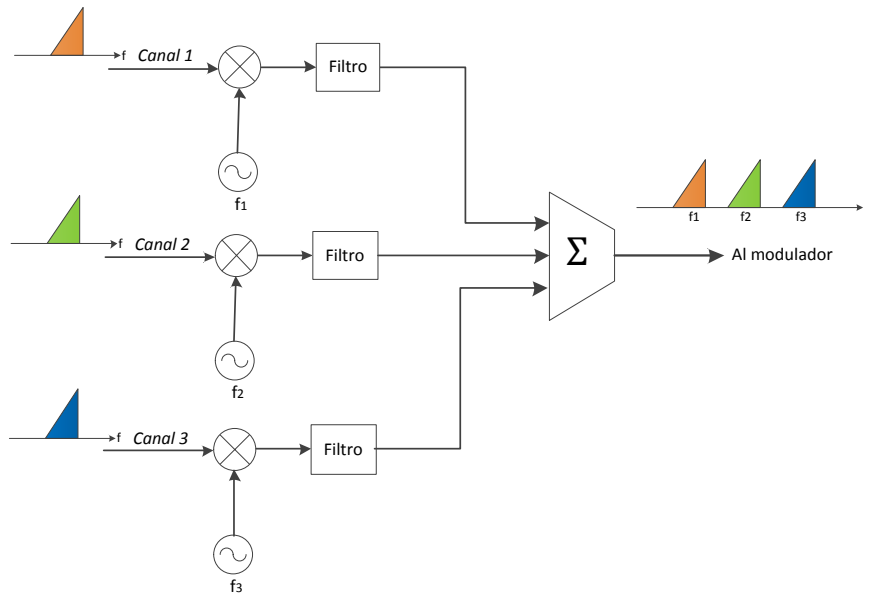


Figura 1.10. Multiplexaje por división de frecuencia.

1.5.2. Multiplexaje por división de tiempo (TDM)

Esta técnica junto con la anterior es de las más habituales en comunicaciones satelitales y se puede utilizar en diversas etapas de la transmisión dependiendo del tipo de información. Está limitada a señales digitales. El conjunto de las señales de origen (consistente en trenes de pulsos binarios) es intercalado siguiendo una determinada secuencia. El intercalado puede ser bit a bit, palabra por palabra (agrupación de bits) o mediante una secuencia predefinida (figura 1.11). Como resultado se obtiene una señal digital con mayor cantidad de información. Las señales multiplexadas ocupan la totalidad del ancho de banda disponible a diferencia de FDM.

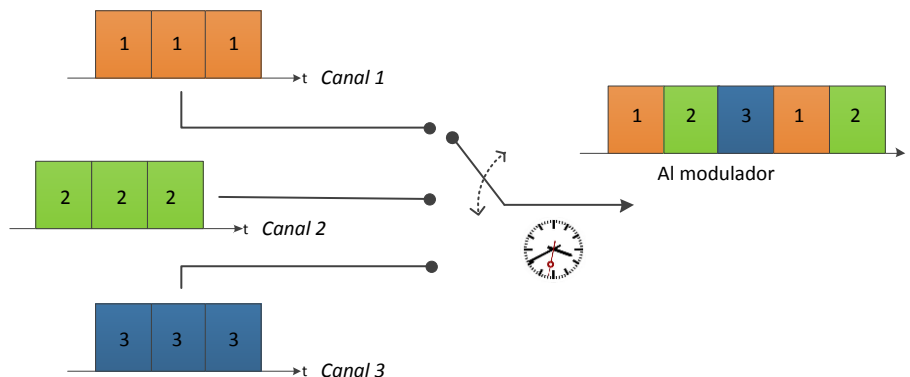


Figura 1.11: Multiplexaje por división de tiempo.

Existen formatos de multiplexaje muy bien definidos y estructurados para fines comerciales y prácticos. La mezcla del audio con el video digital se hace a través de TDM.

Una portadora digital de TV puede contener uno o más canales de televisión al ser transmitida. Se dice que es una señal de portadora única o SCPC (*Single Channel Per Carrier*) si solo transporta un canal de televisión. A las portadoras de TV que transportan más de un canal se les denomina MCPC (*Multiple Channel Per Carrier*). Las portadoras MCPC de igual forma utilizan la técnica TDM para transportar varios canales de televisión [23,27].

1.5.3. Modulación digital

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

La modulación digital es un esquema de señalización para un grupo de símbolos en el cual, los símbolos se convierten en formas de onda compatibles con las características del canal. El caso habitual es utilizar portadoras con forma de onda sinusoidal. Se requieren de 2 formas de onda para representar los estados lógicos 0 ó 1. De manera alternativa, los dígitos binarios pueden ser agrupados en bloques de k -bits donde existirán $M = 2^k$ diferentes formas de onda para representar los datos. A los grupos de k bits también se les denomina símbolos. A este tipo de modulación se le conoce como M-aria [18, 47].

Las señales de televisión por satélite analógicas se transmiten por medio de modulación en frecuencia. En cambio, la técnica de modulación más común para las portadoras de televisión digital es la modulación digital de fase o PSK (*Phase Shift Keying*) y la modulación dual en amplitud y fase o APSK (*Amplitude Phase Shift Keying*).

La modulación digital de fase fue desarrollada en los primeros días de los programas espaciales. Ahora es la modulación más usada en aplicaciones comerciales y militares por satélite.

La expresión analítica para PSK es:

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

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

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

En el caso de $M=2$ tenemos la modulación BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) donde cada una de las señales representa un dígito binario (0 ó 1). La modulación es alcanzada cuando la fase de la portadora cambia en 0 y π dependiendo del dígito binario (figura 1.12).

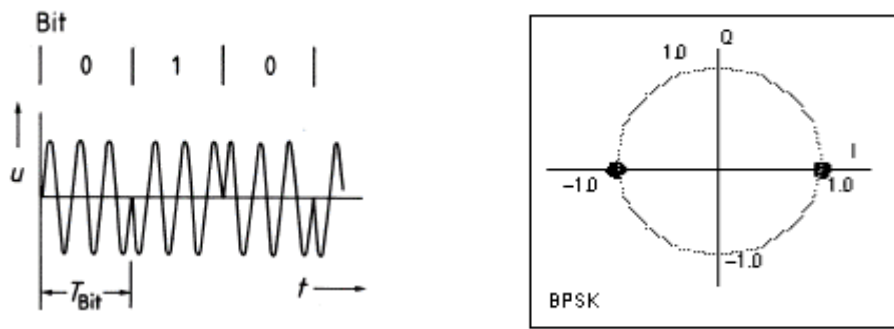


Figura 1.12: Representaciones temporal y fasorial de una señal BPSK .

Si consideramos al canal satelital como AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), podemos definir otro parámetro con ayuda del E_b / N_0 que nos permite conocer la cantidad de errores promedio que existirán en el canal. Para el caso de la detección de una señal BPSK con un detector coherente, la probabilidad de bit en error se obtiene mediante la expresión:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

$$\text{Donde } Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$$

El E_b/N_0 uno de los parámetros para definir la calidad de la señal digital. El numerador representa la energía de la señal que queremos recuperar y el denominador representa la degradación eléctrica de la señal debido al ruido dentro del ancho de banda de la señal.

Si $M=4$, entonces tendremos 4 formas de onda correspondientes a una modulación QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*). Cada símbolo (00, 01, 10 y 11) estará representado por una fase dependiendo del valor de $\varphi_i(t)$.

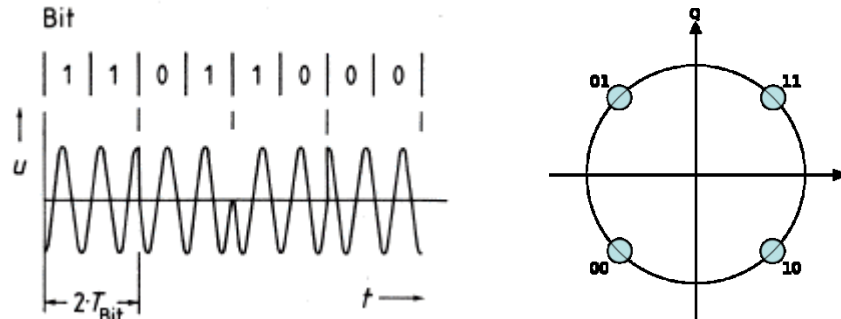


Figura 1.13. Representación temporal y fasorial de una señal QPSK.

Si cierta cantidad de información es modulada en QPSK, esta ocupará menos ancho de banda que la misma modulada en BPSK, por lo que existe una mejor eficiencia espectral en QPSK.

Para modulaciones en que se transmiten símbolos, el parámetro que se toma en cuenta es la probabilidad de símbolo en error. En el caso de la detección de señales QPSK, ésta probabilidad en un detector coherente está dada por la expresión:

$$P_s \approx 2Q\left(\frac{E_s}{N_0}\right)$$

Donde $\frac{E_s}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} \log_2 M$

La relación existente entre P_s y P_b es:

$$P_b = \frac{P_s}{\log_2 M}$$

Se pueden adoptar otros esquemas de modulación en fase M-aria como 8-PSK donde hay 8 símbolos distintos correspondientes a 8 fases diferentes de la portadora. Esto depende de la cantidad de datos que se requieran transmitir, del ancho de banda, y de la potencia disponible en el sistema de comunicaciones. Valores mayores de símbolos en la modulación son factibles de realizar, pero no son comunes debido sobre todo a limitaciones en potencia de los satélites.

Se tienen que tomar en cuenta factores como las limitaciones de potencia de los sistemas reales y la fiabilidad de los datos necesaria (definida por la probabilidad de error) para que el sistema tenga un correcto desempeño.

El ancho de banda de la señal digital está definido por la expresión:

$$B = \frac{R}{\log_2 M}$$

Donde R es la tasa de transmisión de la señal de datos binaria.

Otro esquema de modulación digital es el APSK que la señal de datos tanto en amplitud como en fase. Esto incrementa el grupo de símbolos y la tasa de transmisión. Uno de los esquemas más utilizados es QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). Cuando un sistema presenta problemas en su implementación con sistemas de modulación como 8-PSK, lo más habitual es cambiarse a esquemas duales como QAM, pues así se alcanzan mayores distancias con mayor fiabilidad y eficiencia espectral. Algunos estándares de transmisión de televisión digital usan esquemas como 16APSK, 16-QAM o 64-QAM, difiriendo en el número de símbolos y ubicación de éstos en el diagrama fasorial (figura 1.14).

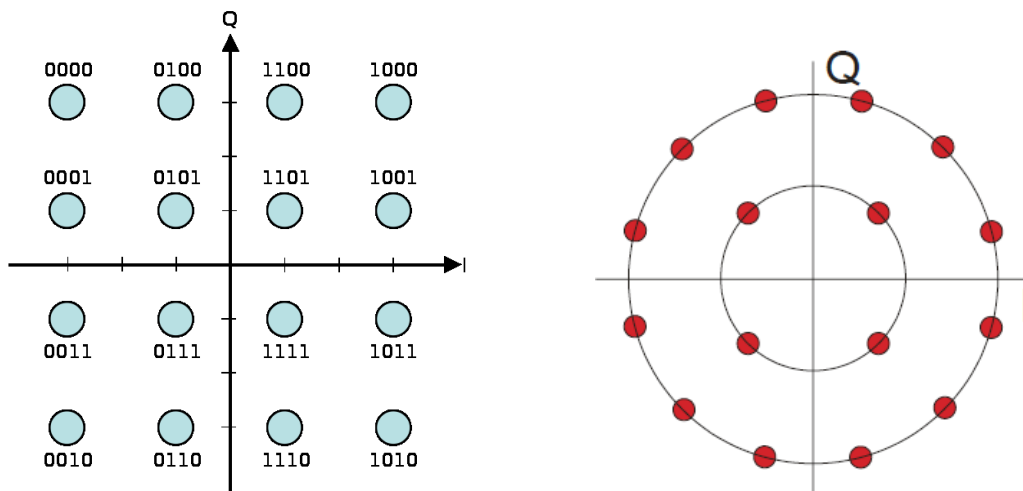


Figura 1.14. Representaciones fasoriales de señales moduladas en 16-QAM y 16-APSK.

Existen otras consideraciones a tomar en cuenta en la implementación de un esquema de modulación a parte del ancho de banda y la potencia. Por ejemplo, el tipo de amplificadores utilizados. En comunicaciones vía satélite se utiliza comúnmente el tubo de ondas progresivas o TWT. Sin embargo, este amplificador ocasiona distorsión en amplitud y fase por sus características no lineales. Debido a esto se tiene que tener mucho cuidado en el uso de modulaciones duales como QAM, ya que la distorsión en amplitud es más severa que la de fase. Algunos esquemas de modulación de desarrollo reciente utilizan además otras técnicas que permiten eficientar aún más la transmisión de las señales.

1.5.4 Técnicas de Acceso Múltiple.

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

Mediante FDM se puede asignar y administrar el ancho de banda disponible por el satélite a diversos servicios. A esto se le conoce como acceso múltiple por división de frecuencia o FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). Esta técnica es la más usada por su sencillez. Cada estación terrena transmite una o más portadoras a frecuencias centrales distintas con un ancho de banda limitado mediante filtros pasa banda para evitar que se traslapen una con otra en el dominio de la frecuencia (figura 1.15). Las portadoras de televisión en los servicios FSS y BSS utilizan este esquema de acceso.

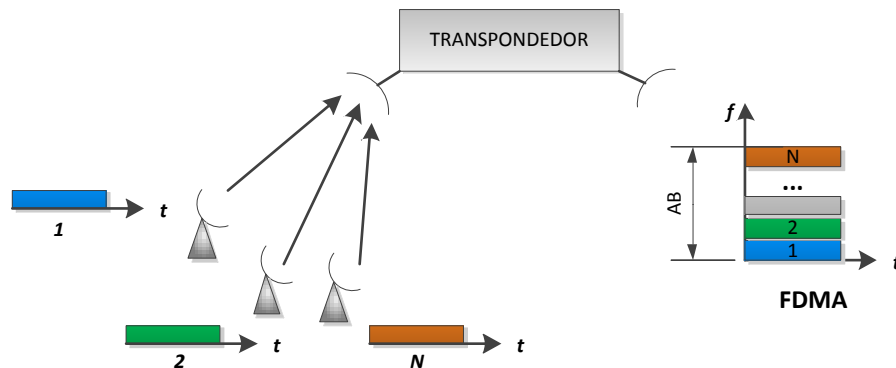


Figura 1.15. Acceso múltiple por división de frecuencia.

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

El esquema de acceso mediante multiplexaje por división de tiempo se denomina TDMA (*Time Division Multiple Access*). El acceso se da entre un grupo de estaciones terrenas asociadas a una sola red que utilizan una portadora para transmitir bajo los principios de división de tiempo (figura 1.16). Este sistema requiere de una alta sincronización, de manera que las ráfagas de información no se traslapen de manera temporal una con otra.

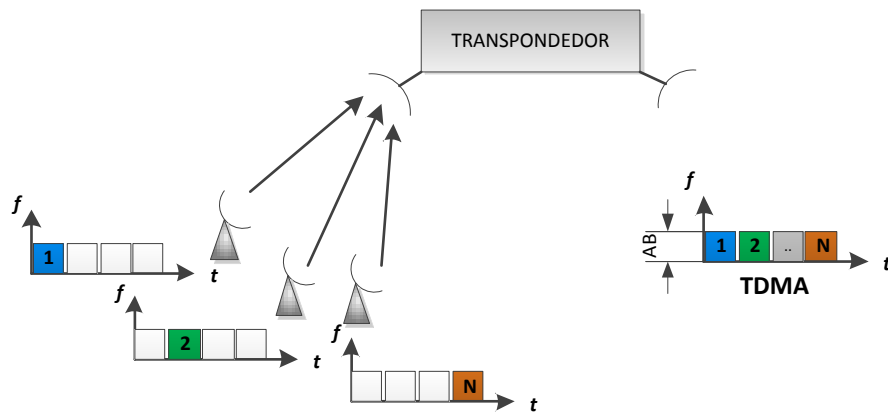


Figura 1.16. Acceso múltiple por división de tiempo.

El esquema TDMA se utiliza principalmente para transmisión de datos, voz y servicios basados en paquetes. El estándar europeo de televisión digital para dispositivos portátiles DVB-SH basa su principio de funcionamiento igualmente en estas técnicas.

CDMA (*Code Division Multiple Access*) es otro esquema de acceso al medio utilizado en diversos sistemas de comunicación. Como su nombre lo indica, basa su funcionamiento en la división por código. Cada estación de la red transmite continuamente y en la misma banda de frecuencias del canal del satélite (figura 1.17). La interferencia entre las señales se resuelve en el receptor mediante una operación lógica entre la señal recibida y un código binario identificado con el transmisor. El ancho de banda necesario para llevar a cabo la comunicación mediante esta técnica es mucho mayor al requerido por esquemas como TDMA y FDMA. También, la velocidad de transmisión es mucho menor comparada con los anteriores.

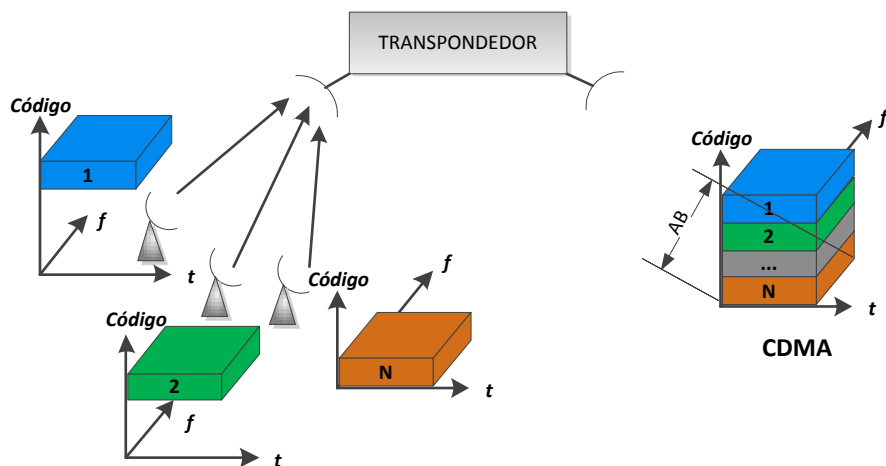


Figura 1.17. Acceso múltiple por división de código.

El esquema de acceso al medio por división espacial SDMA (*Space Division Multiple Access*) permite el reúso de frecuencias entre estaciones terrenas distintas mediante coberturas de diferentes regiones en un mismo satélite (figura 1.18). La interferencia co-canal se limita usando antenas de patrón angosto y arreglos de filtros en el satélite.

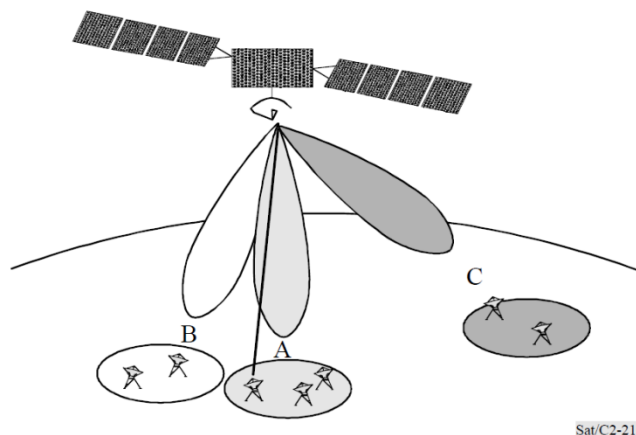


Figura 1.18. Acceso múltiple por división espacial.

Otra técnica que es importante mencionar es MF-TDMA. Ésta combina FDMA y TDMA para mejorar la capacidad y desempeño en enlaces por satélite. La señal de banda base que se envía al satélite es dividida y distribuida en múltiples portadoras FDMA que son asignadas y transmitidas en función de la demanda (figura 1.19). Este sistema puede ser usado como técnica de acceso en sistemas de TV bidireccionales que utilicen como canal de retorno al satélite [51].

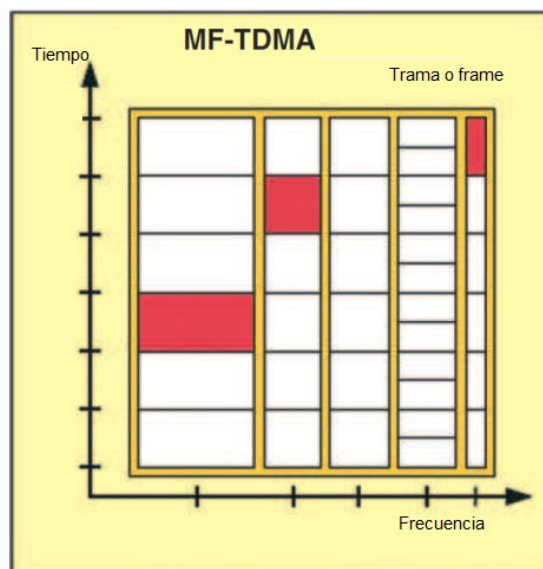


Figura 1.19. Acceso múltiple por slot dinámico MF-TDMA

1.6. Códigos para corrección de errores

En comunicaciones por satélite, se desea minimizar la probabilidad promedio de bit o símbolo en error en el receptor ya que la señal de RF está sujeta a diversas perturbaciones a través de su paso por el canal de comunicaciones. Ningún esquema de modulación por sí solo puede mitigar estos efectos, haciendo necesaria una mayor protección de la información.

En canales de comunicación limitados por la potencia y el ancho de banda (como el caso de los satélites), hay pocas alternativas para disminuir la probabilidad de bit en error. Una técnica efectiva para reducir la cantidad de errores promedio es usar codificación para protección de errores.

Por lo general, el desempeño de un sistema con codificación para protección de errores es mucho mejor. Inclusive, existen códigos capaces de proporcionar una ganancia aparente (denominada ganancia de código) con la que es posible reducir el E_b/N_0 y mantener una tasa de errores constante. No obstante, es necesario realizar un balance de las características necesarias para evaluar este desempeño. Entre los factores a considerar en el análisis tenemos la probabilidad de error necesaria para que el sistema funcione de manera aceptable, la potencia y el ancho de banda disponibles, y la capacidad de información requerida.

Debido a las características de retardo de las ondas que se propagan por satélite y a que las señales de televisión viajan por lo general en forma unidireccional, la detección y corrección de errores se realiza en los receptores sin existir peticiones de retransmisión por parte de estos. A este tipo de control de errores se le denomina FEC (*Forward Error Correction*).

La codificación consiste en convertir un mensaje de k símbolos en uno de mayor tamaño mediante una transformación que agrega redundancia llegando a un tamaño de palabra n tal que $n > k$. La tasa de del código se define por el cociente k/n [47].

Existen diversos códigos aplicados a los mensajes para protegerlos contra errores. A continuación, se describirán brevemente las particularidades de los códigos más habituales.

1.6.1. Códigos lineales de bloque

Estos códigos transforman un mensaje m dígitos en uno de mayor tamaño mediante una matriz generadora. Son generados mediante transformaciones lineales. En la decodificación se vuelve a utilizar la matriz de mapeo para recuperar el mensaje. La codificación no depende de la información generada.

Los códigos LDPC (*Low Density Parity Check*) son una subclase de códigos lineales de bloque de reciente desarrollo que han alcanzado eficiencias comparables o mejores a los turbo códigos. Sus principales ventajas con respecto a estos últimos son:

- Posibilidad de decodificación en paralelo.
- Adaptables a altas tasas de transmisión.

- No requieren de bloques de entrelazado.
- Existen códigos libres de patentes que pueden ser universalmente útiles en diversos medios de transmisión.

Los antecedentes teóricos para su implementación datan de la década de los 60s (desarrollados por R. Gallager), pero no fueron utilizados por su complejidad de implementación en ese momento. Debido al avance y disminución de complejidad en el procesamiento digital de señales, la implementación de estos códigos es una realidad en estos momentos.

En 2003, un código LDPC logró formar parte del estándar europeo de televisión por satélite DVB-S2 al mostrar su superior desempeño contra 6 diferentes turbo códigos.

1.6.2. Códigos cíclicos

Son un subconjunto de los códigos lineales de bloque. Sus particularidades son mayor facilidad de implementación (lógica menos compleja), y generación de las palabras codificadas a través de polinomios. El desempeño de estos códigos depende de la distribución de los errores y el orden de los polinomios generadores. Una clase poderosa de códigos cíclicos utilizada en sistemas de televisión digital son los códigos BCH (*Bose-Chaudhuri-Hocquenghem*).

Los códigos Reed-Solomon son códigos cíclicos no binarios del tipo BCH con símbolos formados a través de secuencias binarias de m dígitos con $m > 2$. Se caracterizan por tres parámetros (n, k, t) , los cuales definen el tamaño del bloque y el número de errores capaces de corregir:

- N es el tamaño (en símbolos) del bloque antes de la codificación.
- K es el tamaño (en símbolos) del bloque codificado.
- T es el número de símbolos corregibles.

Los códigos RS tienen poca redundancia (lo que repercute en el ahorro de ancho de banda y la posibilidad de aumento de la tasa de transmisión) y son usados para corregir errores de ráfagas cuando el tamaño de los símbolos es grande. El hecho de ser códigos no binarios les da una tremenda ventaja en cuanto a la capacidad de corrección en comparación con los binarios.

El uso de los códigos RS tiene aplicaciones comerciales en dispositivos de almacenamiento como discos compactos y en la transmisión de señales de datos con alta tasa de transmisión (como el caso de señales de video). En el caso de satélite, están siendo sustituidos por códigos aún más eficientes como Turbo códigos.

1.6.3. Códigos convolucionales

Son códigos lineales con memoria. Su estructura y propiedades son diferentes a los de bloque y su implementación es sencilla. Tienen mejor desempeño en canales ruidosos que los códigos de bloque y cíclicos. La codificación depende de los datos enviados pero no de la cantidad de información. A este tipo de códigos se le puede denominar también como de Viterbi debido a un conocido algoritmo utilizado generalmente en la decodificación de los datos creado por el Ingeniero italiano Andrew Viterbi.

1.6.4. Códigos entrelazados y concatenados

Este tipo de códigos se utilizan en canales con memoria. Los códigos entrelazados protegen a la información contra errores de ráfagas, pues permutan las palabras o símbolos de acuerdo a una secuencia preestablecida pseudoaleatoria que distribuye los errores de manera uniforme. La desventaja que tienen frente a otros códigos es la introducción de un retardo adicional debido a que el receptor debe de esperar a recibir un bloque completo de información para poder procesarla.

Los códigos concatenados son aquellos que usan 2 niveles de codificación: Un interno y otro externo (figura 1.20). El código interno se aplica justo antes de la modulación e interactúa con el canal de comunicaciones. El código externo se aplica directamente a la información de entrada, por lo que es menos redundante y sirve para disminuir la complejidad del diseño del sistema. Además de estos dos códigos se utiliza una etapa intermedia de entrelazado que mejora todavía más la protección. En la etapa de demodulación se hace el proceso inverso.

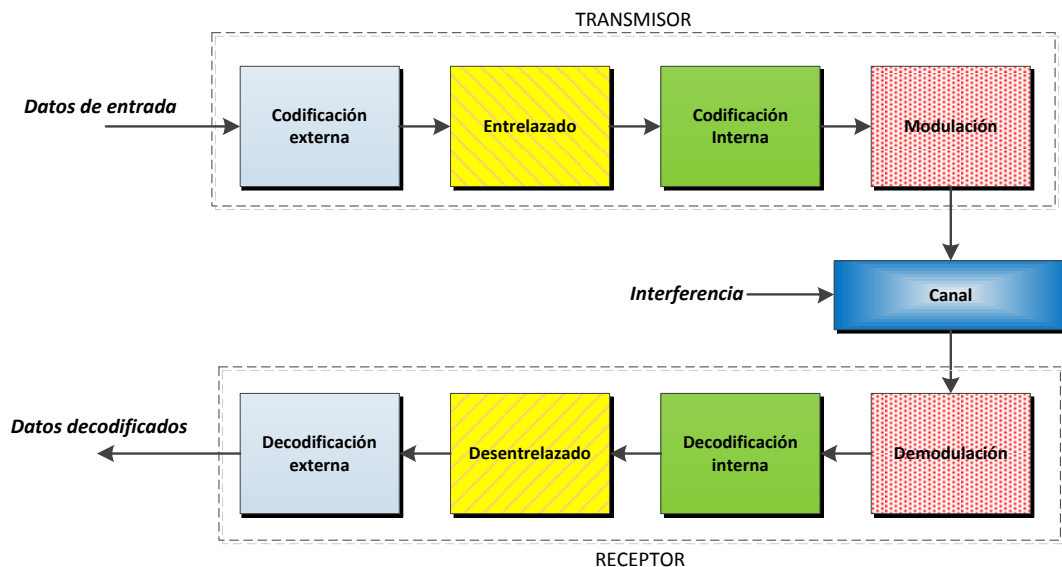


Figura 1.20. Diagrama a bloques de codificación concatenada.

1.6.5. Turbo códigos

Un turbo código puede ser considerado como una mejora de la estructura de codificación concatenada más un algoritmo iterativo con el que es posible decodificar una secuencia asociada. Se introdujeron en 1993 y están contruidos usando dos o más códigos componentes en conjunto con diferentes niveles de entrelazado. Mediante este tipo de codificación se alcanzan altos niveles de eficiencia energética. A pesar de esto, el empleo de patentes para su implementación limita muchas de sus posibilidades.

Los diseñadores de los sistemas de transmisión por satélite implementan sistemas de corrección de errores combinados evaluando entre otras cosas, la complejidad de implementación, el retardo de codificación y la capacidad de corrección del sistema.

CAPITULO 2: ESTÁNDARES DE TELEVISIÓN DIGITAL VIA SATÉLITE

Hemos visto que los sistemas de televisión digital son un conjunto de dispositivos que interactúan entre sí formando una cadena de transmisión y recepción. Resulta evidente pensar que si no existiese un conjunto de normas y formatos “estándares” para la transmisión de televisión, resultaría muy complicado visualizar contenidos de otras regiones del mundo. La estandarización ha contribuido con la globalización y ha incentivado en el consumo de contenidos audiovisuales de mejor calidad. Esto entre otras cosas, hace que los medios de comunicación sean una industria altamente lucrativa y de vanguardia.

Regresando a contexto, desde el inicio de los sistemas de televisión, el desarrollo de estándares se ha dado bajo la influencia de potencias tecnológicas en bloques geográficos diferentes. En la actualidad, existen 3 estándares principales [6]:

- **DVB (*Digital Video Broadcasting*):** Es una organización encabezada por países del bloque europeo que en el caso de la televisión digital por satélite (DVB-S y DVB-S2), se puede considerar como el estándar *de facto*. DVB está compuesto por más de 270 empresas e instituciones de todo el mundo.
- **ATSC (*Advanced Television System Committee*):** Es el grupo que se encarga del desarrollo de estándares de televisión digital en Estados Unidos. En el caso de radiodifusión de televisión digital terrestre, ha sido adoptado por países vecinos como Canadá, México y algunos países de Centroamérica influenciados por este bloque. En cuanto a los servicios de televisión por satélite se han desarrollado bajo la sombra de los estándares DVB por lo que no son comerciales.
- **ISDB (*Integrated Services Digital Broadcasting*):** Es el estándar japonés para televisión y radio digitales. Su penetración ha aumentado debido a la adopción de Brasil, provocando que varios países de América del Sur repliquen la tendencia formando un tercer bloque geográfico.

Potencias tecnológicas como China y Corea del Sur han incursionado en el desarrollo de estándares propios bajo la premisa de disminuir los costos de implementación que aumentan principalmente por el uso de patentes.

Un fenómeno habitual que ocurre con el desarrollo de nuevas tecnologías es que la tecnología o estándar que se desarrolla primero se convierte en el modelo a seguir para las implementaciones posteriores. En el caso específico de la televisión digital, con el surgimiento del conjunto de normas MPEG-2 se creó una tendencia para que los desarrolladores de contenidos audiovisuales basaran sus implementaciones en este estándar. La adopción de MPEG-2 permite hasta cierto punto compatibilidad entre los contenidos y aumenta el intercambio de información. Los consorcios DVB, ATSC e ISDB transportan sus contenidos a través flujos de transporte MPEG-2.

En el caso de MPEG-4, las mejoras están orientadas más a la codificación y transporte de la información y no precisamente en el formato de las tramas.

Los estándares de televisión digital definen dos capas: la capa física y la capa de enlace (referidas al modelo OSI) en un sistema de distribución. Es por ello que las diferencias de implementación entre los tres sistemas son principalmente en el tipo de modulación utilizada, de acuerdo a las características del canal de transmisión. Las explicaciones que aquí se den en referencia al formato de los datos aplican para sistemas de distribución por satélite, terrestre y por cable, tomado en cuenta algunas consideraciones.

2.1. Múltiplex MPEG

Hay dos aplicaciones básicas para el múltiplex de MPEG: grabación y transmisión. Cada aplicación tiene diferentes requerimientos. Es por eso que los datos se codifican por capas. En el caso de MPEG-2 hay 2 capas, una de compresión y codificación del audio y video llamada VCL (*Video Coding Layer*) y la segunda de transporte o (*Transport Layer*). Para el MPEG-4 se agregó una capa intermedia denominada capa de abstracción de red o NAL (*Network Abstraction Layer*) que permite definir de una mejor manera el empaquetado de la información dependiendo de la red en que se transporte a las señales, como se muestra en la figura 2.1.

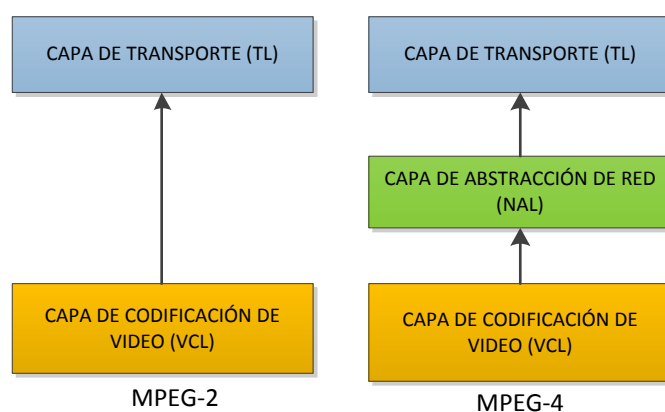


Figura 2.1: Diferencia de capas de codificación entre MPEG-2 Y MPEG-4.

Los codificadores de audio y video de la capa VCL entregan a su salida cadenas de datos denominadas ES (*Elementary Streams*) que constituyen el contenido comprimido. Cada cadena elemental acarrea identificadores de qué tipo de datos son transportados [3, 50].

Las cadenas de datos con la información así como otras cadenas con información privada se combinan de manera organizada y fragmentada formando paquetes elementales denominados PES (*Primary Elementary Stream o Packetized Elementary Stream*). Cada PES transporta un encabezado con una serie de datos de control que identifican al tipo de datos transportados, la

longitud del paquete y el orden de éste, principalmente. Por lo tanto no se tiene un tamaño de paquete PES fijo.

En el estándar MPEG-2 describe dos formas diferentes de multiplexar los PES de acuerdo al tipo de aplicación final del flujo de datos. Estas aplicaciones son la trama de programa (*Program Stream*) y la trama de transporte (*Transport Stream*). En la figura 2.2 se representa un esquema del procesador en banda base del estándar MPEG-2.

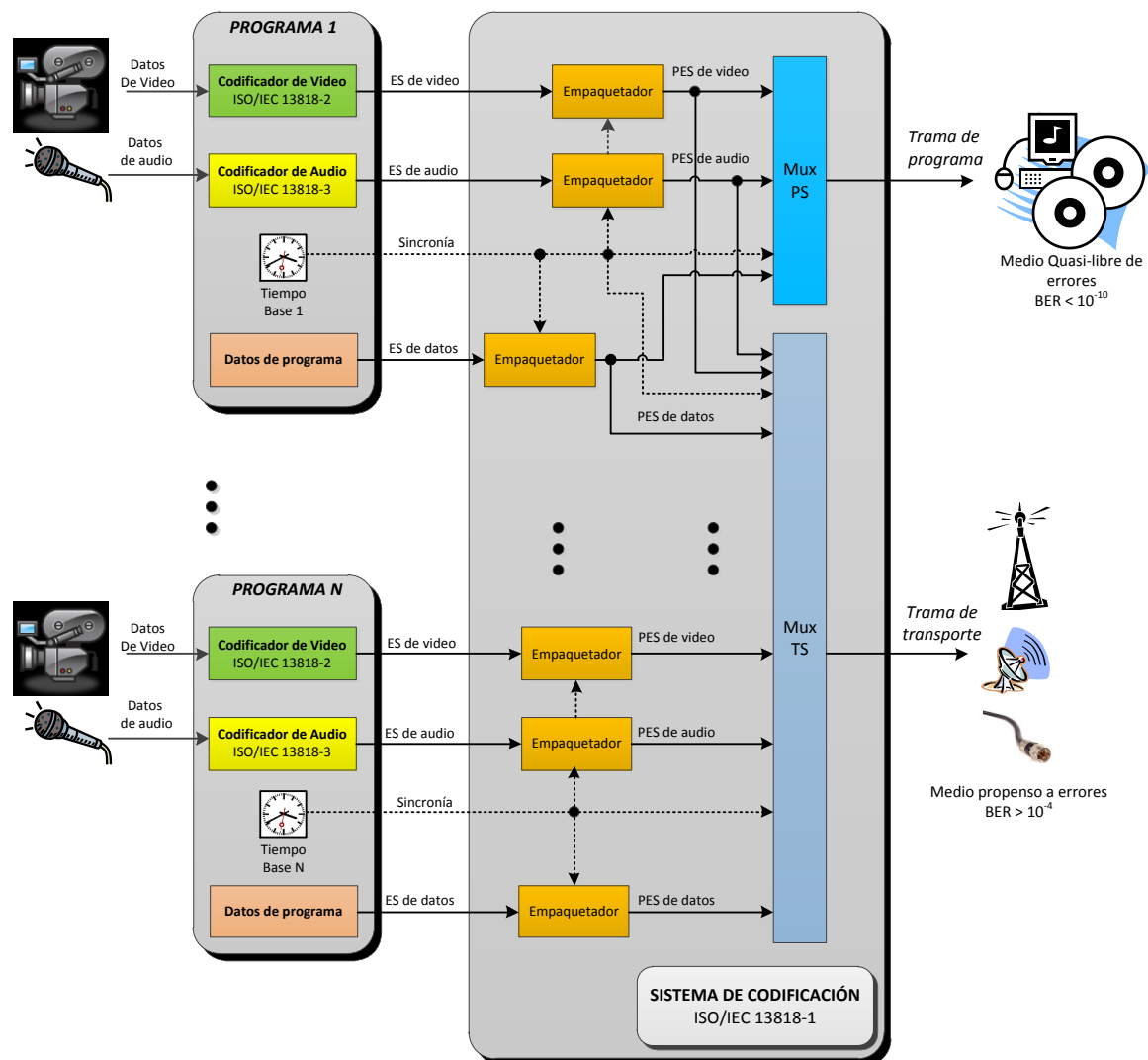


Figura 2.2: Estructura del procesador en banda base del estándar MPEG-2.

La trama de programa es aquella cuyo destino es un medio prácticamente libre de errores ($BER < 10^{-10}$) como son los dispositivos de almacenamiento masivo.

La trama o paquete de transporte (figura 2.3) es aquella que, como su nombre lo indica, va dirigida a la transmisión de los contenidos generalmente a través de largas distancias. Por lo tanto es susceptible a una cantidad de errores relativamente alta ($BER > 10^{-4}$). El largo del paquete de

transporte está ajustado a 188 bytes para la transmisión de televisión con un encabezado de 4 bytes (carga útil: hasta 184 bytes). Opcionalmente, se puede agregar otro campo intermedio denominado campo de adaptación (*Adaptation Field*) cuyo tamaño es variable junto con el de la carga útil.

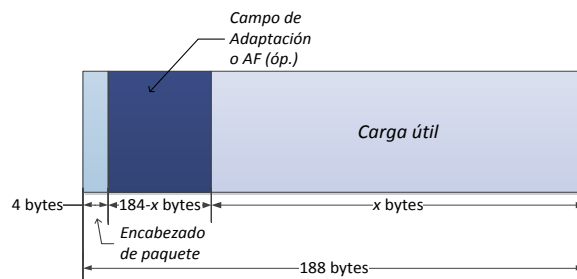


Figura 3.3: Paquete de transporte MPEG-TS.

El PES tiene que ser dividido de tal manera que se ajuste a la longitud de la carga útil de la trama de transporte. El campo AF es necesario cuando los paquetes PES no son múltiplos de 184 bytes y son necesarios bytes de relleno.

La trama de transporte MPEG-2 incluye información adicional de control dentro de la carga útil, común para todos los programas, que está constituida por la tabla PSI (*Program Specific Information*). El PSI acarrea información de la asociación de los programas con su posición en la trama de transporte, del acceso condicional para televisión de paga, etc.

Para el caso de MPEG-4 la capa de compresión contiene tres tipos de descriptores diferentes: de objetos, de escenas y de movimiento. Después de esta etapa se encuentra la capa de adaptación NAL encargada de sincronizar estos datos y multiplexarlos de acuerdo al formato contenedor en el que serán transmitidos (figura 2.4). Por ello, los contenidos almacenados con los formatos MPEG-4 pueden viajar a través de tramas TS (como MPEG-2), paquetes IP, celdas ATM, H223, DAB, entre otros.

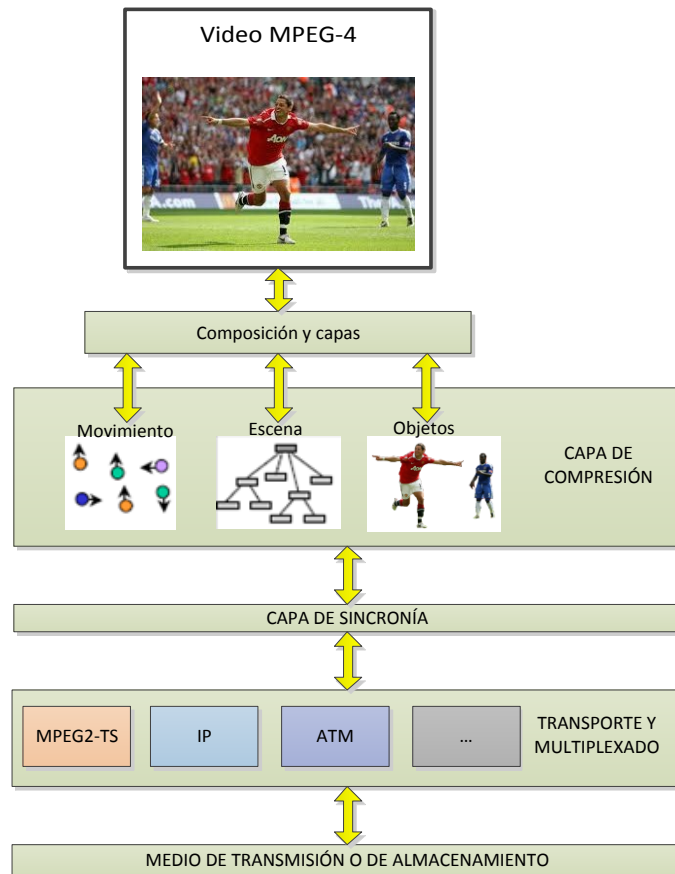


Figura 2.4: Esquema general de codificación de video en MPEG-4

2.2. DVB-S

DVB-S es la primera especificación de televisión por satélite aprobada por el ETSI con la denominación ETSI EN 300 421 [10] en el año de 1993. En este estándar se definen las características de la radiodifusión de televisión digital y datos a través de satélite FSS o BSS para la banda Ku. Permitiendo la transmisión de varios programas de calidad estándar o HDTV a través de un multiplex basado en la especificación MPEG-2.

Los códecs de audio y video que se definieron para este estándar fueron:

- MPEG-2 Parte 2 para video.
- MPEG-2 Parte 3 para audio o Dolby AC-3.

El proceso en banda base es el mismo para los estándares de transmisión por cable y terrestres de DVB, DVB-C y DVB-T respectivamente.

Adicionalmente a las tablas PSI, propias de MPEG-2, en este estándar se definen las tablas DVB-SI (*DVB-Service Information*) que contienen información sobre los programas que viajan en otros

repetidores e incluso que viajan en otras redes. La información transmitida en estas tablas permite que los suscriptores reciban la guía de programas electrónica.

La información de las tablas DVB-SI, entre otras cosas, permite la organización de los contenidos por temas, contener descripciones de los programas, hora y fecha de las transmisiones, etc. Un ejemplo de aplicación de la información de las tablas DVB-SI [11] se puede observar en los menús interactivos que cuentan algunos sistemas de televisión (figura 2.5.).

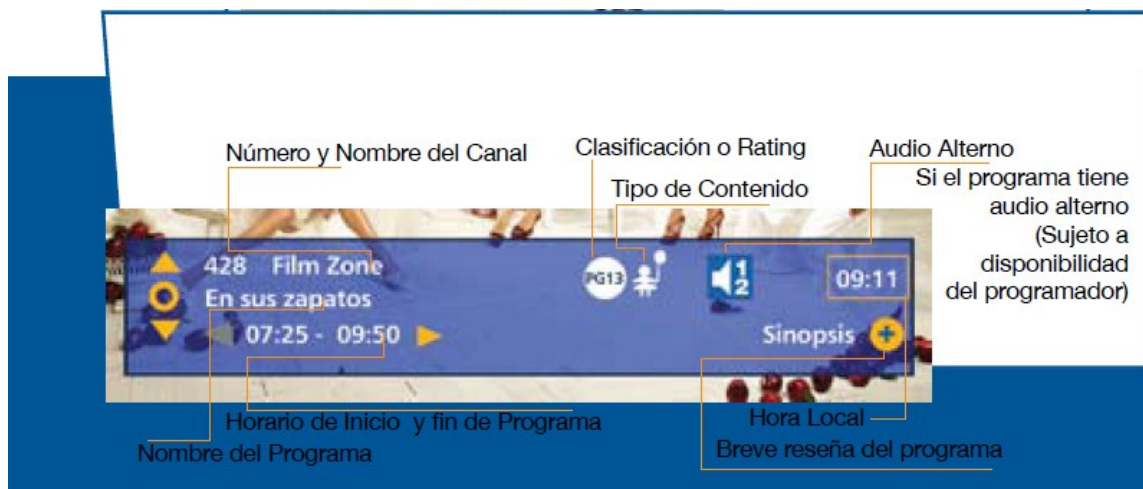


Figura 2.5. Menú interactivo del sistema SKY.

Otro aspecto importante que toma en cuenta el estándar DVB-S y es parte trascendental en los demás sistemas de televisión digital por satélite es el acceso condicional. La gran mayoría de programas de televisión a través de satélite son de pago debido a que esta es la manera de recuperar la inversión en la transmisión y arrendamiento del segmento satelital. Por ello es necesario controlar el acceso a los contenidos por parte de los suscriptores a través de una tabla del PSI (*Conditional Access Table*) que define un algoritmo único de acceso a los datos. Este algoritmo contiene los siguientes elementos:

- Algoritmo de aleatorización de contenidos (*scrambling*). Entrega de llaves electrónicas necesarias para recuperar el contenido en el receptor.
- Sistema de gestión de suscripción o abonado (*Suscriber Management Service*). En este algoritmo se almacena la información pertinente a los suscriptores como el tipo de servicio contratado, canales autorizados, etc.
- Sistema de autorización de suscriptor (*Suscriber Authorization System*). Es un sistema de cifrado para las llaves de acceso a los contenidos.

Los parámetros de acceso condicional son propietarios de los proveedores de servicios y la descripción de la implementación no es de acceso público para evitar mal uso de los contenidos.

Una vez que el paquete de transporte está definido en todos sus campos, se aplica un último proceso adaptivo a la secuencia que consiste en la aleatorización de los datos (*randomizing*) para distribuir la energía de la señal.

El siguiente proceso en la transmisión es la codificación contra errores de la trama de transporte. Este proceso se logra a través de la aplicación de códigos concatenados para lograr una alta protección contra errores en niveles de C/N bajos (entre 4 y 8 dB).

El código externo es un RS (188, 204, 8) y el interno es un código convolucional con tasa de código variable entre $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{5}{6}$ o $\frac{7}{8}$, dependiendo de la eficiencia espectral que se quiera lograr.

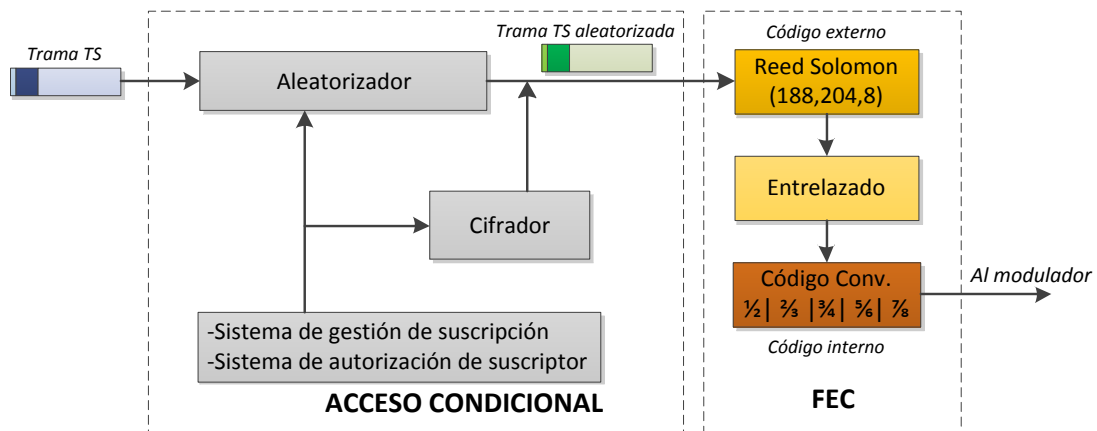


Figura 2.6. Proceso de codificación del estándar DVB-S

Para evitar ISI (Interferencia temporal entre símbolos), es necesario filtrar la señal de banda base mediante un filtro paso bajas. El tipo de filtro más usado es el denominado de Nyquist o Coseno elevado (*Raised cosine*) cuya respuesta en frecuencia se puede observar en la figura 2.7.

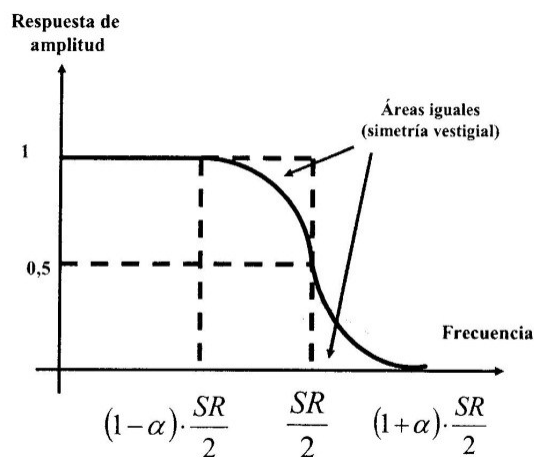


Figura 2.7. Respuesta en frecuencia del filtro Coseno Elevado

El ancho de banda total de la señal digital está dado por la expresión:

$$B = (1 + \alpha)SR \text{ MHz}$$

Dónde:

SR = *Symbol rate* o tasa de símbolos.

α = factor de caída del filtro o *roll-off*. Este valor está definido en el estándar como 0.35.

En un principio, el único esquema de modulación definido para el estándar DVB-S fue QPSK. Sin embargo, en condiciones excepcionales se puede adoptar una modulación BPSK [49].

En la actualidad, DVB-S también denominado Sistema A por la UIT [30] es utilizado en servicios de empresas como Dish Networks, Sky Brasil, Sky México, entre otras.

A manera de resumen, el diagrama a bloques de transmisión para DVB-S es el siguiente [41]:

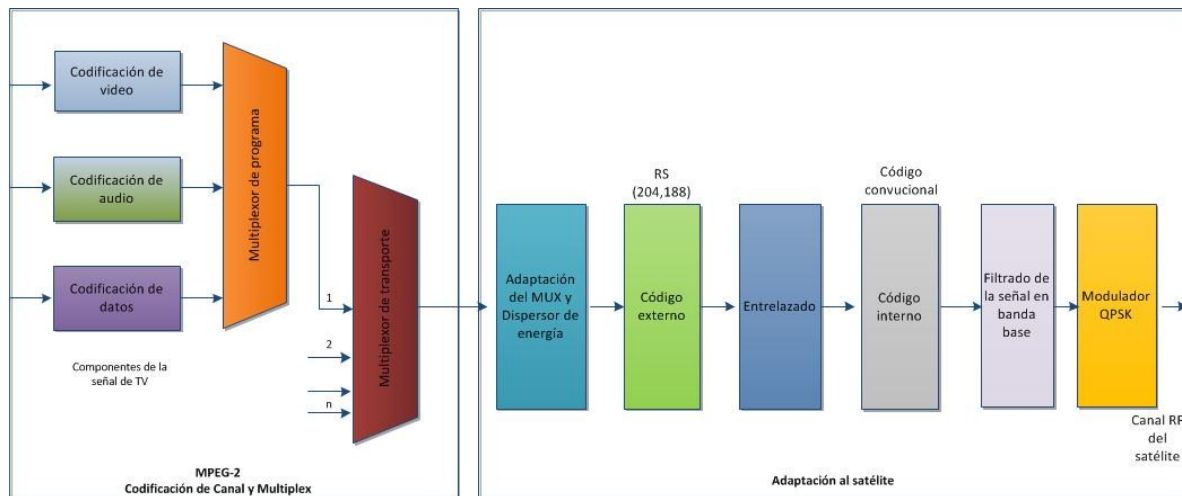


Figura 2.8. Diagrama a bloques de transmisión para DVB-S.

2.3. DVB-DSNG

La UIT define DSNG (*Digital Satellite News Gathering*) como una transmisión de radiodifusión temporal y ocasional de noticias de televisión o audio, usando estaciones terrenas móviles con antenas transmisoras portátiles [48]. El equipo debe de ser capaz de transmitir el o los programas de video generados en el sitio. Opcionalmente, el sistema puede ser capaz de proveer interacción entre los dos sitios de comunicación. Otra característica de este sistema es la facilidad de implementación del enlace, y la instalación del sistema, ambas posibles por el mismo número de personas.

La contribución de señales de televisión por satélite consiste en enlaces punto-punto o punto-multipunto que conectan estaciones terrenas fijas o portátiles. Los enlaces no están destinados para ser recibidos por la audiencia en general. La contribución es utilizada en enlaces entre los sitios donde ocurren hechos o noticias, y los estudios donde se edita el contenido para su distribución masiva.

La mayoría de las ocasiones, este tipo de transmisiones solo transportan un programa de televisión. Pese a esto, la flexibilidad del múltiplex o trama de transporte permite la transmisión múltiples programas de TV con su sonido asociado, incluyendo canales de audio y comentarios o servicios de datos.

En el año de 1998, el consorcio DVB propuso su segundo estándar para aplicaciones por satélite DVB-DSNG [12], extendiendo las funcionalidades y eficiencia espectral de DVB-S. DVB-DSNG tiene las mismas características de DVB-S en cuanto al formato de la trama de transporte, el aleatorizador para dispersar la energía, y el uso de protección contra errores basada en un código Reed-Solomon concatenado a un entrelazador y un código convolucional.

El sistema base incluye todas la características y formatos de transmisión especificados en el estándar DVB-S. No obstante, se encuentran adicionados otros modos de transmisión con esquemas de modulación 8PSK y 16QAM de tal manera que se puede mejorar la eficiencia espectral en ciertas aplicaciones comparando con QPSK.

Se deben de tomar en cuenta las siguientes notas al utilizar los esquemas de modulación de mayor orden:

- Se requiere mayor potencia de transmisión y mayor diámetro de antenas en la recepción debido a que aumenta la sensibilidad de la señal contra interferencias.
- Los nuevos esquemas de modulación, especialmente 16-QAM, son más sensibles a las distorsiones no lineales de transpondedores cerca del punto de saturación.
- Los convertidores de frecuencia de RF deben de ser de mejor calidad debido a que las señales son más sensibles a otras distorsiones como el ruido de fase. Si se utilizan tasas de símbolos bajas, la distorsión se puede agudizar.
- En general, los sistemas de transmisión y recepción deben de ser diseñados con mucho cuidado debido a que las señales son más propensas a afectaciones en su paso por el canal de transmisión.

El factor de *roll-off* del filtro de banda base es por lo común $\alpha=0.35$ con un valor opcional de $\alpha=0.25$ en el caso de las modulaciones 8PSK y 16QAM.

El sistema es flexible para diversos anchos de banda disponibles, ya sea de única portadora por transpondedor o múltiples portadoras.

La figura 2.9 representa de manera funcional todas las características de este estándar a la transmisión.

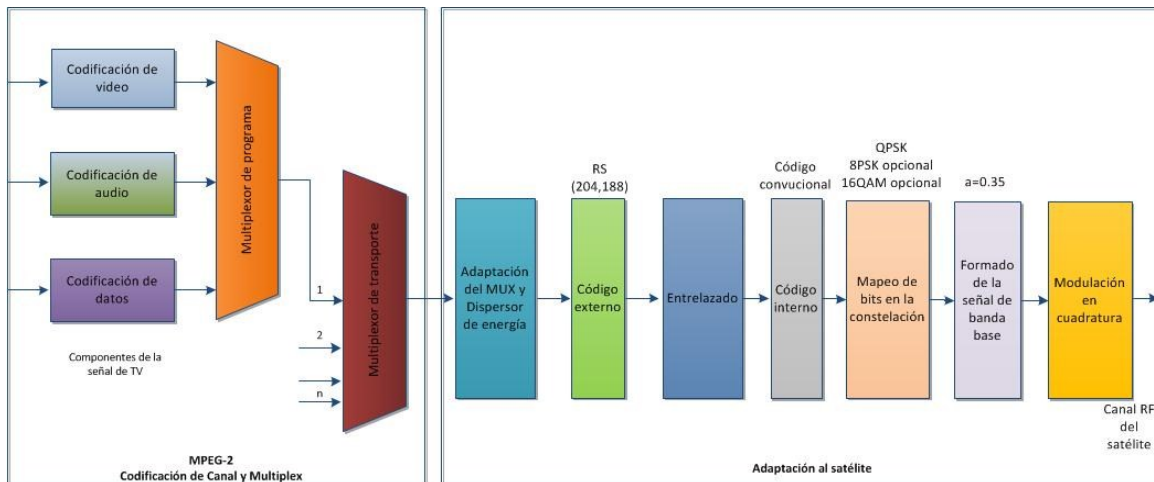


Figura 2.9. Diagrama de bloques de transmisión para DVB-DSNG.

2.4. DVB-S2

Los estándares de televisión por satélite han seguido una tendencia que engloba características de sus predecesores. Tal es el caso de DVB-DSNG con DVB-S. Pero la principal limitación de estos sistemas está dada por la eficiencia de los códigos de protección contra errores en el canal y el algoritmo de compresión de los contenidos audiovisuales.

Las investigaciones en el campo de las comunicaciones digitales, particularmente en el área de técnicas de corrección de errores, impulsaron nuevas innovaciones tecnológicas. Como resultado de esto, se lograron ofrecer servicios de mayor capacidad que llevaron a la DVB a definir en 2003 el estándar DVB-S2 [14] como la segunda generación de servicios por satélite. El estándar nuevo ya no está orientado totalmente a la radiodifusión de TV por satélite, sino que se desarrolló de acuerdo a las tendencias de convergencia en los servicios audiovisuales y de datos.

Existen 3 aplicaciones diferentes para DVB-S2:

- Radiodifusión de televisión SDTV y HDTV.
- Servicios interactivos, incluyendo acceso a internet, para aplicaciones de consumo.
- Distribución de contenidos de datos y servicio Internet.

Para lograr cubrir todas las áreas de aplicación para los que fue diseñado, DVB-S2 está estructurado como un conjunto de herramientas en el que se utilizan solamente las destinadas a un fin específico. Los conceptos claves de operación son una mejora en el desempeño a la transmisión con respecto a sus predecesores, flexibilidad de implementación y un receptor más complejo. Hablando en números, la ganancia en eficiencia con relación a los estándares DVB-S y DVB-DSNG para la transmisión de un canal de TV es del 30%. Esto se consigue gracias a la utilización de técnicas adaptativas tanto en la codificación como en la modulación [26].

En el caso del video, DVB-S2 puede manejar múltiples formatos de tramas de transporte, ya sean tramas de transporte MPEG o paquetes encapsulados en celdas ATM.

La generación de la señal en este estándar está basada principalmente en dos niveles de encapsulamiento de los datos:

- BBFRAME. Trama generada en el nivel de banda base, en la cual se transportan en conjunto con los datos una variedad de bits de señalización que configuran al receptor de acuerdo a la aplicación que se difunda.
- PLFRAME. Trama generada en el nivel físico de los datos, en la que se transportan unos pocos bits de señalización altamente protegidos bajo un esquema de modulación muy robusto (BPSK). Con esto se logra una sincronización alta y señalización al nivel de la capa física. En la carga útil, la modulación depende del tipo de datos transmitidos.

El diagrama a bloques funcional de un transmisor DVB-S2 es mucho más complejo que la primera generación. En la figura 2.10 se representa un diagrama de DVB-S2.

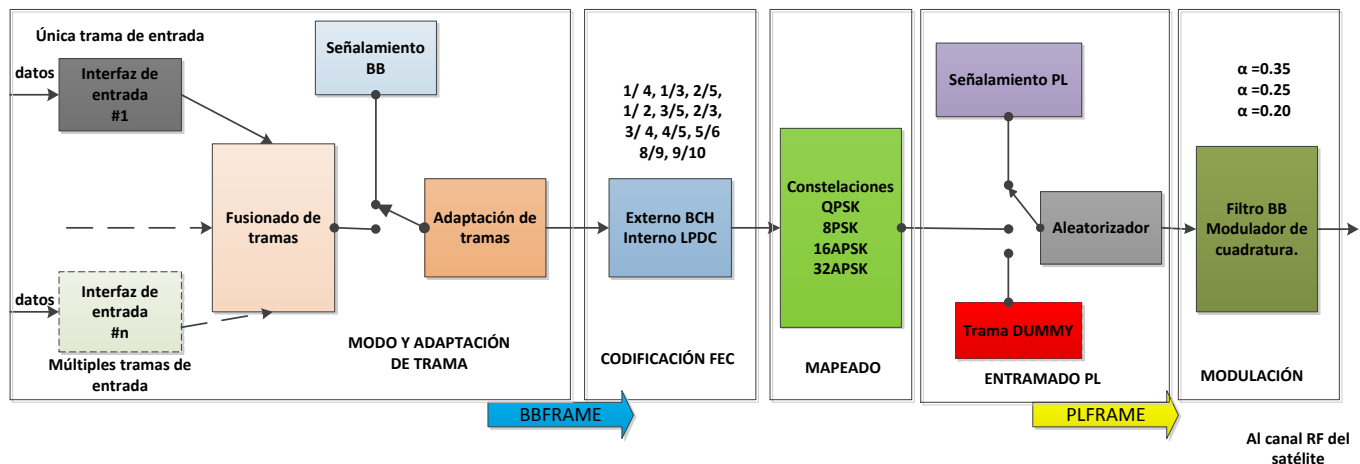


Figura 2.10. Diagrama de bloques de transmisión para DVB-S2.

Podemos englobar al esquema del transmisor en 4 bloques principales:

- *Modo, y adaptación de trama:* En esta parte, se reciben las señales de datos (en el caso de MPEG-2 o MPEG-4, tramas TS) que son encapsuladas y multiplexadas en un BBFRAME. Como parte de la señalización del BBFRAME, se indica el tipo del contenido transportado (paquetes o flujo continuo) y el tipo de codificación (adaptiva o continua). Finalmente se hace un proceso de aleatorización para distribuir la energía de la señal. En el caso de enlaces unidireccionales no es posible variar la tasa de codificación. Debido a esto, cuando se transmite con fines de *broadcast* la tasa permanece constante.
- *Codificador de FEC:* En esta etapa se aplica redundancia al BBFRAME mediante una serie de códigos concatenados. Esta es una de las claves del desempeño del estándar DVB-S2. Dependiendo de si la codificación es adaptiva o continua, se aplica un código interno

basado en códigos LDPC. El código externo es del tipo BCH y del mismo tamaño que el bloque de código interno. La capacidad de corrección es variable.

El codificador FEC genera bloques variables (FECFRAME) de tamaño entre 16 200 y 64 800 bits dependiendo de la capacidad de la información para soportar retardos. Las tasas de código que se pueden configurar son variables del tipo de modulación ocupada. Estas son:

- QPSK: $\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{3}{5}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{4}{5}, \frac{5}{6}, \frac{8}{9}$ y $\frac{9}{10}$.
- 8PSK: $\frac{3}{5}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{4}{5}, \frac{5}{6}, \frac{8}{9}$ y $\frac{9}{10}$
- 16APSK: $\frac{3}{5}, \frac{3}{4}, \frac{4}{5}, \frac{5}{6}, \frac{8}{9}$ y $\frac{9}{10}$
- 32APSK: $\frac{3}{4}, \frac{4}{5}, \frac{5}{6}, \frac{8}{9}$ y $\frac{9}{10}$

Si la opción de codificación adaptiva está activa, el código de protección puede variar entre una trama y otra. Para el caso de video codificado bajo las normas de MPEG, se requiere una BER de 10^{-7} para asegurar una buena recepción.

- **Mapeo de bits en constelaciones:** En esta etapa, nuevamente se distribuyen los datos y se modulan de acuerdo a la información que contenga el encabezado del FECFRAME. Si se especifica que la modulación es adaptiva, el esquema de modulación varía con el tiempo. En el caso de una señal de video para radiodifusión, se utilizan los esquemas QPSK y 8PSK. Nuevamente, en el caso de señales transmitidas de manera unidireccional, el esquema de modulación permanecerá constante. Tal es el caso de *broadcast*.

Cuando se utiliza DVB-S2 en aplicaciones de video profesional (como DSNG), se pueden aplicar los esquemas 16APSK y 32APSK, cuya eficiencia espectral es mucho mayor pero es necesario utilizar el transpondedor en una región de mayor linealidad en la transmisión.

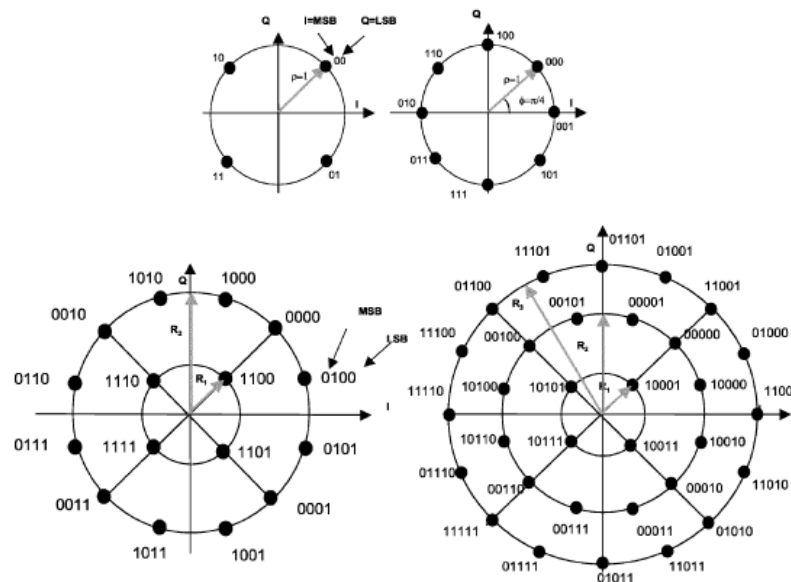


Figura 2.11. Esquemas de modulación de DVB-S2: QPSK, 8PSK, 16APSK Y 32APSK.

- *Entramado PL:* En esta parte de la transmisión, se divide la información en secuencias regulares de tramas. Cada trama tiene como inicio un encabezado de aproximadamente 90 símbolos, dependiendo del esquema de modulación, en el que se especifica el tipo de modulación de la carga útil, además de que se agregan bits de sincronía y señalización, permitiendo a los receptores recobrar de mejor manera la fase de referencia de la portadora. Los datos de los encabezados están protegidos por un poderoso código entrelazado conocido como “Red-Muller de primer orden”. La trama resultante de este bloque es conocida como PLFRAME
- *Modulación:* En esta etapa se traslada el espectro del PLFRAME a RF, pasando por un proceso previo de filtrado de Nyquist. En este caso, se definen en el estándar valores de *roll-off* de $\alpha=0.20, 0.25$ o 0.35 dependiendo de las restricciones de ancho de banda.

En el caso de este estándar, se observa que hay cambios considerables con respecto a las características de DVB-S en cuanto a los esquemas de modulación y corrección de errores.

El tipo de contenido que se puede trasladar en un BBFRAME no está restringido a un estándar de codificación en particular como es el caso de MPEG-2 en DVB-S y DVB-DSNG. Esto trae consigo ventajas debido a la posibilidad de implementación de códecs más recientes de audio y video como los definidos en la especificación MPEG-4.

Como se ha expuesto, DVB-S no es directamente compatible con DVB-S2 y esta es una de las principales razones por la que algunos proveedores de contenidos no han cambiado de tecnología. La reinversión en equipos de transmisión no es factible para muchos proveedores. Por el lado de la recepción, se requiere también una cuantiosa inversión en la sustitución de los equipos de los suscriptores que pueden llegar a ser millones. Los receptores compatibles con DVB-S2 si suelen ser compatibles con transmisiones en el estándar DVB-S.

En DVB-S2 existe un modo opcional de compatibilidad “hacia atrás” también denominado BC (*Backwards Compatible*) cuyo objetivo es combinar dos tramas de transporte en un solo canal. La primera trama sería de alta prioridad y compatible con DVB-S y DVB-S2, mientras que la segunda solamente sería compatible con DVB-S2 (figura 2.12). Este tipo de “retro-compatibilidad” puede ser logrado de dos formas:

- *Modulación por capas:* Las señales de DVB-S y DVB-S2 son combinadas en el canal de radiofrecuencia de manera asíncrona. El decodificador de DVB-S2 no requiere ninguna adaptación extra.
- *Modulación jerárquica:* Las tramas de transporte de alta y baja prioridad son combinadas de manera síncrona en una constelación 8PSK asimétrica. Se requiere un decodificador especial.

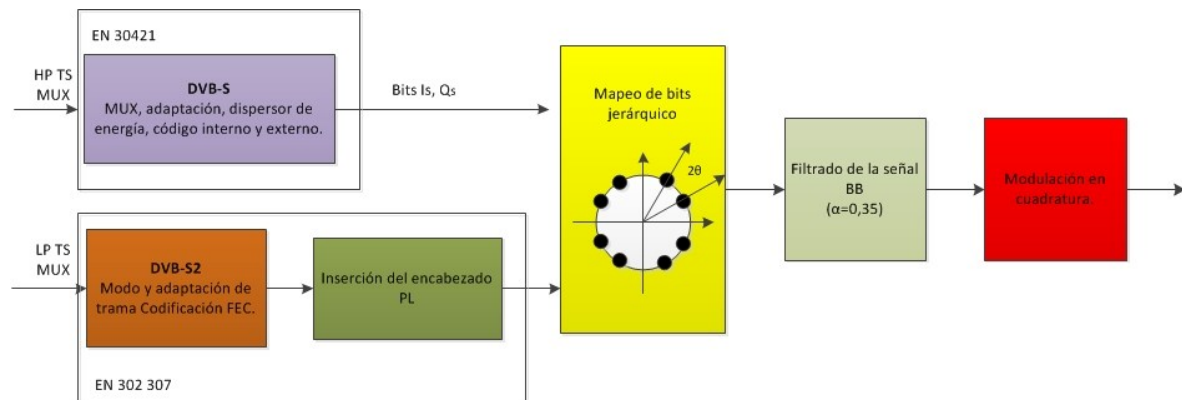


Figura 2.12: Esquema de bloques del modo opcional DVB-S2 BC.

En la figura 2.13 se observa un gráfico de la simulación del desempeño para DVB-S, DVB-DSNG Y DVB-S2 para una misma BER de 10^{-7} y un programa de 5Mbps sobre un canal AWGN. Se compara la relación de portadora a ruido con la eficiencia espectral (definida como tasa de datos de información por símbolo transmitido).

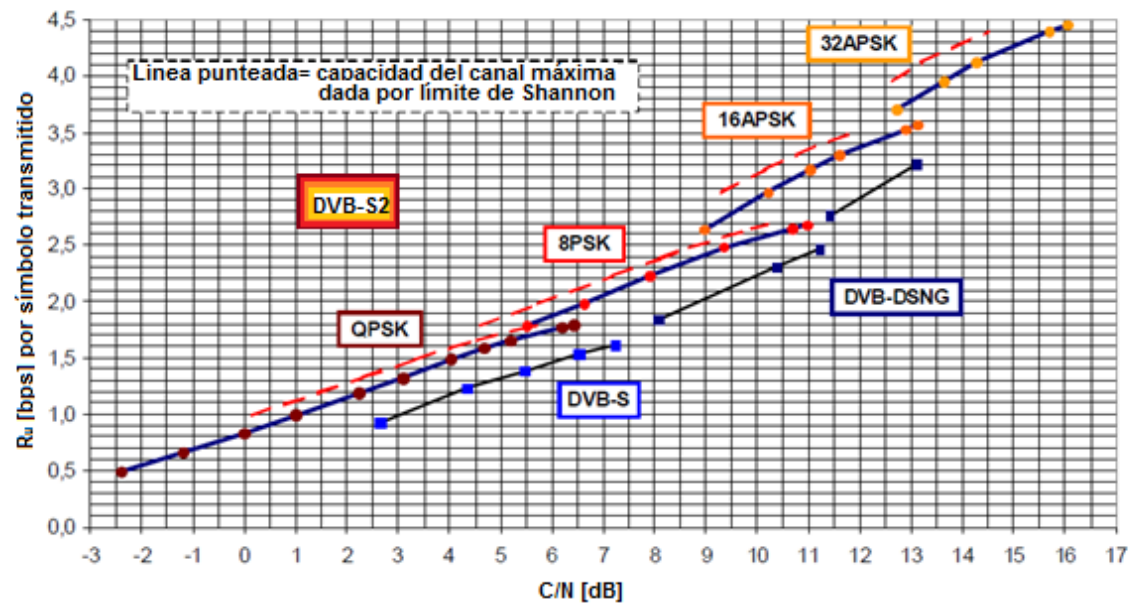


Figura 2.13. Tasa de datos de información (R_u) por símbolo vs C/N para DVB-S, DVB-DNSG Y DVB-S2.

En este caso, se observa que los esquemas manejados en DVB-S2 tienen una eficiencia de codificación cercana al límite teórico máximo (límite de Shannon). También se aprecia que se requiere un menor nivel de potencia en DVB-S2 comparando con la misma señal codificada en otro estándar con iguales niveles de calidad. Se observa que si el nivel de potencia es constante, la eficiencia espectral es mucho mayor para DVB-S2 que para DVB-S Y DVB-DSNG.

Al presente, la implementación de sistemas bajo el estándar DVB-S2 ha crecido tanto en sistemas de distribución como de contribución. Esto se ha dado gracias a 2 factores importantes. El primero fue la recomendación por parte de la UIT como la opción preferida para la implementación de un sistema digital de radiodifusión por satélite de configuración flexible [36]. El segundo factor que ha influido notablemente en la adopción de este sistema ha sido el bajo costo de derechos por licencia en los equipos bajo este estándar.

Con todo, no se ha previsto que DVB-S2 remplace en corto plazo a los sistemas DVB-S para aplicaciones de distribución convencionales. Existen millones de decodificadores DVB-S que están operando actualmente y son parte de una cadena de negocio muy rentable alrededor del mundo. El nicho de mercado mayor que encuentra DVB-S2 es la implementación de sistemas de HDTV con el códec H.264 y la transmisión de varios canales de STDV y HDTV en un mismo múltiplex.

DVB-S2 deja abierta la puerta a nuevas posibilidades de interacción a los usuarios de los contenidos transmitidos bajo el estándar. En caso de contar con un canal de retorno, se pueden variar los esquemas de codificación y modulación dependiendo de las características del canal de comunicaciones aumentando la disponibilidad y cantidad de información transmitida.

2.5. DVB-RCS y DVB-SH

Dentro de las normas del consorcio DVB existen otros estándares usados en servicios por satélite enfocados para aplicaciones particulares.

El estándar DVB-RCS (*Digital Video Broadcasting Return Channel Satellite*) o ETSI EN 301 790 [13] define los protocolos de comunicación en un sistema dúplex usando como canal de retorno el satélite. Para lograr esto se usan VSATs (*Very Small Aperture Terminal*), que son estaciones terrenas utilizadas para la transmisión de datos con antenas relativamente pequeñas (hasta 2 metros dependiendo de la banda de frecuencias). DVB-RCS provee al usuario de un enlace por satélite con tasas de transmisión-recepción asimétricas sin la necesidad de cables, haciendo factible su implementación en lugares donde hay poca infraestructura terrestre.

Dependiendo de los parámetros del enlace, se pueden llegar a conseguir velocidades de 20Mbps para el enlace descendente y 5 Mbps para el enlace ascendente. El estándar es flexible a varias topologías de red y es capaz de involucrar *hand-overs* entre satélites o huellas de cobertura y técnicas de espectro disperso. En la figura 2.14 está dibujado un esquema simple en bloques de la estructura del enlace ascendente de DVB-RCS.

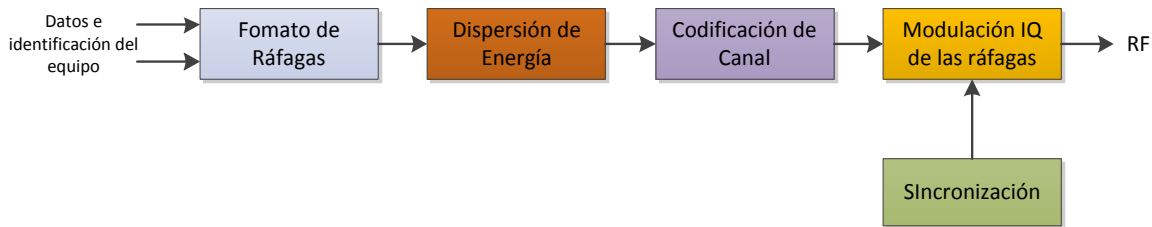


Figura 2.14. Diagrama a bloques de un enlace de retorno al satélite DVB-RCS

La información generada en la terminal del usuario es encapsulada y al igual que en los otros estándares, pasa por un proceso de adaptación al canal que consiste en agregarle protección contra errores y modularla en fase para su transmisión. La información que se genera en el terminal del usuario es muy poca en comparación con el enlace descendente. Por ello, se implementó como técnica de acceso MF-TDMA (*Multiple Frequency Time Division Multiple Access*). Así pues, las solicitudes que se generen en la terminal requieren estar en sincronía y pueden ser enviadas a alguno de los bloques de frecuencia libres que disponga el satélite para éstas.

Debido la inmensa cantidad de posibilidades que representa contar con un enlace Full-Duplex en un sistema DVB, para RCS se han definido numerosos formatos de transporte para los datos del enlace ascendente. Así pues, hay características definidas para tramas de transporte MPEG, DVB-S2, ATM, paquetes IP, etc.

El estándar DVB-SH (*Digital Video Broadcasting - Satellite services to Handhelds*) o ETSI EN 302 583 [15] es una especificación que se definió para la recepción de contenidos de televisión por satélite a dispositivos móviles portátiles. La banda de frecuencias utilizada por este servicio es la denominada S (2 a 4GHz) Este estándar trabaja en conjunto con DVB-H que está enfocado a transmisores terrestres y trabaja en la banda UHF. Esto último es una de sus principales cualidades, pues se garantiza una buena recepción mediante el uso de diversos medios de transporte de la información.

El estándar DVB-SH se clasifica en 2 tipos:

- SH-A: Utiliza el multiplexaje por frecuencias ortogonales (OFDM) para los enlaces terrestres y por satélite. Está basado en el estándar de televisión digital terrestre DVB-T
- SH-B: Utiliza TDM en el enlace con el satélite y OFDM en el enlace terrestre. El enlace por satélite está pensado basándose en las características del estándar DVB-S2.

El multiplexaje OFDM proporciona excelentes características para la radiodifusión terrestre afectada principalmente por fenómenos como las multitrayectorias. En cambio, TDM tiene mayores ventajas en la emisión por satélite.

Las dos variantes de DVB-SH requieren de diferentes arquitecturas tanto en los transmisores como en los receptores, principalmente en los moduladores y demoduladores (figura 2.15). La adopción entre un sistema y otro depende principalmente de las características del satélite y de consideraciones regulatorias. Así por ejemplo, sería más conveniente usar la variante SH-A en satélites de órbitas bajas y SH-B en satélites geoestacionarios.

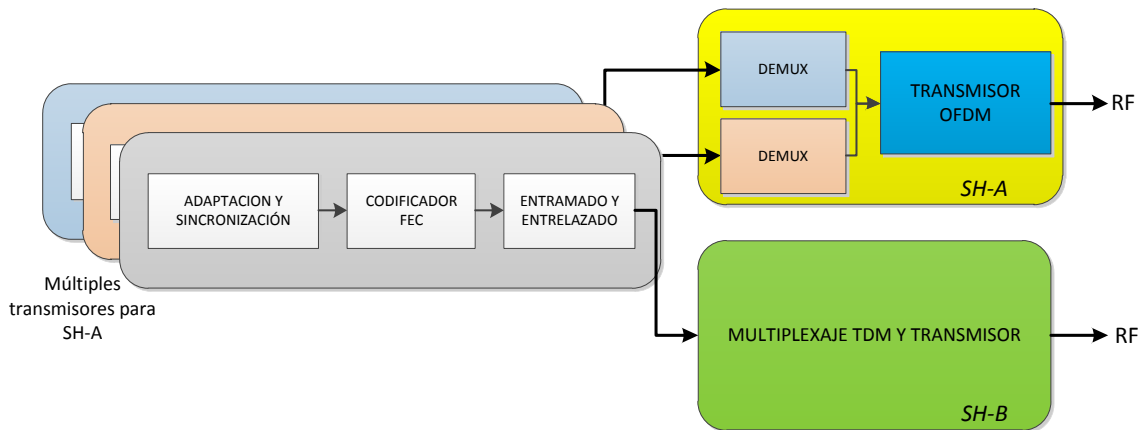


Figura 2.15. Esquema de transmisión para el estándar DVB-SH.

En el caso de la recepción en equipos móviles y debido a las características de la banda de frecuencias usada, en el estándar se han previsto los fenómenos asociados a las comunicaciones móviles como las fluctuaciones por multitrayectorias en la propagación. En el caso de la variante SH-A, es necesario contar con más de un transmisor que genere la información de manera simultánea y en la misma frecuencia, pero en un punto distinto. Siendo capaces de medir y controlar el retardo de las transmisiones, se puede lograr una red de frecuencia única (*Single Frequency Network*) que aumenta los niveles de señal recibida en la terminal móvil.

Para el caso de la variante SH-B, solamente es necesario un transmisor que multiplexe una o varias tramas de transporte y las transmita hacia un segmento asignado al satélite.

En ambos casos, las señales transportadas bajo este estándar pasan por un proceso de adaptación al canal que consiste básicamente en empaquetar la información, aplicar un código de protección contra errores (basado en turbocódigos), multiplexaje de capa 2 (OFDM o TDM), modulación (QPSK, 8PSK, 16APSK o 16QAM) y transmisión.

En el caso de DVB-SH, existen en la actualidad algunos proveedores de servicio en Estados Unidos y Japón. Sin embargo, aún no hay un mercado maduro para estos y algunas empresas han enfrentado serios problemas económicos que las obligan a replantear su modelo de negocios.

Como resumen, DVB-RCS y DVB-SH proveen de diversas soluciones para segmentos de mercado de radiodifusión en donde las características de otros estándares no son muy buenas o no están definidas.

2.6. ISDB-S

ISDB (*Integrated Services Digital Broadcasting*) fue creado en Japón para la transmisión de radio y televisión digital. Está sustentado por la organización conocida como ARIB (*Association of Radio Industries and Businesses*), que creo diferentes estándares libres representados en la figura 2.16.

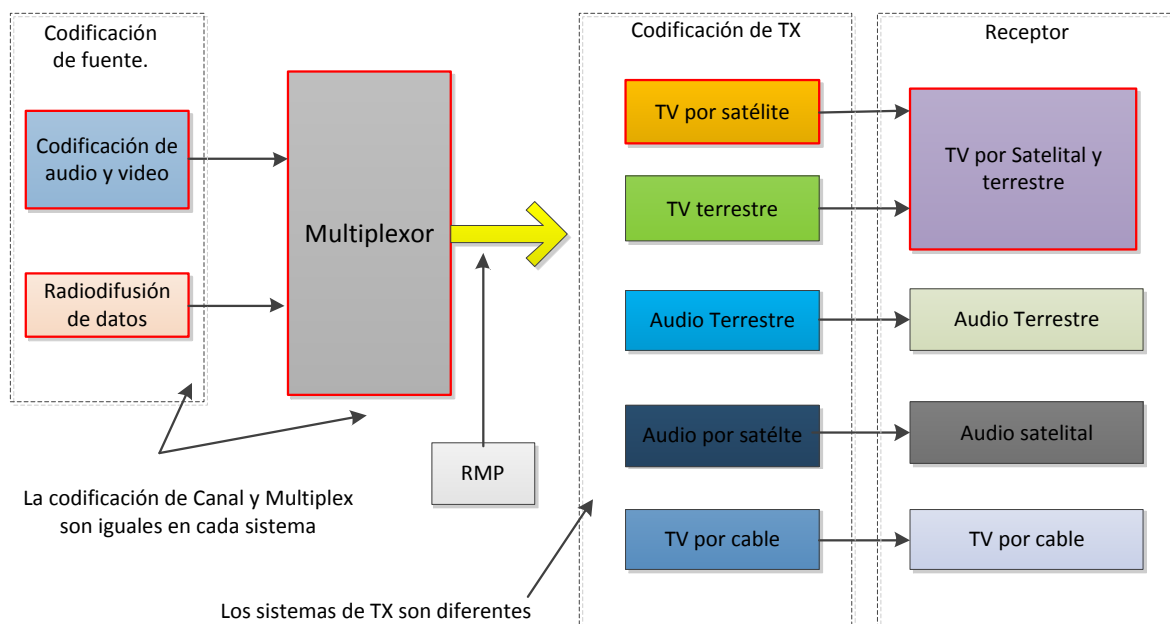


Figura 2.16. Diagrama a bloques de los diferentes estándares denominados como ISDB.

De la misma manera que la norma europea DVB, ISDB cuenta con una gama de estándares dependiendo del medio de transmisión. Los más conocidos son el de televisión terrestre ISDB-T, el de televisión satelital ISDB-S y el de televisión por cable ISDB-C [20, 45].

Como en los demás consorcios, los bloques de codificación de fuente y multiplexaje tienden a funcionar de la misma manera sin importar el medio. La diferencia real entre un estándar terrestre con uno de cable o satelital radica en el bloque de transmisión. Ya que se busca optimizar la transmisión, el procesamiento de la señal es otro debido a los diferentes factores que se presentan en cada medio.

La radiodifusión digital por satélite en Japón comenzó a finales del año 2000, donde es conocida como BS (*Broadcasting Satellite*). El sistema que se desarrolló siempre estuvo enfocado en la transmisión de señales de alta definición y de servicio multimedia.

ISDB-S fue estandarizado en la UIT-R bajo la recomendación BO.1408 [35] y opera en las bandas de BSS de 11.7 a 12.2 GHz. De acuerdo a nomenclatura de la UIT, también se le puede denominar sistema D para DTH [30].

En cuanto al formato de los contenidos audiovisuales ISDB-S adoptó MPEG-2. Para la transmisión de señales HDTV con resoluciones de 1080i o 720p es utilizada la combinación MP@HL. Para SDTV de 480p MP@H14 y para 480i MP@ML. Esto debido a los requerimientos de tasa de bits de las señales que van desde 8 hasta más de 22 Mbps.

Para la codificación de audio se utiliza MPEG-2 AAC por su calidad y altos niveles de compresión que maneja comparado con MPEG-2 BC.

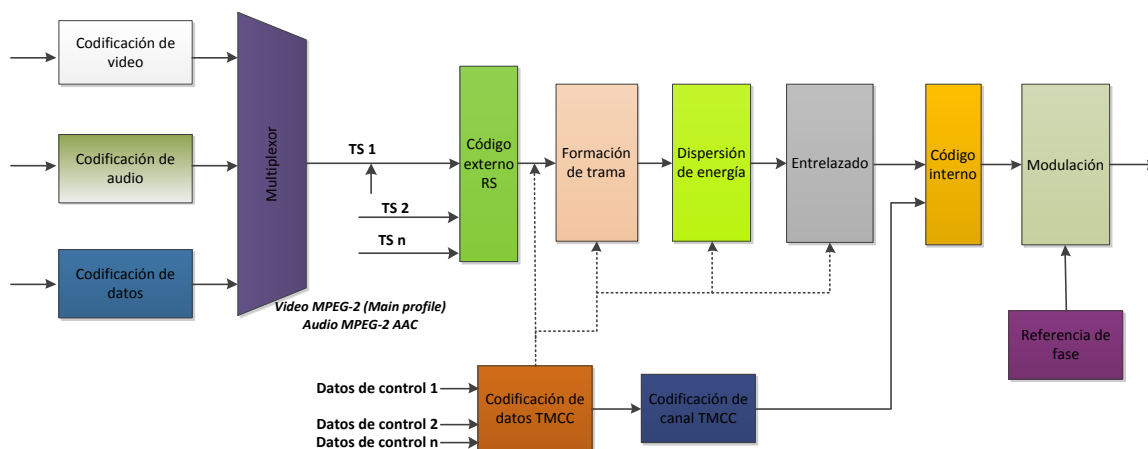


Figura 2.17. Diagrama a bloques transmisión ISDB-S.

En la figura 2.17 se presenta el diagrama a bloques del sistema ISDB-S, a continuación se explicaran brevemente los bloques correspondientes a la codificación de canal:

- En la parte de corrección de errores se utiliza un codificador de FEC adaptivo, el cual tiene la facultad de cambiar de un esquema a otro dependiendo de las circunstancias. Como código interno se adoptó un código convolucional para modulaciones QPSK y BPSK y un código especial llamado código de Trellis para modulación 8PSK. Como código externo se utiliza un código Red Solomon (188, 204, 8).
- El esquema de modulación que este estándar agrega es conocido como TC8PSK (*Trellis Code Eight Phase Shift Keying*) y tiene el objetivo de mejorar la capacidad de transmisión lo más posible y permitir múltiples tramas de transporte sobre una misma portadora.

TCM (*Trellis Code Modulation*) cambia los esquemas de modulación tradicionales incorporando un nuevo parámetro, la distancia de las secuencias de símbolos. La idea principal es combinar la codificación y la modulación [61, 68].

El ancho de banda se conserva, al igual que la tasa de símbolos. Lo que se hace es duplicar el número de símbolos en la modulación para con ello introducir una redundancia. El aumentar el número de símbolos nos haría pensar en un aumento en la probabilidad de error, pero ya que existe una fuerte correlación entre los símbolos, solamente ciertas secuencias son permitidas. Con ello, estaríamos agregando redundancia sin incrementar el ancho de banda.

Otra característica particular de ISDB-S es que permite controlar los sistemas de transmisión. En otras palabras, controla qué esquema de modulación se ocupará además del número de ranuras definidas para cada TS. A esto se le conoce como TMCC (*Transmission and Multiplexing Configuration Control*).

Se pueden seleccionar entre 7 esquemas de modulación y codificación:

- TC8PSK, FEC: $\frac{2}{3}$
- QPSK, FEC: $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{5}{6}$, $\frac{7}{8}$.
- BPSK, FEC: $\frac{1}{2}$

El factor de *Roll-off* del filtro coseno elevado es de 0.35.

La televisión digital por satélite entró a Japón mediante los servicios ofrecidos por la compañía *PerfectTV* la cual hacía uso del estándar DVB-S en octubre del 1996 y por *DirecTV* que también utilizaba DVB-S, en diciembre de 1997. Pero las principales compañías regionales de radiodifusión como *NHK*, *Nippon Televisión*, *TBS*, *Fuji Televisión*, *TV Tokio*, entre otras nunca estuvieron satisfechas con el desempeño del estándar. En consecuencia ARIB desarrolló ISDB-S que como ya se describió anteriormente fue aceptado por sus características enfocadas a transmitir señales de alta definición.

Hoy en día *SKYPerfectTV!*, sucesor de *Skyport TV*, *SkyD*, *CS burn*, *DirectTV* y *PerfectTV!* hacen uso de ISDB-S y se ha convertido en el principal operador satelital de Japón. *SKY Perfect JSAT* cuenta con 14 satélites con cobertura sobre Japón y gran parte de Asia así como Oceanía y Norte América, proporcionando programación de TV abierta y de prepago a miles de usuarios.

2.7. ATSC A/81

ATSC (*Advanced Television Systems Committee*) fue formado en el año 1982 por varias asociaciones norteamericanas. En la actualidad está conformada por aproximadamente 140 miembros de sectores como la radiodifusión, equipos de transmisión, electrónica, cableado, servicios satelitales, semiconductores entre otros.

Los estándares de televisión digital del consorcio ATSC incluyen señales de HDTV, SDTV, emisión de datos, audio multicanal y radiodifusión satelital DTH (*Direct To Home*).

El sistema trata de comprender dos partes: el sistema de transmisión y el receptor/decodificador. El sistema de transmisión comprende a un multiplexor de transporte, un modulador y una etapa de codificación. Las especificaciones para el modulador y la etapa de codificación no fueron vistas como necesarias para los propósitos del estándar y fueron dejadas a elección del proveedor de servicios para su implementación [1,2].

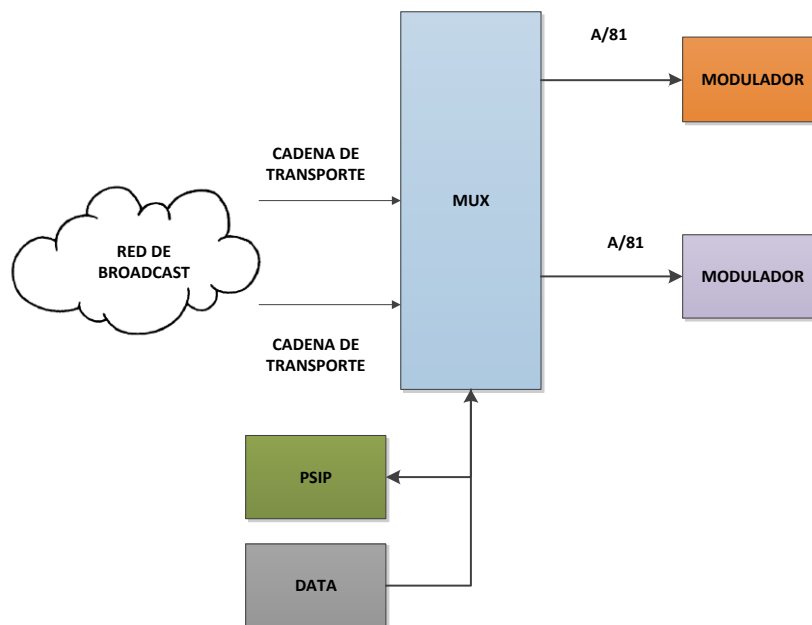


Figura 2.18.Diagrama del sistema ATSC

En la práctica, este sistema nunca ha sido implementado debido al surgimiento posterior de DVB-S2. Por otro lado, ATSC A/81 no aporta mejoras sustanciales a la eficiencia comparándose con DVB-S por lo que desde un principio se encontró en un panorama complicado para su evolución. De hecho ATSC A/81 fue pensado más como una adaptación de compatibilidad de las extensiones de audio, video, transporte y los servicios de información definidos en los documentos A/53B y A/65A.

2.8. Otros estándares de televisión digital por satélite.

La evolución hacia los estándares que conocemos actualmente es producto de los años y de cientos de personas dedicadas a la evaluación e investigación de nuevas técnicas en las comunicaciones. Algunos estándares como los de DVB e ISDB no partieron desde cero, pues tiempo antes de su publicación, ya se había trabajado con formatos de transmisión análogos o híbridos (parte análoga y parte digital) como MAC (estándar europeo predecesor de DVB-S y DVB-T) y *MUSE* (estándar japonés predecesor de ISDB). En el caso de Estados Unidos, estos fueron los primeros en implementar un sistema totalmente digital que a su vez fue comercialmente exitoso: DSS (*Digital Satellite Service*).

DSS es un estándar privado desarrollado por la empresa estadounidense *Hughes Electronics Corporation* y usado por *DirecTV* para la radiodifusión directa al hogar de televisión en el territorio de Estados Unidos. Fue lanzado en 1994 y ha sido paulatinamente sustituido por DVB-S2. Este estándar fue difundido antes que la especificación MPEG-2, no obstante está basado en un esquema de codificación similar a veces referido como “MPEG 1.5”. A pesar de su carácter privado, este estándar tuvo una penetración grande, debido al tamaño y población de Estados Unidos, por lo que la UIT lo catalogó como el sistema B de televisión directa al hogar [30].

Contemporáneo a DSS, surgió el competidor denominado por la UIT como sistema C [30]. El nombre comercial de este sistema es *Digicipher II*. Este servicio fue ofrecido por la empresa canadiense *StarChoice* desde el año de 1997.

La tabla de la figura 2.19 resume y compara las características disponibles de DSS, *Digicipher II* y DVB-S.

Parámetro	Sistema A (DVB-S)	Sistema B (DSS)	Sistema C (Digicipher II)
Códec de video	MPEG-2 MP@ML	MPEG 1.5	MPEG-2 MP@ML
Códec de audio	MPEG-1 Capa 2	Dolby AC-3	Dolby AC-3 MPEG-2 capa 1 y capa 2
Multiplexaje	MPEG Transport Stream	Propietario	MPEG Transport Stream
Tamaño del paquete de transporte	188 bytes	130 bytes	188 bytes
Servicios De Información	DVB-SI (ETSI 300 468)	Propietario	ATSC A/56; DVS-011
Código externo	RS(188,204,8)	RS(130,146,8)	RS(188,204,8)
Código interno	Convolucional (FEC: $\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{5}{6}, \frac{7}{8}$)	Trellis (FEC: $\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{5}{6}, \frac{7}{8}$)	Convolucional (FEC: $\frac{5}{11}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{5}{6}, \frac{7}{8}$)
Ancho de banda del transpondedor	Hasta 54 MHz	27MHz	No definido
Roll-Off	0.35 (coseno elevado)	0.2 (coseno elevado)	0.55 y 0.33 (Butterworth de 4º orden)
Esquema de modulación	QPSK	QPSK	QPSK
Tasa de símbolos	1 a 45 Ms/s (promedio)	20Ms/s	19.5 a 29.3 Ms/s

Figura 2.19. Tabla comparativa de estándares DVB-S, DSS y Digicipher II.

Actualmente, *DirecTV* opera bajo el estándar DVB-S2 (con algunas modificaciones menores) y es una de las compañías con mayor penetración de servicios directos al hogar en América. Por su parte *StarChoice* fue absorbida por la compañía *Shaw Communications Inc.* que es uno de los principales proveedores de servicios de telecomunicaciones en Canadá.

En el campo de las comunicaciones móviles, existe otra variante similar a DVB-SH denominada S-DMB (*Satellite-Digital Multimedia Broadcasting*) la cual es parte de un proyecto nacional de Corea del Sur que consiste en la recepción de contenidos multimedia en dispositivos portátiles. La parte de este estándar, enfocada a la transmisión de contenidos por satélite define como características técnicas el uso de 15MHz en la banda S con una capacidad de unos 18 canales de datos con velocidades de 128kbps. Con el fin de garantizar la recepción correcta tanto en interiores como exteriores, es necesario incluir repetidores de señal terrestres, especialmente en entornos urbanos [54].

Para poder transportar los contenidos multimedia, el estándar S-DMB incorpora varias herramientas de corrección de errores y transporte como códigos Reed-Solomon y paquetes MPEG TS. Los contenidos son codificados bajo el estándar MPEG-4. En marzo de 2004 se lanzó el satélite *MBSat1* que provee los servicios del sistema S-DMB en Corea del Sur y Japón.

Por su parte, el gobierno chino inició sus trabajos de investigación y desarrollo de un estándar de televisión digital DTH. A la especificación se le conoce como ABS-S. De acuerdo a su documentación, ABS-S soporta varios servicios y aplicaciones que varían desde radiodifusión de TV digital hasta distribución de datos para servicios interactivos. Comparado con DVB-S2, los sistemas ABS-S son de menor complejidad y menor costo. Este sistema tiene como intención ser implementado en regiones rurales o con cobertura limitada del país asiático. El encapsulado y la protección contra errores (basada en códigos LDPC) de ABS-S, alcanza desempeños comparables con DVB-S2 apuntando la menor complejidad del primero. Con todo, podría considerarse que el estándar ABS-S está basado en los mismos principios que su homólogo Europeo y no tiene alguna ventaja operativa que le acredite mayor valor a su estudio en nuestro entorno [46].

2.9. Comparativa de estándares principales

De acuerdo a lo estudiado, en televisión por satélite de servicio fijo o de radiodifusión existen 3 estándares implementados a gran escala. En la tabla de la figura 2.20 se resumen las características principales de estos.

Parámetro	DVB-S	DVB-S2	ISDB-S
Códec de video	MPEG-2	MPEG-2, MPEG-4	MPEG-2
Códec de audio	MPEG-1 Capa 2 Dolby AC-3 (como datos de programa)	AAC, AC-3, MPEG-1	MPEG-2 AAC
Multiplexaje	MPEG Transport Stream	MPEG Transport Stream, ATM, IP	MPEG Transport Stream
Tamaño del paquete de transporte	188 bytes	Variable dependiendo del multiplexaje	188 bytes
Código externo	RS(188,204,8)	BCH variable	RS(188,204,8)
Código interno	Convolucional (FEC: $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{5}{6}$, $\frac{7}{8}$)	LDPC (FEC: $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{2}{5}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{5}{6}$, $\frac{8}{9}$ y $\frac{9}{10}$).	8PSK: Trellis QPSK, BPSK: Convolucional
Ancho de banda del transpondedor	Hasta 54 MHz	Variable	27MHz o 36MHz
Roll-Off	0.35 (coseno elevado)	0.20, 0.25, 0.35 (coseno elevado)	0.35 (coseno elevado)
Esquema de modulación	QPSK, BPSK(opcional)	QPSK, 8PSK, 16APSK o 32APSK	BPSK, QPSK, TC8PSK
Tasa de símbolos	1 a 45 Ms/s (promedio)	Variable	28.86 Ms/s

Figura 2.20. Tabla comparativa de DVB-S, DVB-S2 e ISDB-S

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE SISTEMAS DE TELEVISIÓN DIGITAL VÍA SATÉLITE

Una herramienta fundamental a la hora del diseño de un sistema de comunicaciones por satélite es el cálculo de enlace. Este término se refiere al proceso matemático para calcular los niveles de señal de un canal satelital tomando en cuenta los niveles de potencia, amplificadores, diferentes factores de atenuación, entre otros parámetros.

El objetivo de un cálculo de enlace es obtener los niveles de potencia necesarios para que nuestro enlace satelital pueda efectuarse correctamente. Para ello intervienen diferentes factores físicos, aquellos procesos aplicados a la señal tanto en las estaciones terrenas como en el satélite, así como la ubicación geográfica de las estaciones.

Un enlace satelital para su estudio se puede dividir en tres partes:

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

La figura 3.1 muestra los elementos de análisis principales que intervienen en un enlace satelital. Cada parte del sistema de comunicaciones aporta ciertos parámetros al cálculo de enlace.

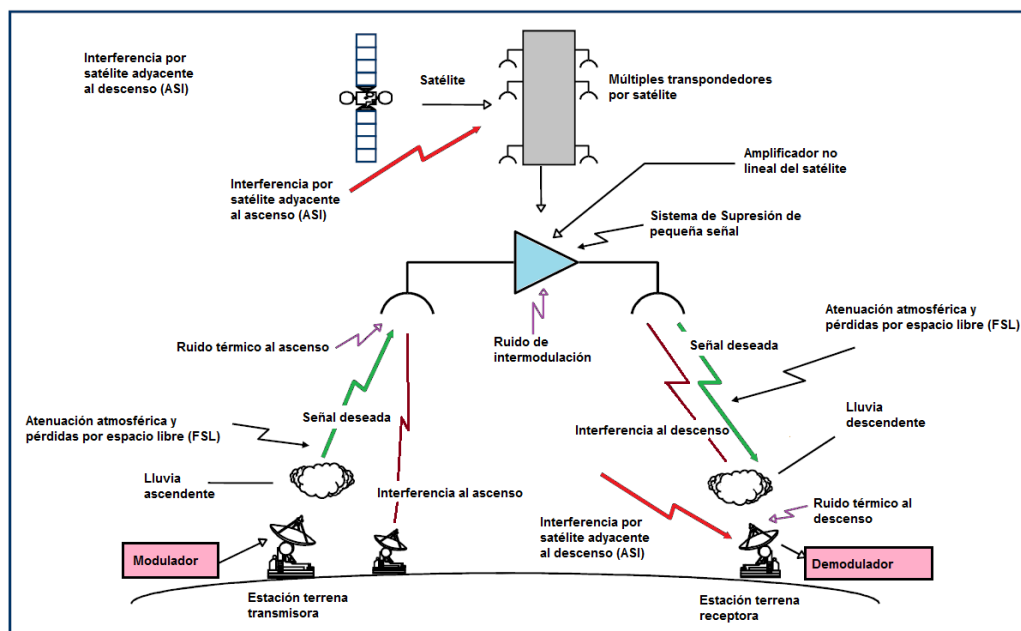


Figura 3.1.: Elementos de análisis para un enlace satelital.

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

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

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

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

Por último en la E/T receptora:

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

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

Las pérdidas que generalmente se toman en cuenta son:

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

3.1. Método para el cálculo de enlace.

El cálculo de enlace se dividirá esencialmente en tres partes [27]. El cálculo de la relación portadora a ruido ascendente (C/N_{asc}), el cálculo de la relación portadora a ruido descendente (C/N_{desc}) y la relación portadora a ruido total (C/N_{total}).

Una vez obtenido este valor se realiza la evaluación del enlace, el cual se puede realizar determinado el margen de enlace. Este parámetro indica la calidad total del enlace, tomando en cuenta la calidad o C/N esperada o requerida y el valor de C/N_{total} .

3.1.1 Enlace ascendente.

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

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

$PIRE_{E/T}$.

Este valor corresponde a la de potencia isotrópica radiada efectiva de la E/T y se puede calcular como el producto de la potencia de transmisión P_{tx} y la Ganancia de transmisión G_{tx} .

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

G/T_{SAT} .

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

K

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

LS_{asc}

Se refiere a las pérdidas en el espacio libre ascendentes. Este valor corresponde a las pérdidas de potencia más grandes de un enlace satelital debido a las enormes distancias que recorre el enlace.

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

Dónde: f = frecuencia ascendente en Hz.

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

C= velocidad de la luz.

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

μ_{asc}

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

Existen varios modelos matemáticos para el cálculo de este valor como el realizado por Crane, el de la UIT-R, etc. El modelo ocupado por laUIT es un modelo empírico, se basa en obtener curvas que coincidan o se asemejen a las gráficas obtenidas con los datos previamente medidos. Por ello, un factor importante para obtener datos exactos es tener datos estadísticos suficientes.

$L\Delta_{asc}$

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

Una vez obtenido el valor de $C/N_{0\ asc}$ se obtiene el valor de C/N_{asc} con la siguiente relación:

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

En donde AB corresponde al ancho de banda del enlace y se obtiene por medio de diferentes factores dependiendo del tipo de información transportada.

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

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

3.1.2 Enlace Descendente

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

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

PIRE SAT.

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

G/TE/T.

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

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

Siendo: GRX = Ganancia de la antena receptora.

Ts= Temperatura de ruido total del sistema receptor.

K

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

LS_{desc}

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

$$Ls_{desc} = 20 \log \left(\frac{4\pi \cdot f_{desc} \cdot D}{C} \right)$$

μ_{desc}

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

$L\Delta_{desc}$

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

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

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

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

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

3.1.3 Evaluación del Enlace

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

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

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

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

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

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

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

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

3.2. Cálculo de pérdidas por propagación.

Las pérdidas de propagación en un trayecto Tierra-espacio con relación a las pérdidas en el espacio libre, son la suma de distintas aportaciones como [37]:

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

Cada una de estas aportaciones tiene sus propias características en función de la frecuencia, la ubicación geográfica y el ángulo de elevación.

En general, para ángulos de elevación por encima de 10°, únicamente la atenuación gaseosa, la atenuación debida a la lluvia y las nubes y posiblemente el centelleo tendrá importancia, dependiendo de las condiciones de propagación.

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

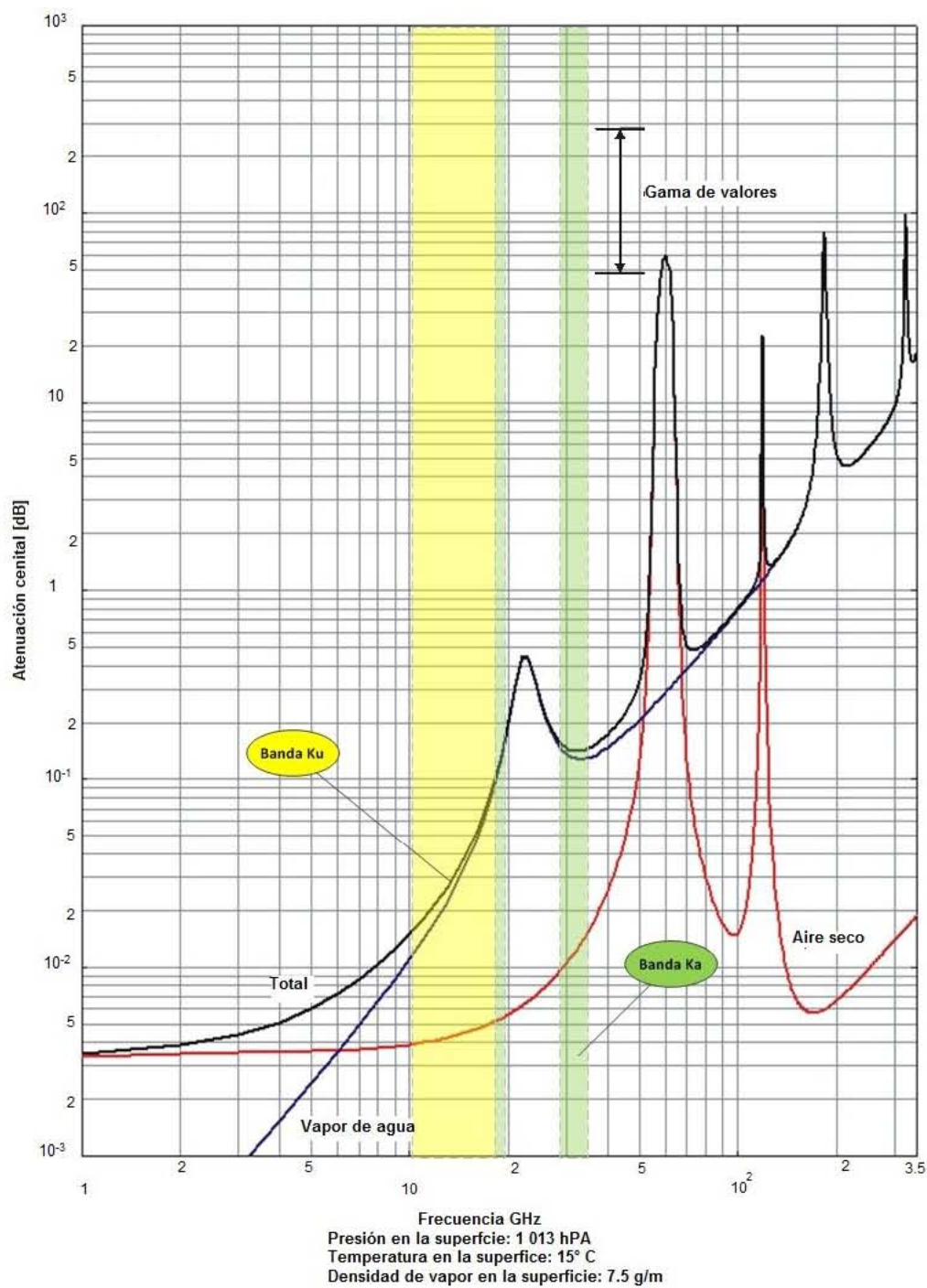


Figura 3.2. Atenuación cenital vs. frecuencia.

Como podemos ver en la figura 3.2 en la banda Ka se incrementan algunos fenómenos de atenuación de las ondas electromagnéticas con respecto a otras de menor frecuencia. La atenuación por lluvia es mayor que en el caso de un enlace en banda Ku. Esto conlleva a que los

sistemas necesitan un cálculo y predicción más preciso con la finalidad de hacerlos más eficientes tanto en funcionamiento como en costo.

El uso de la banda Ka de frecuencias implica que se tengan que entender nuevos problemas y retos: los fenómenos de propagación afectan más fuerte a las señales que son transmitidas y es necesario el desarrollo de nueva tecnología. Por otra parte, para garantizar la alta capacidad y disponibilidad de los enlaces de transmisión, es necesario utilizar modulaciones y codificaciones adaptivas.

Suponiendo un diseño de sistemas de satélites convencionales, la PIRE se determina teniendo en cuenta los requisitos del margen del enlace para alcanzar los objetivos de disponibilidad. La PIRE necesaria podría ser demasiado grande para que el sistema de satélites fuera factible.

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

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

El modelo de cálculo de atenuación que tuvo mejores aproximaciones a los experimentos del ACTS fue una variante extendida del método UIT-R, el modelo DAH (Dissanyake, Allnutt, Haidaral). Actualmente, y desde 1999, la recomendación UIT-R 618-10 (aprobada en 2009) ya toma en cuenta las consideraciones del modelo DAH [21].

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

Se precisan conocer los parámetros siguientes, algunos de ellos se muestran en la figura 3.3:

- $R_{0.01}$: Intensidad de la lluvia en el punto de que se trate, para el 0,01% de un año medio (mm/h)
- h_s : Altura de la estación terrena sobre el nivel medio del mar (km)
- θ : Ángulo de elevación (grados)
- ϕ : Latitud de la estación terrena (grados)
- f : Frecuencia (GHz)
- R_e : Radio efectivo de la Tierra (8 500 km)

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

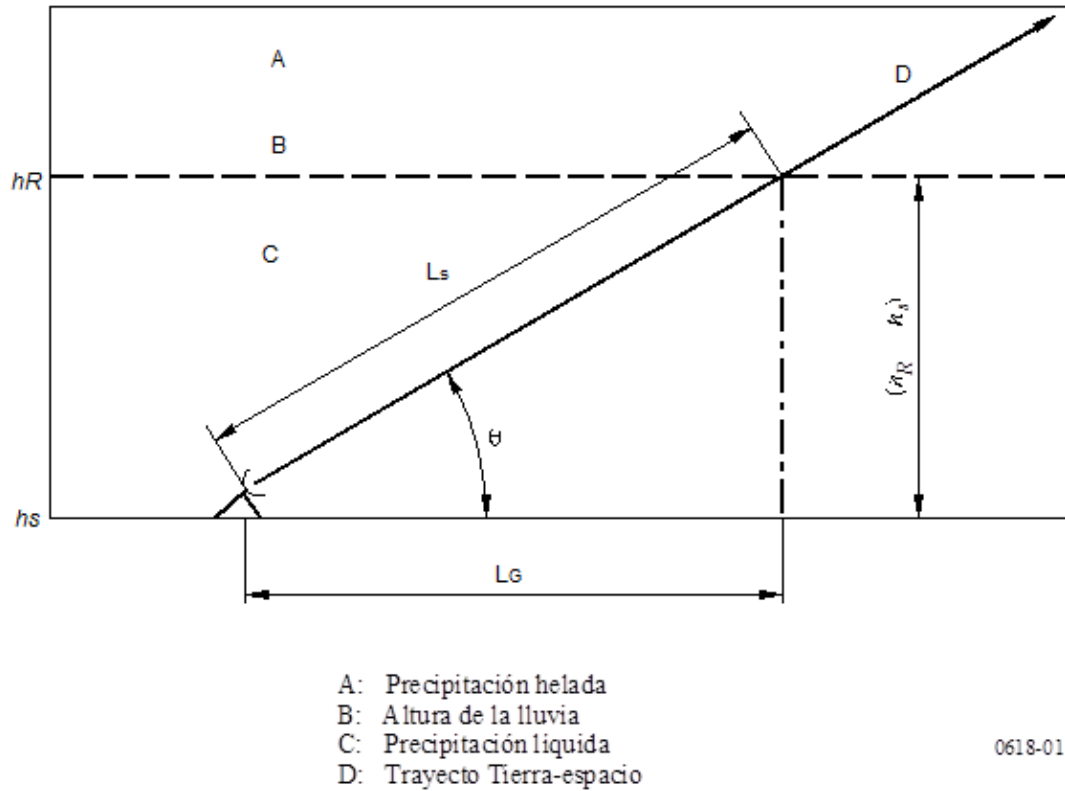


Figura 3.3. Representación esquemática de un trayecto Tierra-espacio.

Paso 1: Se determina la altura de la lluvia, h_R , indicada en la Recomendación UIT-R P.839-3 [39]. Para obtener este valor se utiliza un archivo de datos (proporcionado por la UIT) con los datos de la altura isoterma de 0°C por encima del nivel del mar (h_0) y se aplica la siguiente expresión:

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

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

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad \text{km}$$

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

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right)^{1/2} + \sin \theta} \quad \text{km}$$

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

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

$$L_G = L_s \cos \theta \quad \text{km}$$

Paso 4: Se obtiene la intensidad de la lluvia, $R_{0.01}$, rebasada durante el 0.01% de un año medio (con un tiempo de integración de 1 min). Si no pueden obtenerse datos estadísticos a largo plazo a partir de fuentes locales de información, puede hacerse una estimación utilizando los mapas de intensidad de lluvia que aparecen en la Recomendación UIT-R P.837-5 [38]. Si $R_{0.01}$ es cero, la atenuación debida a la lluvia prevista para cualquier porcentaje de tiempo es cero y no son necesarios los pasos siguientes.

Paso 5: Se halla la atenuación específica, γ_R , utilizando los coeficientes dependientes de la frecuencia y polarización (k, α) que aparecen en la Recomendación UIT-R P.838-3 [66] y el índice de intensidad de la lluvia, $R_{0.01}$, determinado según el Paso 4, aplicando la ecuación:

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

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

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

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

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

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

Para $\zeta > \theta$,

$$L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \quad \text{km}$$

De otro modo,

$$L_R = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad \text{km}$$

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

De otro modo, $\chi = 0$ grados

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

Paso 8: La longitud de trayecto efectiva es:

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad \text{km}$$

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

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

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

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

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

De otro modo: $\beta = -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin \theta$

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

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

3.3 Análisis de la eficiencia de los estándares de transmisión de TV por satélite.

Existen diversas formas para comparar la eficiencia de un sistema de comunicaciones por satélite. En el caso de la transmisión de video por satélite existen diversos parámetros importantes:

- Tasa de datos binaria. Es la cantidad máxima de datos que se puede transmitir por el canal limitado en ancho de banda. Mientras esta tasa sea mayor, es evidente que se pueden transmitir más información. Esto repercute en mejoras en la calidad del audio y el video.
- Ancho de banda disponible: Al ser los satélites canales limitados en ancho de banda, es necesario tomar en cuenta la disponibilidad de este. Si se dispone de un transpondedor completo para la transmisión de la información, se aprovecha el máximo la potencia disponible. En cambio, si el transpondedor es compartido con otros servicios, es necesario balancear la potencia y ancho de banda entre todas las portadoras.
- E_b/N_0 : Parámetro que nos permite comparar si la señal recibida tiene la suficiente calidad para ser decodificada en el receptor de acuerdo a las características acordadas en el estándar de transmisión. Con un E_b/N_0 mayor al de umbral, se tiene un margen que asegura la correcta transmisión de los datos con una cantidad de errores aceptable.
- C/N: Similar al E_b/N_0 , es posible obtener el umbral en el que se asegura que la potencia de la portadora es suficiente para lograr establecer el enlace.

En base a estos parámetros, podemos establecer dos categorías para evaluar la eficiencia de los estándares de transmisión:

1. Umbrales requeridos para transmitir la señal de TV (Depende de la codificación de fuente).
2. Margen del enlace de la señal (Referente al cálculo de los niveles necesarios para que el enlace se lleve a cabo)

Con el método de cálculo de enlace actual, se pueden cuantificar los fenómenos que afectan a la propagación mediante modelos de la UIT a través de los cuales se obtiene la atenuación con un porcentaje de tiempo en el que se prevé que el sistema no opere.

Hoy, los nuevos sistemas de telecomunicaciones están migrando de servicios de distribución masivos como la radio y TV a servicios interactivos como el Internet, video bajo demanda, voz sobre IP, etc. En el caso de los estándares DVB, se manejó una solución complementaria que facilitara la interacción: el estándar DVB-RCS.

Para tener suficientes recursos de espectro radioeléctrico disponibles, el uso de la banda Ka tiene que ser considerado en servicios con canal de retorno (20GHz para el enlace e-T y 30GHz para el T-e). Para mantener una ganancia en la cobertura suficiente y debido al aumento de frecuencia, se usan haces puntuales reducidos. Por lo tanto, un sistema típico en banda Ka está compuesto por varios haces. De igual forma, han de tomarse en cuenta los inconvenientes que puedan tener las transmisiones que operen en la banda Ka debido a la reutilización de frecuencia y / o de la polarización:

- Señales interferentes de alta potencia pueden afectar los enlaces de transmisión dependiendo de la localización del usuario.
- La atenuación de la potencia debido a los fenómenos de propagación puede alcanzar decenas de decibeles.
- La diferencia de la ganancia de la antena entre el centro de la cobertura y la orilla de esta puede ser de varios decibeles.

Para optimizar la disponibilidad de los enlaces y los recursos de frecuencia dependiendo de la configuración se pueden utilizar técnicas adaptivas de modulación y/o codificación. Esta adaptividad consiste en hacer coincidir la tasa de datos con las fluctuaciones del canal a través de controles automáticos de potencia y datos de control en el enlace de retorno. En algunas ocasiones, el peor de los casos analizado en un cálculo de enlace tradicional no es suficiente. Por tanto, el comportamiento de una red debe ser estimado en toda la cobertura bajo un análisis matricial (figura 3.4) en que se pueden tener resultados tanto de disponibilidad y margen de enlace para una disponibilidad dada [53].

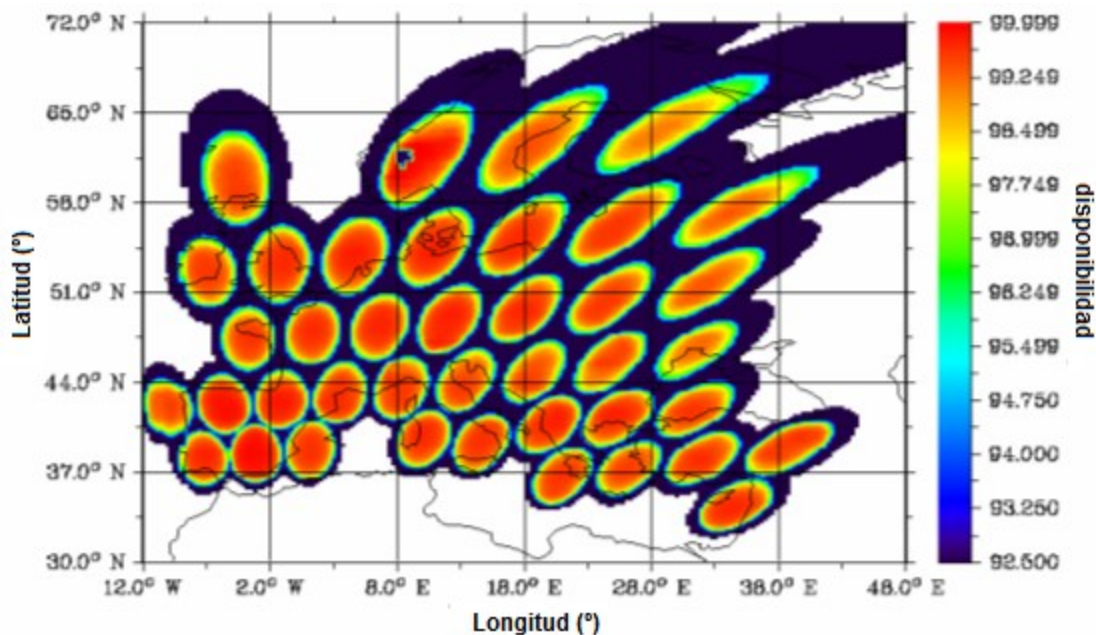


Figura 3.4. Disponibilidad de red DVB-S2 (8-PSK ¾) con cobertura en banda Ka.

Variando los parámetros de disponibilidad y las modulaciones se pueden obtener otro sin número de valores comparativos para esquemas y configuraciones específicas, logrando así tener un análisis de desempeño completo (figura 3.5).

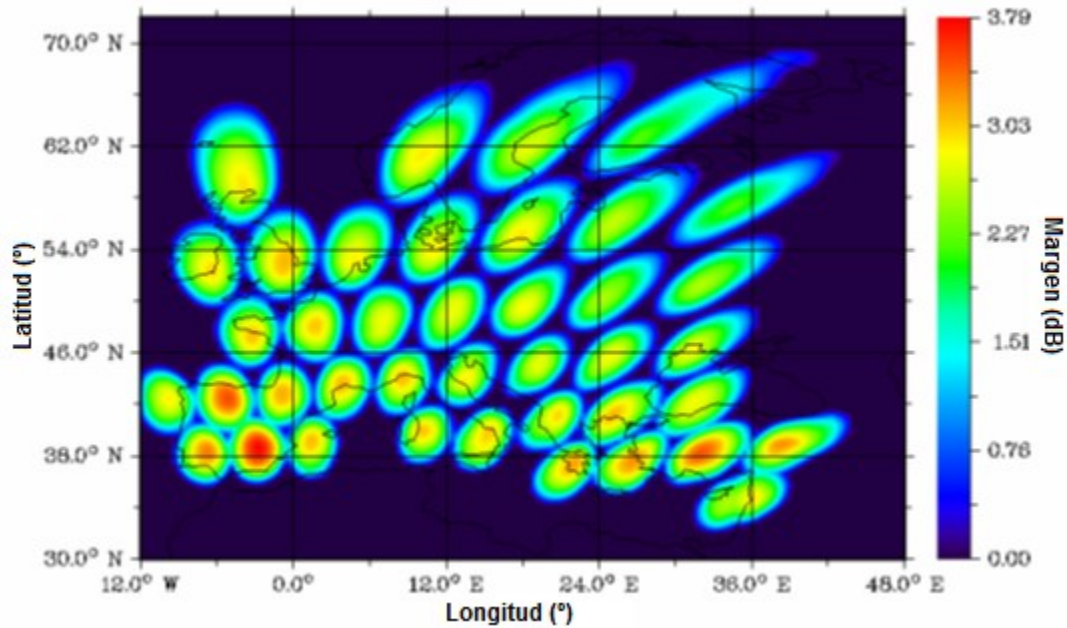


Figura 3.5. Margen de enlace de red DVB-S2 (8-PSK ¾) con disponibilidad del 99.0% en banda Ka.

En el enlace de retorno el problema de análisis difiere un poco. Contrario al enlace ascendente, en el de retorno los datos transmitidos no son transportados en una misma portadora (MF-TDMA). Asimismo, se depende de la cantidad de información transmitida, la ganancia de la antena, la carga del sistema, las condiciones de propagación, etc. Un nuevo análisis y correlación del enlace de retorno debe de ser hecho para caracterizar de la mejor manera todo el sistema de comunicaciones.

Para llevar a cabo este análisis, se debe de tomar en cuenta que los estándares para la transmisión de televisión digital por satélite presentados en este trabajo no son todos de características similares o se implementan en diferentes aplicaciones y regiones. De acuerdo a sus características y estado de uso, los estándares más convenientes para su análisis son:

- DVB-S/DVB-DSNG
- DVB-S2
- ISDB-S

3.3.1. Eficiencia de codificación y ancho de banda.

Dependiendo del estándar ocupado en la codificación de fuente (MPEG-2 o MPEG-4/AVC), el rendimiento de la codificación en el caso de MPEG-4 puede ir del 43 al 63%. Esto significa que se puede codificar aproximadamente el doble de información en MPEG-4/AVC comparado con un flujo de datos codificados en MPEG-2.

En la etapa de codificación de canal definida por los estándares de transmisión, el rendimiento máximo está cerca del 30% para el caso de DVB-S2 comparado con DVB-S. Con el fin de evaluar y demostrar estos resultados, es necesario conocer la forma en que codifican cada uno de los estándares y comparar estos requerimientos con las tablas de eficiencia de codificación que existen publicadas para cada sistema.

Ejemplo 1: Sistema DTH con transpondedores de 36MHz y modulación QPSK (Potencia limitada).

Fijando la tasa de símbolos y el factor de caída del filtro a un valor constante en un esquema QPSK, se puede determinar cuál de los estándares puede codificar mayor cantidad de información en el mismo ancho de banda, así como la potencia requerida para transportar dicha información.

Como condiciones de análisis, se establecieron los siguientes parámetros en todos los casos

- Información codificada en MPEG-2
- Tasa de símbolos: 26.667 MS/s
- Esquema de Modulación: QPSK
- FEC: 3/4
- Tasa de datos y de codificación constante para DVB-S2 e ISDB-S
- Roll-Off de 0.35

Resultados:

Estándar	Tasa neta de información (kbps)	Ancho de banda requerido en el satélite (MHz)	E_b/N_0 (dB) ³	C/N (dB)	Porcentaje de eficiencia en el volumen de información transmitida ⁴ (%)	Porcentaje de potencia requerida a la recepción ⁵ (%)
DVB-S /DVB-DSNG	36853.8	36.0	6.26	6.37	100%	100%
DVB-S2	38723.2	36.0	2.41	2.73	105.1%	43.3%
ISDB-S	36154.3	36.0	6.59	7.14	98.1%	119.4%

Figura 3.6. Tabla comparativa de información transmitida y potencia requerida (potencia limitada).

Tomando en cuenta los niveles de E_b/N_0 y C/N requeridos por cada enlace, la superioridad de la corrección de errores en el estándar DVB-S2 permite el consumo de menos potencia, logrando así un enlace con niveles de calidad buenos y ocupando menos recursos. Bajo estas condiciones, se observa en la tabla de la figura 3.6 que en total se requiere 2.3 veces menos potencia a la recepción. No obstante que el ahorro de potencia es importante, la eficiencia buscada se alcanza

³ Para DVB-S/DVB-DSNG/DVB-S2: BER: 1×10^{-7} ; para ISDB-S: BER: 1×10^{-11}

⁴ Cálculo comparativo entre el volumen de información transmitida bajo el esquema de un estándar en comparación con el volumen de información para el esquema codificado en DVB-S

⁵ Cálculo comparativo entre la potencia requerida bajo el esquema de un estándar en comparación con el nivel necesario para el esquema codificado en DVB-S

variando los parámetros de transmisión y adecuando estos niveles a los niveles que puede proporcionar el satélite.

Por otra parte, se observa que en el estándar ISDB-S los requerimientos de calidad son mayores y se requiere mayor potencia para tener una eficiencia similar a la del estándar DVB-S. Vale la pena mencionar que el estándar ISDB-S se aplica solamente en el territorio de Japón. Por tal motivo, los satélites utilizados para cubrir la geografía de las islas pueden contar, entre muchas otras ventajas, con coberturas regionales con altos niveles de ganancia y potencia radiada. Adicionalmente, es importante recordar que ISDB-S adopta técnicas de modulación variable en la implementación real. Con esto, la disponibilidad es alta y los datos se transmiten de manera fiable.

Ejemplo 2: Sistema DTH con transpondedores de 36MHz y parámetros ajustados a una relación C/N similar (AB limitado).

A fin de codificar la máxima cantidad de información y suponiendo que el requisito de la potencia es de menor interés en este caso, se pueden optar por algunos de los esquemas más robustos definidos para cada estándar.

- Información codificada en MPEG-2
- Tasa de símbolos DVB-S @ $\alpha=0.35$: 26.667 MS/s
- Tasa de símbolos DVB-S2 @ $\alpha=0.25$: 28.80 MS/s
- Tasa de símbolos ISDB-S @ $\alpha=0.35$: 26.667 MS/s
- Esquema DVB-S: QPSK 7/8
- Esquema DVB-S2: 8QPSK 5/6
- Esquema ISDB-S: QPSK 7/8
- Tasa de datos y de codificación constante para DVB-S2 e ISDB-S

Estándar	Tasa neta de información (kbps)	Ancho de banda requerido en el satélite (MHz)	Eb/No (dB)	C/N (dB)	Porcentaje de eficiencia en el volumen de información transmitida (%)	Porcentaje de potencia requerida a la recepción (%)
DVB-S	43013.3	36.0	7.53	8.31	100%	100%
DVB-S2	69762.2	36.0	5.51	8.38	162.2%	101.6%
ISDB-S	42179.4	36.0	7.26	8.48	98.1%	104.0%

Figura 3.7. Tabla comparativa de información transmitida y potencia requerida (AB limitado).

De la tabla de la figura 3.7 podemos obtener varios resultados:

- Si se ajusta el esquema de codificación de tal manera que se tenga un umbral de C/N similar en todos los casos, se observa que el estándar DVB-S2 puede aumentar la cantidad de información más del 60% comparado con DVB-S e ISDB-S.

- DVB-S e ISDB-S tienen un desempeño muy similar pero, los márgenes permiten asegurar una menor cantidad de errores en el caso de ISDB-S ($BER=10^{-11}$) que con DVB-S ($BER=10^{-7}$).
- La posibilidad de ajustar el factor de caída del filtro en el caso de DVB-S2 permite transportar una mayor cantidad de símbolos por Hertz disponible comparado a los esquemas de roll-off fijo a 0.35.

En el caso de análisis para sistemas de contribución con DVB-DSNG, DVB-S2 y la implementación TC8PSK del estándar ISDB-S, también se obtuvieron rendimientos de hasta 57% en volumen de datos transmitidos con DVB-S2 comparado con DVB-DSNG e ISDB-S. Esto utilizando umbrales de C/N similares.

Para fines prácticos, ya sea que la limitante del canal sea la potencia o el ancho de banda, el estándar DVB-S2 balanceado correctamente tiene un desempeño en promedio 30% mejor que su antecesor DVB-S. Si a este mejor desempeño se le suma una mejor eficiencia de codificación a través del uso del estándar MPEG-4, se puede transportar hasta el doble de información con las especificaciones más recientes.

En el caso de la comparativa entre ISDB-S y los estándares DVB se puede mencionar que aunque el primero incorpora mayores herramientas en la adaptación al canal que DVB-S, no supera al estándar DVB-S2. La fortaleza de DVB-S2 radica en la robustez de su código de corrección de errores que en el caso de ISDB-S y DVB-S, es un mismo sistema con limitaciones ya evaluadas.

3.3.2 Evaluación de enlaces.

Tomando en cuenta que el estándar DVB-S2 es el que ofrece las mejores características en base a la primera etapa del análisis, ahora es importante conocer sus márgenes de desempeño en enlaces por satélite en las bandas de frecuencia Ku y Ka. Además, se han de tomar en cuenta los beneficios que se obtendrían agregando un demodulador/modulador a bordo del satélite que convirtiera a los transpondedores en elementos regenerativos de señal basada en el estándar DVB-S2.

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

Ejemplo 3. Señal de televisión digital en satélite de servicio fijo con TP a saturación.

Mediante el siguiente ejemplo, se analizarán los márgenes de enlace para un enlace fijo Atlanta-México D.F. de una portadora a saturación en un transpondedor de 36MHz dentro de un satélite que cubre ambas regiones y tiene una disponibilidad de 99.8% en ambos sitios (figura 3.8).

Características de la red 1:

DATOS DE LA PORTADORA			
Estándar	DVB-S2		
Symbol Rate	30000 KBAud		
Modulación:	8PSK		
F.E.C.:	2/3		
Tasa De Datos	58071.0 Kbps		
Roll-off:	20 %		
Eb/No:	3.75 dB		
BER:	1E-7		
Ancho de Banda Requerido	36000.00 kHz		
Ancho de Banda Asignado:	36000.00 kHz		
DATOS DEL SATÉLITE			
Posición del satélite	116.80 °W		
Ancho de banda del Transpondedor:	36.00 MHz		
	Enlace Ascendente	Enlace Descendente	
Banda de Operación:	14-14.5 GHz	11.7-12.2 GHz	
Frecuencia Central del TP	14.04 GHz	11.74 GHz	
Polaridad:	Vertical	Horizontal	
DATOS DE ESTACION TERRENA	Transmisor	Receptor	
Localidad	Atlanta, Georgia, E.U.	México D.F., México	
Latitud:	33.75 °N	19.40	°N
Longitud:	84.38 °W	99.15	°W
Disponibilidad Ascendente.:	99.80 %	99.80	%
Disponibilidad Descendente.:	99.80 %	99.80	%
Diámetro de Antena:	7.00 m	0.9	M
Ganancia de Antena Tx:	58.0 dBi	40.2	dBi
Ganancia de Antena Rx:	56.5 dBi	38.7	dBi
Temperatura de la Antena Rx	30 K	30	K
Temperatura Total del Sistema:	190 K	152	K
Figura de Merito Satélite (G/T):	3.36 dB/K	3.88	dB/K
PIRE en saturación del Transpondedor:	51.02 dBW	50.58	dBW

Figura 3.8. Tabla de características de la red 1.

Evaluación del enlace 1:

ENLACE ASCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Transmisora	228.82	228.82	228.82	228.82	°
Elevación E/T Transmisora	37.7	37.7	37.7	37.7	°
Disponibilidad	99.8	99.8	99.8	99.8	%
PIRE estación transmisora	80	80	80	80	dBW
Perdidas por Espacio Libre	206.98	206.98	206.98	206.98	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	3.97	0	3.97	dB
Relación C/No Ascendente	103.98	100.01	103.98	100.01	dBHz
Relación C/N Ascendente	17.02	16.57	17.02	16.57	dB
ENLACE DESCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Receptora	223.77	223.77	223.77	223.77	°
Elevación E/T Receptora	59.62	59.62	59.62	59.62	°
Disponibilidad	99.8	99.8	99.8	99.8	%
P.I.R.E. en saturación Transpondedor	205.1	205.1	205.1	205.1	dBW
Perdidas por Espacio Libre	50.58	46.61	50.58	46.61	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	0	1.83	1.83	dB
G/T de la E/T Receptora	16.88	16.88	15.17	15.17	dB/K
Relación C/No Descendente	89.96	86	86.43	82.46	dBHz
Relación C/N Descendente	14.2	10.35	10.77	6.86	dB
MARGEN DE ENLACE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Relación C/N Total del Sistema	12.38	9.42	9.85	6.42	dB
Relación C/N Requerida	5.83	5.83	5.83	5.83	dB
MARGEN DEL ENLACE:	6.55	3.60	4.02	0.59	dB

Figura 3.9. Tabla de resultados, evaluación del enlace de la red 1.

Observamos en la tabla de resultados de la figura 3.9 que los márgenes de enlace para la disponibilidad del 99.8% en banda Ku con la red propuesta se cumplen en todos los casos para las localidades de transmisión y de recepción planteadas con los parámetros asignados inicialmente.

Para este caso no es muy práctico disminuir el diámetro de las antenas de recepción. En caso de que estos se redujeran a 0.7m y no se variara algún otro parámetro se obtienen como resultados márgenes negativos para el supuesto de lluvia en ambos lados del enlace.

En el caso de servicio fijo por satélite, se busca la mayor disponibilidad del enlace sin importar las condiciones climáticas, es por eso que pretender disminuir las dimensiones de las antenas no es un factor muy significativo.

Con esta disponibilidad hay un estimado de que el enlace pueda estar inactivo unas 35 horas al año.

Ejemplo 4. Señal de televisión digital en satélite de servicio broadcast

Mediante el siguiente ejemplo, se analizarán los márgenes de enlace para un enlace de Broadcast Atlanta-México D.F. de una portadora a saturación en un transpondedor de 36MHz dentro de un satélite que cubre ambas regiones y tiene una disponibilidad de 99.7% en ambos sitios (figura 3.10).

Características de la red 2:

DATOS DE LA PORTADORA				
Estándar	DVB-S2			
Symbol Rate	30000 KBAud			
Modulación:	8PSK			
F.E.C.:	2/3			
Tasa De Datos	58071.0 Kbps			
Roll-off:	20 %			
Eb/No:	3.75 dB			
BER:	1E-7			
Ancho de Banda Requerido	36000.00 kHz			
Ancho de Banda Asignado:	36000.00 kHz			
DATOS DEL SATÉLITE				
Posición del satélite	116.80 °W			
Ancho de banda del Transpondedor:	36.00 MHz			
	Enlace Ascendente		Enlace Descendente	
Banda de Operación:	17.8-18.3 GHz	12.2-12.7 GHz		
Frecuencia Central del TP	17.84 GHz	12.24 GHz		
Polaridad:	LHCP	RHCP		
DATOS DE ESTACION TERRENA		Transmisor		Receptor
Localidad	Atlanta, Georgia, E.U.		México D.F., México	
Latitud:	33.75 °N	19.40 °N		
Longitud:	84.38 °W	99.15 °W		
Disponibilidad Ascendente.:	99.70 %	99.70 %		
Disponibilidad Descendente.:	99.70 %	99.70 %		
Diámetro de Antena:	7.00 m	0.7 m		
Ganancia de Antena Tx:	60.12 dBi	40.12 dBi		
Ganancia de Antena Rx:	56.85 dBi	36.85 dBi		
Temperatura Total del Sistema:	190 K	152 K		
Figura de Merito Satélite (G/T):	3.36 dB/K	3.88 dB/K		
PIRE en saturación del Transpondedor:	51.02 dBW	50.58 dBW		

Figura 3.10. Tabla de características de la red 2.

Evaluación del enlace 2:

ENLACE ASCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Transmisora	228.82	228.82	228.82	228.82	°
Elevación E/T Transmisora	37.7	37.7	37.7	37.7	°
Disponibilidad	99.7	99.7	99.7	99.7	%
PIRE estación transmisora	80	80	80	80	dBW
Perdidas por Espacio Libre	209.06	209.06	209.06	209.06	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	5.6	0	5.6	dB
Relación C/No Ascendente	101.9	96.3	101.9	96.3	dBHz
Relación C/N Ascendente	26.33	20.74	26.33	20.74	dB
ENLACE DESCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Receptora	223.77	223.77	223.77	223.77	°
Elevación E/T Receptora	59.62	59.62	59.62	59.62	°
Disponibilidad	99.7	99.7	99.7	99.7	%
Perdidas por Espacio Libre	205.46	205.46	205.46	205.46	dBW
P.I.R.E. en saturación Transpondedor	50.58	44.98	50.58	44.98	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	0	1.55	1.55	dB
G/T de la E/T Receptora	15.03	15.03	13.51	13.51	dB/K
Relación C/No Descendente	87.75	82.15	84.68	79.09	dBHz
Relación C/N Descendente	12.19	6.59	9.12	3.52	dB
MARGEN DE ENLACE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Relación C/N Total del Sistema	12.03	6.43	9.04	3.44	dB
Relación C/N Requerida	5.83	5.83	5.83	5.83	dB
MARGEN DEL ENLACE:	6.2	0.6	3.21	-2.39	dB

Figura 3.11. Tabla de resultados, evaluación del enlace de la red 2.

Hay un gran número de factores que intervienen en el cálculo de un enlace. En las simulaciones hechas (figura 3.11) se observa que en un enlace por satélite para servicios de *broadcast* se requiere mayor potencia en los amplificadores del satélite para alcanzar márgenes similares a los enlaces para servicio fijo. Hay que tomar en cuenta que las frecuencias de los enlaces ascendentes y descendentes sufren de mayor atenuación por lo cual es muy importante el criterio de la potencia.

Al ser satélites de mayor potencia que los de servicio fijo, en la recepción de las señales de *broadcast* se pueden evaluar antenas de menor diámetro a la recepción. De igual manera, se puede evaluar un enlace para una disponibilidad menor, pero esto en detrimento del servicio ofrecido a los suscriptores. Para los valores de disponibilidad supuestos, el estimado anual de horas en que el servicio estará caído es 52.5. A medida que la frecuencia aumenta, es evidente

que es más complicado obtener márgenes positivos. Es por esto que se debe de sacrificar disponibilidad en algunos casos.

Ejemplo 5. Señal de televisión digital en satélite de servicio broadcast en banda Ka⁶

Mediante el siguiente ejemplo, se analizarán los márgenes de enlace para un enlace fijo Atlanta-México D.F. de una portadora a saturación en un transpondedor de 36MHz dentro de un satélite que cubre ambas regiones y tiene una disponibilidad de 99.0% en el año en ambos sitios (figura 3.12). En este caso, la atenuación de propagación puede reducir enormemente la disponibilidad del servicio y la fiabilidad del sistema.

Características de la red 3:

DATOS DE LA PORTADORA		
Estándar	DVB-S2	
Symbol Rate	30000 KBaud	
Modulación:	8PSK	
F.E.C.:	2/3	
Tasa De Datos	58071.0 kbps	
Roll-off:	20 %	
Eb/No:	3.75 dB	
BER:	1E-7	
Ancho de Banda Requerido	36000.00 kHz	
Ancho de Banda Asignado:	36000.00 kHz	
DATOS DEL SATÉLITE		
Posición del satélite	116.80 °W	
	Enlace Ascendente	Enlace Descendente
Banda de Operación:	29.5-30 GHz	19.7-20.2 GHz
Frecuencia Central del TP	29.7 GHz	19.9 GHz
Polaridad:	Horizontal	Vertical
DATOS DE ESTACION TERRENA	Transmisor	Receptor
Localidad	Atlanta, Georgia, E.U.	México D.F., México
Latitud:	33.75 °N	19.40 °N
Longitud:	84.38 °W	99.15 °W
Disponibilidad Ascendente.:	99.00 %	99.00 %
Disponibilidad Descendente.:	99.00 %	99.00 %
Diámetro de Antena:	7.00 m	0.70 m
Ganancia de Antena Tx:	64.55 dBi	44.55 dBi
Ganancia de Antena Rx:	61.07 dBi	41.07 dBi
Temperatura Total del Sistema:	350 K	300 K
Figura de Merito Satélite (G/T):	16.0 dB/K	16.0 dB/K
PIRE en saturación del Transpondedor:	54 dBW	54 dBW

Figura 3.12. Tabla de características de la red 3.

⁶ Descartando ambiente de interferencia por inducciones entres satélites adyacentes, polarización contraria e intermodulación.

Evaluación del enlace 3:

ENLACE ASCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Transmisora	228.82	228.82	228.82	228.82	°
Elevación E/T Transmisora	37.7	37.7	37.7	37.7	°
Disponibilidad	99	99	99	99	%
PIRE estación transmisora	80	80	80	80	dBW
Perdidas por Espacio Libre	213.49	213.49	213.49	213.49	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	5.57	0	5.57	dB
Relación C/No Ascendente	110.11	104.53	110.11	104.53	dBHz
Relación C/N Ascendente	34.55	28.97	34.55	28.97	dB
ENLACE DESCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Receptora	223.77	223.77	223.77	223.77	°
Elevación E/T Receptora	59.62	59.62	59.62	59.62	°
Disponibilidad	99.0	99.0	99.0	99.0	%
Perdidas por Espacio Libre	209.68	209.68	209.68	209.68	dBW
P.I.R.E. en saturación Transpondedor	54	48.43	54	48.43	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	0	1.6	1.6	dB
G/T de la E/T Receptora	16.6	16.6	17.44	17.44	dB/K
Relación C/No Descendente	88.52	82.94	87.76	82.18	dBHz
Relación C/N Descendente	12.95	7.38	12.2	6.62	dB
MARGEN DE ENLACE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Relación C/N Total del Sistema	12.92	7.35	12.17	6.6	dB
Relación C/N Requerida	5.83	5.83	5.83	5.83	dB
MARGEN DEL ENLACE:	7.1	1.52	6.34	0.77	dB

Figura 3.13. Tabla de resultados, evaluación del enlace de la red 3.

Al evaluar enlaces en banda Ka para televisión es cuando se aprecia en la figura 3.13 la gran importancia de algunos parámetros tanto en el segmento espacial como en el satelital. La atenuación que se llega a sufrir en esta banda debe de ser contrarrestada con varios elementos dentro del enlace.

En la recomendación de la UIT BO.1659 se proponen algunos métodos de reducción del efecto de la atenuación en banda Ka y superiores. El primer método se basa en el aumento de la PIRE de manera variable o local. El segundo caso se basa en un modelo de transmisión jerárquica de la información. Por último, se plantea un modelo con sistema de almacenamiento en la recepción.

El hecho de usar haces concentrados o puntuales en áreas menores se vuelve el factor primordial en el primero de los casos descrito. De lo contrario, sería muy difícil construir equipamiento que fuera capaz de establecer un enlace.

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

Ejemplo 6. Señal de televisión digital en satélite de servicio broadcast con transpondedor regenerativo en banda Ka (figura 3.14).

Características de la red 4:

DATOS DE LA PORTADORA			
Estándar	DVB-S2		
Symbol Rate	30000 KBAud		
Modulación:	8PSK		
F.E.C.:	2/3		
Tasa De Datos	58071.0 Kbps		
Roll-off:	20 %		
Eb/No:	3.75 dB		
BER:	2E-7		
Ancho de Banda Requerido	36000.00 kHz		
Ancho de Banda Asignado:	36000.00 kHz		
DATOS DEL SATÉLITE			
Posición del satélite	116.80 °W		
	Enlace Ascendente	Enlace Descendente	
Banda de Operación:	29.5-30 GHz	19.7-20.2 GHz	
Frecuencia Central del TP	29.7 GHz	19.9 GHz	
Polaridad:	Horizontal	Vertical	
DATOS DE ESTACION TERRENA	Transmisor	Receptor	
Localidad	Atlanta, Georgia, E.U.	México D.F., México	
Latitud:	33.75 °N	19.40 °N	
Longitud:	84.38 °W	99.15 °W	
Disponibilidad Ascendente.:	99.00 %	99.00 %	
Disponibilidad Descendente.:	99.00 %	99.00 %	
Diámetro de Antena:	7.00 m	0.60 m	
Ganancia de Antena Tx:	64.55 dBi	43.21 dBi	
Ganancia de Antena Rx:	61.07 dBi	39.73 dBi	
Temperatura Total del Sistema:	350 K	300 K	
Figura de Merito Satélite (G/T):	16.0 dB/K	16.0 dB/K	
PIRE en saturación del Transpondedor:	54 dBW	54 dBW	

Figura 3.14. Tabla de características de la red 3.

Evaluación del enlace 4:

ENLACE ASCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Transmisora	228.82	228.82	228.82	228.82	°
Elevación E/T Transmisora	37.7	37.7	37.7	37.7	°
Disponibilidad	99.7	99.7	99.7	99.7	%
PIRE estación transmisora	75	75	75	75	dBW
Perdidas por Espacio Libre	213.49	213.49	213.49	213.49	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	14.69	0	14.69	dB
Relación C/No Ascendente	101.11	86.42	101.11	86.42	dBHz
Relación C/N Ascendente	25.55	10.85	25.55	10.85	dB
ENLACE DESCENDENTE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Azimut E/T Receptora	223.77	223.77	223.77	223.77	°
Elevación E/T Receptora	59.62	59.62	59.62	59.62	°
Disponibilidad	99.7	99.7	99.7	99.7	%
Perdidas por Espacio Libre	209.68	209.68	209.68	209.68	dBW
P.I.R.E. en saturación Transpondedor	54	54	54	54	dB
Perdidas misceláneas	1	1	1	1	dB
Margen de Lluvia	0	0	4.98	4.98	dB
G/T de la E/T Receptora	15.26	15.26	14.87	14.87	dB/K
Relación C/No Descendente	87.18	87.18	81.81	81.81	dBHz
Relación C/N Descendente	11.61	11.61	6.24	6.24	dB
MARGEN DE ENLACE	CIELO DESPEJADO	LLUVIA ASCENDENTE	LLUVIA DESCENDENTE	LLUVIA AMBOS LADOS	
Relación C/N Requerida	5.83	5.83	5.83	5.83	dB
Margen Del Enlace Ascendente	19.72	5.03	19.72	5.03	dB
Margen Del Enlace Descendente	5.79	5.79	0.42	0.42	dB

Figura 3.15. Tabla de resultados, evaluación del enlace de la red 3.

Tomando las mismas características del ejemplo número 4, se observa que el uso de un transpondedor regenerativo en banda Ka permite obtener márgenes positivos con menores recursos en la transmisión de Tierra y mayor disponibilidad (figura 3.15). El enlace va a funcionar siempre y cuando los niveles de C/N en cada trayectoria sean los mínimos que aseguren el E_b/N_0 de 3.75 dB a la recepción. Hay que tomar en cuenta que no obstante los márgenes positivos, se agrega complejidad al diseño del satélite y, por otro lado la tasa de errores se puede llegar a duplicar en sistemas mal balanceados.

En la banda Ka se tienen ganancias de las antenas mayores en razón de 3dB con respecto a la banda Ku. Sin embargo, la ganancia obtenida es contrarrestada con los efectos diversos de atenuación que son mucho más extremos para esta banda. En el ejemplo mostrado, se observa que en Atlanta la atenuación por efecto de la lluvia en banda Ka (29.7GHz) para una disponibilidad del 99.7% es de 14.69 dB, este valor de atenuación es 8 veces mayor a la presente en la misma localidad a 17 GHz (5.6dB). Para el enlace descendente la atenuación en banda Ka resultó 2 veces mayor a la de Ku. Con todo y que la atenuación es mayor, es importante hacer notar que con la disponibilidad considerada, el tiempo en que el enlace estaría fuera se reduciría más de 120 horas en comparación con un transpondedor transparente en similares condiciones. Esto es que el enlace estaría fuera unas 52 horas en total a lo largo del año.

Suponiendo un diseño de sistemas de satélites convencionales, la PIRE se determina teniendo en cuenta los requisitos del margen del enlace para alcanzar los objetivos de disponibilidad. La PIRE necesaria podría ser demasiado grande para que el sistema de satélites fuera factible. Dadas las condiciones de propagación, puede que sea necesario aplicar las adecuadas técnicas de reducción de la atenuación debida a la lluvia para poner en funcionamiento sistemas factibles en las bandas de frecuencias más elevadas [34].

A manera de conclusiones generales, hemos observado el conjunto de elementos que tienen que considerarse para evaluar el funcionamiento de un sistema de comunicaciones por satélite de radiodifusión de TV. Una vez analizados los parámetros que entran en juego para calcular el enlace satelital, asimismo es necesario conocer los parámetros de los estándares de televisión, los cuales nos permiten definir niveles de calidad y umbrales de adecuado funcionamiento de los sistemas receptores.

El estándar DVB-S2 es, hoy por hoy el conjunto de protocolos de transporte más idóneo para el flujo de programas de televisión por satélite. A través de este estándar se pueden transmitir datos con video y audio de alta calidad. El uso de tramas especiales y modulaciones variables también permite priorizar algunos datos y hace factible el transporte de datos codificados con diversos estándares o de diferente naturaleza.

En la parte del segmento satelital, la realización de simulaciones y cálculos de enlace permite conocer los parámetros necesarios de la señales para que la comunicación se pueda llevar a cabo. Evaluando la afectación de la lluvia y las pérdidas por propagación de las ondas en el espacio libre se observaron las dificultades que enfrentan los analistas de redes satelitales para balancear enlaces de banda Ka. Hay que tomar en cuenta, además los siguientes factores para el uso de la banda Ka:

- Las antenas de los satélites ofrecen mayores ganancias y patrones de radiación más estrechos.
- El uso de haces puntuales permite un mejor reuso de frecuencias pero requiere un mejor alineamiento de las antenas.

- Las líneas de transmisión son de dimensiones más críticas. La pérdida es mayor en estos componentes y su fragilidad también.
- Los elementos activos tienen un desempeño más pobre a nivel de RF que a frecuencias menores (potencia de salida, eficiencia, control de características, etc.).

Los sistemas satelitales más novedosos utilizan la banda de frecuencias Ka para servicio fijo. El uso de la banda Ka implica fenómenos de propagación más intensos, el desarrollo de nuevas tecnologías y de nuevas interfaces aéreas basadas en codificaciones y modulaciones adaptivas.

Considerando lo último tanto en el diseño de la carga útil del satélite como en el diseño de las estaciones terrenas, la posibilidad de implementar enlaces en banda Ka se ha convertido una realidad y ha ido penetrando al mercado gracias a las apuestas de los grandes controladores satelitales como SES, Intelsat, Eutelsat, Telesat, entre otros.

CAPÍTULO 4: SISTEMAS SATELITALES PARA TELEVISIÓN DIGITAL.

Un sistema satelital para televisión al igual que todo sistema satelital está dividido en tres partes: la etapa de transmisión, la etapa satelital, y la etapa de recepción.

La etapa de transmisión está conformada principalmente por la fuente de programación y el centro de radiodifusión. La fuente de programación utiliza diferentes medios para transmitir el contenido al centro de radiodifusión. El centro de radiodifusión es el encargado de hacer llegar la señal de televisión al satélite.

La etapa satelital está compuesta únicamente por el satélite. Las señales recibidas son tratadas y repetidas de regreso a la Tierra. Es por ello que el satélite se define algunas veces como repetidor punto multipunto. El destino de las señales puede ser diferente dependiendo de la forma en la que se entregan los contenidos al usuario.

Por último, está la etapa de recepción que, como se comentó puede estar definida de diferente manera. El satélite es capaz de entregar los programas de televisión directamente a los usuarios DTH o indirectamente por medio de redes de cable o redes de radiodifusión terrestre.

La figura 4.1 muestra una red convencional de televisión por satélite [48].

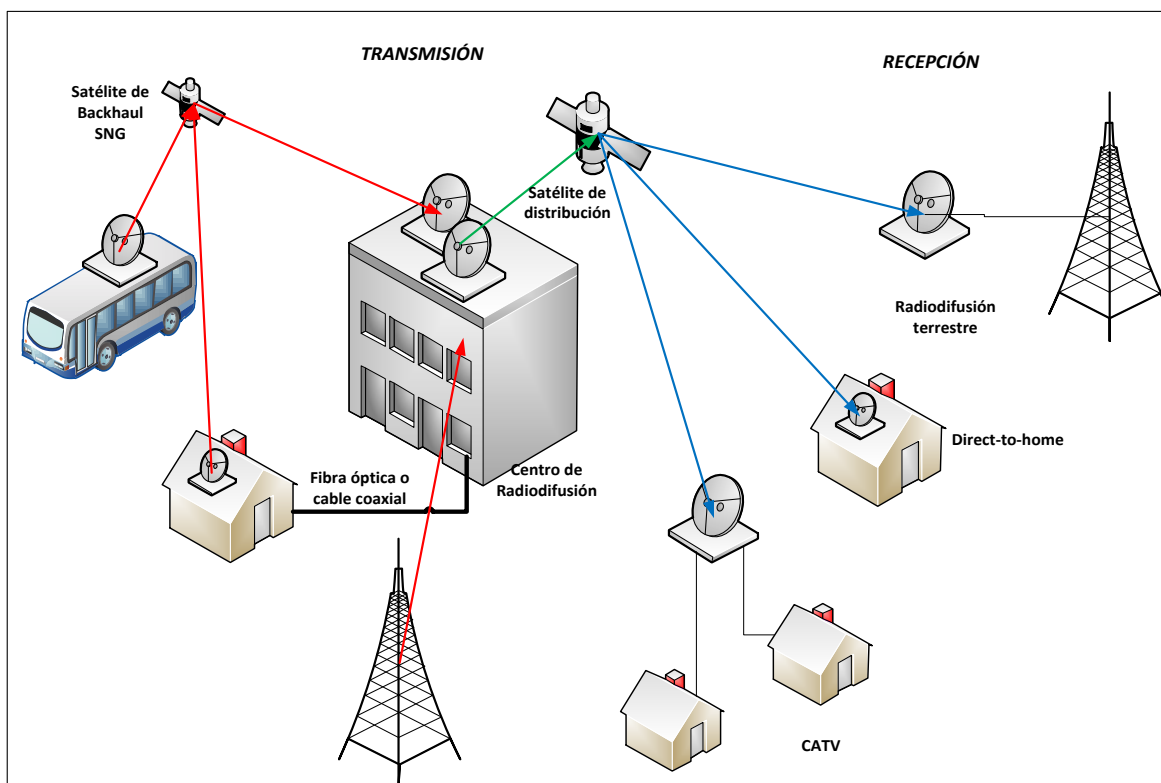


Figura 4.1. Red convencional de televisión por satélite.

4.1. Redes de televisión por satélite.

4.1.1. Transmisión de contenidos.

Esta etapa del sistema está conformada principalmente por la fuente de programación y el centro de radiodifusión. Se le llama fuente de programación a toda red proveedora de canales de TV y está encargada de entregar las señales de televisión al centro de radiodifusión.

La fuente de programación puede realizar la transmisión de contenidos de tres diferentes maneras: por medio de un sistema terrestre de microondas con línea de vista, por medio de fibra óptica y por SNG.

Hoy en día la transmisión de contenidos por fibra, es utilizada en este medio principalmente para la entrega de programas grabados dentro de un set de grabación.

SNG se utiliza generalmente cuando se trata de realizar una cobertura de algún evento deportivo o noticia en el exterior. En algunos casos se emplea una estación terrena móvil la cual tiene comunicación con el satélite de *backhaul* encargado de retransmitir la información al centro de radiodifusión.

La estación móvil va montada sobre una camioneta, camión o aeronave y es capaz de proveer servicios de datos, voz y video. Generalmente trabajan en las bandas de 6/4GHz, 14/12 GHz y 30/20 GHz. Aunque la tendencia es utilizar las bandas de frecuencia altas para reducir el tamaño del equipo. Estas estaciones móviles tienen la facilidad de montarse y desmontarse entre 15 y 30 minutos. El tamaño y peso del equipo permite una práctica transportación sin la necesidad de un gran número de personas.

El centro de radiodifusión es referido como el Hub o concentrador de todo el sistema. En este punto se reúnen los contenidos de diferentes fuentes de televisión. Después de procesar las señales de TV, se realiza la conexión con el satélite de distribución o satélite de radiodifusión. Además, el centro de radiodifusión es el encargado de agregar los comerciales y comentarios o datos al conjunto de programas, así como de realizar una encriptación especial a la señal para proteger los contenidos de carácter privado y/o prepago.

4.1.2. Recepción de contenidos.

La etapa de recepción de contenidos puede realizarse de tres maneras diferentes: por medio de radiodifusión terrestre, por una operadora de cable o por recepción directa del usuario.

La primera, se encuentra integrada por varios centros de radiodifusión terrestre, los cuales reciben la señal satelital y la transmiten hacia los usuarios en las bandas de VHF y UHF. El usuario final necesita de antenas Yagi direccionales para recibir la señal de televisión. Este método de recepción es el predominante por años en todo el mundo, desde los inicios de la televisión hasta nuestros días.

En el caso de que se realice mediante una operadora de cable, la etapa de recepción estará conformada por el centro distribuidor, que contiene el equipo de recepción de la señal satelital y una red de distribución cableada a lo largo de la zona para la entrega del contenido.

Por último, si la recepción se realizara con un sistema DTH el cual es un servicio únicamente de recepción, cada usuario contará con una antena parabólica montada en su hogar, permitiendo la recepción individual del servicio [8, 9].

CATV y radiodifusión terrestre.

CATV (*Community antena televisión*), comúnmente conocido como *Cable TV*, es el término utilizado para la distribución de televisión por cable y hace referencia a la manera en que la red entrega los servicios de televisión a un conjunto de usuarios a través de un medio de transmisión guiado.

Las redes de televisión por cable, con el incremento de usuarios, están siendo más extensas y complicadas. Por lo tanto, se optó por la solución de que el centro de distribución recibiera los canales de programación tanto por satélite como por la red de radiodifusión local.

El uso de satélites para la recepción de programación en los sistemas de cable se conoce como televisión por Satélite-Cable. El centro de distribución se compone de varias estaciones terrenas únicamente receptoras. Estas son generalmente capaces de tomar señales de entre dos y seis satélites. Para ello, las estaciones terrenas pueden tener varias antenas parabólicas o una única antena de múltiples alimentadores, cada uno alineado o dirigido a un satélite diferente.

Los canales recibidos son distribuidos por medio de una típica red cableada a un número grande de suscriptores. Es en esta etapa donde se aplica el acceso condicional a los programas.

En cuanto a la radiodifusión terrestre o radiodifusión local, se tiene una estructura similar a CATV. Las señales satelitales son recibidas en un centro de radiodifusión local para luego ser distribuidas a los suscriptores. Estos centros, como se comentó, utilizan las bandas de UHF y VHF para la entrega del servicio por medio de antenas de línea de vista con un alcance de entre 50 y 150 Km.

DTH

Direct-To-Home se refiere a la recepción de televisión satelital directa en los hogares o ubicación de los suscriptores por medio de sus propias antenas parabólicas.

En un principio, esta forma de recepción era conocida como TVRO (*Television Receive-Only*). Cuyos sistemas eran para la radiodifusión de televisión analógica y empleaban la banda C de frecuencias, por lo que las antenas receptoras tendían a ser de gran tamaño (2-6 metros).

Esta fue una de las razones por la que se fuera haciendo menos común este servicio, además de la inevitable interferencia entre la señal satelital y la radiación de las microondas terrestres y el cambio inminente de la televisión analógica a digital.

Cada transpondedor de banda C era capaz de proveer un canal analógico, por lo que un satélite de 16 transpondedores era capaz de transmitir solamente 16 canales diferentes. Esto obviamente limitaba la cantidad de canales por satélite, por lo que se optó por implementar motores en las antenas para que permitieran una rotación o redireccionamiento para sintonizar canales provenientes de otros satélites.

TVRO surgió en los inicios de los 80s marcando el inicio de DTH. Pero el año 1994 TVRO alcanzó su máximo esplendor y a partir de esa fecha su uso ha tenido un declive rápido en favor de los sistemas DBS. A pesar de esto, TVRO sigue existiendo en algunos sitios y su desarrollo en la actualidad está siendo enfocado en una mejora que permita recibir canales de satélites de banda Ku.

En la actualidad, los servicios de DBS son los más utilizados a nivel mundial. La primera compañía en implementar el servicio fue *SKY Television* en el año 1989. DBS ocupa satélites en las bandas Ku y Ka lo que permite el uso de antenas parabólicas mucho más pequeñas, del orden de los 50 cm aproximadamente. Otro beneficio de este sistema, es la capacidad de canal por cada transpondedor (5-12 canales). Debido a este aumento de capacidad se ha reducido la necesidad de utilizar antenas con mecanismos de alineamiento.

DBS provee al suscriptor de múltiples servicios como una guía completa de programación, programación en HDTV, programas interactivos, video bajo demanda, y posibilidad de grabación de programas, entre otros.

Pero la principal limitante de estos sistemas se encuentra en la restricción del usuario para mandar información de retorno. Esto es debido al aumento en el costo y complejidad de los equipos en el hogar de los suscriptores.

4.2. Hardware en el segmento terrestre.

4.2.1 Estaciones terrenas (transmisión y recepción).

En la figura 4.2 se muestra un diagrama general del segmento terrestre de un sistema satelital. La imagen hace referencia a un sistema dúplex, muestra bloques tanto de transmisión como de recepción y ambas partes comparten el sistema de la antena. Es común que los sistemas terrestres o estaciones terrenas sean simplex, en este caso el sistema de la antena sería solamente de recepción o de transmisión respectivamente [24].

El diagrama está dividido en cuatro grupos de bloques principalmente, los bloques verdes corresponden a la etapa de transmisión, los rojos a la de recepción y los morados al sistema de la antena bidireccional. Los bloques amarillos corresponden al conjunto de procesos de la señal en banda base explicados en los capítulos anteriores, procesos como codificación y corrección de errores, multiplexación y modulación. Por lo anterior estos bloques solo quedan mencionados en la figura.

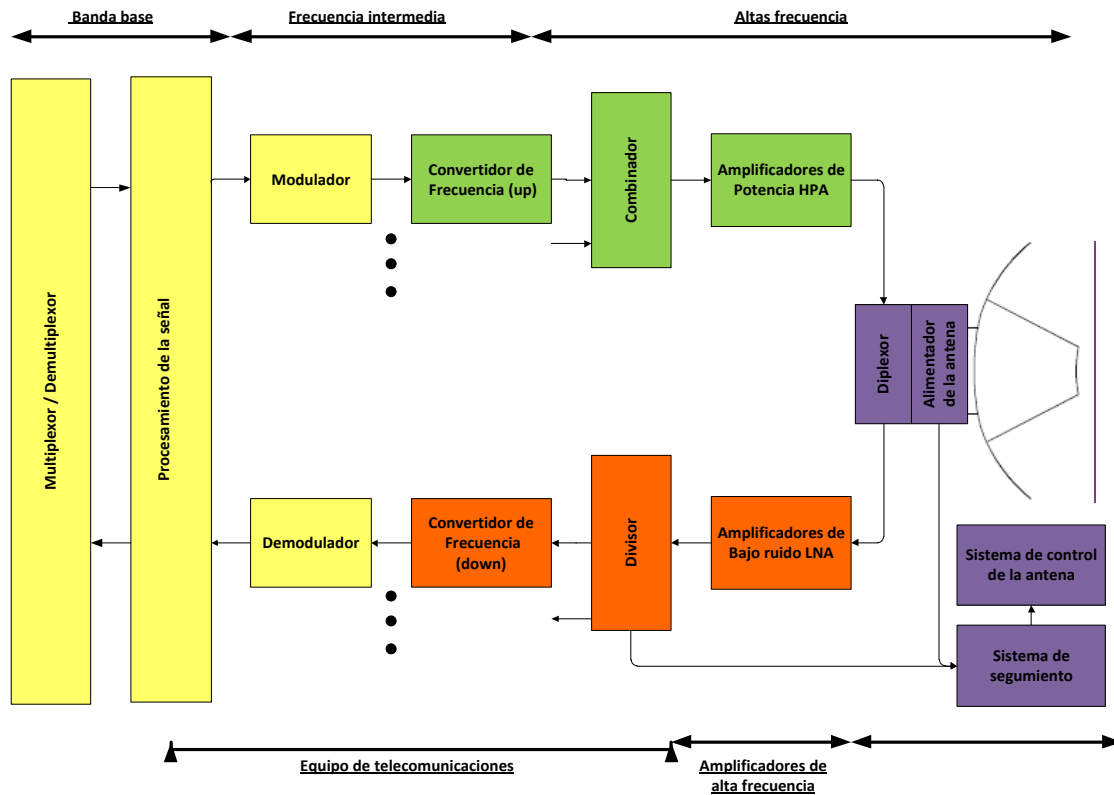


Figura 4.2. Diagrama a bloques del segmento terrestre.

Convertidor de frecuencias.

Los convertidores de frecuencia están presentes tanto en los enlaces ascendentes como en los descendentes. En la primera etapa están encargados de trasladar la frecuencia de la señal desde la frecuencia intermedia (70 o 140 MHz generalmente) a la frecuencia de RF del satélite. En la segunda etapa se realiza el proceso inverso, bajando la frecuencia de RF hasta la frecuencia intermedia.

En estaciones terrenas de gran tamaño, los convertidores de frecuencia son equipos o unidades por separado, diseñadas especialmente para mantener estable el cambio de frecuencia. En el caso de los sistemas DTH, el equipo requiere de un bajo costo de manufactura e integración con el equipo de RF.

Los principales objetivos de los convertidores de frecuencia son:

- Realizar la transformación de frecuencia entre la frecuencia intermedia y la frecuencia de RF.
- Permiten la selección o el cambio entre transpondedores reemplazando la referencia del oscilador o cristal, o mediante un sintetizador de frecuencias.

- Proveen una respuesta en frecuencia satisfactoria en términos de reflexión y retardo de grupo.

Amplificador de alta potencia o HPA

La potencia de transmisión o de subida necesaria para alcanzar el satélite fluctúa entre valores mucho más grandes que los de la potencia de recepción. Para lograr alcanzar dichos valores las estaciones terrenas hacen uso de los HPA.

Se distinguen tres principales tipos de amplificadores de alta potencia: Klystrons, TWT (*Travelling Wave Tube*) y amplificadores de estado sólido SSPA (*Solid State Power Amplifier*).

Klystrons.

Los amplificadores de este tipo son esencialmente de banda angosta, 40 MHz para un amplificador de 6GHz y 80 MHz para uno de 14 GHz. Su uso implica el uso de un amplificador por portadora transmitida, además de la necesidad de tener un sistema de ajuste mecánico remoto con el cual se selecciona la frecuencia de operación central.

Las principales características de los amplificadores Klystron son:

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

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

En la actualidad los HPA más utilizados en la industria satelital son los TWT debido al limitante en rango de frecuencias que presentan los KPA,

TWT.

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

La banda ancha que posee el TWT permite flexibilidad en los siguientes aspectos:

- Cualquier cambio en la frecuencia de portadora es posible sin ningún mecanismo de ajuste o modificación del sistema, gracias al amplio ancho de banda que maneja el amplificador.
- Muchas portadoras con diferentes frecuencias pueden ser transmitidas simultáneamente con el mismo HPA.
- Por el punto anterior, la expansión de tráfico de una estación terrena es posible sin el aumento de TWT.

Amplificadores de potencia TWT para 14 GHz o incluso mayores frecuencias utilizan estructuras con concavidad acoplada y rayos lentos.

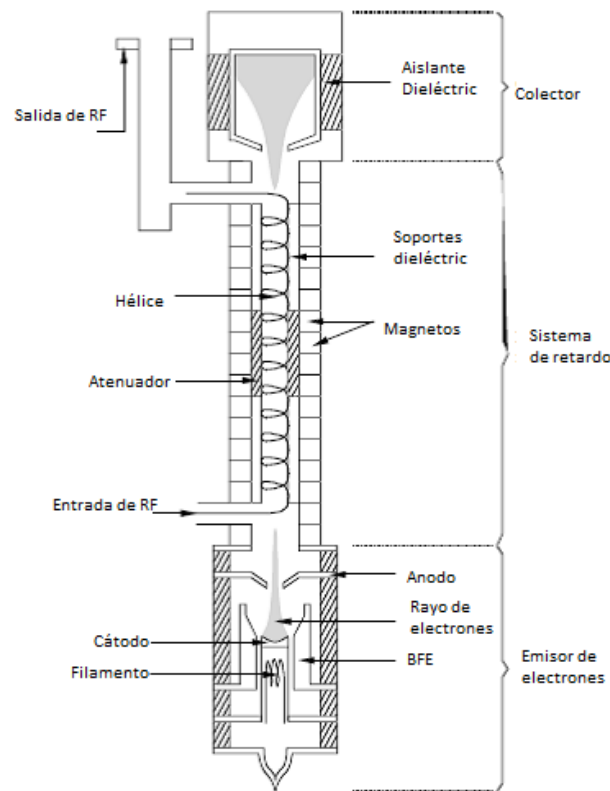


Figura 4.3. Tubo de onda progresiva o TWT.

Las estaciones terrenas de gran tamaño necesitan usar más de un amplificador de potencia ya sea Klystron o TWT conectados en cascada.

En el caso de que se utilicen KPA, la estación requerirá tantos amplificadores como transmisores, se prefiere el uso de KPA generalmente cuando se desean transmitir pocas portadoras, en especial portadoras FDMA.

Si se utilizan TWT en la estación terrena, serán necesarios varios amplificadores para alcanzar la potencia deseada. Además generalmente se utiliza un amplificador extra “en espera” proporcionando una redundancia 1+1. En el caso de transmisiones con múltiples portadoras, no es posible utilizar toda la potencia disponible, pues se presentan efectos grandes de intermodulación y distorsión de fase.

Amplificadores de estado sólido.

Estos amplificadores están enfocados principalmente a las estaciones pequeñas de baja capacidad o portátiles. Gracias a los avances tecnológicos en circuitos y el desarrollo de transistores de Arseniuro de Galio (GaAs), los amplificadores de estado sólido desarrollados en la actualidad alcanzan potencias de hasta 1 kW para banda C, hasta 200 W para banda Ku y 50W para banda Ka. Los amplificadores de estado sólido son implementados por medio de transistores FET y HEMT.

Amplificadores de Bajo Ruido.

Para lograr la recepción de las señales provenientes del satélite, las estaciones terrenas deben valerse de receptores de alta sensibilidad, es aquí donde se emplean los LNA.

La principal característica de los amplificadores que les permite tener alta sensibilidad es el bajo ruido térmico, el cual dentro de un receptor es caracterizado por su figura de ruido.

La sensibilidad de una estación terrena está asociada a la relación G/T, en donde G corresponde a la ganancia de la antena y T a la temperatura de ruido equivalente del sistema receptor. Los LNA deben de ser ubicados cerca del diplexor del alimentador de la antena, para evitar pérdidas extras a causa de las guías de onda o conectores coaxiales empleados. Los amplificadores de bajo ruido son de banda ancha, uno solo puede amplificar todas las portadoras emergentes de un puerto del diplexor de la antena. Además al igual que los TWT, generalmente se coloca un amplificador de bajo ruido en “espera” para obtener una redundancia 1+1.

Los LNA actuales están basados en transistores de bajo costo. Un ejemplo de ellos son los transistores HEMT, un tipo de transistor FET basado en GaAs, el cual proporciona un gran ancho de banda, y presenta un buen desempeño en cuanto a la temperatura de ruido.

Sistema de la antena

Es importante diferenciar entre los dos tipos de sistemas de antenas que podemos tener en la etapa terrestre, por un lado se encuentran las de las estaciones terrenas de los centros de radiodifusión, en donde generalmente las antenas son comunes para la transmisión y la recepción y por otro las antenas de los sistemas DTH que son antenas de solo recepción.

Las antenas comunes de transmisión y recepción deben de tener la siguiente configuración:

- El tamaño de las antenas puede ir desde 0.45 a 33 metros.
- Alta ganancia tanto en transmisión como en recepción.
- Bajo nivel de interferencia en la transmisión y de sensibilidad en la recepción.

El sistema de la antena está compuesto por los siguientes subsistemas:

- El sistema mecánico compuesto del reflector principal, el pedestal y el motor de alineamiento.
- La fuente principal compuesta por la corneta transmisora, elementos reflectores y componentes no radiantes (polarizadores, diplexores, sensores etc.).

Las estaciones terrenas son generalmente clasificadas dependiendo del tamaño de sus antenas:

- Estaciones grandes: antenas de dimensiones mayores a 15 m.
- Estaciones medianas: antenas de aproximadamente 7m a 15m.
- Estaciones pequeñas: antenas de 3m a 7 m o menos.
- Micro estaciones: Donde se emplean las VSAT

En la actualidad las antenas mayores a nueve metros en banda Ku ya no son muy comunes. Las antenas más utilizadas son las antenas que cuenta con un reflector. Estas a su vez se pueden clasificar de acuerdo a su configuración en axisimétrica o de offset y de uno o dos reflectores.

A continuación se presentan dos tablas (figura 4.4 y figura 4.5), una de ellas para las principales antenas configuradas con simetría axial y la otra con las antenas configuradas como de offset.

Antenas axisimétricas

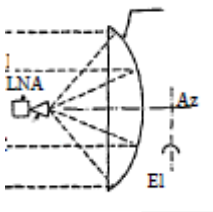
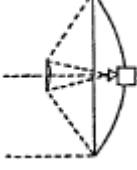
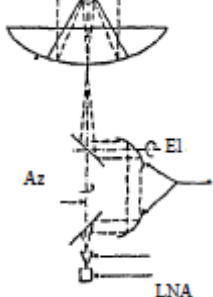
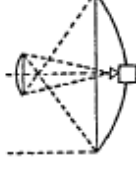
Tipo de antena	Antena parabólica	Antena Cassegrain	Antena Cassegrain alimentada con 4 rayos reflectores	Antena Gregoriana
Esquema				
Características	Simple configuración. Baja eficiencia de apertura. Alta temperatura de ruido. El alimentador y LNA deben de ir junto a la corneta.	Sub reflector convexo. Alta eficiencia y baja temperatura de ruido. El alimentador y LNA pueden ir en el compartimento del equipo. Rango de frecuencias angosto comparado con la antena alimentada con 4 rayos reflectores. Patrón de radiación deseable.	Alta eficiencia y baja temperatura de ruido. El alimentador y LNA pueden instalarse en el compartimento del equipo. Patrón de radiación deseable.	Sub reflector cóncavo. Alta eficiencia y baja temperatura de ruido. El alimentador y LNA pueden instalarse en el compartimento del equipo. Rango de frecuencias angosto comparado con la antena alimentada con 4 rayos reflectores. Patrón de radiación deseable.
Aplicaciones	Estaciones terrenas pequeñas	Estaciones terrenas medianas	Estaciones terrenas grandes ($D/\lambda = 500$)	Estaciones terrenas medianas.

Figura 4.4. Antenas axisimétricas.

Antenas de offset

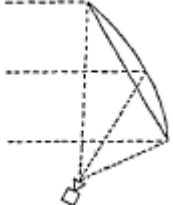
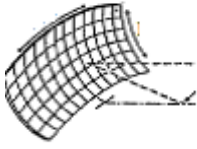
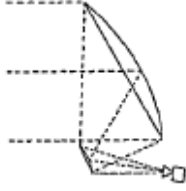
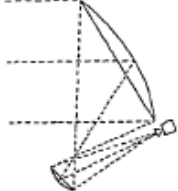
Tipo de antena	Antena parabólica	Antena toroidal	Antena Cassegrain	Antena Gregoriana
Esquema				
Características	Excelente patrón de radiación. Baja temperatura de ruido. Excelente VSWR.	Capaz de seguir a un satélite cuasi-estacionario sin mover el reflector principal. La dirección del haz puede cambiarse moviendo el radiador principal. Baja eficiencia de apertura. Patrón de radiación poco deseable. Posible capacidad de multi-haz con múltiples radiadores principales	Excelente patrón de radiación. Alta eficiencia y baja temperatura de ruido. Bajo VSWR. El alimentador y LNA pueden ir en el compartimento del equipo. Baja carga de viento.	Excelente patrón de radiación. Alta eficiencia y baja temperatura de ruido. Bajo VSWR. El alimentador y LNA pueden ir en el compartimento del equipo. Baja carga de viento.
Aplicaciones	Estaciones terrenas pequeñas, TVRO	Antena para recepción multi-satélite	Estaciones terrenas medianas y pequeñas.	Estaciones terrenas medianas y pequeñas.

Figura 4.5. Antenas de offset.

4.2.2 Etapa de recepción de sistemas DTH.

Un sistema de recepción individual o DTH (figura 4.6) está formado principalmente por 3 elementos:

- La antena parabólica, encargada de la recepción de canales provenientes del satélite.
- El alimentador con el LNB (*Low Noise Block*), el cual selecciona los canales con la polarización adecuada, amplifica la señal y la convierte a las frecuencias intermedias. Recibe la energía del receptor o IRD. Se observa al LNB por separado en la figura 4.7.
- IRD (*Integrated Receiver and Decoder*), este componente es el encargado de sintonizar el canal deseado en la primera frecuencia intermedia, y de decodificar los programas asociados al paquete de suscripción.

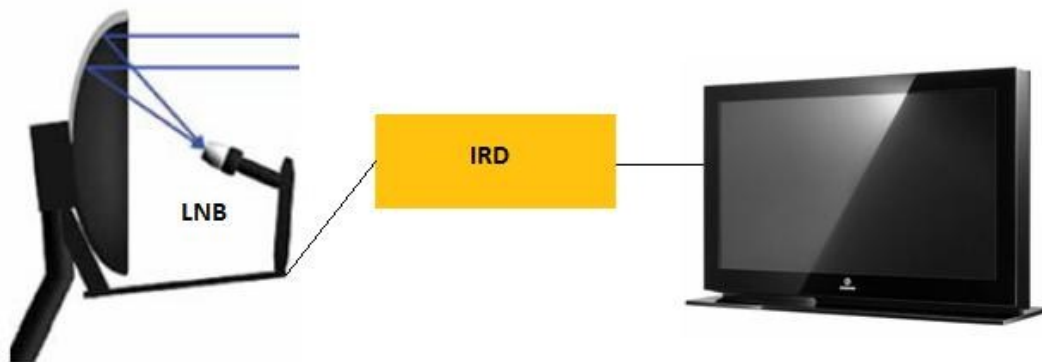


Figura 4.6. Etapa de recepción DTH.

Las antenas parabólicas están conformadas por dos elementos, el plato o superficie reflectora y el alimentador. Las ondas provenientes del satélite son reflejadas en el plato y recolectadas por el alimentador. Las antenas parabólicas con construidas de metal y de malla recubierta de material sintético.

El alimentador de la antena además de recolectar las ondas radioeléctricas es encargado de seleccionar la polarización mediante el control del IRD. Algunos alimentadores son capaces de soportar dos polarizaciones al mismo tiempo, a lo que se le conoce como ortomodo, esto se logra con dos salidas independientes o dos alimentadores.

Las principales antenas parabólicas utilizadas para los sistemas de recepción DTH son la antena simétrica y la de *offset*.

Las antenas simétricas son sencillas de diseñar y construir pero presentan desventajas en cuanto a la eficiencia alcanzada, la cual no supera el 60%, además de que la posición del alimentador hace que capte ruido proveniente de la superficie terrestre.

La principal ventaja de las antenas de *offset* es que el alimentador y LNB son colocados fuera de la línea de vista del lóbulo principal, permitiendo alcanzar eficiencias del 70% y 75%.

Los principales parámetros a considerar en la instalación y diseño de antenas parabólicas son:

- La ganancia máxima de la antena, en sistemas DTH se necesitan valores mayores a 20 dBi. Los valores de ganancia están fijos y estandarizados por los proveedores de servicios, basados en las características técnicas de los satélites empleados.
- El ángulo de abertura o ancho del lóbulo principal a la mitad de potencia o a -3dB.
- Aislamiento de polarización cruzada.
- Orientación de la antena. Definida por el ángulo de elevación y el acimut.

Las antenas de los sistemas DTH suelen ir montadas de dos maneras diferentes. La primera de ellas es un montaje fijo, la antena es ajustada con buena exactitud con los ángulos de elevación y acimut correspondientes, apuntando la antena a la posición orbital deseada. El otro tipo de montaje utilizado es el montaje polar, el cual permite movimiento de la antena para poder realizar un seguimiento de la órbita geoestacionaria que sigue el satélite.

Por otro lado el LNB se puede considerar como un pre-amplificador de la antena, cuyas principales funciones son:

- Amplificar las señales que se reciben con un amplificador de bajo ruido.
- Convertir las señales de microondas recibidas a una frecuencia baja o frecuencia intermedia, la cual es del orden de los 950-2150 MHz.

Los parámetros fundamentales para el diseño o la elección de un LNB son la temperatura de ruido la ganancia de conversión y el ruido de fase.



Figura 4.7. Bloque de bajo ruido o LNB

El IRD, receptor / decodificador integrado, es compuesto por el receptor, el decodificador y la solución propietaria de software y hardware asociada al proveedor de servicios de TV.

El receptor, es encargado de sintonizar el canal deseado, con la señal en frecuencia intermedia proveniente del LNB. El sintonizador funciona bajo el concepto de un receptor superheterodino y permite obtener a la salida la portadora del canal deseado.

Después la señal es demodulada y descifrada basándose en procesos inversos a los hechos en la etapa de transmisión. Estos procesos dependen del estándar utilizado.

4.3. Hardware del segmento espacial.

Se han descrito los elementos principales tanto de la etapa de transmisión como de recepción de un enlace satelital. Sin embargo, gran parte de las características de las antenas y equipos utilizados para comunicarse de un punto a otro dependen del repetidor en órbita.

En análisis previos, se observaron algunos de los parámetros necesarios para considerar a un enlace como factible. De igual forma, hay otros factores involucrados en un análisis que provienen de los elementos físicos de los transpondedores.

Para los satélites de comunicaciones tenemos 2 tipos de transpondedores: transparentes o regenerativos,

4.3.1 Transpondedores transparentes

Se aplican procesos de amplificación y filtrado de las señales recibidas sin modificar de manera lógica el contenido de estas. La potencia de portadora se amplifica y se convierte a una frecuencia menor. La ganancia en la etapa satelital varía entre 100 y 130dB, tomando en cuenta que el satélite recibe señales del orden de picowatts. La potencia es limitada tanto por la capacidad de los amplificadores, que son por lo general TWTs o SSPAs, como por la capacidad total de generación de energía del satélite. Debido a estas limitaciones, el ancho de banda disponible total de la carga útil es dividido en sub-bandas con un amplificador asociado a ellas.

La cadena de amplificación asociada a cada sub-banda es el transpondedor. El ancho de banda total del satélite se logra a través de grupos de filtros denominados multiplexores de entrada y de salida.

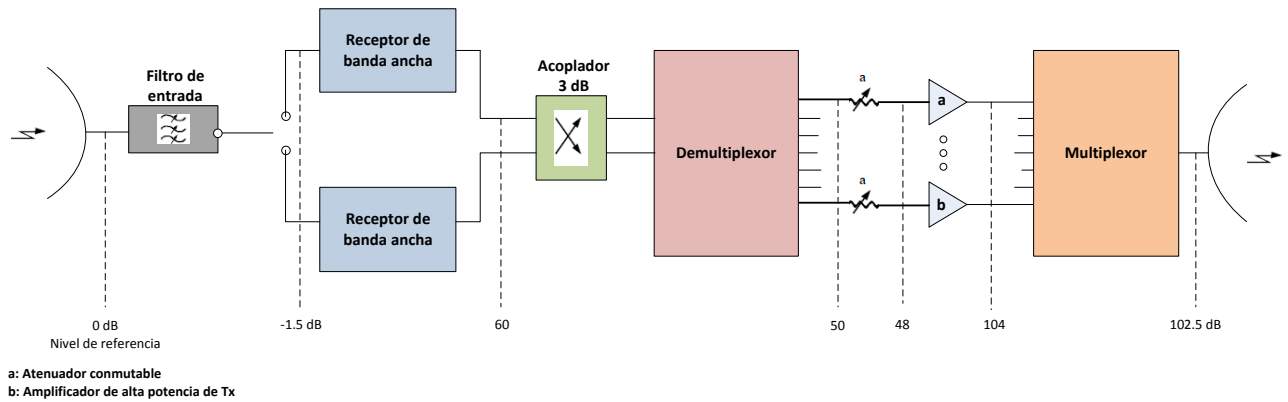


Figura 4.8. Diagrama a bloques de un transpondedor transparente o bent-pipe.

4.3.2 Transpondedores regenerativos

En este tipo de configuraciones, las portadoras del enlace ascendente son demoduladas, procesadas a bordo y enrutadas hacia el enlace ascendente de manera inteligente. La frecuencia de bajada se logra mediante la re-modulación de las señales procesadas en banda base. Con esta disposición se hace más factible y eficiente el uso de haces puntuales que concentren la potencia en puntos de interés para los enlaces, pudiendo minimizar los efectos debidos a la lluvia [43]. El costo de implementación y complejidad de esta tecnología limita a muchos operadores en la utilización de estas técnicas.

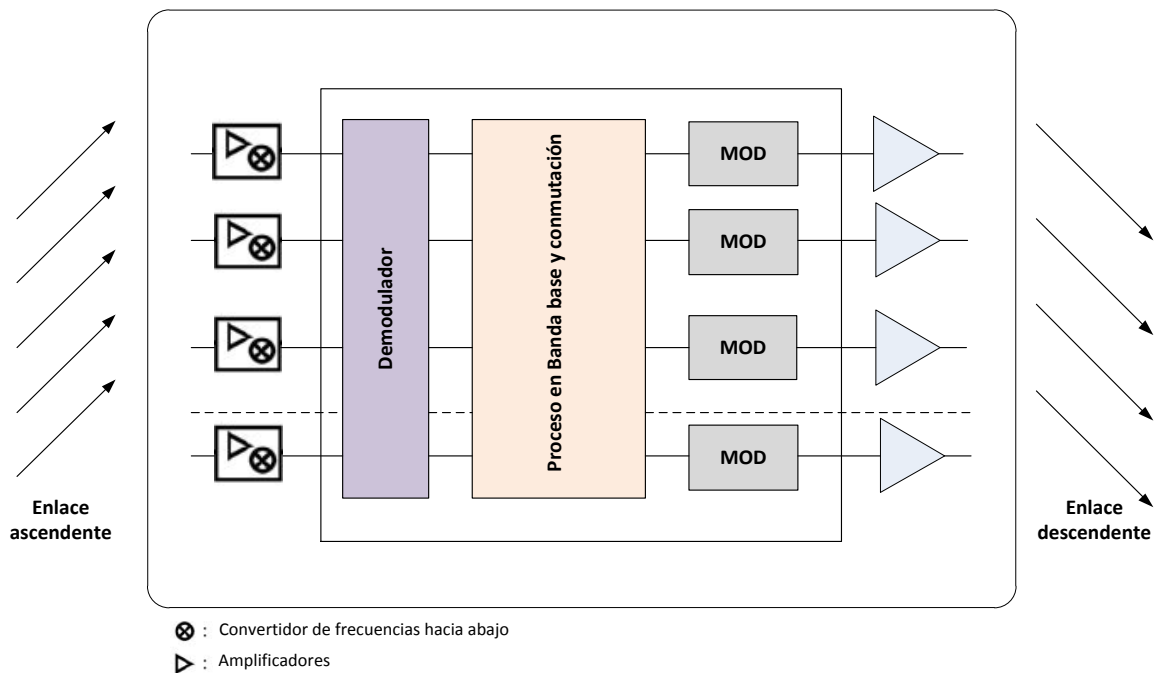


Figura 4.9. Diagrama a bloques transpondedor regenerativo.

4.4. Satélites por tipo de servicio.

La siguiente clasificación de los satélites es en base al tipo de servicio al que serán dirigidos [48].

Los satélites de servicio fijo cuentan por lo general con la opción de trabajar en varias bandas de frecuencia, por lo tanto, la potencia disponible es distribuida en cada banda dependiendo de la demanda esperada. Los satélites de servicio fijo en banda C y Ku son lo más comunes, pero a su vez son los que resultan más caros de construir al incluir elementos diversos y requerir de mayor espacio y disponibilidad de potencia. El incluir bandas adicionales como Ka, X, S o L encarece y aumenta la complejidad del diseño. La figura 4.10 muestra un ejemplo de este tipo de satélite. En sistemas de televisión se puede utilizar para contribución y distribución de video. Así como enlaces bi-direccionales.

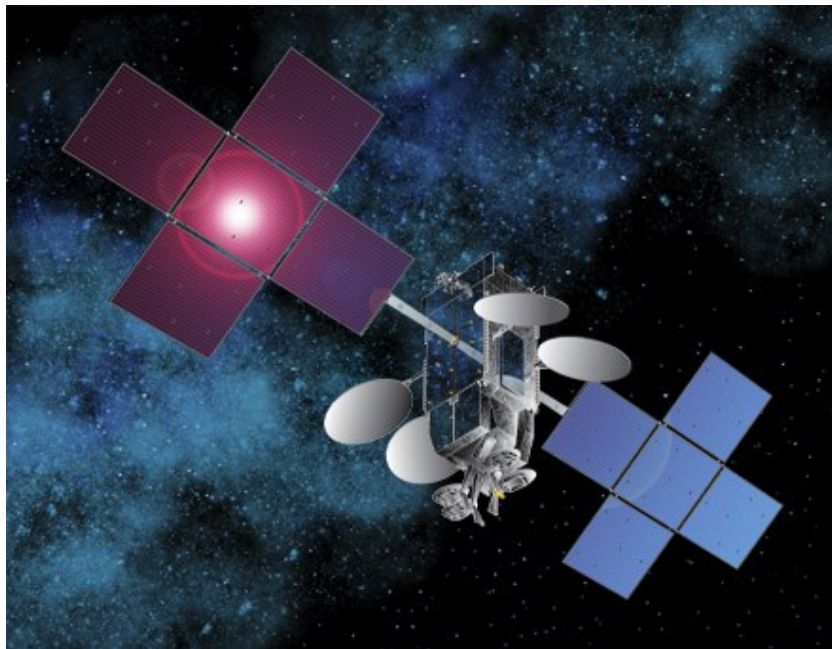


Figura 4.10. Satélite Júpiter de servicio fijo fabricado por SS/Loral.

Los satélites de Radiodifusión cuentan con diseños más simples, generalmente utilizan una sola banda de frecuencias (Ku), lo que los hace ligeramente menos complejos. Con esto, se busca optimizar al máximo el ancho de banda y potencia disponible por cada transpondedor. En la figura 4.11 se encuentra el satélite *Echostar XIV*, el cual es un ejemplo de satélite de radiodifusión utilizado para DTH.

Mientras más potencia sea capaz de producir un satélite de este tipo, mejores condiciones se tendrán a la recepción. Un adecuado balance de los parámetros de diseño, permitiría reducir el tamaño y el costo de las antenas para servicios DTH. Los satélites en banda Ka para ofrecer este tipo de servicios requerirían de una exagerada cantidad de potencia para lograr niveles de calidad y cobertura similares a un sistema DTH en banda Ku. Es por eso que tanto para servicios fijos, como de broadcast se utilizan haces concentrados en potencia que aseguran niveles de

disponibilidad aceptables combinados con equipo en Tierra de tamaño reducido, pero solamente en regiones geográficas limitadas.

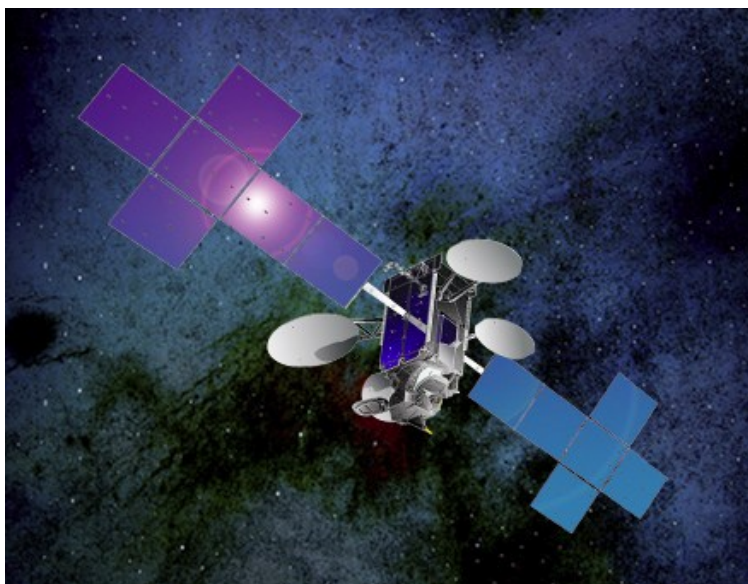


Figura 4.11. Satélite Echostar XIV de Broadcast con 103 transpondedores de banda Ku.

4.4.1 Consideraciones de diseño aplicables a satélites en las bandas de frecuencias superiores a 17GHz.

Se sabe que la absorción atmosférica y la atenuación debida a la lluvia en las bandas de satélite a partir de 17.3 GHz son mucho mayores que en la banda de 12 GHz, ampliamente utilizada. Además, la atenuación de propagación puede reducir enormemente la disponibilidad del servicio y la fiabilidad del sistema. Es por esto que en el diseño de un satélite se tienen que tomar en cuenta la banda en la que va operar.

Existen 3 técnicas de reducción de la atenuación debida a la lluvia para el diseño de un satélite [34]:

Aumento de la PIRE

El control adaptativo de potencia es un método eficaz y sencillo para mejorar la disponibilidad del servicio cuando hay atenuación debida a la lluvia, y a la vez reduce la interferencia causada a otros servicios cuando el cielo está despejado.

Normalmente los sistemas abarcan una zona de servicio amplia con un solo haz. Los sistemas de PIRE variable se clasifican según permitan o no variar localmente la PIRE dentro de la zona de servicio. La PIRE puede ser uniformemente o localmente variable. En el sistema local, la potencia de radiación total necesaria del satélite es menor que la de un sistema uniformemente variable

con la misma disponibilidad del servicio. Esto se logra a través de un sistema multi-haz (figura 4.12). Además se las emisiones no deseadas se pueden limitar en mayor grado.

El sistema uniforme de compensación de potencia puede llegar a aumentar las emisiones no deseadas, lo cual no es deseable. Por otro lado se tiene que contar con amplificadores de muy alta potencia a también altas frecuencias. Este diseño es el utilizado en satélites de frecuencias menores a 17GHz. Para el caso de satélites en banda Ka, se utiliza el sistema localmente variable.

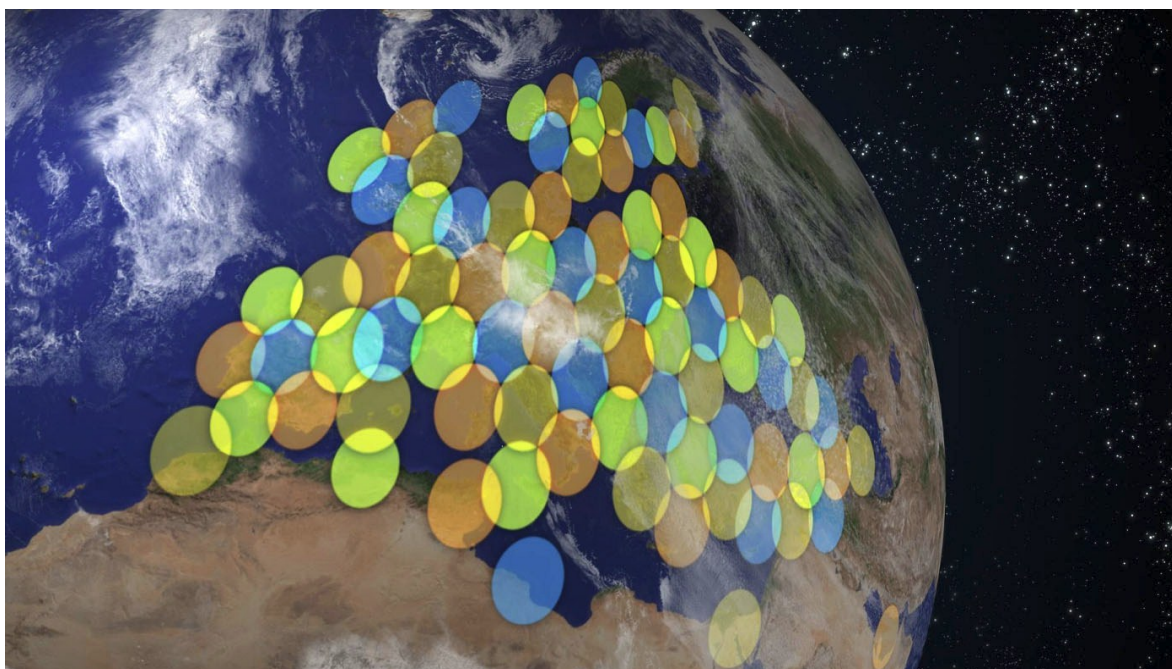


Figura 4.12. Haces múltiples del satélite KA-SAT de Eutelsat cubriendo el continente europeo.

Transmisión Jerárquica

Para formar una señal de transmisión jerárquica se multiplexan en el tiempo dos o más esquemas de modulación de requisitos de relación C/N diferentes. La información fundamental, por ejemplo la mínima calidad de la señal de vídeo y de audio, se transmite a una velocidad de datos baja utilizando un esquema robusto de modulación/codificación del canal con un requisito de relación C/N bajo. Por otro lado, la parte de la señal de alta velocidad de datos, se transmite con un esquema de modulación más eficaz y con un requisito de relación C/N mayor. El receptor elige el flujo de datos adecuado en función de la condición de relación C/N de recepción real. Por consiguiente, la transmisión jerárquica se puede utilizar para realizar una degradación gradual en el sistema digital de modo que la calidad de la imagen vaya disminuyendo paulatinamente según se reduce el valor de la relación C/N en recepción.

Esta consideración de diseño aplica hoy en día para el diseño de sistemas en Tierra principalmente. Aun no se han desarrollado sistemas espaciales que hagan este procesamiento.

Sistema de radiodifusión con almacenamiento en el receptor.

En términos estadísticos, la lluvia intensa capaz de producir interrupción de la señal se produce únicamente durante un breve instante en el día. Mediante el almacenamiento, es posible transmitir programas por anticipado y almacenarlos en el receptor para evitar interrupciones del servicio durante la presentación.

Suponiendo la recepción con almacenamiento, es inevitable un gran retardo de transmisión. Dicho retardo dependerá del esquema que se adopte y de la capacidad de superar interrupciones de la señal. Es posible que para los programas en tiempo real, no sea adecuado el almacenamiento en los sistemas.

En el caso de satélites, la opción de incorporar sistemas de almacenamiento en el espacio no ha sido incorporada. En el segmento terreno, existe incorporación de sistemas de almacenamiento a la recepción, pero estos no han considerado como opción que remplace a lo ya existente.

CAPÍTULO 5: ACTUALIDAD Y TENDENCIAS DE LOS SISTEMAS DE TELEVISIÓN DIGITAL VÍA SATÉLITE.

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

Como era de esperarse, cada país siguió un proceso diferente de transición. Se han establecido fechas para el cambio de la televisión analógica a digital dependiendo del desarrollo tecnológico. En América, Estados Unidos fue el primero que completó la transición. Cuando la FCC ordenó el apagón analógico en junio del 2009, cerca del 98% de la población estaba lista para realizarlo.

Por otro lado, en Europa, cada país tomó una fecha diferente de acuerdo a sus intereses para realizar el cambio. El primer país en realizarlo fue Holanda, en diciembre del 2006.

Japón por su lado, no ha realizado la transición a la televisión digital, pero de acuerdo a la Asociación de la Promoción de la Televisión Japonesa, en el presente año 2011 se terminaran por completo las transmisiones análogas en el país.

El cambio a la televisión digital se dio por tres principales vertientes. La siguiente gráfica en la figura 5.1 muestra la migración a la televisión digital en Estados Unidos. La forma más difundida fue por medio de sintonizadores externos (74.3 % de la población norteamericana). El 18.2 % lo realizó a través de televisión por cable y un 7.5% por medio de televisión por satélite [17].

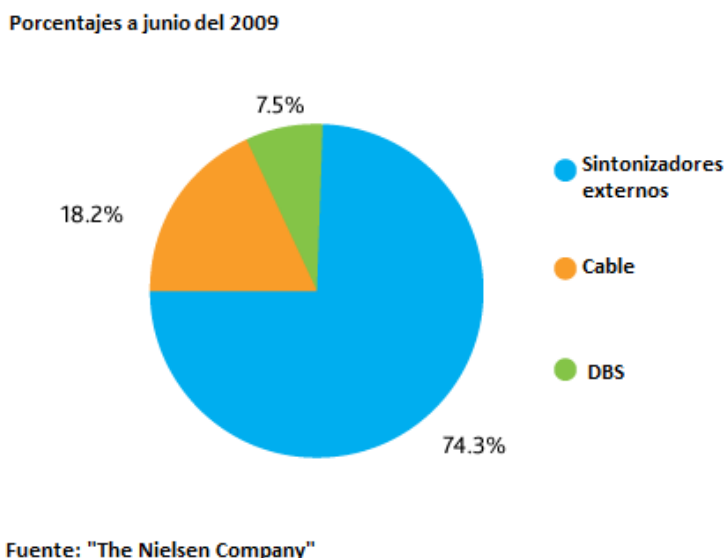


Figura 5.1. Principales métodos de difusión de TV.

Las compañías del sector satelital encontraron un gran negocio en la cobranza por los servicios de televisión digital. En la figura 5.2 se muestra como desde el año 2004 la televisión de paga satelital ha ido ganando terreno sobre la televisión de paga por cable. Para el 2012 se espera que el 58.8% del mercado de televisión de pago sea entregado por cable, el 31.3% vía satelital y el 9.9% por operadores de redes de datos que también se han introducido a la competencia.

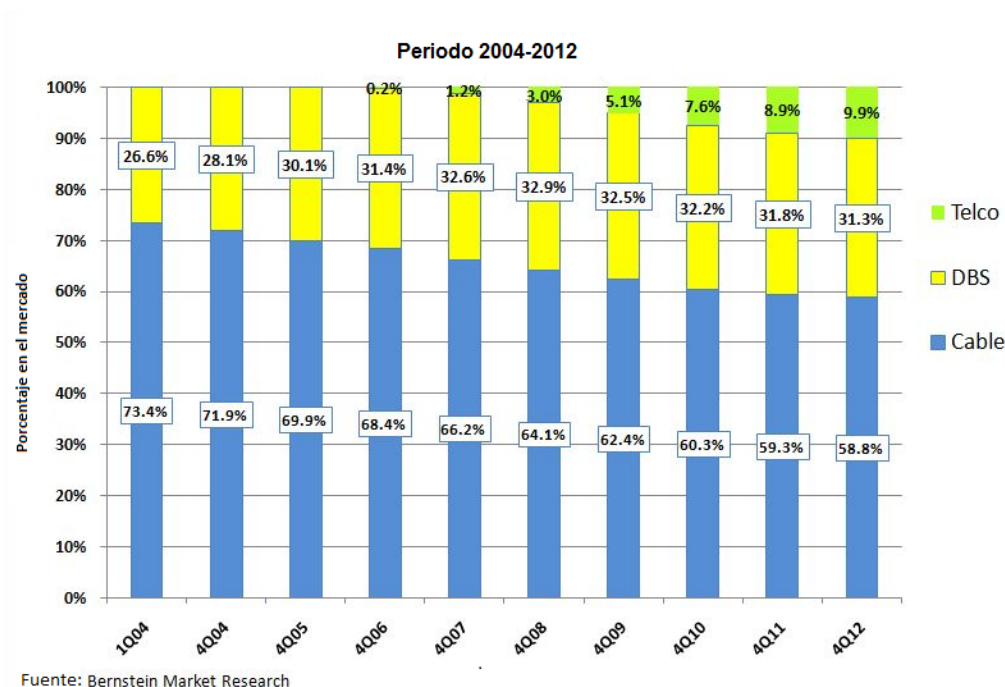


Figura 5.2. Participación en el mercado de la televisión de paga.

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

Este gran avance en el número de suscriptores se le atribuye a las agresivas ofertas de la compañía *Dish*, lo cual impulsó a la única compañía de ese momento: *SKY* a introducir paquetes de bajo costo. Por otro lado, hay expectativas altas ante la entrada de nuevos operadores de televisión restringida con tecnología DTH, como *Telefónica* y *Axtel* [72].

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

Para los operadores de satélites, el mercado de la televisión digital es de suma importancia pues según estudios, aproximadamente un 50% de los servicios mundiales por satélite están relacionados con la televisión. La figura 5.3 nos señala el crecimiento de la demanda satelital desde el año 2009 hasta 2019. Se puede observar que ningún servicio tendrá un decremento considerable, algunos de ellos se mantendrán a lo largo de este periodo y los servicios que muestran un crecimiento sustancioso son en especial los servicios de banda ancha y redes de datos.

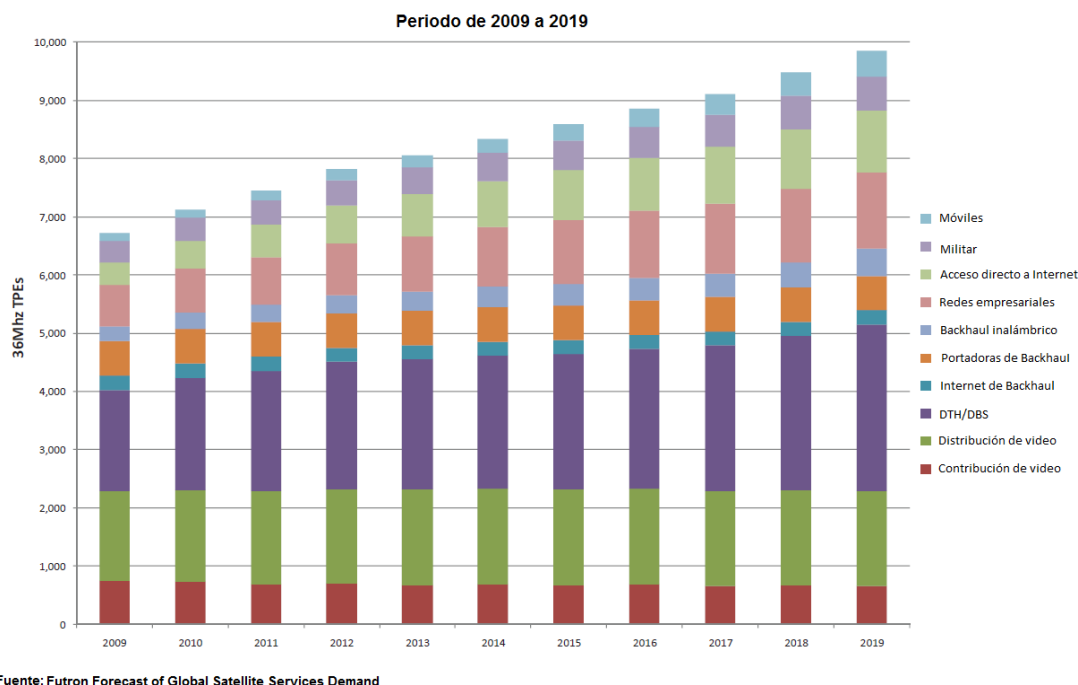


Figura 5.3: Demanda mundial de servicios satelitales en el periodo de 2009 a 2019.

Las redes que proveen acceso a Internet y las redes empresariales, incluyendo las redes gubernamentales muestran un crecimiento de 15.6% y 7.7% respectivamente en los siguientes dos años. Estas redes promedian un crecimiento esperado para el 2019 de 10.8% y 6.4% [16].

Otros servicios en los que se espera un crecimiento importante, son los servicios de movilidad comercial y *backhaul* o redes de retorno. Esto será propiciado por la tendencia e interés de los usuarios a la movilidad de sus servicios. En promedio tendrán un crecimiento de 12.6% y 6.1%, respectivamente al terminar la década.

Como se mencionó anteriormente, gran parte de la demanda satelital es debida a los servicios DTH/DBS. El crecimiento esperado para 2019 será del 5.2%. Este incremento dependerá en gran medida de la elección de los operadores por servicios en banda Ka y adopción de nuevos estándares de transmisión como DVB-S2.

El uso de la banda Ka es propiciado por el crecimiento de los servicios de banda ancha y la saturación actual del espectro electromagnético en bandas para satélites inferiores. La opción de que los satélites permitan consumo de más potencia, mayor tasa de transferencia o características más flexibles permitirá a los operadores y clientes tener una oferta mayor de servicios y disminuiría los costos.

La gráfica de la figura 5.4 presenta la distribución de la demanda satelital por bandas de frecuencias comerciales para la segunda década el siglo XXI. Esta gráfica estará ligada al crecimiento en oferta de los operadores gracias a la aparición de nuevos servicios. La tendencia de crecimiento es mucho mayor para banda Ka, que para bandas C y Ku.



Figura 5.4: Demanda satelital en Banda C, Ka y Ku. Fuente: Futron

Regresando a los servicios de televisión, existen dos factores clave en la distribución de los mismos: la introducción de las señales de alta definición en el mercado y las diferencias étnicas en el contenido y en la distribución de televisión satelital.

Podemos decir que la alta definición es el siguiente paso después de la transición al video digital. En el año 2006, el 88% de los canales a nivel global eran canales digitales, un 8% eran analógicos y solamente 4% eran de alta definición. La distribución de canales de alta definición comenzó a realizarse mientras el proceso de transición A/D seguía su curso.

En la actualidad en algunos países, como el nuestro, existe una mezcla de los tres tipos de señales, al existir todavía señales de tipo analógico.

Para el año 2015 se espera que el porcentaje de canales analógicos sea solamente del 1% y que el número de canales de alta definición tenga un aumento, llegando hasta un 28%, como lo muestra la figura 5.5

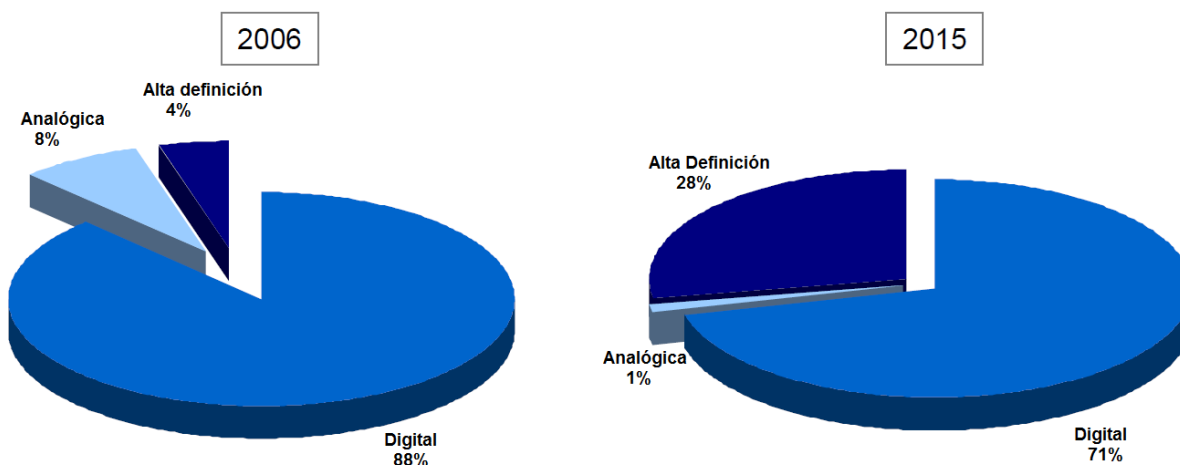


Figura 5.5: Cambio en los canales de televisión de analógica a digital y de alta definición en EU. Fuente: Futron

5.1 Oferta de servicios y mercado de la televisión digital por región.

La distribución de televisión satelital alrededor del mundo va a depender de la zona, continente o incluso país donde se ofrezca.

En Estados Unidos, el servicio de DTH puede clasificarse como masivo o uniforme con todos sus usuarios. *Echostar* y *DirecTV*, los principales proveedores de servicios de transporte de televisión digital por satélite, tienen control tanto de la distribución de las señales como de la programación.

Siendo Estados Unidos uno de los países con mayor número de inmigrantes, tuvo que adoptar los cambios necesarios para ofrecer la programación étnica al alcance de un botón del control remoto. En el caso de la programación en idioma español, ésta forma parte actualmente del bloque principal de servicios y no es considerada como programación étnica (generalmente ofrecida bajo otros paquetes de programación a elección del suscriptor).

Eutelsat Communications y *SES Astra* proveen los servicios de transmisión DTH en Europa, Oriente Medio y África, mas no controlan la programación como *Echostar* y *DirecTV* en EU, permitiendo la entrada de nuevos proveedores de contenido.

En sus inicios *Eutelsat* era parte de la infraestructura pública, por lo que la implementación de DTH en Europa fue una exigencia por parte de los gobiernos en lugar de la iniciativa privada. *Eutelsat* fue la primera empresa en establecer los servicios de DTH en el viejo continente.

El hecho de fuera una empresa pública fue una de las dos razones de la separación de los servicios de transmisión y de programación.

La otra razón y quizás la más importante, fue la diferencia entre culturas y lenguajes del continente. Los países de lengua alemana podrían o no estar interesados en la programación de lengua francesa por ejemplo.

Debido a esto, cada país estableció industrias locales encargadas de producir su propia programación, además de tomar la iniciativa de lanzar sus propios satélites DTH para la conducción de las señales.

En la actualidad, existen más de 34 paquetes de programación DTH diferentes en Europa. En América del Norte, entre Estados Unidos y Canadá no existen más de 6 paquetes [70].

En países orientales y culturalmente distintos como Japón y China, hay una postura local entorno a la tecnología y a los servicios de televisión satelital. En Japón se desarrolló un estándar propio generalizado para contenidos digitales, el cual en un inicio solo se encontraba dentro del país pero hoy en día ha comenzado a expandirse en ciertos países de América del Sur.

Un caso similar al de Japón se ha dado en China con la reciente implementación de su estándar ABS-S. Con el lanzamiento del satélite *Chinasat-9* para la transmisión de las olimpiadas de Beijing 2008, el país oriental comenzó a fijarse en los servicios de DTH. El lanzamiento de este satélite significó el comienzo de los servicios de televisión digital en diferentes regiones del país, en especial aquellas regiones apartadas o inaccesibles para los servicios de radiodifusión terrestre o por cable. El gobierno chino tuvo que comenzar a establecer ciertas normas respecto a los platos parabólicos, el estándar que ocuparían y las empresas que se encargarían de proveer los servicios satelitales.

5.2 Tendencias tecnológicas en la industria satelital y distribución de contenidos multimedia.

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

La primera premisa, en el caso de la televisión digital, se fundamenta debido al gran crecimiento de aplicaciones multimedia y la demanda de mayor calidad en las transmisiones de HD. En el caso de la televisión de alta definición, se espera que crezca más del 100% en oferta de canales en menos de 5 años. Por otro lado, se prevén mejoras de eficiencia en el consumo de ancho de banda de las señales mejorando los procesos de filtrado y codificación.

Otra área que ha sido fuertemente impulsada por la industria del entretenimiento es la televisión 3D. La UIT y el consorcio DVB, entre otros, ya han planteado el uso de marcos de referencia para la estandarización y creación de contenidos con formatos estereoscópicos. Se espera que unos 20 años (2030), la televisión 3D llegue a su máximo nivel de desarrollo. Actualmente se encuentran en investigación y en análisis los detalles importantes de la visión humana y aspectos sobre la compresión y codificación de esta información. Los primitivos formatos en 3D que existen hoy en día en el mercado, requieren entre un 10% y 20% más de ancho de banda que el video en alta definición en 2D.

La segunda premisa de los operadores satelitales se fundamenta en la aparición de los servicios basados en “La Nube” (*Cloud computing*), la personalización de los contenidos multimedia y la entrada de operadores de redes de datos al mercado de la televisión. El desarrollo de nuevas plataformas basadas en Internet y el aumento del ancho de banda disponible darían más ventajas competitivas a los satélites con respecto a los operadores de redes. El satélite cuenta como mayor cobertura, flexibilidad y rapidez de implementación que las redes cableadas. Sin embargo, para estas últimas la capacidad y disponibilidad de ancho de banda aún no se ve superada. Además, esta capacidad va en aumento a medida que las tecnologías ópticas son implementadas [70].

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

Por este último argumento, el reto fuerte para la industria satelital es integrarse al mundo de las redes de datos completamente y no seguir con arquitecturas dependientes del tipo de contenidos que se transportan. La distribución de contenidos multimedia se ha vuelto cada vez más personalizada. Esto no marca el fin del *Broadcasting*. Más bien hay que tomar en cuenta que la tendencia está dirigida a que los usuarios tengan una mayor oferta e interacción con los servicios ofrecidos.

El crecimiento en aplicaciones y servicios se verá reflejado de igual forma en la implementación y desarrollo de nuevos sistemas en las plataformas de los satélites. Una de las plataformas que ha tenido un desarrollo importante los últimos años es la denominada HTS (*High Throughput Satellite*). Los aspectos más importantes de estas tecnologías en los satélites son el reúso de frecuencias alto debido a la implementación de haces puntuales *spot beams* y el uso de tecnologías de procesamiento a bordo. Para alcanzar el desarrollo deseado es necesario todavía encontrar un balance entre la complejidad de los sistemas y su posibilidad de implementación. Las arquitecturas regenerativas actuales aún son muy costosas y algo complejas. Los circuitos utilizados son de aplicaciones específicas (también denominados ASIC, por sus siglas en inglés) y no son reconfigurables. El cambio a sistemas de procesamiento configurables reduciría la

complejidad, daría mayor flexibilidad a los servicios transportados y permitiría pensar en una recuperación de costos a través de la demanda de los clientes.

Hoy por hoy, el desarrollo de plataformas HTS está orientado más hacia la transmisión de datos y no al *Broadcasting*, que ha funcionado bien con arquitecturas transparentes *bent-pipe* en bandas C, Ku y Ka. A medida que la televisión se aproxime al modelo de “La nube”, se tendrá que replantear el modelo de negocios y el tipo de contenidos distribuidos. De igual manera tendrán que cambiar los esquemas y estándares de transmisión para adaptarse a este nuevo paradigma.

Según estudios de mercado, se espera que a mediados de la década de 2010 la demanda de servicios en banda Ka aumente en mayor medida.

En Estados Unidos a finales de la década del 2000 existieron ambiciosos proyectos, *Teledesic* y *Spaceway*, que contemplaban satélites con procesamiento a bordo y uso del espectro disponible en banda Ka. Sin embargo, no hubo viabilidad para estos proyectos; en el caso de *Teledesic* se detuvo por completo. El proyecto *Spaceway* cambió su visión y hasta hoy ha lanzado 3 satélites sin procesamiento a bordo que son usados por compañías como *DirectTV* para ofrecer servicios de televisión de alta definición en banda Ka. Proveedores de servicios como *Echostar*, *DirectTV* y *Telesat* ya cuentan con cargas útiles que aprovechan el amplio espectro disponible en banda Ka. Los servicios citados son provistos únicamente en Estados Unidos y Canadá.

En Europa, por su parte se han lanzado recientemente satélites como el *Ka-Sat* y la nueva generación de satélites *Hotbird* de *Eutelsat* con cobertura en la mayoría de países del viejo continente. Tanto en Norteamérica como en Europa la apuesta por arquitecturas con procesamiento a bordo se han dejado para una nueva generación de satélites, pues la capacidad en banda Ka que tienen los satélites se basa en transpondedores transparentes [54].

En África, Asia y América (salvo EU y Canadá) la demanda de servicios en banda Ka aún no es la suficiente como para considerar económicamente viable un satélite dedicado a la explotación de esta banda. Hablando sobre el caso particular de México, en 2006 se lanzó una licitación para la explotación y uso de la banda Ka asociada a la posición orbital 109.2 ° W. En octubre, del mismo año se declaró desierta la licitación debido a que tanto las empresas nacionales como las extranjeras no vieron todavía viable este nicho de mercado en la región.

Esta percepción para el mercado latinoamericano podría cambiar en los próximos años. De acuerdo a las últimas publicaciones del mercado de comunicaciones por satélite, la demanda de capacidad es muy alta. Algunos factores que se señalan como fortalezas de los mercados Latinoamericanos es la estabilidad económica por la que atraviesa la región y la responsabilidad de organización de eventos de importancia global como la copa del mundo de 2014 y los juegos olímpicos de 2016 en Brasil. Este tipo de eventos incrementarán exponencialmente la demanda de transmisión de video y servirán como catalizador en la migración de proveedores de servicio regionales a nuevas tecnologías de transmisión.

En México, el operador local SATMEX tiene más demanda de la que puede manejar y se prevé que con el remplazo gradual de su flota y la reciente reestructura económica pueda adquirir mayor importancia a nivel regional. La implementación de nuevas tecnologías y servicios dependerá del interés y contribución de otras empresas junto con el gobierno en los nuevos satélites.

CONCLUSIONES.

A través de esta investigación, hemos enmarcado la actualidad de la radiodifusión de televisión por satélite desde los principales hitos históricos, referenciando los aspectos más importantes, hasta llegar a la actualidad y las tendencias en la transmisión de contenidos digitales. Esto siempre es parte fundamental en toda investigación, ya que el realizar un avance cronológico alrededor de alguna tecnología nos permite tener una mejor perspectiva de las necesidades y los porqués en el desarrollo de los sistemas de comunicación estudiados.

Se ha determinado que el sector de las telecomunicaciones es una parte muy dinámica de la ingeniería. Como ejemplo se estudió una de las áreas que más se ha transformado en los últimos años: las comunicaciones por satélite. Desde los inicios de este medio de comunicación, la televisión ha tomado un rol protagónico en el desarrollo de sistemas terrestres y espaciales. Además existe ya un modelo de negocios bastante remunerable que involucra a miles de empresas alrededor del mundo. El negocio de conducción de señales de video a través del satélite proporciona más del 50% de los ingresos de esta industria a nivel global.

Los satélites artificiales nacieron a finales de la década de los 60. Junto con ellos, surgió la necesidad de caracterizar matemáticamente los fenómenos naturales más influyentes para este medio de comunicación basándose en las leyes físicas y matemáticas. Con el paso del tiempo se comenzaron a desarrollar los primeros estándares de transmisión de señales por este medio.

Al desarrollarse las comunicaciones digitales de mano de la electrónica, aparecieron también estándares que permitieron evaluar y mejorar las técnicas de transmisión ya existentes. Esto último se volvió crucial para el avance tecnológico de la televisión y los satélites.

El principal problema al que los Ingenieros en Telecomunicaciones nos enfrentamos en la actualidad es el uso eficiente de los recursos disponibles a fin de contar con medios para establecer una comunicación. En el caso de transmisión por medios no guiados como los satélites, es importante aprovechar al máximo el espectro radioeléctrico. Debido a esto, todo nuevo estándar de comunicaciones que se desarrolle debe de presentar un ahorro en ancho de banda respecto a los estándares anteriores.

En el caso de la televisión, no fue sino hasta la última década del siglo XX que surgieron estándares de codificación de fuente y de canal digitales que provocaron en menos de 20 años una revolución y difusión de la información sin precedentes. Todo el fenómeno de la era digital que aún sigue su camino ha sido pieza clave para que el desarrollo de industrias como la satelital. Se espera que para el término de la transición analógico digital de la televisión exista mayor número de suscriptores de televisión satelital que por cable.

Al ir avanzando en esta investigación, se lograron describir las características y principios que rigen las técnicas de compresión de audio y video digitales. En la actualidad, existen innumerables

técnicas de compresión de audio y video, pero solo se analizaron aquellas que son empleadas para los estándares de transmisión satelital.

En cuanto a codificación de video se analizaron los estándares MPEG-1 parte 2, MPEG-2 parte 2 y MPEG-4 parte 10. El último de estos muestra una eficiencia de hasta el 50% respecto a su antecesor MPEG-2. Además de que MPEG-4 permite transmisiones de video y audio de mejor calidad sin exceder los recursos disponibles. Es por ello que es utilizado para el estándar DVB-S2 e ISDB-S.

En la codificación de audio se describieron múltiples estándares como MPEG-1 parte 3, MPEG-2 parte 3, AC-3, MPEG-2 parte 7, MPEG-4 parte 3 y algunos otros. El estándar MPEG-4 parte 3, también conocido como AAC fue el que se incluyó en el estándar satelital DVB-S2 al demostrarse más adecuado y superior a sus similares.

El flujo de datos multiplexado que resulta de la codificación de audio y video, es procesado posteriormente y adaptado al canal de transmisión satelital mediante técnicas digitales como protección contra errores y modulación de fase, entre las principales. En esta etapa analizamos la importancia y características de la protección de la información contra errores, ya que esta propiedad es una de las partes fundamentales en el sistema de transmisión y está directamente relacionada con la eficiencia de estos. Similar a otras áreas de la ingeniería, con el paso del tiempo se han ido desarrollando nuevas técnicas de corrección de errores cada vez más complejas pero al mismo tiempo más efectivas.

Así pues, y gracias al desarrollo del procesamiento digital de señales, revisamos que los códigos BCH en conjunto con LDPC son mucho más eficientes que los Reed-Solomon concatenados con códigos convolucionales. Muestra de ello es que el consorcio DVB incluyó a los primeros en el estándar más reciente de televisión por satélite: DVB-S2.

Con el surgimiento de las técnicas de codificación y compresión digital, la televisión por satélite pasó por un proceso de transformación y estandarización liderado por organismos y consorcios internacionales que llevaron al surgimiento a estándares como DVB, ISDB, ATSC, entre otros. Cada uno de estos estándares fue del mismo modo desarrollado para transmisión terrestre, por cable y satelital. La parte enfocada hacia satélite de estos estándares estipula los parámetros y detalles con que deben de cumplir los sistemas de transmisión para ser compatibles con sus homólogos en la etapa de recepción.

El tiempo y lugar en que se diseñaron estos estándares, así como las ventajas operativas de uno sobre otro formaron varios bloques de estandarización. El bloque principal está encabezado por los estándares europeos del consorcio DVB. Le sigue el estándar mixto de medios de transmisión japonés ISDB. Los demás esquemas, a pesar de estar mencionados en este trabajo, no alcanzaron una operatividad o diferencias significativas para ser analizados más a detalle. Como se mencionó, el estándar DVB se convirtió en un estándar *de facto* al ser de los pioneros en el área y poco a poco se fue expandiendo por el mundo, siendo ahora uno de los más usados.

Sobre los estándares del consorcio DVB hay dos generaciones tecnológicas involucradas en el desarrollo de los sistemas de televisión. Se enunciaron las características particulares de adaptación de la información dependiendo del medio en que se distribuyan. Se encuentran estandarizados los sistemas de primera generación de televisión por satélite DVB-S y DVB-DSNG. Años después salió a la luz el estándar de nueva generación DVB-S2 y algunos esquemas particulares de adaptación para comunicaciones móviles y canal de retorno por el satélite como DVB-SH y DVB-RCS, respectivamente.

El estándar ISDB-S en general muestra características muy similares a la primera generación DVB-S. Los bloques de codificación de fuente y multiplexaje funcionan de la misma manera. La principal diferencia se encuentra en que en los esquemas de modulación ya se incluye el esquema 8PSK en ISDB-S a diferencia de DVB-S.

Se realizó un estudio comparativo entre los estándares y en base a los parámetros definidos por el estándar DVB-S2 se demostró la superioridad operativa de éste. Una característica que no sólo se ve aplicada en los estándares de transmisión satelital, sino en todas las comunicaciones inalámbricas, y que además es pieza clave en la superioridad del estándar DVB-S2 es la aplicación de técnicas heurísticas o adaptivas. La optimización de los sistemas de telecomunicaciones se ha alcanzado gracias a los avances de la computación y la inteligencia artificial y han permitido la creación de estas múltiples técnicas adaptivas como solución a los diferentes problemas presentados por el dinamismo o variabilidad de los factores que afectan a una señal en el área de las comunicaciones.

El estándar DVB-S2, dependiendo de la situación, puede utilizar diferente velocidad de símbolos, ancho de banda, código interno de protección y modulación. Esto mejora y supera a los sistemas anteriores en donde todos estos factores son fijos.

Una vez determinada la supremacía de DVB-S2, se realizaron análisis de enlaces bajo este estándar. Con ello, pudimos determinar los márgenes y niveles de disponibilidad necesarios para un cálculo que involucra dos localidades. Para esto, se introdujeron los conceptos de cálculo de enlace satelital y las variables que intervienen en este.

Para realizar un cálculo confiable, se tuvo que involucrar la atenuación debida a la lluvia. Con ayuda de las recomendaciones de la UIT y herramientas de software comprendimos el procedimiento de cálculo de este valor y observamos el comportamiento variable en función de la frecuencia, disponibilidad, polarización del enlace, entre otros elementos.

El uso de la banda Ka de frecuencia implica que se tengan que entender nuevos problemas y retos: los fenómenos de propagación afectan más fuerte a las señales que son transmitidas y es necesario el desarrollo de nueva tecnología. Por otra parte, para garantizar la alta capacidad y disponibilidad de los enlaces de transmisión, es necesario utilizar modulaciones y codificaciones adaptivas.

Hoy por hoy, el futuro en los sistemas satelitales para telecomunicaciones está en caminado al diseño y provisión de servicios multimedia similar a los que se ofrecen a través de infraestructura

terrestre. El principal objetivo del diseño de dichos servicios es proveer una solución con la mayor cantidad de datos transmitidos.

En la última parte de este trabajo se realizó una investigación sobre la actualidad y tendencias del cambiante mercado de la televisión por satélite. A pesar de existir alta demanda, comprendimos que la introducción de los operadores de redes cableadas terrestres a la televisión y la oferta de contenidos de mayor calidad ha provocado que los operadores de satélite se cuestionen la viabilidad de su modelo de negocios actual y comiencen a explorar los nuevos medios de distribución de contenidos acorde con las tendencias tecnológicas.

Advertimos que los campos de estudio de este trabajo son bastante amplios y cada tema puede desarrollarse por separado. Esperamos que esta investigación fomente a otros universitarios a realizar un estudio más profundo sobre alguno de los temas aquí tratados y que facilite la comprensión de uno de los sistemas de comunicaciones más importantes para trascendentes para la historia de la humanidad: los satélites artificiales.

ANEXOS

A. Código de MATLAB auxiliar para el cálculo de enlace en banda KU FSS.

```
clear
clc

%% Constantes
R=42164.2; %km distancia del centro de la Tierra a la orbita GEO
rEarth=6378.155; %km
K=10*log10(1.3806503e-23); %dB/K
c0=299792458; %m/s

%% Datos Enlace
Vinf=58.071e6; %bps DVB-S2 Fec 2/3 SR=30.0 Mbaud
ABO=36e6; %Hz Ancho de banda requerido
EbN0=3.75; %dB para que jale el enlace @BER=10^-7
disp=99.8;
LongSat=deg2rad(116.8); %Satmex 5
for i=1:4
    %Estacion Tx
    LongET1=deg2rad(84.38);
    LatET1=deg2rad(33.75);
    Fasc=14.04e9; %GHz
    LdeltaAsc=1; %dB Perdidas miscelaneas
    PIREet=80; %dBW propuesta

    GTsat1=3.36; %dB/K

    %Estacion Rx
    LongET2=deg2rad(99.15);
    LatET2=deg2rad(19.4);
    Fdesc=Fasc-2.3e9; %GHz
    LdeltaDesc=1; %dB Perdidas miscelaneas
    Trx=152; %Temperatura de ruido del sistema de Rx
    Grx=38.7; %dB Ganancia de la antena receptora
    Tant=31; %Temperatura de Antena

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

    w1=cos(LatET1)*cos(LongSat-LongET1);
    w2=cos(LatET2)*cos(LongSat-LongET2);

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

```

    %Rango
    D1=(R^2+rEarth^2-
    (2*rEarth*R*sin(E1rad+asin((rEarth/R)*cos(E1rad))))^(1/2);    %km TX
    D2=(R^2+rEarth^2-
    (2*rEarth*R*sin(E2rad+asin((rEarth/R)*cos(E2rad))))^(1/2);    %km RX

    if i==1 %cielo despejado
        MuAsc=0;
        MuDesc=0;
    elseif i==2 %lluvia ascendente
        MuAsc=AtLluvia(E1,Fasc,LatET1,4.0307,0.23,D1,3.20925,disp);
        MuDesc=0;
    elseif i==3 %lluvia descendente
        MuAsc=0;
        MuDesc=AtLluvia(E2,Fdesc,LatET2,4.465,2.22,D2,2.3483,disp);
    elseif i==4 %lluvia ambos lados
        MuAsc=AtLluvia(E1,Fasc,LatET1,4.0307,0.23,D1,3.20925,disp);
        MuDesc=AtLluvia(E2,Fdesc,LatET2,4.465,2.22,D2,2.3483,disp);
    end

    LL=10^(MuDesc/10);
    TantL=(Tant/LL)+280*(1-1/LL);

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

    %% Uplink
    LsAsc=20*log10((4*pi*Fasc*D1*1000)/c0);
    CN0asc=PIREt+GTsat1-K-LsAsc-MuAsc-LdeltaAsc;
    CNasc=CN0asc-10*log10(ABO); %C/Nasc Total sencilla

    %Constantes del satelite (Satmex 5)
    CIasc=18; %dB
    CXPasc=30; %dB
    CXAasc=28; %dB

    CNascT=10*log10(1/(10^-(CNasc/10)+10^-(CIasc/10)+10^-(CXPasc/10)+10^-(
    CXAasc/10)));
    %% Downlink

    %Constantes del satelite (Satmex 5)
    CIdesc=35; %dB
    CXPdesc=29; %dB
    CXAdesc=39; %dB
    PIREsat=50.58-MuAsc; % dBW
    % *****

    LsDesc=20*log10((4*pi*Fdesc*D2*1000)/c0);
    GTet=Grx-10*log10(Trx);
    CN0desc=PIREsat+GTet-K-LsDesc-MuDesc-LdeltaDesc;
    CNdesc=CN0desc-10*log10(ABO); %C/Ndesc Total sencilla

```

```
CNdescT=10*log10(1/(10^-(CNdesc/10)+10^-(CIdesc/10)+10^-(CXPdesc/10)+10^-(CXAdesc/10)));
```

```
%% Evaluación
```

```
CNT=10*log10(1/(10^-(CNdescT/10)+10^-(CNascT/10))); %C/N total
```

```
calculado
```

```
CNR=EbN0+10*log10(Vinf)-10*log10(ABo);
```

```
ME=CN-CNR;
```

```
%% *-*-*-*-*-*-*-* Despliegue de Resultados *-*-*-*-*-*-*-* %%
```

```
fprintf('Azimut E/T Transmisora: %.2f\n',Az1);
fprintf('Elevacion E/T Transmisora: %.2f\n',E1);
fprintf('Disponibilidad: %.2f\n',disp);
fprintf('PIRE E/Tx: %.2f\n',PIREt);
fprintf('Pérdidas por espacio libre Asc: %.2f\n',LsAsc);
fprintf('Pérdidas miscelaneas asc: %.2f\n',LdeltaAsc);
fprintf('Margen de lluvia asc: %.2f\n',MuAsc);
fprintf('C/N0 Ascendente: %.2f\n',CN0asc);
fprintf('C/N Ascendente: %.2f\n',CNascT);
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*\n');
fprintf('Azimut E/T Receptora: %.2f\n',Az2);
fprintf('Elevacion E/T Receptora: %.2f\n',E2);
fprintf('Disponibilidad: %.2f\n',disp);
fprintf('Pérdidas por espacio libre desc: %.2f\n',LsDesc);
fprintf('PIRE saturacion satelite: %.2f\n',PIREsat);
fprintf('Pérdidas miscelaneas desc: %.2f\n',LdeltaDesc);
fprintf('Margen de lluvia desc: %.2f\n',MuDesc);
fprintf('G/T de la E/T Receptora: %.2f\n',GTet);
fprintf('C/N0 Descendente: %.2f\n',CN0desc);
fprintf('C/N Descendente: %.2f\n',CNdescT);
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*\n');
fprintf('C/N Total: %.2f\n',CNT);
fprintf('C/N Requerida: %.2f\n',CNR);
fprintf('Margen de enlace: %.2f\n',ME);
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*\n');
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*\n\n');
```

```
end
```

B. Código de MATLAB auxiliar para el cálculo de enlace en banda KU BSS.

```
clear
clc

%% Constantes
R=42164.2; %km distancia del centro de la Tierra a la orbita GEO
rEarth=6378.155; %km
K=10*log10(1.3806503e-23); %dB/K
c0=299792458; %m/s

%% Datos Enlace

Vinf=58.071e6; %bps DVB-S2 Fec 2/3 SR=30.0 Mbaud
ABO=36e6; %Hz Ancho de banda requerido
EbN0=3.75; %dB para que jale el enlace @BER=10^-7
disp=99.7;
LongSat=deg2rad(116.8); %Satmex 5
for i=1:4
    %Estacion Tx
    LongET1=deg2rad(84.38);
    LatET1=deg2rad(33.75);
    Fasc=17.84e9; %GHz
    LdeltaAsc=1; %dB Perdidas miscelaneas
    PIREet=80; %dBW propuesta

    Gtsat1=3.36; %dB/K

    %Estacion Rx
    LongET2=deg2rad(99.15);
    LatET2=deg2rad(19.40);
    Fdesc=Fasc-5.6e9; %GHz
    LdeltaDesc=1; %dB Perdidas miscelaneas
    Trx=152; %Temperatura de ruido del sistema de Rx
    Grx=36.85; %dB Ganancia de la antena receptora
    Tant=31;

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

    w1=cos(LatET1)*cos(LongSat-LongET1);
    w2=cos(LatET2)*cos(LongSat-LongET2);

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

```

%Rango
D1=(R^2+rEarth^2-
(2*rEarth*R*sin(E1rad+asin((rEarth/R)*cos(E1rad))))^(1/2); %km TX
D2=(R^2+rEarth^2-
(2*rEarth*R*sin(E2rad+asin((rEarth/R)*cos(E2rad))))^(1/2); %km RX

if i==1 %cielo despejado
    MuAsc=0;
    MuDesc=0;
elseif i==2 %lluvia ascendente
    MuAsc=AtLluvia(E1,Fasc,LatET1,4.0307,0.23,D1,5.1436,disp);
    MuDesc=0;
elseif i==3 %lluvia descendente
    MuAsc=0;
    MuDesc=AtLluvia(E2,Fdesc,LatET2,4.465,2.22,D2,2.49089,disp);
elseif i==4 %lluvia ambos lados
    MuAsc=AtLluvia(E1,Fasc,LatET1,4.0307,0.23,D1,5.1436,disp);
    MuDesc=AtLluvia(E2,Fdesc,LatET2,4.465,2.22,D2,2.49089,disp);
end

LL=10^(MuDesc/10);
TantL=(Tant/LL)+280*(1-1/LL);

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

%% Uplink
LsAsc=20*log10((4*pi*Fasc*D1*1000)/c0);
CN0asc=PIREt+GTsat1-K-LsAsc-MuAsc-LdeltaAsc;
CNasc=CN0asc-10*log10(ABO); %C/Nasc Total sencilla

%Constantes del satelite
CIasc=95; %dB
CXPasc=114.4; %dB
CXAasc=102.2; %dB
%*-**--*-**--*-**--*-**--*

CNascT=10*log10(1/(10^-(CNasc/10)+10^-(CIasc/10)+10^-(CXPasc/10)+10^-(CXAasc/10)));
%% Downlink
%Constantes del satelite
CIDesc=95; %dB
CXPdesc=87.5; %dB
CXAdesc=102.2; %dB
PIRESat=50.58-MuAsc; % dBW @DIAMETRO 0.9m
% *-**--*-**--*-**--*-**--*

LsDesc=20*log10((4*pi*Fdesc*D2*1000)/c0);
GTet=Grx-10*log10(Trx);

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

```

```
CNdescT=10*log10(1/(10^-(CNdesc/10)+10^-(CIdesc/10)+10^-(CXPdesc/10)+10^-(CXAdesc/10)));
```

```
%% Evaluación
```

```
CNT=10*log10(1/(10^-(CNdescT/10)+10^-(CNascT/10))); %C/N total
```

```
CNR=EbN0+10*log10(Vinf)-10*log10(ABo);
```

```
ME=CN-CNR;
```

```
%% *-*-*-*-*-*-*-* Despliegue de Resultados *-*-*-*-*-*-*-* %%
```

```
fprintf('Azimut E/T Transmisora: %.2f\n',Az1);
```

```
fprintf('Elevacion E/T Transmisora: %.2f\n',E1);
```

```
fprintf('Disponibilidad: %.2f\n',disp);
```

```
fprintf('PIRE E/Tx: %.2f\n',PIREt);
```

```
fprintf('Pérdidas por espacio libre Asc: %.2f\n',LsAsc);
```

```
fprintf('Pérdidas miscelaneas asc: %.2f\n',LdeltaAsc);
```

```
fprintf('Margen de lluvia asc: %.2f\n',MuAsc);
```

```
fprintf('C/N0 Ascendente: %.2f\n',CN0asc);
```

```
fprintf('C/N Ascendente: %.2f\n',CNascT);
```

```
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*\n');
```

```
fprintf('Azimut E/T Receptora: %.2f\n',Az2);
```

```
fprintf('Elevacion E/T Receptora: %.2f\n',E2);
```

```
fprintf('Disponibilidad: %.2f\n',disp);
```

```
fprintf('Pérdidas por espacio libre desc: %.2f\n',LsDesc);
```

```
fprintf('PIRE saturacion satelite: %.2f\n',PIREsat);
```

```
fprintf('Pérdidas miscelaneas desc: %.2f\n',LdeltaDesc);
```

```
fprintf('Margen de lluvia desc: %.2f\n',MuDesc);
```

```
fprintf('G/T de la E/T Receptora: %.2f\n',GTet);
```

```
fprintf('C/N0 Descendente: %.2f\n',CN0desc);
```

```
fprintf('C/N Descendente: %.2f\n',CNdescT);
```

```
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*\n');
```

```
fprintf('C/N Total: %.2f\n',CNT);
```

```
fprintf('C/N Requerida: %.2f\n',CNR);
```

```
fprintf('Margen de enlace: %.2f\n',ME);
```

```
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*\n');
```

```
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*\n\n');
```

```
end
```

C. Código de MATLAB auxiliar para el cálculo de enlace en banda Ka FSS.

```
clear
clc

%% Constantes
R=42164.2; %km distancia del centro de la Tierra a la orbita GEO
rEarth=6378.155; %km
K=10*log10(1.3806503e-23); %dBJ/K
c0=299792458; %m/s

%% Datos Enlace
Vinf=58.071e6; %bps DVB-S2 Fec 2/3 SR=30.0 Mbaud
ABO=36e6; %Hz Ancho de banda requerido
EbN0=3.75; %dB para que jale el enlace @BER=10^-7
disp=99.0;
LongSat=deg2rad(116.8); %Satmex 5
for i=1:4
    %Estacion Tx
    LongET1=deg2rad(84.38);
    LatET1=deg2rad(33.75);
    Fasc=29.7e9; %GHz
    LdeltaAsc=1.0; %dB Perdidas miscelaneas
    PIREet=80; %dBW propuesta

    GTsat1=16; %dB/K

    %Estacion Rx
    LongET2=deg2rad(99.15);
    LatET2=deg2rad(19.40);
    Fdesc=Fasc-9.8e9; %GHz
    LdeltaDesc=1.0; %dB Perdidas miscelaneas
    Trx=280; %Temperatura de ruido del sistema de Rx
    Grx=41.07; %dB Ganancia de la antena receptora
    Tant=52;

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

    w1=cos(LatET1)*cos(LongSat-LongET1);
    w2=cos(LatET2)*cos(LongSat-LongET2);

    %Elevacion
    El1rad=atan((R-rEarth*(w1))/(rEarth*sin(acos(w1))))-acos(w1);
    El2rad=atan((R-rEarth*(w2))/(rEarth*sin(acos(w2))))-acos(w2);
    El1=rad2deg(El1rad);
    El2=rad2deg(El2rad);
```

```

    %Rango
    D1=(R^2+rEarth^2-
    (2*rEarth*R*sin(E1rad+asin((rEarth/R)*cos(E1rad))))^(1/2);    %km TX
    D2=(R^2+rEarth^2-
    (2*rEarth*R*sin(E2rad+asin((rEarth/R)*cos(E2rad))))^(1/2);    %km RX

    if i==1 %cielo despejado
        MuAsc=0;
        MuDesc=0;
    elseif i==2 %lluvia ascendente
        MuAsc=AtLluvia(E1,Fasc,LatET1,4.0307,0.23,D1,10.34245,disp);
        MuDesc=0;
    elseif i==3 %lluvia descendente
        MuAsc=0;
        MuDesc=AtLluvia(E2,Fdesc,LatET2,4.465,2.22,D2,5.9528,disp);
    elseif i==4 %lluvia ambos lados
        MuAsc=AtLluvia(E1,Fasc,LatET1,4.0307,0.23,D1,10.34245,disp);
        MuDesc=AtLluvia(E2,Fdesc,LatET2,4.465,2.22,D2,5.9528,disp);
    end

    LL=10^(MuDesc/10);
    TantL=(Tant/LL)+280*(1-1/LL);

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

    %% Uplink
    LsAsc=20*log10((4*pi*Fasc*D1*1000)/c0);
    CN0asc=PIREet+Gtsat1-K-LsAsc-MuAsc-LdeltaAsc;
    CNascT=CN0asc-10*log10(ABo); %C/Nasc Total sencilla
    %% Downlink
    PIREsat=54-MuAsc;

    LsDesc=20*log10((4*pi*Fdesc*D2*1000)/c0);
    GTet=Grx-10*log10(Trx);

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

    %% Evaluación
    CNT=10*log10(1/(10^-(CNdescT/10)+10^-(CNascT/10)));    %C/N total
    CNR=Ebn0+10*log10(Vinf)-10*log10(ABo);
    ME=CNT-CNR;

    %% *-*-*-*-*-*-*-* Despliegue de Resultados *-*-*-*-*-*-*-* %%
    fprintf('Azimut E/T Transmisora: %.2f\n',Az1);
    fprintf('Elevacion E/T Transmisora: %.2f\n',E1);
    fprintf('Disponibilidad: %.2f\n',disp);
    fprintf('PIRE E/Tx: %.2f\n',PIREet);
    fprintf('Pérdidas por espacio libre Asc: %.2f\n',LsAsc);
    fprintf('Pérdidas miscelaneas asc: %.2f\n',LdeltaAsc);
    fprintf('Margen de lluvia asc: %.2f\n',MuAsc);
    fprintf('C/N0 Ascendente: %.2f\n',CN0asc);

```

```

fprintf('C/N Ascendente: %.2f\n',CNascT);
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*-*-*\n');
fprintf('Azimut E/T Receptora: %.2f\n',Az2);
fprintf('Elevacion E/T Receptora: %.2f\n',E2);
fprintf('Disponibilidad: %.2f\n',disp);
fprintf('Pérdidas por espacio libre desc: %.2f\n',LsDesc);
fprintf('PIRE saturacion satelite: %.2f\n',PIREsat);
fprintf('Pérdidas miscelaneas desc: %.2f\n',LdeltaDesc);
fprintf('Margen de lluvia desc: %.2f\n',MuDesc);
fprintf('G/T de la E/T Receptora: %.2f\n',GTet);
fprintf('C/N0 Descendente: %.2f\n',CN0desc);
fprintf('C/N Descendente: %.2f\n',CNdescT);
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*-*-*\n');
fprintf('C/N Total: %.2f\n',CNT);
fprintf('C/N Requerida: %.2f\n',CNR);
fprintf('Margen de enlace: %.2f\n',ME);
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*-*-*\n');
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*-*-*\n\n');

```

end

D. Código de MATLAB auxiliar para el cálculo de enlace en banda Ka con TP regenerativo.

```
clear
clc

%% Constantes
R=42164.2; %km distancia del centro de la Tierra a la orbita GEO
rEarth=6378.155; %km
K=10*log10(1.3806503e-23); %dB/K
c0=299792458; %m/s

%% Datos Enlace
Vinf=58.071e6; %bps DVB-S2 Fec 2/3 SR=30.0 Mbaud
ABO=36e6; %Hz Ancho de banda requerido
EbN0=3.75; %dB para que jale el enlace @BER=10^-7
disp=99.7;
LongSat=deg2rad(116.8);
for i=1:4
    %Estacion Tx
    LongET1=deg2rad(84.38);
    LatET1=deg2rad(33.75);
    Fasc=29.7e9; %GHz
    LdeltaAsc=1.0; %dB Perdidas miscelaneas
    PIREet=75; %dBW propuesta

    GTsat1=12; %dB/K

    %Estacion Rx
    LongET2=deg2rad(99.15);
    LatET2=deg2rad(19.40);
    Fdesc=Fasc-9.8e9; %GHz
    LdeltaDesc=1.0; %dB Perdidas miscelaneas
    Trx=280; %Temperatura de ruido del sistema de Rx
    Grx=39.73; %dB Ganancia de la antena receptora
    Tant=52;

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

    w1=cos(LatET1)*cos(LongSat-LongET1);
    w2=cos(LatET2)*cos(LongSat-LongET2);

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

```

%Rango
D1=(R^2+rEarth^2-
(2*rEarth*R*sin(E1rad+asin((rEarth/R)*cos(E1rad))))^(1/2);   %km TX
D2=(R^2+rEarth^2-
(2*rEarth*R*sin(E2rad+asin((rEarth/R)*cos(E2rad))))^(1/2);   %km RX

if i==1 %cielo despejado
    MuAsc=0;
    MuDesc=0;
elseif i==2 %lluvia ascendente
    MuAsc=AtLluvia(E1,Fasc,LatET1,4.0307,0.23,D1,10.34245,disp);
    MuDesc=0;
elseif i==3 %lluvia descendente
    MuAsc=0;
    MuDesc=AtLluvia(E2,Fdesc,LatET2,4.465,2.22,D2,5.9528,disp);
elseif i==4 %lluvia ambos lados
    MuAsc=AtLluvia(E1,Fasc,LatET1,4.0307,0.23,D1,10.34245,disp);
    MuDesc=AtLluvia(E2,Fdesc,LatET2,4.465,2.22,D2,5.9528,disp);
end

LL=10^(MuDesc/10);
TantL=(Tant/LL)+280*(1-1/LL);

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

%% Uplink
LsAsc=20*log10((4*pi*Fasc*D1*1000)/c0);
CN0asc=PIREet+GTsat1-K-LsAsc-MuAsc-LdeltaAsc;
CNascT=CN0asc-10*log10(ABo); %C/Nasc Total sencilla
%% Downlink
PIREsat=54;

LsDesc=20*log10((4*pi*Fdesc*D2*1000)/c0);
GTet=Grx-10*log10(Trx);

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

%% Evaluación
CNT=CNdescT;
CNR=EbN0+10*log10(Vinf)-10*log10(ABo);
ME=CNT-CNR;

%% *-*-*-*-*-*-*-* Despliegue de Resultados *-*-*-*-*-*-*-* %%
fprintf('Azimut E/T Transmisora: %.2f\n',Az1);
fprintf('Elevacion E/T Transmisora: %.2f\n',E1);
fprintf('Disponibilidad: %.2f\n',disp);
fprintf('PIRE E/Tx: %.2f\n',PIREet);
fprintf('Pérdidas por espacio libre Asc: %.2f\n',LsAsc);
fprintf('Pérdidas miscelaneas asc: %.2f\n',LdeltaAsc);
fprintf('Margen de lluvia asc: %.2f\n',MuAsc);
fprintf('C/N0 Ascendente: %.2f\n',CN0asc);
fprintf('C/N Ascendente: %.2f\n',CNascT);

```

```

fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*-*-*\n');

fprintf('Azimut E/T Receptora: %.2f\n',Az2);
fprintf('Elevacion E/T Receptora: %.2f\n',E2);
fprintf('Disponibilidad: %.2f\n',disp);
fprintf('Pérdidas por espacio libre desc: %.2f\n',LsDesc);
fprintf('PIRE saturacion satelite: %.2f\n',PIREsat);
fprintf('Pérdidas miscelaneas desc: %.2f\n',LdeltaDesc);
fprintf('Margen de lluvia desc: %.2f\n',MuDesc);
fprintf('G/T de la E/T Receptora: %.2f\n',GTet);
fprintf('C/N0 Descendente: %.2f\n',CN0desc);
fprintf('C/N Descendente: %.2f\n',CNdescT);

fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*-*-*\n');

fprintf('C/N Total: %.2f\n',CNT);
fprintf('C/N Requerida: %.2f\n',CNR);
fprintf('Margen de enlace descendente: %.2f\n',ME);
fprintf('Margen de enlace ascendente: %.2f\n',CNascT-CNR);
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*-*-*\n');
fprintf('*-*-*-*-*-*-*-*-*-*\n\n');

```

E. Código de MATLAB auxiliar para calcular la atenuación por lluvia en 2 latitudes definidas

```
hS=hSNM;
gamma=atEspecifica;

hR=h0+0.36;
%Si theta>=5°
Ls=(hR-hS)/sin(theta);
Lg=Ls*cos(theta);

%% probabilidad de lluvia
if latitud==33.75
    R001=60.8325;
    p0=6.2855;
end
if latitud==19.4
    R001=57.7395;
    p0=3.8401;
end
if latitud==-23.75
    R001=68.06132;
    p0=6.7426;
end
%%
r001=1/(1+0.78*sqrt(Lg*gamma/f)-0.38*(1-exp(-2*Lg)));
sigma=atan((hR-hS)/(Lg*r001));
if sigma>theta
    Lr=Lg*r001/cos(theta);
else
    Lr=(hR-hS)/sin(theta);
end

psi=36-abs(rad2deg(latitud));

v001=1/(1+sqrt(sin(theta))*(31*(1-exp(-
rad2deg(theta)/(1+psi)))*sqrt(Lr*gamma)/(f^2)-0.45));
LE=Lr*v001;
A001=gamma*LE;
if elevacion>=25
    beta=-0.005*(abs(phi)-36);
else
    beta=-0.005*(abs(phi)-36)+1.8-4.25*sin(theta);
end

p=100-disponibilidad; % 0.5%
Ap=A001*(p/0.01)^-(0.655+0.033*log(p)-0.045*log(A001)-beta*(1-
p)*sin(theta));
```

FUENTES CONSULTADAS

Referencias bibliográficas

- [1] Advanced Television Systems Committee, "ATSC Direct-to-Home Broadcast Standard Doc. A/81"; 2003.
- [2] Advanced Television Systems Committee; "Modulation And Coding Requirements For Digital TV (DTV) Applications Over Satellite Doc A/80"; 1999.
- [3] Benoit, Hervé; "Digital Television: Satellite, Cable; Terrestrial, IPTV, Mobile TV in the DVB Framework"; Focal Press 3rd edition; 2006.
- [4] Breynaert, Dirk; d'Oreye de Lantremange, Maximilien; "Analysis of the bandwidth efficiency of DVB-S2 in typical data distribution network"; CCBN2005, Beijing; 2005.
- [5] Davidson, Grant A. et al.; "ATSC Video and Audio Coding"; Proceedings of the IEEE Vol.94 Issue.1; 2006.
- [6] de Bruin, Ronald; "Digital Video Broadcasting: technology, Standards, and Regulations"; Artech House, Inc. 1st edition; 1999.
- [7] Dulac, Stephen P.; Godwin, John P.; "Satellite Direct-to-Home" Proceedings of the IEEE Vol.94 Issue.1; 2006.
- [8] Elbert, Bruce; "Introduction to Satellite Communication"; Artech House, Inc. 3rd edition; 2008.
- [9] Elbert, Bruce; "The Satellite Communication Applications Handbook"; Artech House, Inc. 2nd edition; 2004.
- [10] EN 300 421; "Digital Video broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services"; European Telecommunications Standards Institute; 1997.
- [11] EN 300 468; "Digital Video broadcasting (DVB); Specification for Service Information (SI) in DVB systems"; European Telecommunications Standards Institute; 2010.
- [12] EN 301 210; "Digital Video broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for DSNG and other contribution applications by satellite" European Telecommunications Standards Institute; 1999.
- [13] EN 301 790; "Digital Video broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems" European Telecommunications Standards Institute; 2009.
- [14] EN 302 307; "Digital Video broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broad-band satellite applications"; European Telecommunications Standards Institute; 2009.
- [15] EN 302 583; "Digital Video broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for Satellite Services to Handheld devices (SH) below 3 GHz"; European Telecommunications Standards Institute; 2010.
- [16] Futron Corporation; "Forecast of Global Satellite Services Demand"; 2010.
- [17] Futron Corporation; "Satellite Services Demand – The Future in High Def"; 2006

- [18] Haykin, Simon; "Communication Systems"; John Wiley & Sons Inc. 4th edition; 2001.
- [19] Ippolito, Louis J.; "Satellite Communications Systems Engineering"; John Wiley & Sons Ltd. 1st edition; 2008.
- [20] Katoh, Hisakazu; "Transmission System for ISDB-S"; Proceedings of the IEEE Vol.94 Issue.1; 2006.
- [21] Landeros-Ayala, Salvador; et al.; "Cálculo de atenuación por lluvia usando el modelo DAH y diámetros de antena para banda Ka en México"; Ingeniería, Investigación y Tecnológica III; 2002.
- [22] Maini, Anil; Agrawal, Varsha; "Satellite Technology"; John Wiley & Sons Ltd. 1st edition; 2007.
- [23] Maral, Gérard; Bousquet, Michel; "Satellite Communications Systems"; John Wiley & Sons Ltd. 5th edition; 2009.
- [24] Matos, Jorge; "Sistemas DTH: Arquitectura, Estándares y Tecnologías para los Servicios Vía Satélite de TV Digital, Internet y HDTV"; Alfaomega Grupo Editor, 1ª edición; 2007.
- [25] Matsumura, Hajime; Katoh, Hisakazu; "Technologies and Services of Digital Broadcasting", NHK, 2004.
- [26] Morello, A.; Mignone, V.; "DVB-S2: The Second Generation Standard for Satellite Broad-band Services"; Proceedings of the IEEE Vol.94 Issue.1; 2006.
- [27] Neri, Rodolfo; "Comunicaciones por satélite"; International Thomson Editores 1ª edición; 2003.
- [28] Pascall, Stephan; Withers, David; "Commercial Satellite Communications"; Focal Press 1st edition; 1997
- [29] Recomendación UIT R BO.1724-1: "Sistemas interactivos de radiodifusión por satélite (televisión, sonido y datos)".
- [30] Recomendación UIT-R BO.1516: "Sistemas de televisión digital multiprograma para utilización por satélites que funcionan en la gama de frecuencias 11/12 GHz".
- [31] Recomendación UIT-R BO.790: "Características del equipo receptor y cálculo del factor de calidad (G/T) de los receptores del servicio de radiodifusión por satélite"
- [32] Recomendación UIT-R BO.791: "Elección de la polarización en el servicio de radiodifusión por satélite".
- [33] Recomendación UIT-R SNG.1561: "Transmisión digital de televisión de alta definición para periodismo electrónico por satélite y radiodifusión en exteriores".
- [34] Recomendación UIT-R BO.1659: "Técnicas de reducción de la atenuación debida a la lluvia aplicables a sistemas del servicio de radiodifusión por satélite en las bandas de frecuencias entre 17,3 GHz y 42,5 GHz"
- [35] Recomendación UIT-R BO.1408-1: "Sistema de transmisión para servicios multimedia avanzados de la radiodifusión digital de servicios integrados en un canal de radiodifusión por satélite".
- [36] Recomendación UIT-R BO.1784: "Sistema de radiodifusión digital por satélite (televisión, sonido, datos) con configuración flexible"
- [37] Recomendación UIT-R P.618.10: "Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio".

- [38] Recomendación UIT-R P.837-5: "Características de precipitación para modelo de propagación".
- [39] Recomendación UIT-R P.839-3: "Modelo de estimación de la altura de la lluvia para utilizar en los métodos de predicción"
- [40] Recomendación UIT-R S.733-2: "Determinación de la relación ganancia/temperatura de ruido de las estaciones terrenas que funcionan en el servicio fijo por satélite".
- [41] Reimers, Ulrich; "DVB-The Family of International Standards for Digital Video Broadcasting"; Proceedings of the IEEE Vol.94 Issue.1; 2006.
- [42] Richer, et al.; "The ATSC Digital Television System"; Proceedings of the IEEE Vol.94 Issue.1; 2006.
- [43] Roddy, Dennis; "Satellite Communications"; McGraw-Hill 4th edition; 2006.
- [44] Rosado, Carlos; "Comunicación por satélite"; AHCET 1ª edición; 2000.
- [45] Saito, Tomohiro, et al.; "ISDB-S - Satellite Transmission System for Advanced Multimedia Services Provided by Integrated Services, ABU Technical Review No.189.
- [46] Shim, Yang; Ma, Lv; "A New Generation Satellite Broadcasting System In China"; WiCOM IEEE; 2008.
- [47] Sklar, Bernard; "Digital Communications"; Prentice Hall 2nd Edition; 2001.
- [48] The International Telecommunications Union; "Handbook on Satellite Communications"; Editorial Wiley 3a. Edición; 2002.
- [49] TR 101 198; "Digital Video broadcasting (DVB); Implementation of Binary Phase Shift Keying (BPSK) modulation in the satellite transmission systems"; European Telecommunications Standards Institute; 1997.
- [50] Watkinson, John; "The MPEG Handbook"; Focal Press 2nd edition; 2004.
- [51] Wiegand, Thomas; Sullivan, Gary; "Overview of the H.264/AVC Video Coding Standard"; IEEE Transactions on circuits and systems for video technology, Vol. 13, No. 7; 2003
- [52] WU, et al.; "Overview of Digital Television Development Worldwide"; Proceedings of the IEEE Vol.94 Issue.1; 2006.
- [53] Deplancq et al.; "Link Budget Analysis for New Satellite Telecommunications Systems", Defense technical Information Center; 2005.

Sitios Web

- [54] <http://en.wikipedia.org>
- [55] <http://es.scribd.com/doc/7167023/dvb-atsc-is>
- [56] <http://gofastmotorsports.com/TCM.pdf>
- [57] <http://satellitettv.lifetips.com/es/cat/62815/tv-por-cable-vs-tv-v-a-sat-lite/>
- [58] http://www.andreas-schwoppe.de/ASIC_s/Schnittstellen/Data_Lines/body_modulation.html
- [59] http://www.arib.or.jp/english/html/overview/sb_ej.html
- [60] <http://www.atsc.org/cms/>
- [61] <http://www.complextoreal.com/chapters/tcm.pdf>
- [62] <http://www.dibeg.org/techp/techp.htm>
- [63] <http://www.duiops.net/hifi/enciclopedia/mpeg-4-parte10.htm>
- [64] <http://www.dvb.org/technology/standards/>
- [65] http://www.ebu.ch/fr/technical/trev/trev_305-moser.pdf
- [66] <http://www.etsi.org/WebSite/Standards/Standard.aspx>
- [67] <http://www.itu.int/pub/R-REC>
- [68] http://www.mjtele.com/pds/mjtele_pds/trellis_coded_modulation.pdf
- [69] http://www.moveutilities.com/cable_vs_satellite.html
- [70] <http://www.satellitettoday.com/via/>
- [71] <http://www.satellitettvissue.com/cabletvvssatellitettv.htm>
- [72] http://www.signalstelecom.com/comunicados_detalle.php?id=35
- [73] <http://www.sptvjsat.com/toppage>
- [74] <http://www2.engr.arizona.edu/~ryan/publications/ldpcchap.pdf>