



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CÁLCULOS DE ENLACE PARA TV DIGITAL POR
SATÉLITE**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A:

CARRILLO RAMÍREZ JOSÉ LUIS

ASESOR: DR. RODOLFO NERI VELA



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F. JUNIO 2003

Dedico este trabajo a mis padres Teresa y Rodrigo:

Por su apoyo y fe en mí durante toda mi vida.

Este paso, es sólo gracias a ellos
y cualquier logro se los debo a ambos.

A mis hermanos Teresa, Rodrigo, Juan José y Elizabeth:

Con todo mi cariño, admiración y respeto.

En esta parte no puedo olvidarme también de agradecer a todas aquellas personas que me han apoyado, no sólo durante la elaboración de esta tesis sino durante toda la carrera:

Al Dr. Rodolfo Neri Vela:

Por su apoyo y paciencia durante la elaboración de este trabajo.

A Sonia:

Por su ayuda, cariño, amistad y confianza, que han perdurado pese a los malos momentos.

A Cynthia:

Por todo su apoyo y comprensión que la han convertido en una de mis mejores amigas.

A Omar y Carlos:

Por su amistad franca y sincera que hace de ellos mis mejores amigos durante la carrera.

A Arely, Roberto y Heidi:

Por brindarme su amistad incondicional y ayudarme con información para este trabajo.

A todos mis amigos:

Quienes afortunadamente son tantos, que sus nombres no caben en este espacio, pero a cada uno de los cuales recuerdo con afecto.

A todos mis profesores:

Por los conocimientos que me brindaron y la formación que me dieron.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi Alma Mater que ha sido un hogar durante los últimos años y me ha dado tanto.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I: NORMAS ACTUALES PARA LA RADIODIFUSIÓN DIRECTA DE TV DIGITAL POR SATÉLITE	
1.1 PRINCIPIOS DE LA TELEVISIÓN DIGITAL	5
1.1.1 Televisión clásica analógica	5
1.1.2 Reseña Histórica de la Televisión de Alta Definición	9
1.1.3 Televisión Analógica y Televisión Digital	10
1.2 NORMATIVIDAD	12
1.2.1 Normas para la radiodifusión de video digital	12
1.3 COMUNICACIONES POR SATÉLITE	21
1.3.1 Breve historia de las comunicaciones por satélite	21
1.3.2 Bandas de frecuencia	23
1.3.3 Polarización y reuso de frecuencias	26
1.3.4 Transpondedores	29
1.3.5 Bandas de frecuencias atribuidas y normas para los servicios de radiodifusión directa al hogar	31
1.3.6 Televisión digital sobre la banda DBS	39
1.4 NORMATIVIDAD DE LA TELEVISIÓN DIGITAL EN MÉXICO	42
1.4.1 Marco regulatorio para servicios DBS en la región 2 incluyendo a México	42
1.5 CONFIGURACIÓN DE LOS SISTEMAS DBS	46
1.5.1 Configuración de un sistema DBS	46
CAPITULO II: COMPRESIÓN, CODIFICACIÓN, MULTIPLEXAJE Y MODULACIÓN DE CANALES DE TV DIGITAL	
2.1 COMPRESIÓN DE VIDEO	49

Índice

2.1.1 Principios del video digital	50
2.1.2 Entrelazado	52
2.1.3 Los Formatos 4:2:2 Y 4:2:0	53
2.1.4 Técnica de compresión MPEG-2	54
2.1.5 Tramas I, P Y B	59
2.1.6 Perfiles, Niveles y Capas en MPEG-2	65
2.2 COMPRESIÓN DE AUDIO	69
2.2.1 Principios de la compresión de audio con MPEG	69
2.2.2 Capas de codificación de audio MPEG-1	74
2.3 MULTIPLEXACIÓN DE SEÑALES, MEZCLADO Y ACCESO CONDICIONAL	75
2.3.1 Organización de la multiplexación MPEG-2	77
2.3.2 Tablas MPEG-2	82
2.3.3 Tablas principales de DVB-SI	83
2.3.4 Tablas opcionales de DVB-SI	83
2.3.5 Acoplamiento (Seguridad) y Acceso Condicional	84
2.3.6 Principios del sistema de acoplamiento (seguridad) en el estándar DVB	85
2.4 MODULACIÓN DE CANALES DE TV DIGITAL	89
2.4.1 Dispersión de energía y codificación externa (Reed-Solomon Coding)	89
2.4.2 Forney convolutional interlaving	90
2.4.3 Modulación QPSK (DVB-S)	91
2.5 RECEPCIÓN DE TV DIGITAL	93
2.5.1 Visión Global del proceso de transmisión y recepción	93
2.5.2 Estructura del receptor/decodificador integrado de TV (IRD)	95
 CAPITULO III: ECUACIONES GENERALES PARA EL CÁLCULO DE ENLACES	
3.1 CONCEPTOS GENERALES DE LOS ENLACES RF	100
3.2 CONFIGURACIÓN BÁSICA DE UN ENLACE EN RF	100
3.3 GANANCIA DE LA ANTENA	103

3.4 ATENUACIÓN POR ESPACIO LIBRE	106
3.5 ATENUACIÓN POR ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA	110
3.6 ATENUACIÓN POR LLUVIA	112
3.7 PÉRDIDAS POR DESAPUNTAMIENTO	121
3.8 PÉRDIDAS POR CONECTORES	124
3.9 RUIDO EN UN ENLACE SATELITAL	124
3.9.1 Ruido térmico	126
3.9.2 Figura de ruido	128
3.9.3 Temperatura de ruido de varios amplificadores en cascada	128
3.9.4 Temperatura de ruido de un atenuador	129
3.9.5 Temperatura de ruido de una antena para el enlace de bajada	131
3.9.6 Temperatura de ruido de una antena para el enlace de subida	135
3.10 RUIDO DE INTERMODULACIÓN	136
3.11 FACTOR DE CALIDAD O FIGURA DE MÉRITO (G/T)	138
3.12 DENSIDAD DE FLUJO DE SATURACIÓN Y ENLACE ASCENDENTE	139
3.13 RELACIÓN TOTAL DE POTENCIAS	141
3.14 BER (BIT ERROR RATE)	143
3.15 TASA DE BITS Y EFICIENCIA ESPECTRAL	145
3.16 ÁNGULOS DE ELEVACIÓN Y AZIMUT	147
3.17 RANGO	149

CAPITULO IV: EJEMPLOS DE SISTEMAS DE RADIODIFUSIÓN DIRECTA DE TV DIGITAL Y EQUIPOS CASEROS

4.1 ANTENAS RECEPTORAS	152
4.1.1 La antena parabólica	152
4.1.2 Tipos de antenas parabólicas	155
4.2 INSTALACIÓN DE LA ANTENA	158
4.2.1 Ángulos de azimut y elevación	158
4.2.2 Montaje de antenas fijas	163
4.3 FUENTES	169
4.4 POLARIZADORES	170

Índice

4.4.1 Polarización lineal	170
4.4.2 Polarización circular	171
4.5 BLOQUE CONVERTIDOR DE BAJO RUIDO (LNB)	172
4.5.1 Tipos comunes de LNB	175
4.5.2 Ganancia de un LNB	177
4.6 EL RECEPTOR/DECODIFICADOR INTEGRADO IRD	177
4.6.1 IRD's digitales	178
4.7 CORRECCIÓN DE PROBLEMAS EN SISTEMAS DIGITALES DE RECEPCIÓN	182
4.7.1 Corrección de la mala calidad de la señal debido a la mala orientación de la antena	182
4.7.2 Corrección de problemas cuando la imagen se recibe en forma intermitente	184
4.8 DIRECTV Y SKY	185
4.8.1 DirectTV Latin América	185
4.8.2 SKY TV Latin América	188
 CAPITULO V: PROGRAMA DE COMPUTADORA Y CÁLCULOS DE ENLACE PARA TRANSMITIR VARIOS CANALES DIGITALES EN UN TRANSPONDEDOR COMPLETO	
5.1 CÁLCULO DE ENLACE PARA LA TRANSMISIÓN DE CANALES DE TV DIGITAL	193
CONCLUSIONES	218
APÉNDICE A: DATOS REQUERIDOS PARA LA REALIZACION DE UN CÁLCULO DE ENLACE COMPLETO	221
APÉNDICE B: USO DEL PROGRAMA PARA CÁLCULOS DE ENLACES	233
BIBLIOGRAFÍA	240

INTRODUCCIÓN

La idea de interconectar al mundo no es nueva. Desde tiempos antiguos los hombres han tenido la necesidad de comunicarse desde sitios lejanos y esta necesidad ha crecido conforme la humanidad ha progresado tecnológicamente, hasta llegar al punto en que se requirió de una interconectividad mundial. Fue entonces cuando, por dar solución a este problema, a mediados del siglo pasado se lanzaron los primeros satélites artificiales, logrando establecer comunicación entre puntos muy distantes; sin embargo, el uso de esta tecnología estaba aún limitada al sector militar. Las comunicaciones continuaron evolucionando hasta que la tecnología de comunicación mediante satélites artificiales fue utilizada para llegar a la población en general, sector en el que encontró gran auge debido a la necesidad que existía para intercomunicar grandes masas de población, y con ello surgieron los sistemas de transmisión de televisión vía satélite.

En el año de 1964, durante los juegos olímpicos de Tokio, se transmitió por primera vez una señal de televisión en blanco y negro de un continente a otro, cruzando el Océano Pacífico con la ayuda del satélite SYCOM 3. La calidad de la señal recibida era relativamente buena, sin embargo, las estaciones terrenas eran antenas de gran tamaño y alto costo, lo cual era imposible de instalar en un hogar, por ello la transmisión de señales de TV entre continentes se daba sólo entre dos puntos y a partir de ellos se distribuía a los hogares mediante otros sistemas de radiodifusión.

En aquellos tiempos las antenas eran de poca ganancia y reducida eficiencia, además de que las transmisiones eran completamente analógicas, lo que provocaba que la potencia de transmisión fuera muy elevada y al no tener mucha eficiencia en

las antenas se requería que éstas fueran de gran tamaño. Conforme la tecnología avanzó se logró reducir considerablemente el tamaño de las antenas, hasta que finalmente a mediados de los 70's su tamaño fue lo suficientemente pequeño, de tal forma que para lograr transmitir señales de TV a la población era posible instalar un plato parabólico directamente en el hogar del usuario. No obstante, dado que la transmisión aún era analógica el tamaño de estas antenas debía ser superior a dos metros, lo cual aún era bastante impráctico, además el ancho de banda que se requería para transmitir una señal de video era muy grande, por lo que el servicio de TV directa al hogar era muy costoso y por otra parte no se tenían sistemas de seguridad, por lo que cualquier persona que contara con una antena parabólica podía robar la señal simplemente orientando la antena hacia la ubicación del satélite. Fue hasta mediados de los 80's que se empezó a usar la transmisión digital y con los nuevos avances tecnológicos, tanto en materia de satélites como de antenas, fue posible reducir las dimensiones de los platos parabólicos hasta que las dimensiones de éstos fueron menores a un metro, sin mencionar que con el uso de transmisiones digitales fue posible codificar las señales de tal forma que sólo los suscriptores contaran con los recursos para decodificar las señales y el robo de la señal fuera mucho más difícil.

Hoy en día los satélites DBS (Direct Broadcasting Satellite) representan una poderosa herramienta de comunicación. Es posible transmitir simultáneamente una gran cantidad de canales con imagen de gran calidad en un ancho de banda reducido; además el costo de los equipos caseros ha disminuido drásticamente, por lo que el usuario en realidad no tiene que realizar una gran inversión para disfrutar de este servicio; todo esto hace que los servicios por satélite directo al hogar tengan un gran auge hoy por hoy y que estos sistemas sean altamente rentables.

Los satélites DBS y los servicios de comunicación directa al hogar tienen un gran desarrollo tecnológico tras de sí. Esto aunado a otros aspectos técnicos y gubernamentales, hizo creciente la necesidad de estándares que definieran un marco regulatorio para la prestación de este servicio, estándares que se encargan de regular desde frecuencias usadas para la transmisión de las señales, hasta las técnicas de codificación y compresión del audio y video.

La radiodifusión directa de TV digital se inició en Estados Unidos y México hace ya varios años. En el país los dos sistemas que existen son SKY y DirecTV. Sin embargo, es muy difícil encontrar información publicada en libros y revistas sobre cómo funciona un sistema típico como éstos, desde el punto de vista de tasa de datos, probabilidad de error, cálculos de enlaces y, en general, dimensionamiento de las estaciones transmisoras y receptoras. Por tanto, en esta tesis se planea aportar dicha información de una manera didáctica y de utilidad para ingenieros en telecomunicaciones que deseen realizar cálculos de enlace de TV digital.

Específicamente, esta tesis tiene por objetivo proporcionar toda la teoría necesaria para realizar cálculos completos de enlaces para la transmisión de TV digital por satélite, de esta forma se provee de información teórica y práctica que resultan de gran utilidad al estudiante interesado en el área. Sin embargo, debemos ser enfáticos en que muchos datos técnicos aquí utilizados, y que sólo el proveedor de servicios posee, son muy difíciles de conseguir, de tal forma que en esta obra se trabajaron con datos aproximados lo que nos puede traer algunos errores en los resultados obtenidos en comparación con los valores reales, sin embargo, aunque los datos no sean del todo exactos, si se tiene y maneja toda la información necesaria, para que en caso de que cualquier persona en posesión de la información exacta pueda realizar los cálculos con resultados mucho más aproximados a la realidad.

José Luis Carrillo Ramírez

CAPITULO I

NORMAS ACTUALES PARA LA RADIODIFUSIÓN DIRECTA DE TV DIGITAL POR SATÉLITE

1.1 PRINCIPIOS DE LA TELEVISIÓN DIGITAL

1.1.1 Televisión clásica analógica

Tradicionalmente, las señales de televisión han sido distribuidas, desde hace más de medio siglo, mediante enlaces con ondas electromagnéticas que unen entre sí los distintos centros constitutivos de la red, que son la estación transmisora, por parte del proveedor, y una antena receptora por cada usuario.

A partir de 1950, se comenzaron a complementar las redes de radioenlaces con sistemas de TV por cable, que permitieron distribuir las señales a comunidades situadas en zonas de sombra, donde era insuficiente la calidad de las imágenes procedentes de la distribución inalámbrica. Estos sistemas estaban constituidos por una antena situada en un lugar con buena recepción, y una red de cable coaxial que distribuía las señales a la comunidad afectada; de ahí la denominación de Community Antenna Tele Vision (CATV) que designa a este tipo de sistemas, usados aún en la actualidad.

En sus orígenes históricos y técnicos, la televisión comienza con la transmisión y recepción de imágenes en blanco y negro, es decir, la información de brillo de la imagen. De hecho, la forma en que se trabajaba entonces es muy similar a como se hace hoy en día.

El principio de transmisión de TV consiste en dividir la imagen en pequeños elementos llamados píxeles. Para ello, al transmitir una imagen de televisión se requiere convertir los matices de las imágenes en variaciones de una corriente eléctrica, y corresponde a las células fotoeléctricas convertir la energía luminosa en energía eléctrica. No obstante, no existe modo alguno que permita transmitir toda una imagen al mismo tiempo, y, en vez de emplear una célula grande, se recurre a un mosaico de pequeñísimos elementos dispuestos por millares sobre una placa de mica, o a tubos electrónicos que permitan analizarla punto por punto. La imagen queda dividida así en un gran número de puntos que son explorados uno a uno en la cámara con un orden de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, es decir,

recorriendo la imagen con un haz electrónico línea por línea hasta llegar al pie de ésta. De este mismo modo se reconstruye la imagen en el aparato receptor, es decir, se hace un barrido de toda la pantalla reconstruyendo punto a punto la imagen original. La sensación de continuidad y movimiento se consigue con la generación de un determinado número de cuadros por segundo en forma similar al método utilizado en cinematografía; la frecuencia óptima para el cambio de cuadros queda determinada por las propiedades de percepción del ojo humano. Sin embargo, se trabaja con un par de frecuencias, de las cuales cada país elige la que considera más apropiada; en ambos casos la percepción que tiene el ojo de la imagen es de continuidad y pasa desapercibido el cambio de cuadros. En la mayoría de los países la frecuencia de repetición para los cuadros es de 25 Hz y para el caso de Estados Unidos, Japón y México es de 30 Hz ⁽¹⁾.

Por otra parte, la calidad de la imagen reproducida queda determinada por la definición (capacidad de reproducir detalles finos), que es tanto mejor cuanto mayor sea el número de líneas, requiriéndose un número mínimo para que la trama no moleste al espectador. Sobre este aspecto, hay que considerar tanto la distancia del observador a la pantalla como la agudeza visual del ojo. Es necesario también hacer uso de lo que se conoce como relación de aspecto, que es la relación del cociente del ancho de la pantalla y el alto de la misma, donde siempre será mayor el ancho. Para el caso de la televisión clásica, por razones de óptica y de estética se eligió, una relación de aspecto de 4:3, lo que significa que por 4 unidades de ancho, hay 3 unidades de alto en la pantalla.

El primer sistema de televisión en color, el NTSC (National Television System Committee), se introdujo en Estados Unidos en Diciembre de 1953, y en él están basados todos los demás sistemas de televisión en color. El NTSC había trabajado en conseguir un buen conjunto de requerimientos, y gracias a la cooperación entre empresas de difusión, fabricantes y organismos gubernamentales, fueron capaces de recomendar un sistema de televisión en color que ha probado ser tan

1. **International Captioning Project (Worldwide Video Standards):**
<http://ncam.wgbh.org/resources/icr/appendixa.htm>

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

satisfactorio que él y sus variantes, PAL y SECAM, todavía se están usando en todo el mundo cincuenta años después.

Cuando el sistema NTSC se creó, se buscó que cumpliera con los siguientes requerimientos:

- Compatibilidad:

La señal de color debe ser visible en un televisor monocromo en escala de grises sin pérdida de calidad.

- Compatibilidad con señales monocromáticas:

Los receptores de color deben mostrar imágenes en escala de grises cuando reciban una señal en blanco y negro.

- Ancho de banda.

La señal de color no debe ocupar mayor ancho de banda que la señal monocromática.

- Calidad.

El sistema de color debe producir imágenes con colores precisos y con una calidad no inferior a la proporcionada por el sistema de blanco y negro.

El sistema NTSC cumplió las cuatro condiciones y consiguió además un método para separar el brillo (luminancia) y el color (crominancia) en dos señales diferentes, lo cual fue útil no sólo para la transmisión sino también para la grabación en cinta de la señal de televisión.

Sin embargo, los defectos del NTSC (su susceptibilidad a los errores de fase y la consecuente necesidad de que los receptores deban tener un mando de control de tono) hicieron que se siguiese investigando en un sistema que solucionase esos problemas y, cuando la European Broadcasters Union creó un grupo de trabajo para elegir un sistema de color para Europa, se hizo una investigación a fondo en los méritos y problemas que se encontraban con los diferentes sistemas propuestos.

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

Los sistemas bajo estudio eran el PAL y el SECAM que estaban diseñados sobre las bases marcadas por el NTSC pero tratando de evitar sus defectos. Ambos emplean las mismas señales de color, pero mientras el PAL hace una sencilla modificación en el signo de una de las señales que es transmitida en cada línea, el SECAM hace una transmisión secuencial de estas señales línea a línea, y la señal de color transmitida es modulada en frecuencia.

El sistema SECAM actualmente en uso, aunque conocido simplemente como SECAM, es realmente el sistema SECAM III. Una variante posterior, que llegó demasiado tarde para ser considerada como estándar, el SECAM IV a diferencia de las versiones anteriores del SECAM es que las dos componentes de color son transmitidas conjuntamente en líneas alternas, mientras que la referencia de la subportadora se transmite en las líneas intermedias, lo cual lo hace un sistema muy robusto.

Aunque los defectos de los actuales sistemas de televisión en color no son muy tenidos en cuenta por los actuales televidentes, los centros de producción de programas, tienen muy claro que si las imágenes transmitidas actualmente se visualizaran en pantallas grandes, tal como se espera que ocurra en los siguientes años ⁽²⁾, los mencionados problemas cobrarían enorme importancia.

No es pensable que los televidentes tiren sus receptores de televisión para comprar uno nuevo que permita ver imágenes de mayor calidad, aunque la mejora de calidad sea realmente grande. Como esto está muy claro, se hicieron numerosos esfuerzos por buscar una forma en la que los métodos actuales, PAL, SECAM, podrían ser mejorados manteniendo la compatibilidad con los millones de receptores existentes, al estilo de lo que se hizo por el NTSC cuando se introdujo la imagen a color. De esta forma surge el sistema PALplus que se está tratando de introducir en Europa.

2. Diálogos de la Comunicación

Romero Sanjinés, Carlos

La televisión Digital: Perspectivas para su introducción en América Latina

Artículo, Honduras, 2002, pg. 145

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

Una solución indirecta e inesperada a este problema la aportó la World Administrative Radiocommunication Conference en el año 1977 (WARC'77). En esta conferencia se presentó un amplio y detallado plan para la implementación de los servicios de transmisión directa de televisión por satélite (DBS) para los países de la región 1 (Europa, la antigua URSS y el norte de África) y una previsión frecuencial para las regiones 2 (América) y 3 (Asia y Australia).

1.1.2 Reseña Histórica de la Televisión de Alta Definición

La idea de lograr en la pantalla de un televisor una imagen con calidad similar a la del cine surgió en Japón hacia el año de 1964. La corporación de radiodifusión japonesa, NHK (Nippon Hoso Koyokay) fue quien inició investigaciones al respecto, y abrió así el camino hacia la televisión de alta definición. Fue de esta forma como los ingenieros de esta empresa, bajo la dirección del Dr. Takashi Fujio, sentaron las bases de esta tecnología que tenía por objetivo lograr la transmisión de imágenes de alta fidelidad y nitidez. El invento logrado por este grupo fue presentado por primera vez al público durante la conferencia de la SMPE (Society of Motion Picture and Television Engineers) suscitada en San Francisco, en Febrero de 1981, y para el año de 1984 se presentó ante el mundo el sistema de alta definición analógica llamado MUSE (Multiple Sub-Nyquist Sampling Encoding), que salió al aire a comienzos de 1987 utilizando un ancho de banda de 12 MHz, pero era aún muy grande y resultaba muy costosa su transmisión; sin embargo, lograba una definición en la imagen sin precedentes.

La televisión Norteamericana, alarmada por los logros japoneses, se vio forzada a acelerar las investigaciones al respecto y presionando a la FCC (Federal Communications Commission) se iniciaron los estudios y programas necesarios para salvaguardar los intereses de la economía estadounidense, que se veía en desventaja ante los avances tecnológicos de Japón. De esta forma, la FCC organizó el comité encargado de este servicio de televisión, el cual se nombró ACATS (Advisory Committee on Advanced Television Service) en el año de 1987.

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

La NAB (National Association of Broadcasting) solicitó a la NHK que desarrollara un sistema en el que se ocupara un ancho de banda de 6 MHz, es decir, que se lograra transmitir televisión de alta definición usando el ancho de banda de un canal de televisión normal, resultando así la aparición del Narrow (angosto) MUSE y para el año de 1990 la FCC anunció su preferencia por este tipo de transmisión surgiendo así el HDTV (High Definition TV).

La ACATS llevó a cabo un panel especial entre el 8 y el 11 de Febrero de 1993 donde se tomaron tres grandes decisiones. Tal vez la más importante fue la conclusión de que la nueva televisión no podía ser analógica, pues, el Narrow MUSE había demostrado que era inconveniente por la calidad de la imagen entregada, así como la deficiente cantidad de señales que podía contener y la cobertura que podía dar. Aunque esta determinación puso fuera al sistema japonés, la NKH continuó contribuyendo en el desarrollo del sistema de televisión digital norteamericano ATV (Advanced TV) así como HDTV o televisión de alta definición.

1.1.3 Televisión Analógica y Televisión Digital

La televisión analógica utiliza las ondas electromagnéticas para ser transmitida mediante señales que varían en forma continua, es decir, la función de variación de voltaje contra tiempo es continua, Desafortunadamente, estas señales tienen el grave inconveniente de ser altamente susceptibles a la influencia de campos magnéticos o electrostáticos, lo cual se ve reflejado como una distorsión tanto en la imagen como en el sonido. Conforme se ha avanzado en el desarrollo de la televisión, se han planteado también nuevos esquemas para el formato de la imagen, donde también la televisión analógica está en desventaja, ya que ésta tiene una resolución de 420 líneas aproximadamente, lo cual resulta ser bastante limitado y desaprovecha el ancho de banda de 6 MHz asignado a cada canal televisivo. Con esta perspectiva, la televisión digital tiene varias y considerables ventajas sobre la televisión analógica. La televisión digital es transmitida a través de cadenas binarias, es decir la señal sólo tiene dos niveles de voltaje posibles dentro de los que puede variar, alto o bajo. Como la diferencia de umbral entre ambos voltajes es grande, esto hace que la señal sea menos vulnerable a los campos

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

electromagnéticos, lo cual permite manejar información con mucha mayor exactitud y libre de distorsiones. Otra gran ventaja de la televisión digital es que, al hacer uso de la compresión digital, se puede transmitir mayor información utilizando el mismo ancho de banda de 6 MHz, lo cual representa mayores beneficios para el espectador o usuario final que puede recibir una mayor cantidad de servicios en el mismo ancho de banda. En lo que respecta a la resolución de la imagen, es claro que mientras mayor sea el número de líneas por imagen mejor será la calidad de ésta. Existen actualmente varias posibilidades de transmisión⁽³⁾:

- HDTV: High Definition TV (hasta 1125 líneas)
- SDTV: Standard Definition TV (hasta 720 líneas)
- MULTICASTING: Posibilidad de transmitir varias señales en forma simultánea.
- DATACASTING: Posibilidad de transmitir servicios de información.

Sin embargo, para mayo de 1999 la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) adoptó el estándar internacional de 1125 líneas propuesto por los estudios de HDTV, la cual había sido propuesta como recomendación por el instituto japonés NHK. Mientras los países europeos habían propuesto un estándar que consistía de 1250 líneas, ésta resultaba difícil de implementar en aparatos caseros de bajo costo, por lo que la HDTV fue la mejor opción como estándar mundial que facilita el intercambio internacional de programas televisivos, teniendo una relación de aspecto de 16:9.

7. **International Journal Of Satellite Communications**
Jhon Wilwy & Sons
Digital video broadcasting over satellite (DVB-S): a system for broadcasting and contribution applications.
2000, pg. 394-395

1.2 NORMATIVIDAD

1.2.1 Normas para la radiodifusión de video digital

Actualmente existen dos estándares principales para la transmisión de TV digital. Uno es europeo y se llama DVB (Digital Video Broadacasting), y el otro es estadounidense y se llama ATSC (Advanced Television Systems Committee).

El proyecto DVB (Digital Video Broadcast) es un consorcio de organizaciones tanto públicas como privadas, con objeto de establecer el marco para la introducción de servicios de televisión digital basados en la técnica de compresión y codificación MPEG-2. Esto es, se propone abordar las necesidades reales en este campo teniendo presente la situación y estado de los mercados, así como las circunstancias económicas, tanto de la electrónica de consumo, como de la industria de difusión de televisión. Fue de este grupo donde nacieron los fundamentos para el estándar DVB.

El estándar DVB fue el primero en ser instaurado y fue publicado en enero de 1995 por la ETSI (European Telecommunication Standard Institute). Desde los inicios de este estándar, muchos radiodifusores alrededor del mundo la han adoptado como base de sus sistemas de Radiodifusión de Televisión digital. Actualmente (año 2002) la lista de países asciende a 300 ⁽⁴⁾. Con una tasa de transferencia de 15 Mb/s es actualmente la base para sistemas de compresión digital.

El estándar DVB está conformado de varias especificaciones de transmisión. El primero en ser aprobado en 1994 fue la especificación DVB-S que plantea especificaciones para la transmisión por satélite, basado en modulación QPSK, actualmente es una norma de facto para la transmisión de televisión digital por satélite la cual se estudiará a fondo en la presente tesis. La especificación DVB-C es basada en gran parte en el DVB-S y da mecanismos para la transmisión por cable; está basada en una modulación por cuadratura (64-QAM) aunque soporta una gran variedad de técnicas de modulación.

4. <http://www.dvb.com>

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

El DVB plantea, además de éstas, muchas más especificaciones, algunas de las cuales se resumen en la tabla 1.1.

El proyecto DVB genera especificaciones técnicas a partir de unos requisitos comerciales previamente definidos. Es por este carácter cercano al mercado, que el DVB se caracteriza por un gran dinamismo cuyo objetivo es la aportación de soluciones técnicas abiertas a necesidades comerciales.

Una de las decisiones fundamentales que tomó el DVB muy al principio de sus actividades fue la selección de las especificaciones MPEG-2 como codificación fuente de sonido y video, así como la formación de los flujos elementales de datos, el multiplexaje, etc. Los tres documentos relevantes son [ISO 13818-1]⁽⁵⁾, [ISO 13818-2]⁽⁶⁾ y [ISO 13818-3]⁽⁷⁾ que están refrendados como normas internacionales; en ellos se especifican los componentes del MPEG-2: nivel sistema, codificación fuente de vídeo y de sonido, respectivamente.

Entre los principales logros del proyecto DVB se cuentan las especificaciones técnicas para la transmisión de las señales de televisión digital, esto es, las formas de realizar la codificación de canal y los métodos y constelaciones de la modulación.

La primera especificación que se produjo fue la correspondiente a la entrega de señales DVB vía satélite [ETS 300 421]⁽⁸⁾ conocida como DVB-S. En dicho documento, y por primera vez, se describen varias herramientas para la codificación de canal, mecanismo que ha venido a ser la referencia para el resto de medios de transmisión. Está en curso la producción de un informe técnico tipo ETR

-
5. **[ISO 13818-1] Information Technology. Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information. Part 1: Systems.** Norma Internacional ISO/CEI. Noviembre, 1994.
 6. **[ISO 13818-2] Information Technology. Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information. Part 2: Video.** Norma Internacional ISO/CEI. Noviembre, 1994. El documento TM 1764 incorpora correcciones a esta Norma.
 7. **[ISO 13818-3] Information Technology. Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information. Part 3: Audio.** Norma Internacional ISO/CEI. Noviembre, 1994.

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

que incluya la opción de utilizar modulación QPSK para enlaces en entornos especiales (altas interferencias, etc). La forma preferida de configurar la modulación QPSK está contenida en [TM 1751]⁽⁹⁾. Respecto la interpretación correcta de la codificación convolucional, el documento [TM 1438]⁽¹⁰⁾ proporciona aclaraciones al respecto.

Tabla 1.1 Principales especificaciones del estándar DVB.

Especificación	Descripción
Satélite	Sistema de transmisión digital por satélite
Cable	Sistema digital de cable
Terrestre	Sistema broadcasting terrestre digital
Sistema MMDS	Sistema de distribución multipunto por encima de 10 GHz
	Sistema de distribución multipunto por debajo de 10 GHz
Satélite (SMATV)	Sistema de distribución por antena master de TV por satélite, (SMATV).
Televisión interactiva	Sistemas de canales de retorno en CATV, (DVB-RCC)
	Protocolos interactivos para redes independientes.
	Canales interactivos para antena master de satélite, (SMATV)
	Canales de retorno en sistemas PSTN / ISDN, (DVB-RCT)
	Interfaces para redes PDH
	Relación Interfaces para redes SDH
Broadcasting de datos	Especificación para la transmisión del flujo de datos DVB
Acceso condicional	Interfase común para acceso condicional y otras aplicaciones
	Especificaciones técnicas para SIMULCRIP en sistemas DVB
Subtitulado	Sistema de broadcasting digital para televisión, sonido y servicios de datos: sistemas de subtitulado.
Interfaces	Interfaces DVB para redes PDH
	Interfaces DVB para redes SDH

El documento [ETS 300 429]⁽¹¹⁾ describe la codificación de canal y modulación para la entrega de señales DVB en redes de cable (CATV), conocida como especificación DVB-C.. La especificación DVB-C conjuntamente con la especificación del satélite DVB-S, constituyen la base para [ETS 300 473]⁽¹²⁾, que es la especificación, conocida como DVB-SMATV, que debe usarse en los sistemas de Antenas Colectivas (SMATV). Como información básica de las características técnicas de los sistemas de Antenas Colectivas y resultados de medidas, simulaciones y pruebas de transmisión llevadas a cabo por el proyecto europeo DIGISMATV, el DVB recopiló la documentación técnica más relevante en el documento [TM 1259]⁽¹³⁾.

La transmisión terrenal de señales DVB se describe en [ETS 300 744]⁽¹⁴⁾, especificación que se conoce como DVB-T. Como complemento, el doc [TM 1743]⁽¹⁵⁾ especifica una Mega-trama como paquete de inicialización (MIP) que puede resultar necesario para el sincronismo en Redes de Frecuencia Única (SFN) así como herramienta adicional para el control de otros parámetros importantes en este tipo de redes.

Para la transmisión de señales DVB en sistemas terrenales de microondas, se han elegido dos especificaciones dependiendo del rango de frecuencias usado. El documento [ETS 300 748]⁽¹⁶⁾ describe la codificación de canal y modulación para sistemas MVDS en frecuencias superiores a 10 GHz (DVB-MS). Este sistema de transmisión se basa en la tecnología adoptada para el satélite DVB-S. El documento

-
8. **[ETS 300 421] Digital Broadcasting Systems for Television, Sound and Data Services.** Norma ETSI. Diciembre, 1994.
 9. **[TM 1751]Preferred Implementation for non-standard BPSK signals.** Documento interno Módulo Técnico DVB.
 10. **[TM 1438]Definition of the Convolutional Encoder in the DVB-S System.** Documento interno Módulo Técnico. Julio, 1995.
 11. **[ETS 300 429] Digital Broadcasting Systems for Television, Sound and Data Services; Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Cable Systems.** Norma ETSI. Diciembre, 1994. Los documentos TM 1759 y TM 1620 incluyen modificaciones (128-QAM y 256-QAM) a incorporar en futura revisión.
 12. **[ETS 300 473] Digital Broadcasting Systems for Television, Sound and Data Services; Satellite Master Antenna Television (SMATV) Distribution Systems.** Norma ETSI. Mayo, 1995.
 13. **[TM 1259] Satellite Digital TV in Collective Antenna Systems. SMATV Reference Channel Model for digital TV.** Contribución del proyecto DIGISMATV. Julio 1994.

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

[ETS 300 749]⁽¹⁷⁾ se aplica a los sistemas de microondas MMDS en frecuencias por debajo de 10 GHz (DVB-MC). Esta especificación se basa en la tecnología adoptada para el cable DVB-C.

Para el caso del estándar ATSC, fue aprobado por los miembros de dicho grupo en Septiembre de 1995, Este estándar provee plataformas específicas para la implementación de sistemas de televisión digital. Este sistema consiste a su vez de varios subsistemas, cada uno de los cuales contiene sus propias especificaciones.

Este estándar inicialmente describía las características que debía tener la ATV (Advanced Television) de Estados Unidos. Sin embargo, como era de esperarse, el mismo estándar fue adoptado por otros países. Este estándar incluye parámetros para la codificación, compresión y formato de video y audio, así como también para la multiplexación y transporte de señales. Plantea también especificaciones para transmitir audio y video de alta calidad en un canal de 6 MHz, con una tasa de transferencia de 19 Mbps para el caso de transmisión por radiodifusión terrestre, y de 32 Mbps para el caso de transmisión por cable.

El comité ejecutivo de la ATSC dividió el estándar de Televisión Avanzada en 5 áreas específicas, las cuales fueron atendidas por un grupo específico de especialistas:

-
14. **[ETS 300 744] Digital Broadcasting Systems for Television, Sound and Data Services; Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television.** Norma ETSI. Mayo, 1996. El documento TM 1762 incorpora modificaciones a la especificación. El documento TM 1619 proporciona explicaciones sobre las razones básicas de selección de OFDM.
 15. **[TM 1743 rev 2] Specification of a Mega-frame for SFN Synchronisation.** Documento interno Módulo Técnico DVB. Noviembre, 1996.
 16. **[ETS 300 748] Digital Broadcasting Systems for Television, Sound and Data Services; Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Multipoint Video Distribution Systems (MVDS) at 10 GHz and Above.** Norma ETSI. Octubre, 1996.
 17. **[ETS 300 749] Digital Broadcasting Systems for Television, Sound and Data Services; Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Multipoint Video Distribution Systems (MMDS) below 10 GHz.** Borrador Norma ETSI. Noviembre, 1996.

Nota: Cabe mencionar que estos documentos, aunque tienen varios años de antigüedad, siguen vigentes actualmente con ligeras modificaciones.

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

- Video (Incluyendo formato de la señal y fuente de codificación)
- Audio (Al igual que en Video incluye formato de la señal y fuente de codificación)
- Transporte (Abarcando multiplexación de datos y codificación de canal)
- Transmisión (Cubriendo los aspectos de los sistemas de modulación)
- Receptor (Características Técnicas).

El estándar describe un sistema diseñado para transmitir video y audio de alta definición y un auxiliar para la transmisión de datos sobre un solo canal de 6 MHz. Este sistema puede alcanzar una tasa de transferencia de 19 Mbps en un canal de 6 MHz para radiodifusión terrestre y de 38 Mbps para transmisión por cable⁽¹⁸⁾. Lo anterior quiere decir que la resolución de video que se puede alcanzar es hasta 5 veces mejor que la televisión convencional (NTSC), la cual requeriría un factor de reducción en su tasa de transmisión de hasta 50 veces. Para lograr esto, el sistema fue diseñado para realizar una codificación sobre la información de audio y video utilizando la técnica MPEG-2. El objetivo es lograr la máxima calidad de imagen con la menor cantidad posible de bytes. Aunque el subsistema de transmisión fue diseñado específicamente para aplicaciones por cable y radiodifusión terrestre, el objetivo era que la información de video, audio y los servicios de multiplexación y transporte pudieran ser usados en otras aplicaciones como la radiodifusión por satélite.

La compresión se refiere a los métodos de reducción de la tasa de transferencia en bits, y es utilizada en las aplicaciones de video, audio y datos digitales. El propósito de la codificación es minimizar el número de bits necesarios para representar la información de audio y video. El sistema de televisión planteado por la ATCS emplea la técnica MPEG-2 para la compresión de video, y para la compresión de audio utiliza el estándar AC-3.

Los servicios de transporte y multiplexación se refieren a la división de cadenas de datos en paquetes mas pequeños de información, lo cual facilita el transporte de distintos canales sobre un solo medio de transmisión. La televisión digital emplea también la técnica de transporte MPEG-2 para la fragmentación en paquetes y

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

multiplexación de señales de audio, video y datos para transmisión digital. La técnica de transporte MPEG-2 es utilizada cuando el ancho de banda del que se dispone es limitado y se requieren de mecanismos de transporte más eficientes. Fue diseñado además para facilitar la interoperabilidad con mecanismos de transporte como ATM.

La transmisión se refiere a la codificación del canal, así como de la modulación. El codificador de canal toma las cadenas de bits de datos y agrega información adicional, la cual puede ser usada por el receptor para reconstruir los datos originales de la señal recibida. La modulación usa la información de la cadena de datos para modular la señal a transmitir. El subsistema de modulación ofrece dos modos de hacerlo: Para la radiodifusión terrestre se emplea la técnica 8 VSB (banda lateral residual con 8 niveles discretos de amplitud) y para altas tasas de transmisión (transmisión por cable) se utiliza la técnica 16 VSB (banda lateral residual con 16 niveles discretos de amplitud).

En la tabla 1.2 se comparan las características más importantes de los estándares DVB y ATSC.

Tabla: 1.2 Principales características de los estándares de televisión digital DVB y ATSC.

	ATSC	DVB-T
Modulación	8 VSB	COFDM
Ancho de Banda del canal	6 MHz	6 o 7 MHz
Capacidad del canal	19 Mbps	19 Mbps
Técnica de compresión para audio y video	MPEG-2	MPEG-2

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

Existe un tercer estándar que sólo utiliza Japón y es el llamado ISDB-T. Su principal característica es el tipo de modulación que utiliza, la cual es llamada BST-OFDM (segmentación para la transmisión del ancho de banda).

En lo que respecta a la adopción de estos estándares por parte de cada país, en la actualidad se encuentra de la forma indicada en tabla 1.3.

Tabla 1.3 Adopción de estándares para televisión digital de varios países en el año 2001 ⁽¹⁹⁾.

DVB-T, (COFDM) 19 países	ATSC, (8 VSB) 5 países	Países en toma de decisiones y estándar que usan actualmente
Austria	Argentina	Brasil (PAL)
Australia	Canadá	México (NTSC)
Bélgica	Corea del Sur	China Rusia (PAL)
Dinamarca	Taiwán	China (PAL)
Finlandia	Estados Unidos	Rusia (SECAM)
Francia		
Nueva Zelanda		
Portugal		
Singapur		
España		
Suiza		
Reino Unido		
Alemania		
Grecia		
Irlanda		
Italia		
Luxemburgo		
Países Bajos		
India		

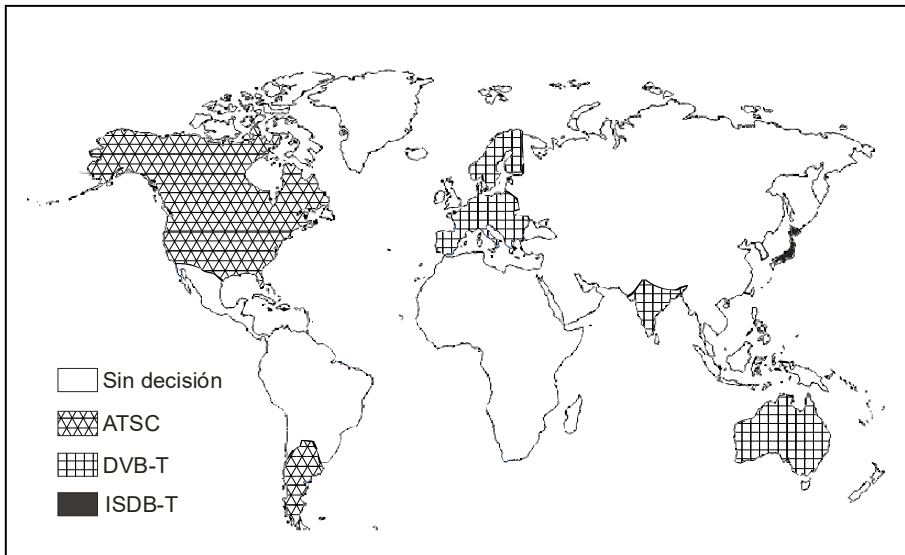


Figura 1.1 Mapa de adopción de estándares de Televisión Digital en cada país en el año 2001 ⁽¹⁹⁾.

México se encuentra estudiando los sistemas DVB-T y ATSC ⁽²⁰⁾. Cabe hacer notar que en el caso de México, que comparte una extensa frontera con Estados Unidos, no sólo geográfica sino también comercial, se está estudiando la posibilidad de unir los dos sistemas para dar por terminado el debate acerca del desempeño de cada uno de ellos. Esta salomónica decisión, permitiría compartir las ventajas de uno y otro, además de dar una pronta solución al asunto, decisión que ahorraría tiempo en la implementación de un sistema de televisión digital para este país, y que inevitablemente forzaría una pronta solución al debate en los países centroamericanos.

19. **Established Terrestrial DTV Standards.**

<http://64.26.128.84/news/slides.htm>

20. **Executive Summary**

Issues to be considered for the evaluation of standard for digital television, ATSC answers to Mexico's questionnaire
Octubre 21, 1999

1.3 COMUNICACIONES POR SATÉLITE

1.3.1 Breve historia de las comunicaciones por satélite

Desde principios del siglo XX, las comunicaciones comenzaron a cobrar cada vez mayor importancia, haciéndose indiscutible la necesidad de poder comunicarse a mayores distancias, que a principios de siglo ya excedían el horizonte terrestre y aun cuando ya se tenía un dominio apropiado de las comunicaciones por medio de ondas de radio, la necesidad de comunicarse a sitios más lejanos era cada vez más recursiva. El uso de las antenas comunes para comunicaciones de radio pronto dejó de satisfacer las necesidades de comunicación que la humanidad reclamaba, y fue entonces necesario buscar nuevas alternativas de transmisión. La primera solución que se dio al problema fue el uso de las transmisiones de radio en onda corta, también llamadas ondas ionosféricas. Esta técnica de transmisión consistía en aprovechar las propiedades de la ionosfera para reflejar señales electromagnéticas de determinadas frecuencias, por lo que se podía lograr que una señal transmitida de un sitio determinado pudiera llegar a un lugar considerablemente alejado. No obstante, pronto fue desechada la efectividad de esta técnica, ya que una transmisión exitosa dependía demasiado de las condiciones climáticas, factor que podía degradar drásticamente una señal al grado de hacerla imperceptible, además de que las limitantes de distancia seguían existiendo porque las comunicaciones trasatlánticas no eran posibles aún.

Ante estos hechos, la necesidad de encontrar la forma de lograr comunicaciones a larga distancia continuó siendo la tarea de muchos científicos, y una solución planteada, bastante obvia pero prácticamente imposible de conseguir, era el uso de antenas de alturas gigantescas que pudieran comunicar puntos lejanos. Esta técnica fue adoptada y sigue siendo usada aún hoy en día por estaciones transmisoras de televisión, pero la altura de estas antenas era incomparable con los requerimientos que se tendrían para una comunicación trasatlántica. Sin embargo, en el año de 1945, el escritor y científico Arthur Clarke, determinó que si se pudieran colocar 3 antenas montadas sobre un satélite artificial ubicado sobre el plano ecuatorial, a una altura de 36,000 Km sobre el nivel del mar y equidistantes

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

entre sí, entonces el globo completo podría ser comunicado; pero más aún, estos satélites girando en el sentido de la rotación de la tierra tendrían un periodo orbital de 24 horas sin necesidad de propulsión, por lo que parecerían puntos estáticos en el cielo para cualquier observador terrestre, haciendo completamente factible la transmisión de señales de radio a través de los continentes, como se puede ver en la figura 1.2.

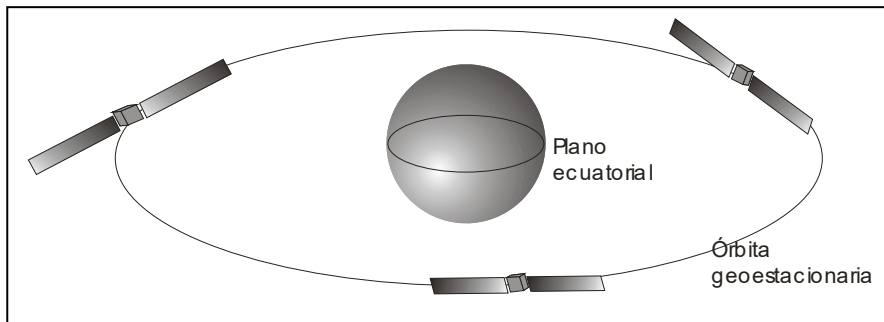


Figura 1.2 Órbita geoestacionaria propuesta por Arthur Clarke en la que cada satélite equidista 120° de los otros dos satélites.

Basado en estas ideas; a principios de los años 60 surge el primer prototipo de satélite geoestacionario SYNCOM 1, y por primera vez en la historia, en el año de 1963, es colocado en órbita el primer satélite geoestacionario SYNCOM 2. A partir de entonces, la efectividad de este tipo de satélites ha sido comprobada a tal grado que hoy en día son los satélites más utilizados. Actualmente se encuentran en órbita varios satélites SYNCOM que son descendientes directos de SYNCOM 2 y que son utilizados para la transmisión de TV por satélite directa al hogar.

A raíz de lo prometedor de los satélites geoestacionarios, en el año de 1964 se creó el primer consorcio internacional de satélites (INTELSAT), que en Abril 6 de 1965 lanzó el satélite geoestacionario INTELSAT 1, también conocido como Early Bird (Pájaro madrugador), que era capaz de proveer interconectividad a nivel mundial con 240 canales de voz y un canal de TV entre Estados Unidos y Europa. Durante la siguiente década la capacidad de transmisión y de potencia fue incrementada en

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

los satélites INTELSAT II, III y IV, logrando una mayor efectividad en el uso del espectro asignado mediante el uso de nuevos tranpondedores.

Ya comprobada la efectividad de los sistemas de satélites en órbita geoestacionaria, el uso y evolución de estos sistemas comenzó a darse rápidamente, provocando una pronta evolución de estos. En la tabla 1.4 se listan algunos de los satélites de órbita geoestacionaria que se han creado a lo largo de la historia.

Una nueva era en los satélites de comunicación se abrió en Diciembre de 1993 con el lanzamiento del satélite DBS-1 y DBS-2 en 1994. Estos satélites DBS (Direct Broadcasting Satellite) estaban ya orientados hacia la comunicación directa al hogar dejando de lado las grandes estaciones receptoras que se debían tener en tierra.

Tabla 1.4 Principales satélites geoestacionarios que se han construido.

Año	Satélite
1963	SYNCOM
1966	INTELSAT II
1967	ATS I
1969	INTELSAT IV
1973	COMSTAR
1981	PALAPA-B
1987	BSB
1988	OPTUS-B
1993	DBS-1
1999	HS 702
2003	SATMEX 6

1.3.2 Bandas de frecuencia

La asignación de frecuencias a servicios de radiodifusión por satélite es un complicado proceso que requiere de planeación y coordinación internacional. Para ello es necesaria la participación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

(UIT) que, para facilitar la planeación de asignación de frecuencias, dividió al mundo en tres regiones:

Región 1: Europa, África, Mongolia, Rusia y los antiguos países que conformaban la URSS.

Región 2: Norte y Sur América básicamente.

Región 3: La mayoría de los países asiáticos, Australia y el suroeste del Pacífico.

Con estas regiones definidas, las bandas de frecuencias disponibles son atribuidas a distintos servicios de radiodifusión por satélite, aunque a un determinado servicio le puede ser asignada una diferente banda de frecuencia según la región sobre la que opere. Algunos de los servicios por satélite más comunes son los siguientes:

FSS: Fixed Satellite Service (Servicio fijo)

DBS o BSS: Direct Broadcasting Satellite (Radiodifusión Directa por Satélite)

Mobile Satellite Service (Servicio Móvil)

Navigation Satellite Service (Servicio de Navegación por Satélite)

Meteorological Satellite Service (Servicio de Meteorología por Satélite)

El servicio BSS está planteado para proporcionar básicamente los servicios de radiodifusión directa por satélite (DBS) también conocida como directa al hogar (DTH). En la tabla 1.5 se muestra la designación de frecuencias para servicios de radiodifusión por satélite.

La banda Ku significa "under K" (bajo la banda K), y la banda Ka significa "above K" (sobre la banda K). La banda Ku es una de las más utilizadas actualmente para los servicios DBS, y es también usada para proporcionar algunos servicios fijos. Por otra parte la banda C es utilizada básicamente para proveer servicios fijos por satélite. VHF es la banda asignada para servicios móviles y de navegación,

Tabla 1.5 Designación de bandas de frecuencia.

Rango de Frecuencias, GHz	Designación de la banda
0.1-0.3	VHF
0.3-1.0	UHF
1.0-2.0	L
2.0-4.0	S
4.0-8.0	C
8.0-12.0	X
12.0-18.0	Ku
18.0-27.0	K
27.0-40.0	Ka
40.0-75	V
75-110	W
110-300	Mm
300-3000	μm

mientras que la banda L se usa para proveer servicios de radiodifusión móvil así como de radionavegación. Actualmente la banda C es usada básicamente para servicios de radiodifusión móvil y el rango de frecuencias más usado está contenido aproximadamente entre los 4 y 6 GHz. La frecuencia superior es siempre usada para enlaces de subida al satélite, mientras que la frecuencia inferior es utilizada para enlaces de bajada. Es por esto que es común denotar a la banda C por 6/4 GHz, dando la frecuencia de enlace de subida primero. Para servicios de radiodifusión directa al hogar o DBS se usa la banda Ku y el rango de frecuencias comúnmente usado es aproximadamente 12 a 14 GHz que se denota 14/12 GHz. Las bandas de frecuencias que se utilizan son en realidad mucho más precisas; por ejemplo en la banda Ku para el enlace de subida se utiliza la frecuencia de 14.030 GHz y para el enlace de bajada se usa 11.730 GHz. Abajo se muestra una tabla con las bandas de frecuencias que se abordarán en este trabajo, proporcionando además en forma más precisa las frecuencias y ancho de banda de los canales para enlaces tanto de subida como de bajada (Tabla 1.6).

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

La banda Ku posee un rango de frecuencias variable, según el continente del que se trate, aunque como ya se ha mencionado esta banda está asignada muy particularmente para el servicio de DBS.

Tabla 1.6 Frecuencia de enlaces ascendentes y descendientes para comunicaciones por satélites en las bandas de frecuencias más comunes, así como su ancho de banda y servicios asignados.

Banda	Enlace de subida	Enlace de bajada	Servicio
C	5.925-6.425	3.7-4.2	FSS
6/4 GHz	(BW de 500 MHz)	(BW de 500 MHz)	
Ku	14.0-14.5	11.7-12.2	FSS
14/12 GHz	(BW de 500 MHz)	(BW de 500 MHz)	
Ku	17.3-17.8	12.2-12.7	BSS o DBS
17/12 GHz	(BW de 500 MHz)	(BW de 500 MHz)	
Ka	27.5-31.0	17.2-21.2	FSS
30/20 GHz	(BW de 3500 MHz)	(BW de 3500 MHz)	

Cómo ya se había mencionado antes, hay que tener en cuenta que la asignación de frecuencias no es la misma para todos los países, ya que la UIT es la encargada de hacer esta asignación. A continuación se muestra una tabla con las designaciones de frecuencia oficialmente planteadas por la UIT (Tabla 1.7).

1.3.3 Polarización y reuso de frecuencias

Las ondas electromagnéticas que son radiadas por un transmisor tienen dos características básicas que son la frecuencia y su polarización. La polarización define la orientación que tienen las componentes de los campos eléctrico y magnético, los cuales son siempre ortogonales entre sí y también ortogonales a la dirección de propagación. La polarización de una onda electromagnética queda determinada por las antenas transmisoras. Para el caso de las comunicaciones por satélite son dos los tipos de polarización utilizada: lineal y circular.

Tabla 1.7 Designación oficial de frecuencias de la UIT

Número de Banda	Símbolo	Rango de Frecuencias
4	VLF	3-30 kHz
5	LF	30-300 kHz
6	MF	300-3000 kHz
7	HF	3-30 MHz
8	VHF	30-300 MHz
9	UHF	300-3000 MHz
10	SHF	3-30 GHz
11	EHF	30-300 GHz
12		300-3000 GHz

Polarización lineal:

Este tipo de polarización se caracteriza por mantener fija la orientación de los vectores de campo eléctrico y magnético independientemente de la dirección de propagación.

Si se plantea un sistema de referencia, entonces se pueden definir los conceptos de ***polarización lineal vertical*** y ***polarización lineal horizontal***, empleándose el concepto de polarización horizontal para el caso en que la dirección del vector de campo eléctrico es paralelo al eje coordenado correspondiente a la referencia horizontal; análogamente, se dice que una onda electromagnética tiene polarización vertical si la dirección del vector de campo eléctrico es paralelo al eje coordenado correspondiente a la referencia vertical.

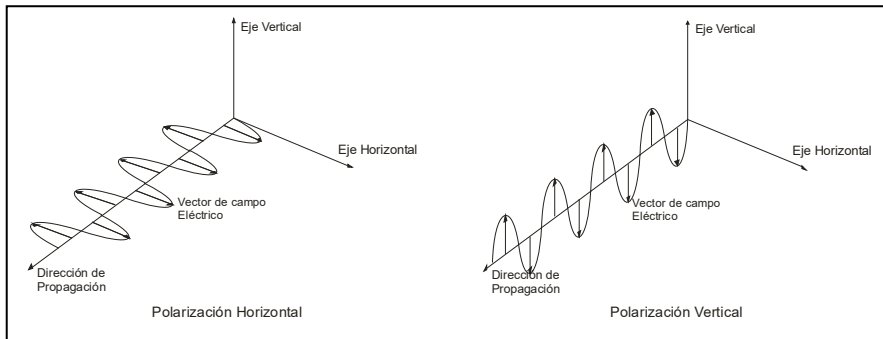


Figura 1.3 Polarización Lineal.

De esta manera, es posible transmitir dos señales de la misma frecuencia pero con polarizaciones ortogonales entre sí (polarización horizontal y vertical) sin que las señales interfieran entre sí. Con esto se aprovecha el ancho de banda disponible al doble de lo que se podría utilizar usando sólo una polarización; a este concepto se le conoce como **reuso de frecuencias**.

Polarización Circular:

En este caso la orientación de los campos eléctricos y magnéticos, que son ortogonales entre sí, no es fija a lo largo del eje de propagación si no que conforme avanza en la dirección de propagación estos van rotando en forma uniforme, de tal forma que estos cumplen un giro de 360° al haber recorrido una longitud de onda en la dirección de propagación.

Dependiendo del sentido de rotación de los campos eléctricos y magnéticos, la polarización es llamada **polarización circular derecha** o **polarización circular izquierda**. Una de las ventajas de la polarización circular sobre la polarización lineal es que la orientación de los dispositivos de transmisión no tiene que ser tan precisa aunque por otra parte tiene la desventaja de ser más susceptible a la despolarización causada por campos electromagnéticos ajenos al sistema de transmisión.

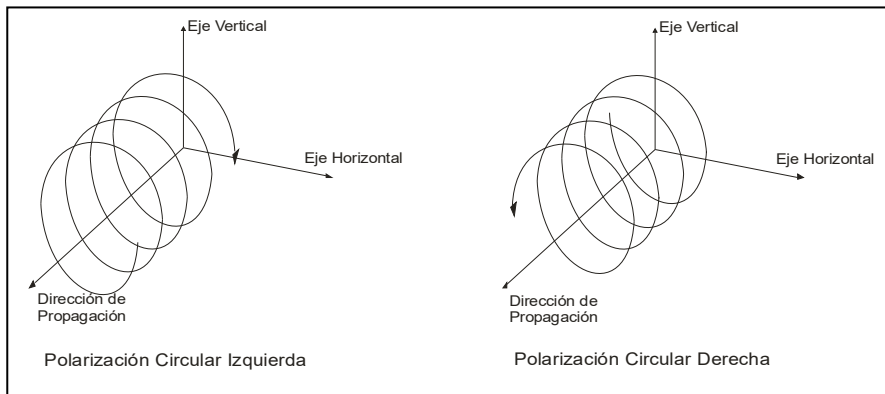


Figura 1.4 Polarización Circular.

1.3.4 Transpondedores

Un satélite geoestacionario es capaz de dar cobertura al 42.4 % de la superficie terrestre. Para lograr comunicar dos puntos de la superficie, el satélite realiza las funciones de un repetidor de señales las cuales son enviadas desde un punto sobre la superficie terrestre y retransmitidas por el satélite hacia la tierra para ser captadas por alguien más.

El dispositivo encargado de realizar dicha tarea se llama transpondedor (transponder). El transpondedor debe realizar una conversión en frecuencia a la señal de subida antes de retransmitirla. Es por ello que se dispone de dos frecuencias, una para el enlace ascendente y otra para el enlace descendente.

Los elementos básicos que conforman a un transpondedor se muestran en la Figura 1.5. La antena receptora es el dispositivo encargado de recibir la señal proveniente desde la tierra. Esta señal ha sido considerablemente atenuada a lo largo del trayecto desde la estación transmisora ubicada en la superficie terrestre hasta la antena receptora montada en el satélite. Es por ello que esta señal requiere ser amplificada con bajos niveles de ruido, y esta función es realizada por el LNA (Low

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

Noise Amplifier) o amplificador de bajo ruido. Una vez que la señal ha sido amplificada, es necesario realizar el cambio de frecuencia para retransmitir la señal hacia la tierra, ya que como se había mencionado se trabaja en dos frecuencias distintas para los enlaces de subida y los de bajada; es común también que la señal recibida sea demultiplexada en distintos canales, esto con la finalidad de dar un procesamiento distinto a cada canal según sean los requerimientos del usuario que utiliza el servicio proporcionado por el satélite. Posterior a esto, es necesario amplificar cada señal con niveles de potencia elevados de tal forma que se garantice que la señal llegará a la tierra con niveles razonables de potencia. Por último, las señales son multiplexadas nuevamente en una sola señal que será reenviada a la tierra por medio otra antena.

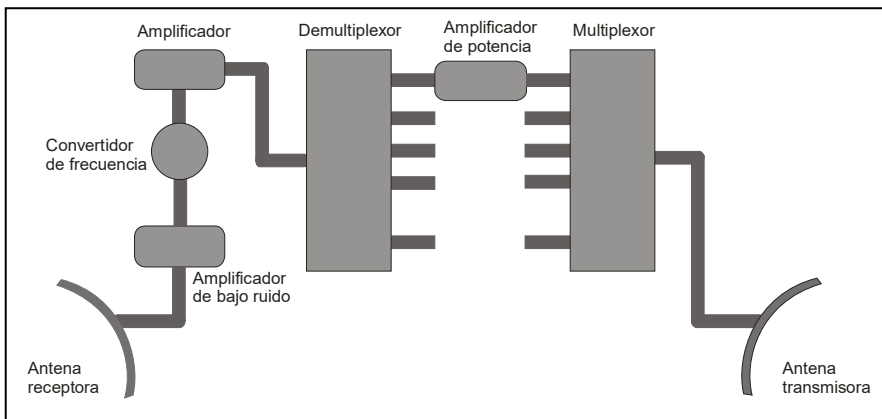


Figura 1.5 Elementos que componen a un transpondedor.

Los satélites DBS pueden ser configurados para tener hasta 16 transpondedores, cada uno de los cuales puede proporcionar una potencia a la señal de salida de 120 W aproximadamente. Otra configuración común es de 8 transpondedores y un nivel de potencia de salida de 240 W cada uno.

1.3.5 Bandas de frecuencias atribuidas y normas para los servicios de radiodifusión directa al hogar.

La introducción de las nuevas tecnologías junto con nuevas aplicaciones de tecnologías ya existentes, y con la aparición de recientes reglamentaciones nacionales en los países más avanzados, están fomentando la proliferación de distintas técnicas para la distribución de las señales de televisión.

Las técnicas usadas en la actualidad son:

- Radiodifusión convencional (broadcasting);
- Televisión de baja potencia (Low Power Tele Vision - LPTV);
- Servicio de distribución multipunto y multicanal (Multichannel Multipoint Distribution Service - MMDS);
- Radiodifusión directa por satélite (Direct Broadcast Satellite - DBS);
- Televisión por cable (CABLE Tele Vision - CATV).

El éxito o el fracaso de cualquiera de estos procedimientos depende de tres factores íntimamente relacionados entre sí: tecnología, marco legal y economía.

En lo que respecta la radiodifusión directa por satélite; la idea de lanzar satélites para la transmisión de canales de TV directa al hogar surgió a principios de los años 70's. De esta forma apareció el servicio DTH (Direct To Home). Las especificaciones técnicas para estos sistemas que todos los países (excepto Estados Unidos) adoptaron fue definida por la WARC (World Administration Radiocommunication Conference) en el año de 1977. Estas especificaciones se encuentran en el documento WARC 77, que definen entre otras cosas, las bandas de frecuencia empleadas, potencia de los transpondedores, el tipo de polarización de las señales, posiciones orbitales de los satélites, canales, así como los contornos de PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Efectiva) para cada país.

La atribución de la banda de frecuencias que va de los 11.7 GHz a los 12.5 GHz para el caso de Europa, África y Asia y de los 12.2-12.7 para el caso del continente

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

Americano y México es conocida como la banda DBS (Direct Broadcast Satellite), mientras que en Estados Unidos se la conoce como la banda BSS (Broadcast Satellite Service). Esta banda de frecuencia fue seleccionada porque, por un lado, permite una buena delimitación de las áreas de servicio con antenas relativamente pequeñas (menos de 3 m de diámetro) y, por otro lado, porque para estas longitudes de onda las señales no son demasiado afectadas por las condiciones meteorológicas. Aunque el ancho de banda es tan sólo de 800 MHz, la banda DBS es separada en 40 canales con un ancho de banda de 27 MHz cada uno para las regiones 1 y 3 y para la región 2 en 32 canales con un ancho de banda de 24 MHz.

De hecho, el reuso de frecuencias hace posible la utilización de la misma frecuencia para transmitir dos diferentes señales empleando polarizaciones ortogonales. Con la finalidad de evitar interferencias entre canales, la WARC propuso el uso de bandas de guarda de 11.36 MHz entre canales, por lo que las frecuencias centrales de dos canales adyacentes están separadas por 38.36 MHz, como se muestra en la figura 1.6. De esta manera y empleando el uso de polarizaciones ortogonales, es posible contener 40 canales en una banda de 800 MHz; de otra forma, para contener el mismo número de canales usando una sola polarización sería necesario un ancho de banda de casi 1200 MHz.

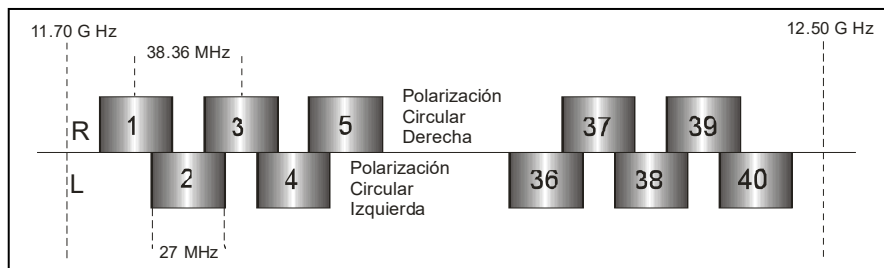


Figura 1.6 Configuración de canales para la banda DBS planteada por la WARC 77.

La polarización utilizada en los sistemas DBS es circular derecha para los canales impares y circular izquierda para los canales pares. La polarización circular se prefiere en estos sistemas a la lineal ya que para la polarización circular la

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

orientación de las antenas transmisora y receptora no debe ser tan precisa como sí lo debe ser una antena que trabaja por polarización lineal. Esto es importante ya que los sistemas DBS generalmente ubican las antenas receptoras en el hogar de los usuarios y estos no poseen la infraestructura necesaria para mover con precisión la antena. Ocho posiciones orbitales con 6° de separación entre ellas (de 9° E a 37° O) han sido definidos en Europa para los satélites que proveen estos servicios. No obstante, sólo dos de ellas (16° O y 31° O) han sido completamente usadas, y el resto sólo han sido parcialmente utilizadas. La distancia angular entre satélites adyacentes operando en esta banda de frecuencias fue seleccionada de tal forma que fuera lo suficientemente amplio para evitar interferencia entre señales. Con base en esto se determinó que la distancia mínima requerida es de 6°, aunque para antenas muy direccionales es suficiente con 3°.

La posición orbital de los satélites de DBS fue atribuida tratando que cuando el satélite no reciba luz solar, es decir que se encuentre eclipse solar de equinoccio, en el área en la que ofrece servicio sobre la superficie terrestre sean entre las 2 y 4 AM. Esto es debido a que cuando el satélite no recibe luz solar, la posibilidad de falla o interrupción en la programación es mayor y a esta hora de la madrugada es cuando menor cantidad de usuarios están haciendo uso del servicio.

La asignación de canales (pares o impares) se realiza dependiendo de la lengua del país donde se prestará el servicio. Es decir, se procura que los países que tienen una misma lengua también tengan una misma polarización con la finalidad de simplificar la instalación de equipos de recepción y no requerir de dispositivos especiales para captar señales con otro tipo de polarización, lo cual representa un costo adicional. De cualquier forma, esto no siempre es posible, y sobre todo en aquellos países que tienen más de una lengua como son Suiza y Bélgica, entre otros países. En lo que se refiere a la potencia de transmisión, también se plantearon estándares en la WARC 77 así como especificaciones de las antenas receptoras y transmisoras en los satélites. Para este último caso se plantea que el diámetro de la antena debe ser aproximadamente de 90 cm para las principales áreas de servicio, mientras que para la potencia de transmisión el estándar propone

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

más de 200 W. En el caso de los satélites franceses y alemanes TDF y TV-SAT la potencia de transmisión está entre los 200 y 230 W.

Tabla 1.7 Frecuencias centrales de los canales estandarizados en la WARC 77.

Canal	Polarización	Frecuencia (MHz)	Canal	Polarización	Frecuencia (MHz)
01	R	11727.48	21	R	12111.08
02	L	11746.66	22	L	12130.26
03	R	11765.84	23	R	12149.44
04	L	11785.02	24	L	12168.62
05	R	11804.20	25	R	12187.80
06	L	11823.38	26	L	12206.98
07	R	11842.56	27	R	12226.16
08	L	11861.74	28	L	12245.34
09	R	11880.92	29	R	12264.52
10	L	11900.10	30	L	12283.70
11	R	11919.28	31	R	12302.88
12	L	11938.46	32	L	12322.06
13	R	11957.64	33	R	12341.24
14	L	11976.82	34	L	12360.42
15	R	11996.00	35	R	12379.60
16	L	12015.18	36	L	12398.78
17	R	12034.36	37	R	12417.96
18	L	12053.54	38	L	12437.14
19	R	12072.72	39	R	12456.32
20	L	12091.90	40	L	12475.50

A pesar de los estándares planteados en la WARC 77, conforme los servicios de radiodifusión directa al hogar evolucionaron también las especificaciones técnicas de los satélites cambiaron, así como las antenas receptoras y otros elementos que conforman los sistemas DBS. Con ello nuevos estándares fueron propuestos; el más importante de ellos es el D2MAC y DMAC.

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

Los nuevos estándares D2MAC y DMAC que surgieron a mediados de los 80's fueron propuestos por Brúcelas para transmisión de DTH en la banda DBS, y aunque el costo de los equipos receptores era mayor, esta propuesta fue aceptada ya que tenía contemplada la compatibilidad para el nuevo sistemas HDTV y con el estándar HDMAC⁽²¹⁾.

Actualmente los satélites empleados para proveer servicios directos al hogar han sufrido varios cambios comparados con los planes originales que se tenían para ellos, sobre todo después de haber encontrado varios problemas en los primeros satélites. Por ejemplo, el TV-SAT1 lanzado en Noviembre de 1987 jamás trabajó debido a que uno de sus paneles solares no se pudo abrir; TV-SAT2 fue lanzado en Agosto de 1989 y trabajó hasta 1994 con tres 'clear channels' canales bajo el estándar de D2MAC y un canal con 16 programas de radio digital usando el ya difunto sistema DSR (Digital Satellite Radio). El satélite TDF fue lanzado en Octubre de 1988 y el TDF2 en Julio de 1990; ellos operaron inicialmente con cuatro canales y durante el transcurso de su vida se redujeron para terminar operando sólo con uno (a mediados de 1997). Por otra parte el satélite Marco-Polo, lanzado al mismo tiempo cesó su operación rápidamente debido a que su operador BSB cayó en bancarrota y que posteriormente formó una alianza con SkyTV para formar una nueva compañía llamada BSkyB cuyo principal competidor es la compañía ASTRA. Olympus 1 fue un satélite experimental lanzado en Julio de 1989 que cesó sus operaciones en el año de 1992 debido a que permaneció fuera de control por dos meses, y una vez rescatado en Julio de 1991 se tomó la decisión de retirarlo. Solamente los satélites Hispasat 1 y 2 lanzados en 1993 continúan en operación y son parcialmente usados para la transmisión de TV analógica, pero principalmente para la transmisión de video Digital.

Ante esta serie de problemas se han logrado grandes mejoras en los nuevos satélites, entre las que destacan las siguientes.

21. H. Benoit
Satellite Television: Techniques of Analogue and Digital Televisión.
Ed. Arnold.
1ra Ed. Londres 1999. pg 25-29

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

- Los dispositivos receptores de bajo ruido (LNB) han tenido enormes progresos, reduciendo enormemente el ruido que se le introducía a la señal captada, lo cual permite brindar el mismo servicio con una potencia de transmisión hasta cuatro veces menor de lo que se requería en los inicios de esta clase de servicio (1977).
- Por otra parte, la eficiencia de los cohetes de propulsión con que se provee a los satélites ha mejorado considerablemente, por lo que el consumo de energía eléctrica es mucho menor. De esta forma la energía solar puede ser mejor aprovechada en un satélite, lo que ha llevado a que hoy en día un satélite tenga hasta 20 transpondedores, cuatro veces más de los que podía tener en un principio. Esto permite la normal operación de los satélites, aún durante los intervalos de tiempo en que no dispone de luz solar es decir durante los eclipses solares de equinoccio.
- El tiempo de vida de los satélites ha sido incrementado al doble, aproximadamente de 7 a 15 años, en parte debido también a la eficiencia de los cohetes de propulsión, que se ven fuertemente influenciados por la cantidad y calidad del combustible necesario para el control de posición del satélite.

Comprobada la falla de los satélites de alta potencia propuestos por la WARC 77, la SES (Satellite European Society) decidió lanzar satélites de media potencia (50 W) para proveer servicios de televisión directa al hogar operando en la banda FSS.

El primero de estos satélites su ASTRA 1A, que fue lanzado en Diciembre de 1988 y tenía 16 transpondedores de 50 W cada uno cubriendo un área de 1000 km de radio y hacía posible la recepción en tierra con un plato parabólico de 60 cm de diámetro. El ancho de banda del canal fue cambiado a 26 MHz con polarización lineal (horizontal y vertical). ASTRA 1B y 1C fueron los descendientes inmediatos de ASTRA 1A los cuales fueron lanzados en 1991 y 1993 respectivamente, cada uno adicionaba 16 nuevos canales para ocupar completamente la banda FSS (10.950 a 11.70 GHz) con 48 canales. ASTRA 1D fue lanzado en 1994, llegando hasta el canal 64 y extendió la banda FSS por debajo de los 10.7 GHz.

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

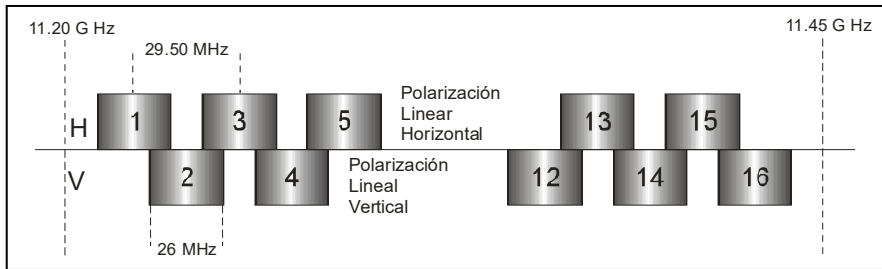


Figura 1.7 Configuración de los canales del satélite ASTRA 1A (ASTRA 1B, 1C y 1D ocupan tres bandas contiguas idénticas).

El sistema satelital EUTELSAT es el segundo más importante de Europa después de ASTRA. Ambos utilizan una distribución de frecuencia similar, aunque EUTELSAT tiene más servicios.

El sistema EUTELSAT actualmente usa la banda FSS. Tiene canales por debajo de los 10.7 GHz con una extensión de trece canales de 33 MHz (110 a 122) con su satélite HOT BIRD 5.

Los satélites franceses Telecom 2A, 2B y 2C, lanzados entre 1991 y 1992 usan la parte superior de la banda FSS (13.5 -12.75 GHz) a la que comúnmente se le llama banda "Telecom "; esta banda fue dividida en 11 canales de 36 MHz con una banda de guarda entre canales de 6 MHz. Estos satélites ofrecen entre otros servicios canales de televisión analógica⁽²²⁾.

22. H. Benoit
Satellite Television: Techniques of Analoge and Digital Televisión
Ed. ARNOLD. Londres 1999. pg 28-30

Tabla 1.8 Distribución de canales de los satélites del sistema ASTRA.

Canal	Polarización	Frecuencia	Canal	Polarización	Frecuencia
10.70-10.95 GHz (ASTRA 1D)			10.20-11.45 GHz (ASTRA 1A)		
49	H	10714.25	1	H	11214.25
50	V	10729.00	2	V	11229.00
51	H	10743.75	3	H	11243.75
52	V	10758.50	4	V	11258.50
53	H	10773.25	5	H	11273.25
54	V	10788.00	6	V	11288.00
55	H	10802.75	7	H	11302.75
56	V	10817.50	8	V	11317.50
57	H	10832.25	9	H	11332.25
58	V	10847.00	10	V	11347.00
59	H	10861.75	11	H	11361.75
60	V	10876.50	12	V	11376.50
61	H	10891.25	13	H	11391.25
62	V	10906.00	14	V	11406.00
63	H	10920.75	15	H	11420.75
64	V	10935.50	16	V	11435.50
10.95-11.20 GHz (ASTRA 1C)			11.45-11.70 GHz (ASTRA 1B)		
33	H	10964.25	17	H	11464.25
34	V	10979.00	18	V	11479.00
35	H	10993.75	19	H	11493.75
36	V	11008.50	20	V	11508.50
37	H	11023.25	21	H	11523.25
38	V	11038.00	22	V	11538.00
39	H	11052.75	23	H	11552.75
40	V	11067.50	24	V	11567.50
41	H	11082.25	25	H	11582.25
42	V	11097.00	26	V	11597.00
43	H	11111.75	27	H	11611.75
44	V	11126.50	28	V	11626.50
45	H	11141.25	29	H	11641.25
46	V	11156.00	30	V	11656.00
47	H	11170.75	31	H	11670.75
48	V	11185.50	32	V	11685.50

1.3.6 Televisión digital sobre la banda DBS

La transmisión de TV digital inició en el año de 1996 con ASTRA y EUTELSAT regresando al empleo de la banda DBS, la cual fue dividida en 40 canales de 33 MHz en polarización lineal empleando los mismos LNB que eran utilizados para la banda FSS.

Los canales DBS de ASTRA y EUTELSAT no son exactamente los mismos: EUTELSAT ha mantenido una separación entre canales de 19.18 MHz propuesto por la WARC 77, mientras que ASTRA seleccionó una separación de 19.5 MHz. Por otra parte, ASTRA 1G explota la parte superior de la banda FSS (12.5-12.75 GHz) con 16 canales de 26 MHz, similar a aquellos utilizados por ASTRA 1A a 1D, pero con una separación asimétrica entre ellos.

EUTELSAT en sus satélites HOT BIRD 4 y 5 divide la misma banda, 12.5 – 12.75 GHz, en 12 canales de 33 MHz, idénticos a aquellos usados en la banda DBS.

ASTRA a diferencia de los satélites HOT BIRDS de EUTELSAT actualmente no tienen una frontera definida entre los servicios analógicos y digitales, que coexisten, prácticamente en su totalidad, dentro de la banda Ku. De cualquier forma, los servicios digitales están desplazando rápidamente a los analógicos y pronto éstos ocuparán por completo la banda Ku en todos los satélites.

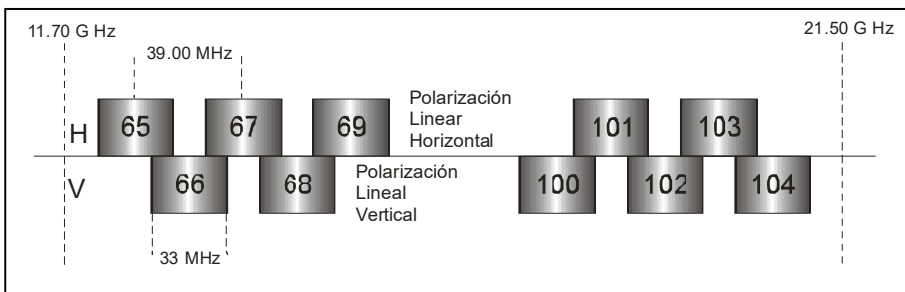


Figura 1.8 Configuración de canales en la banda DBS para los satélites ASTRA 1E, 1F y 2B.

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

Tabla 1.9 Distribución de canales para los satélites ASTRA en la banda DBS (11.7 – 12.75 GHz)

Canal	Polarización	Frecuencia	Canal	Polarización	Frecuencia
11.70-12.10 GHz (ASTRA 1E Y 2A)			12.10-12.50 GHz (ASTRA 1A)		
65	H	11719.50	85	H	12109.50
66	V	11739.00	86	V	12129.00
67	H	11758.50	87	H	12148.50
68	V	11778.00	88	V	12168.00
69	H	11797.50	89	H	12187.50
70	V	11817.00	90	V	12207.00
71	H	11836.50	91	H	12226.50
72	V	11856.00	92	V	12246.00
73	H	11875.50	93	H	12265.50
74	V	11895.00	94	V	12285.00
75	H	11914.50	95	H	12304.50
76	V	11934.00	96	V	12324.00
77	H	11953.50	97	H	12343.50
78	V	11973.00	98	V	12363.00
79	H	11992.50	99	H	12382.50
80	V	12012.00	100	V	12402.00
81	H	12031.50	101	H	12421.50
82	V	12051.00	102	V	12441.00
83	H	12070.50	103	H	12460.50
84	V	12090.00	104	V	12480.00
12.50-12.15 GHz (ASTRA 1G Y 2B)					
105	H	12515.25	113	H	12633.25
106	V	12522.00	114	V	12640.00
107	H	12544.75	115	H	12662.75
108	V	12551.50	116	V	12669.50
109	H	12574.25	117	H	12692.25
110	V	12581.00	118	V	12699.00
111	H	12603.75	119	H	12721.75
112	V	12610.50	120	V	12728.50

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

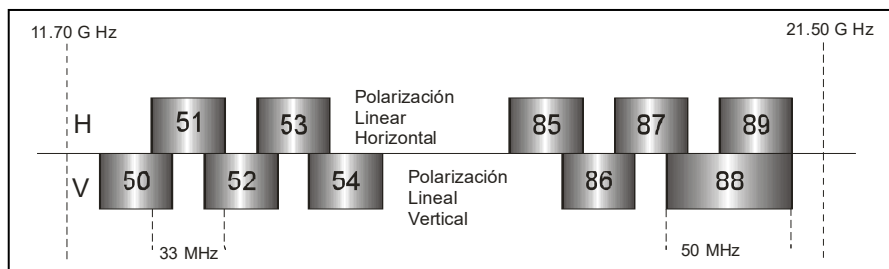


Figura 1.9. Configuración de canales en la banda DBS para el sistema EUTELSAT (satélites HOT BIRD 1 y 2).

Tabla 1.10 Distribución de canales para satélites del sistema EUTELSAT en la banda DBS (11.7 – 12.75 GHz)

Canal	Polarización	Frecuencia	Canal	Polarización	Frecuencia
11.70-12.10 GHz (HOT BIRD 2)			12.10-12.50 GHz (HOT BIRD 3)		
50	V	11727.48	70	V	12111.08
51	H	11746.66	71	H	12130.26
52	V	11765.84	72	V	12149.44
53	H	11785.02	73	H	12168.62
54	V	11804.20	74	V	12187.80
55	H	11823.38	75	H	12206.98
56	V	11842.56	76	V	12226.16
57	H	11861.74	77	H	12245.34
58	V	11880.92	78	V	12264.52
59	H	11900.10	79	H	12283.70
60	V	11919.28	80	V	12302.88
61	H	11938.46	81	H	12322.06
62	V	11957.64	82	V	12341.24
63	H	11976.82	83	H	12360.42
64	V	11996.00	84	V	12379.60
65	H	12015.18	85	H	12398.78
66	V	12034.36	86	V	12417.96
67	H	12053.54	87	H	12437.14
68	V	12072.72	88	V	12456.32
69	H	12091.90	89	H	12475.50
12.50-12.75 GHz (HOT BIRD 4 y 5)					
90	V	12519.84	96	V	12634.92
91	H	12539.02	97	H	12654.1
92	V	12558.2	98	V	12673.28
93	H	12577.38	99	H	12692.46
94	V	12596.56	100	V	12711.64
95	H	12615.74	101	H	12730.82

1.4 NORMATIVIDAD DE LA TELEVISIÓN DIGITAL EN MÉXICO

1.4.1 Marco regulatorio para servicios DBS en la región 2 incluyendo a México

El servicio de DBS se definió por primera vez en 1963, pero los parámetros de funcionamiento tales como frecuencias portadoras, posiciones orbitales, coberturas, etc. no se firmaron sino hasta la reunión de la World Administrative Radiocommunication Conference (WARC) en 1977 para los países pertenecientes a las regiones 1 (Europa, África, Mongolia y la antigua Unión Soviética) y 3 (Asia - salvo Mongolia y la URSS- y Australia). Para el caso de la región 2 (Continente Americano y Groelandia) en el año de 1983 la Regional Administrative Radiocommunication Conference (RARC) se aprobó el plan para el servicio de radiodifusión por satélite para los países americanos. En dicha conferencia se aprobaron las frecuencias y posiciones orbitales para cada uno de los países americanos.

Una de las decisiones más importantes tomadas en estas conferencias fue el acuerdo del espaciamiento orbital entre satélites, el cual debe ser de 9° ⁽²³⁾. El uso del espectro radioeléctrico para la región 2 fue establecido por la RARC 83 para utilizar la banda de frecuencias de 12.2 – 12.7 GHz en los enlaces de bajada y 17.3-17.8 GHz en los enlaces de subida y cada una de estas bandas fue dividida en 33 canales. En el caso europeo y las regiones 1 y 3, en la WARC 77 se dividió la banda de 11.7 a 12.5 GHz en 40 canales para los enlaces descendentes y de igual forma también fue dividida la banda 17.3 – 18.1 GHz para los enlaces ascendentes.

En lo que respecta al reuso de frecuencias la RARC planteó el uso de polarización circular derecha para los canales impares y polarización circular izquierda para los canales pares, donde cada canal tiene un ancho de banda de 24 MHz con una banda de guarda de 5 MHz entre canales adyacentes de la misma polarización.

23. C. Mead, Donald
Direct Broadcast Satellite Communications An MPEG Enabled Service
Prentice Hall
1ra Ed. Estados Unidos, 2000.
Pg. 21-22

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

Aunque hoy en día se ha optado por trabajar con polarización lineal, ya que se ha comprobado que resulta ser más efectiva que la polarización circular.

Tabla 1.11 Asignación mundial de frecuencias para servicios de DBS.

Enlace ascendente GHz	Enlace descendente GHz	Banda de Frecuencias	Región	Conferencia que lo estableció
17.3-17.8	12.2-12.7	Ku	2 (América)	RARC 83
17.3-18.1	11.7-12.5	Ku	1 y 3 (Europa Asia y Oceanía)	WARC 77

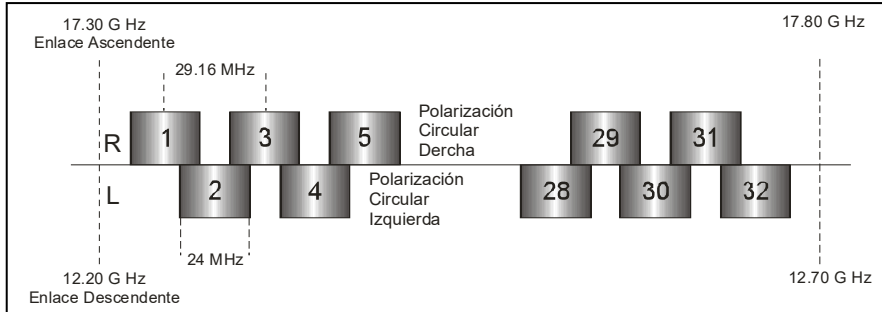


Figura 1.10 Atribución de canales por la RARC 83 para la región 2 en enlaces ascendentes y descendentes.

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

Tabla 1.12 Plan de Frecuencias para la región 2, incluyendo a México, planteado por la RARC 83.

Canal	Polarización	Frecuencia (Enlace de subida)	Frecuencia (Enlace de bajada)	Canal	Polarización	Frecuencia (Enlace de subida)	Frecuencia (Enlace de bajada)
1	R	17324.00	12224.00	17	R	17557.28	12457.28
2	L	17338.58	12238.58	18	L	17571.86	12471.86
3	R	17353.16	12253.16	19	R	17586.44	12486.44
4	L	17367.74	12267.74	20	L	17601.02	12501.02
5	R	17382.32	12282.32	21	R	17615.60	12515.60
6	L	17396.90	12296.90	22	L	17630.18	12530.18
7	R	17411.48	12311.48	23	R	17644.76	12544.76
8	L	17426.06	12326.06	24	L	17659.34	12559.34
9	R	17440.64	12340.64	25	R	17673.92	12573.92
10	L	17455.22	12355.22	26	L	17688.50	12588.50
11	R	17469.80	12369.80	27	R	17703.08	12603.08
12	L	17484.38	12384.38	28	L	17717.66	12617.66
13	R	17498.96	12398.96	29	R	17732.24	12632.24
14	L	17513.54	12413.54	30	L	17746.82	12646.82
15	R	17528.12	12428.12	31	R	17761.40	12661.40
16	L	17542.70	12442.70	32	L	17775.98	12675.98

En lo que respecta a las posiciones orbitales de las que dispone cada país, en la RARC 83 se acordó de la manera que se muestra en la tabla 1.13.

En la RARC 83 se estableció que los sistemas que se implementarán de acuerdo al plan serán fundamentalmente para cobertura nacional así; como también una Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (PIRE) de 57 dBW.

Durante la planificación del servicio de radiodifusión por satélite se tomó en cuenta tanto las características del receptor como las del satélite. También se consideró el efecto de atenuación por la lluvia (dicha atenuación es importante en la banda ku, especialmente en zonas tropicales donde las lluvias son abundantes y frecuentes).

Estos satélites de difusión directa se caracterizan por utilizar satélites de gran potencia, los cuales irradian señales que pueden ser recibidas por antenas de pequeño diámetro (menores de 1 m); estas antenas requieren una interfase, que convierte la señal del satélite (banda ku 12- 14 Ghz) a las frecuencias convencionales de los receptores de televisión (VHF-UHF). La gran potencia de la

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

señal en la tierra se logra mediante antenas altamente directivas ubicadas en el satélite, que producen haces puntuales, en muchos casos.

Tabla 1.13 Asignación de las posiciones orbitales en Latino América dada por la RARC 83.⁽²⁴⁾

País	Posiciones Orbitales °W	Número Total de Canales
Argentina	54.8, 5.2, 93.8, 94.2	88
Bolivia	87.2	
Brasil	44.8, 45.2, 63.8, 64.2, 73.8, 74.2, 80.8, 81.2, 101.8	400
Colombia	103.3	16
Chile	106.2, 105.8	64
Ecuador	94.8	32
México	69.2, 77.8, 78.2, 126.8, 127.2, 135.8, 136.2	112
Paraguay	99.2	16
Perú	85.8	16
Uruguay	71.7	16
Venezuela	103.8	16

El equipo receptor, o TVRO (Tele Vision Receive Only), está constituido por la antena parabólica, provista de una unidad externa (amplificador y conversor), conocida como LNB o LNC (Low Noise Block Converter), que es el encargado de reducir la frecuencia de las señales recibidas para que se pueda transmitir con bajas pérdidas por un cable coaxial, hasta la unidad interna (receptor y modulador); en esta unidad se realiza la adaptación de las señales SHF recibidas del satélite, a señales UHF compatibles con la toma de antena del televisor.

24. [RARC83] RARC, Proceedings of the 1983 Regional Administrative Radio Council, Geneva, Suiza

1.5 CONFIGURACIÓN DE LOS SISTEMAS DBS

1.5.1 Configuración de un sistema DBS

En la figura 1.11 se muestra un diagrama simplificado de un sistema de comunicaciones DBS. Este sistema es idéntico para cada uno de los transpondedores. Se puede observar que en el lado del transmisor son multiplexados 4 o 5 canales por cada transpondedor, ya que en cada canal de 6 MHz pueden quedar perfectamente contenidos éstos. Los canales pueden tener distinta procedencia, desde un video, una cámara, otra señal recibida en una antena, desde un cable, fibra óptica, etc.

A las señales de audio y video se les aplica una técnica de compresión para posteriormente añadir información adicional de codificación (Conditional Access), de modo que sólo los usuarios autorizados puedan hacer uso del servicio. Posteriormente, los distintos canales ya comprimidos y codificados son divididos en pequeños paquetes de información llamados PES (Packetized Elementary Streams), que son multiplexados por división de tiempo (TDM) en una sola señal digital para cada uno de los transpondedores. Otros tipos de datos pueden ser añadidos a la señal única que será enviada al transpondedor, como puede ser la guía de programación, mensajes de subtítulos e incluso mensajes de correo electrónico, entre otros.

Una vez que los distintos canales han sido multiplexados en una sola señal binaria, un código de detección de errores es añadido a ésta mediante una técnica llamada Forward Error Correction (FEC), con la finalidad de determinar en el receptor si la información ha sido dañada o ha tenido errores en la transmisión. La cadena binaria resultante es entonces modulada en cuadratura (QPSK), para ser posteriormente convertida a una frecuencia apropiada para la transmisión al satélite (entre 17.3 y 17.8 GHz para el caso de México y el resto de América), según lo planteado por los estándares definidos para cada región. Finalmente, la señal es amplificada con la potencia suficiente para llegar al satélite.

Normas actuales para la radiodifusión directa de TV digital por satélite

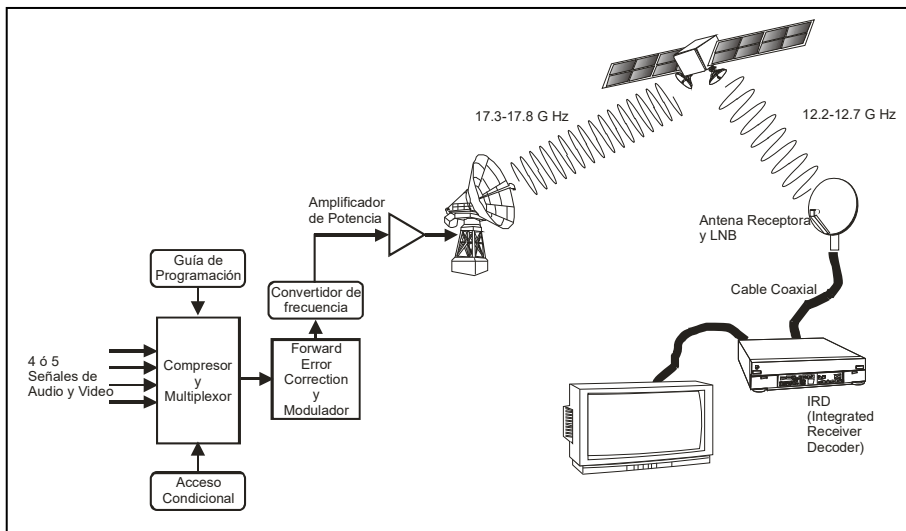


Figura 1.11 Configuración típica de un sistema DBS.

El transpondedor del satélite se encarga de hacer un cambio de frecuencia a la señal y amplificarla para posteriormente ser retransmitida a la tierra. Cabe hacer notar que la señal no es regenerada en el satélite, tan sólo es amplificada. La frecuencia con la que es retransmitida la señal está entre los 12.2 y 12.7 GHz para la región dos, que incluye a México y a América Latina.

En tierra, la señal es recibida por una antena reflectora de aproximadamente 60 cm de diámetro, ubicada en el domicilio del usuario, y nuevamente es cambiada en frecuencia por el LNB (Low Noise Block Converter también llamado LNC) a la banda L (950 – 1450 MHz para que ésta pueda ser interpretada incluso por los televisores convencionales) y reamplificada para ser guiada por un cable coaxial hasta el IRD (Integrated Receiver Decoder), que es el dispositivo encargado de decodificar, descomprimir y desmultiplexar la señal recibida.

Cabe hacer mención de que el usuario final recibe a través de su antena receptora las señales provenientes de todos los transpondedores, que para el caso de la Región 2 son 33, por lo que el usuario puede recibir hasta 165 canales de video y audio digital.

CAPITULO II

COMPRESIÓN, CODIFICACIÓN, MULTIPLEXAJE Y MODULACIÓN DE CANALES DE TV DIGITAL

2.1 COMPRESIÓN DE VIDEO

Una gran cantidad de estudios han mostrado que para que un sistema DBS sea redituable se requiere que cada transpondedor del satélite sea capaz de manejar de cuatro a ocho canales de televisión. Si la tasa de transferencia es de 30 Mbps, la tasa total de transferencia (video, audio y datos) debe ser de 3.75 a 7.5 Mbps por cada programa(en promedio). El audio y los datos requieren aproximadamente de 0.2 Mbps por servicio. De esta forma, el video deberá estar entre 3.55 Mbps y 7.3 Mbps. Comparando esta tasa de transferencia con la tasa que se requeriría para la transmisión de video sin compresión, que sería de 249 Mbps, es claro que el video requiere ser comprimido en un orden de 34 a 70 con relación a la señal original ⁽¹⁾.

En 1988, la Organización Internacional de Estándares (ISO) de la UIT estableció el MPEG (Moving Pictures Experts Group) como el estándar internacional para la compresión de video, graficas y materiales de texto⁽²⁾. El objetivo era conseguir un estándar que diera herramientas relativamente simples, baratas y flexibles, las cuales asignaban las tareas más difíciles al transmisor, dejando al receptor las tareas más simples. Más de 50 empresas y organizaciones gubernamentales alrededor del mundo forman parte del comité de deliberación del MPEG.

En 1991, el estándar MPEG-1 fue introducido para manejar la compresión digital de información multimedia que no fuese video con una tasa de transferencia de 1.5 Mbps o menos. De cualquier forma, MPEG-1 puede ser adaptada para la transmisión de señales de video tan pronto como la información de video ha sido convertida de su formato analógico original a formato binario. El estándar MPEG-1 es comúnmente encontrado en computadoras IBM y otras plataformas compatibles con la peculiaridad de mostrar archivos usando la extensión *.mpg. Varios proveedores de TV inicialmente

-
1. C. Mead, Donald
Direct Broadcast Satellite Communications An MPEG Enabled Service
Prentice Hall
1ra Ed. Estados Unidos, 2000. Pg 29
 2. E. Long, Mark
The Digital Satellite TV Handbook
Newnes
1ra Ed. Gran Bretaña, 1999. Pg. 21

eligieron el uso de una forma modificada de la compresión MPEG-1, llamada MPEG-1.5, para la transmisión de video por satélite, el cual utilizaron mientras que el comité MPEG planteaba un estándar para TV con líneas entrelazadas. Aunque el MPEG-1.5 nunca fue un estándar oficial, éste fue adoptado para varias aplicaciones, incluyendo la transmisión de TV educativa.

El comité MPEG finalmente eligió un estándar en 1994 que resolvía muchos de los problemas que presentaba el MPEG-1.5 ⁽³⁾. El estándar de compresión MPEG-2 provee alta resolución, escalabilidad y la habilidad de procesar video de líneas entrelazadas. MPEG-2 también se caracteriza por el transporte de cadenas que permiten varios canales de video, audio y datos que pueden ser multiplexadas en una sola cadena binaria.

Todos los estándares MPEG son en principio genéricos; esto quiere decir que estas técnicas de compresión tienen una gran variedad de aplicaciones. El estándar de video MPEG 2 lista un gran número de posibles aplicaciones, incluyendo DBS.

2.1.1 Principios del video digital

El video digital es una secuencia de tramas que representan valores de color y de luminancia de muestras tomadas de una imagen analógica dividida en pequeñas partes llamadas elementos de la imagen o píxeles.

Para producir una imagen a color, se requieren tres colores básicos: Rojo, Verde y Azul (RGB: Red, Green, Blue). Empleando la proporción adecuada de cada uno de estos colores es posible reproducir cada color deseado.

De adoptarse tal procedimiento, la primera dificultad que presentaría sería la ocupación de las bandas de frecuencia de tres estaciones emisoras para una sola emisión. Esta dificultad ha podido ser soslayada con una serie de sorprendentes simplificaciones técnicas.

3. E. Long, Mark
The Digital Satellite TV Handbook
Newnes
1ra Ed. Gran Bretaña, 1999. Pg. 21

En primer lugar, la experiencia muestra que el ojo no distingue el color en los detalles muy pequeños, y así, una hoja aislada en una rama de árbol vista a cierta distancia carece aparentemente de color.

Por consiguiente, es inútil transmitir tres veces la parte de la señal de video concerniente a los pequeños detalles. Con dicho fin, de la información R (rojo), B (azul) y G (verde) captada por la cámara se extrae una señal de luminancia R+B+G que contendrá todos los detalles de la imagen del objeto, pero que será modulada exclusivamente en función de la luminosidad de los puntos y no de su color. En realidad, sólo se transmiten dos de las tres señales de crominancia: R y B. El televisor dispone de unos circuitos que suman el valor de ambas y la restan del valor de R+G+B de la señal de luminancia. Restituyendo así la señal G del tercer color.

De esta forma todos los algoritmos de compresión realizan un preprocesamiento de la señal de color para crear la señal componente de luminancia (Y) y las dos componentes de crominancia (Cr y Cb).

La señal de luminancia contiene sólo variaciones de brillo de la información de la imagen, incluyendo los detalles finos, lo mismo que en una señal monocromática. La señal de luminancia desplegada por sí sola en una pantalla es una señal de video en blanco y negro. La señal de luminancia o Y se forma combinando 30% de la señal de video roja (R), 59% de la señal de video verde (G) y 11% de la señal de video azul (B), y su expresión es:

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

De igual forma, las señales de crominancia son creadas empleando un porcentaje de las señales RGB. En resumen, estas señales pueden ser obtenidas cada una según lo indica la siguiente matriz⁽⁴⁾:

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cr \\ Cb \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} .299 & .587 & .144 \\ -.169 & -.331 & .500 \\ .500 & -.419 & -.081 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

4. **YCC colour space and image compression.**
<http://astronomy.swin.edu.au/~pbourke/colour/ycc/>

En contraparte, el decodificador de salida realiza una conversión de las señales de crominancia y luminancia a las señales RGB, donde cada una de ellas es obtenida de la siguiente matriz, la cual indica la proporción de luminancia y crominancia:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1.404 \\ 1 & -.3434 & -.712 \\ 1 & 1.773 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Y \\ Cr \\ Cb \end{bmatrix}$$

2.1.2 Entrelazado

En los años 1930's, cuando la TV comenzó a ser implementada, el tubo de rayos catódicos era la única alternativa para aparatos de TV y podía desplegar hasta 30 imágenes por segundo. La frecuencia era demasiado baja y se podía percibir el cambio entre cuadros; el parpadeo de la imagen era inaceptable. Para resolver este problema se creó el concepto de entrelazado.

Para ello, las líneas de las tramas se dividen en 2 campos (2 semi-imágenes) que se entrelazan y transmiten en forma consecutiva. Cada campo contiene L/2 líneas. Así, las líneas 1,3,5,... pertenecen al primer campo y las líneas 2,4,6,... pertenecen al segundo campo.

De esta forma es posible transmitir un campo en la mitad de tiempo de lo que se transmitía un cuadro completo sin entrelazado. Esto hace posible desplegar de 60 a 72 campos por segundo, lo que elimina el efecto de parpadeo ⁽⁵⁾.

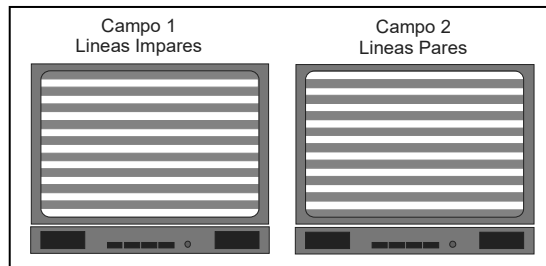


Figura 2.1 Campos que conforman el entrelazado, cada uno de los cuales se puede transmitir en la mitad del tiempo que tomaría transmitir un cuadro completo.

5. **Estándares Internacionales de Televisión y HDTV/DTV**
<http://www.cybercollege.com/span/typ009.htm>

2.1.3 Los formatos 4:2:2 Y 4:2:0

La recomendación CCIR-601 define los parámetros de digitalización para señales de video con componentes de luminancia y crominancia (Y, Cb y Cr) para el formato 4:2:2 (4 muestras de Y, 2 muestras de Cr y dos muestras de Cb) en una cuantificación de 8bits⁽⁶⁾.

La frecuencia de muestreo es de 13.5 MHz para luminancia y 6.75 MHz para crominancia, independientemente del estándar de la señal de entrada. Esto da como resultado 720 muestras activas de video por línea para luminancia, y 360 muestras por línea para crominancia. La resolución de la crominancia es la mitad que en el caso de la luminancia en dirección horizontal, pero son idénticos en dirección vertical⁽⁶⁾.

Esto da como resultado una tasa de transferencia de 216 Mbps. Si consideramos que es inútil digitalizar la línea y el período de supresión del campo, entonces la digitalización de la parte útil del video requiere sólo 166 Mbps.

La recomendación CCIR-656 define estándares para las señales en formato 4:2:2. Estas señales son multiplexadas en tiempo formando una palabra de 8 bits de acuerdo a la recomendación CCIR-601, la cual indica que se han de multiplexar las señales de luminancia y crominancia junto con un reloj de 27 MHz (un periodo de reloj por muestra de luminancia o crominancia)⁽⁶⁾.

Para el caso del formato 4:2:0, éste se ocupa para aplicaciones que no demandan tanta resolución: Su objetivo es minimizar los requerimientos de tasa de transmisión tanto como sea posible. El formato 4:2:0 ha sido seleccionado para la televisión digital comercial; es obtenida del estándar 4:2:2 usando la misma crominancia para iluminar dos líneas contiguas, logrando reducir la tasa de transmisión hasta 133 Mbps aproximadamente y minimiza además los requerimientos de memoria en los circuitos de procesamiento de la señal. El resultado es una imagen con resolución de crominancia igual a la mitad de la resolución de luminancia en la dirección horizontal y vertical.

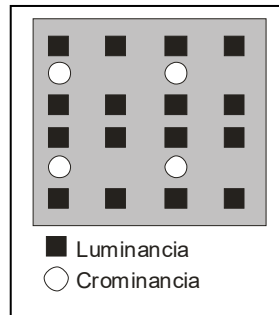


Figura 2.2 Posición de las muestras de luminancia y crominancia en el formato 4:2:0

Este formato es la base de la compresión MPEG-2 también conocida como MP@ML. El formato SIF (Source Intermediate Format), el cual tiene la mitad de la resolución en ambas direcciones comparada con 4:2:0, es usado como base para la compresión MPEG-1 ⁽⁷⁾.

No obstante que se ha reducido ya considerablemente la tasa de transferencia requerida para los canales de TV digital aún existen algunos problemas, el formato 4:2:0 requiere más de 100 Mbps, lo cual requeriría un ancho de banda varias veces mayor que el que se utiliza en la televisión convencional con los sistemas PAL o SCAM. Es por ello que el formato 4:2:0 no puede ser usado directamente para la radiodifusión, de esta forma, que para lograr proveer servicios de televisión digital por radiodifusión se requería primero dar solución a una serie de problemas que pueden ser clasificados en dos categorías.

1. Codificación de Fuente: Es necesario lograr una codificación eficiente de las señales de audio y video para lograr reducir tanto como sea posible la tasa de transmisión requerida sin provocar graves daños a las señales de audio y video.

-
6. H. Benoit
Satellite Television: Techniques of Analogue and Digital Television.
Ed. Arnold
1ra Ed. Londres 1999. Pg 57-62.
 7. **International Journal Of Satellite Communications**
Jhon Wilwy & Sons
Digital video broadcasting over satellite (DVB-S): a system for broadcasting and contribution applications.
2000, Pg. 397

Compresión, codificación, multiplexaje y modulación de canales de tv digital

2. Codificación de Canal: Se requieren de poderosos algoritmos de corrección de errores para resguardar la información, lo cual también implica el uso de técnicas de modulación altamente eficientes que reduzcan al máximo la probabilidad de error durante la transmisión de una señal de TV.

En la actualidad los resultados han superado los objetivos inicialmente planteados. Hoy en día es posible transmitir varios programas de TV digital (de seis a ocho canales, o más) en un solo canal de radio frecuencias; todo esto se ha logrado gracias al trabajo del grupo DVB que, en busca de obtener un estándar Europeo, consiguieron grandes logros en las tecnologías empleadas para TV digital. Este grupo escogió el estándar MPEG-2 como la base para la codificación de fuente y multiplexación de señales, y ha definido los principales estándares para la codificación de canal para los tres principales medios de radiodifusión (satélite, cable y terrestre).

En la figura 2.3 se muestra la secuencia de operaciones que se requieren en el lado del transmisor para lograr la transmisión de varios canales televisivos sobre una sola señal de radiofrecuencias.

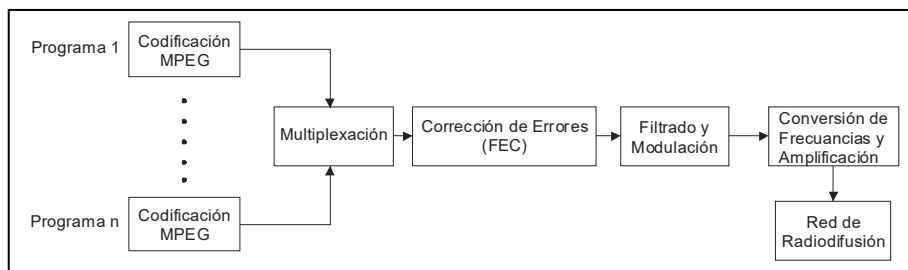


Figura 2.3 Secuencia de las principales operaciones que se realizan en el lado del transmisor

2.1.4 Técnica de compresión MPEG-2

La técnica de compresión MPEG-2 es el resultado de usar cuatro técnicas básicas conjuntas: preprocesamiento, predicción temporal, compensación de movimiento y codificación por cuantificación. El preprocesamiento filtra la información visual que carece de importancia para la señal de video, información que es difícil de codificar y

que la visión humana no percibe. El preprocesamiento generalmente hace uso de una combinación de filtros no lineales.

La compensación de movimiento toma algunas ventajas del hecho de que las secuencias de video son fácilmente correlacionadas en tiempo, esto es, cada trama en una secuencia dada es muy similar a las secuencias pasadas y futuras por lo que resulta más fácil codificar y comprimir la diferencia entre tramas, en vez de hacerlo con cada trama completa en forma aislada. Más aún, muchos de los cambios que ocurren entre una y otra trama pueden ser aproximadas trasladando pequeñas regiones de la imagen de video previa. Para lograr esto, un codificador hace un barrido de pequeñas secciones dentro de cada trama (llamada macrobloque) e identifica cuales de ellas no cambian de posición de una trama a otra.

El codificador también hace una predicción de macrobloques para esas porciones de la escena que se encuentran en movimiento previendo su dirección y velocidad de movimiento. Sólo la relativamente pequeña diferencia entre bloques, llamada compensación residual de movimiento, es subsecuentemente transmitida al receptor / decodificador integrado IRD. El IRD acumula la información que no cambia de una trama a otra dentro de un buffer de memoria. El IRD accesa a los macrobloques estáticos del buffer de memoria y entonces usa la información de compensación residual de movimiento para llenar los espacios en blanco (vease la figura 2.4).

La principal desventaja del uso de la compensación residual de movimiento es que cambios bruscos de movimiento pueden ocurrir en cualquier momento, incluso cuando la cantidad de bits disponibles es insuficiente para describir detalladamente o rápidamente el cambio de escenas. Esto es más apreciable cuando se observa una transmisión en vivo. La única solución en estos casos es aumentar la tasa de transmisión asignada al servicio.

Un algoritmo matemático llamado Transformada Cosenoidal Discreta (DCT) reorganiza la diferencia residual entre tramas en el dominio del espacio en series equivalentes de coeficientes en el dominio de la frecuencia, los cuales pueden ser más fácilmente transmitidos ⁽⁸⁾. La DCT es una fórmula trigonométrica derivada de la Teoría del

Análisis de Fourier que minimiza dramáticamente la duplicación de datos en cada imagen. En el dominio de la frecuencia, los elementos de imagen más importantes son representados por altas frecuencias en la esquina superior izquierda mientras que los elementos menos importantes son representados por bajas frecuencias en la parte baja y derecha del bloque.

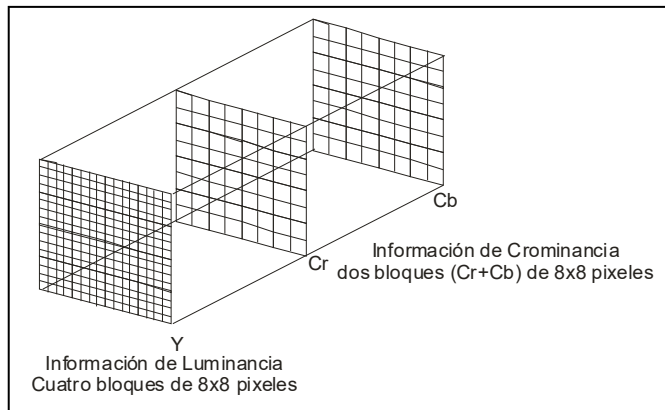


Figura 2.4 Un macrobloque en formato 4:2:0 consta de un bloque conformado por cuatro subbloques de 8x8 píxeles, cada uno portando la información de luminancia, y dos bloques de 8x8 que portan la información de crominancia.

La codificación por cuantificación convierte los resultados de coeficientes obtenidos en números definidos que son más representativos y compactos. Estos se obtienen redondeando o escalando todos los valores de los coeficientes; de esta forma a todos los coeficientes que se encuentren en un rango determinado se les puede asignar el mismo valor. Por ejemplo, el proceso de cuantificación elimina en cada bloque aquellas frecuencias para las cuales el ojo humano es menos sensitivo. Aunque de este proceso de escalamiento resulta una aproximación de la señal original, es lo suficientemente parecida a la original para que el ojo humano no lo perciba.

-
8. E. Long, Mark
The Digital Satellite TV Handbook
Newnes
1ra Ed. Gran Bretaña, 1999. Pg. 21

los 64 coeficientes de frecuencia obtenidos, el barrido para posicionarlos se hace en forma de zig-zag partiendo de la esquina superior izquierda hacia la esquina superior derecha (como se muestra en la figura). Este resultado hace posible que las frecuencias menos importantes sean representadas por ceros, y haciendo uso de la compresión espacial es posible codificar el número de cadenas de ceros que existen en un renglón en vez de codificar cada cadena por si misma. Así no es necesario enviar todas las cadenas completas sino sólo indicadores de donde se localizan las cadenas de ceros; de esta forma se logra una reducción en la cantidad de información a transmitir.

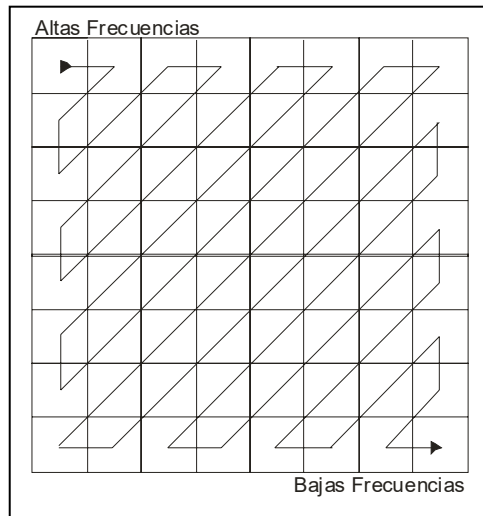


Figura 2.5 Los coeficientes de DC son barridos en forma de zigzag.

El codificador también posee una referencia de códigos que se conforma de una biblioteca de códigos representativos en la que a los coeficientes de frecuencia que tienen una mayor probabilidad se le asigna el código más simple o corto, y a aquellos coeficientes que son menos recurrentes se les asigna un código o palabra más larga, de tal forma que el codificador puede elegir el código más apropiado para cada uno de los coeficientes. A este proceso de cuantificación se le conoce como *codificación de longitud variable*.

Una imagen que ha de ser codificada en formato 4:2:0 es dividida en bloques de 8x8 píxeles. El estándar MPEG-2 es aplicable a distintos sistemas y para el caso de el sistema PAL se plantea una imagen de 720 píxeles de ancho por 576 píxeles de alto en una relación de aspecto de 5:4, de tal forma que la imagen completa queda dividida en 90 bloques a lo ancho por 72 bloques de altura ⁽⁹⁾.

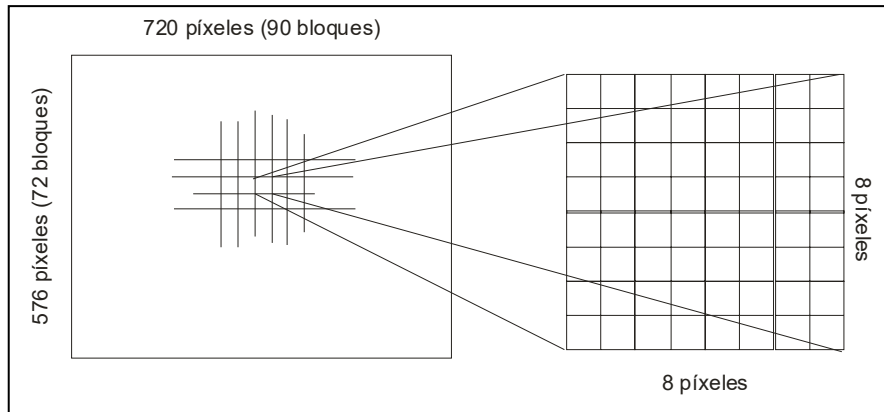


Figura 2.6 Formación de los grupos a partir de los píxeles que conforman una pantalla.

2.1.5 Tramas I, P Y B

El estándar MPEG-2 emplea la predicción temporal para minimizar la duplicación de datos contenidos dentro de un grupo de imágenes. En una secuencia de movimiento, un objeto que se mueve aparece en cuadros subsecuentes con una dirección de movimiento aparente, esto es, el objeto aparece en cuadros subsecuentes pero en distintas posiciones dentro de cada cuadro, de tal forma que no es obvia la correlación entre estas dos zonas subsecuentes. La predicción de movimiento o predicción temporal consiste en encontrar un vector que describa el movimiento del objeto y que garantice la correlación entre dos zonas definidas de cuadros subsecuentes. Esto se logra tomando un macrobloque en la imagen actual y comparándola con todos los

9. E. Long, Mark
The Digital Satellite TV Handbook
Newnes
1ra Ed. Gran Bretaña, 1999. Pg. 24

macrobloques del cuadro anterior hasta encontrar aquél con el que la correlación indique que se tiene mayor parecido. La diferencia de posiciones entre estos dos macrobloques proporciona el vector de movimiento, el cual puede ser aplicado a las tres componentes que conforman la señal de video (Y, Cb, Cr). Sólo los macrobloques que difieren de las imágenes calculadas por la predicción necesitarán ser codificados; esto reducirá sustancialmente la cantidad de información.

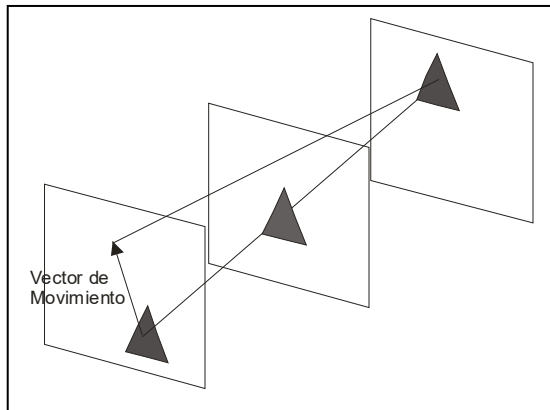


Figura 2.7 Obtención del vector de movimiento.

De esta manera, en un grupo de imágenes que tengan objetos en común puede ser eliminada la información redundante y en vez de ello transmitir sólo la información que difiere de uno a otro cuadro junto con el vector de movimiento. A este conjunto de imágenes se le conoce como GOP (Group of pictures); empleando esta técnica la información necesaria para reconstruir la imagen se reduce sustancialmente.

Para concluir con esto, en un grupo de imágenes (GOP) se emplean tres tipos de tramas, las cuales se llaman I, P y B. Las tramas que no requieren información de ninguna otra trama previa o posterior es conocida como Intra trama o trama I, las tramas que son predichas por una trama anterior se conocen como tramas P, y las tramas que son predichas por tramas anteriores y posteriores son conocidas como tramas B. En la figura 2.9 se ilustra la estructura típica de un GOP.

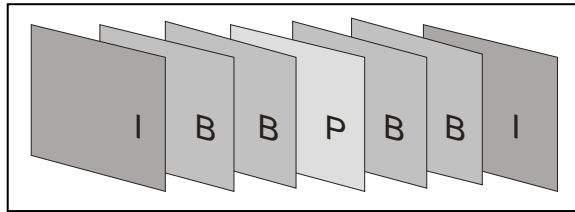


Figura 2.9 Estructura típica de un grupo de imágenes empleando las tramas I, B y P.

Las razones por las que se requiere de estos tres tipos de tramas se explican a continuación. Para lograr la máxima compresión en una señal de video, la redundancia debe ser eliminada en todos los ejes, dos espaciales y una temporal (vertical, horizontal y en el eje del tiempo). Las tramas P y B son usadas para asegurar la compresión temporal. La trama I sirve como referencia para hacer predicciones en tramas subsecuentes, la trama I puede ayudar para hacer predicciones en las 10 o 15 tramas siguientes; es por ello que son esenciales para lograr la continuidad en un programa. La inserción regular de esta trama es controlada por el codificador.

Las tramas P son predecidas de la información proporcionada por la trama I o P más cercana empleando la técnica de predicción de movimiento; esta trama contiene sólo la información que ha cambiado de la trama P o I antecesora, información que fue almacenada en una memoria de almacenamiento dentro del codificador.

Las tramas bidireccionales B, son codificadas usando la preedición de datos a partir de las tramas I o P más cercanas y también de la siguiente trama I o P más cercana⁽¹⁰⁾. El codificador selecciona el número de tramas B que ha de insertar entre un par de tramas de referencia I o P a modo de seleccionar la secuencia más eficiente. Aunque el uso de las tramas B hace mucho más eficiente el nivel de compresión en una señal de video, también tiene la desventaja de requerir memorias de almacenamiento en el receptor, lo cual incrementa el costo del decodificador.

10. Roddy, Dennis
Satellite Communications Systems
McGraw-Hill
7ma Ed. Estados Unidos, 2001. Pg. 468-469.

Se requieren dos parámetros, M y N, para describir la sucesión de tramas I, P y B. M es la distancia en número de tramas entre dos tramas P sucesivas y N es la distancia entre dos tramas I subsecuentes. Al momento de desplegar las imágenes en pantalla, comúnmente $M=3$ y $N=12$. Obviamente la secuencia en que se reproducen las tramas es la misma que en la secuencia original. No obstante, con la finalidad de codificar o decodificar las tramas B (bidireccionales) que hacen uso de las tramas futuras, se hace necesario cambiar el orden de las tramas antes de codificar y una vez hecha la codificación se realiza su transmisión; el receptor es el encargado de reordenar las tramas para conseguir reproducir la imagen ⁽¹¹⁾.

La compresión MPEG hace una innovación al hacer uso de lo que se llama *Slice* (Porción). Un Slice está conformado por un conjunto de macrobloques. Sabemos que cada macrobloque es una matriz de 16x16 píxeles; de esta forma un Slice es un renglón de macrobloques, por ejemplo, en el sistema PAL, que tiene una resolución de pantalla de 576 píxeles de alto por 720 píxeles de ancho, se pueden crear 45 macrobloques a lo ancho y 36 macrobloques a lo alto. Un Slice está conformado entonces de 45 macrobloques, es decir un "bloque" de 720 píxeles de ancho por 16 píxeles de alto. De esta forma una imagen completa en el sistema PAL puede ser dividida en 36 Slices ⁽¹²⁾.

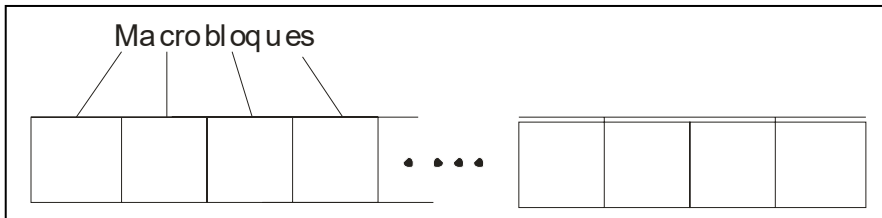


Figura 2.10 Un Slice es un renglón de macrobloques.

-
11. H. Benoit
Satellite Television: Techniques of Analogue and Digital Television.
Ed. Arnold
1ra Ed. Londres 1999. Pg 57-62.
 12. E. Long, Mark
The Digital Satellite TV Handbook
Newnes
1ra Ed. Gran Bretaña, 1999. Pg. 24-26

Compresión, codificación, multiplexaje y modulación de canales de tv digital

Para obtener mejores resultados, las imágenes entrelazadas serán procesadas en formas diferentes dependiendo de la importancia de los movimientos entre los dos campos que conforman una imagen. Los dos casos extremos son: Por una parte, imágenes obtenidas de filmes de cine, donde ambos campos son obtenidos del mismo cuadro de imagen, y por otra parte, imágenes de eventos en vivo o deportivos donde la diferencia de movimiento entre un campo y otro puede ser importante.

Para la codificación de imágenes entrelazadas, el estándar MPEG-2 permite elegir entre dos estructuras de imagen llamadas de *Campo* y de *Trama*.

- Estructura de Trama: También llamada progresiva, es más conveniente en los casos en que la diferencia de movimiento entre dos campos sucesivos es pequeña. Los Slice's de los Macrobloques y los bloques son entonces separados en tramas completas.
- Estructura de Campo: También llamada de entrelazado, es preferente cuando la diferencia entre campos sucesivos es importante; en este caso los Slice's que conforman los macrobloques son separados en un campo independiente que se puede considerar como una imagen independiente.

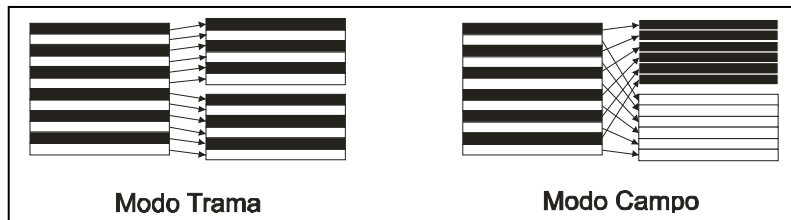


Figura 2.11 Estructuras de imagen en modo trama y modo campo.

En la figura 2.12 se muestra detalladamente cómo está conformada una trama completa en formato MPEG-2 para la compresión de video.

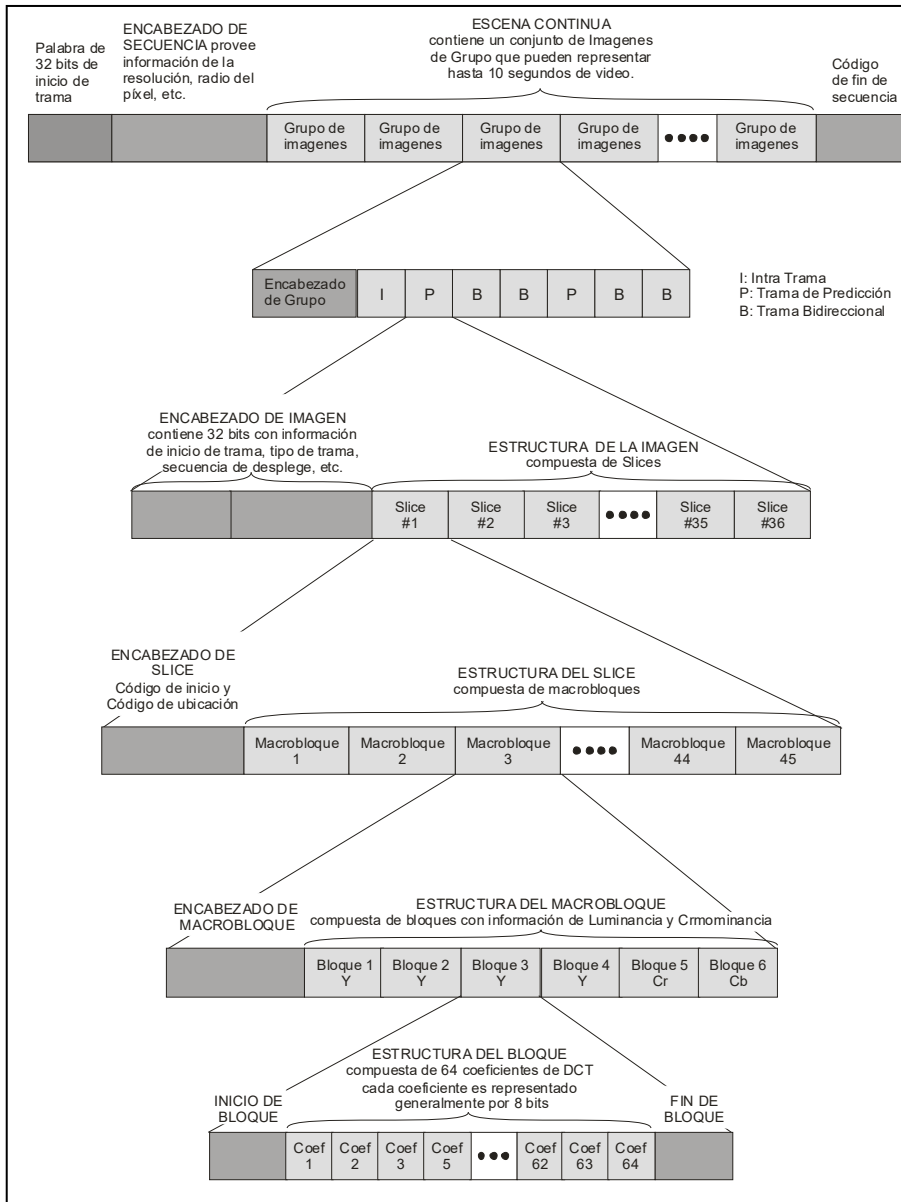


Figura 2.12 Estructura de una Trama completa para reproducir una escena con el estándar MPEG-2.

2.1.6 Perfiles, Niveles y Capas en MPEG-2

La codificación en MPEG-2 comprime el video y el audio en paquetes. El resultado es una secuencia de longitud variable de paquetes que son multiplexados en cadenas elementales llamadas PES (packetized elementary stream). El codificador utiliza un campo de tiempo llamado reloj de referencia del programa (PCR, Program Clock Reference) para sincronizar las cadenas de paquetes de audio y video. El proveedor tiene dos opciones para enviar el PCR, ya sea por separado de las cadenas elementales ó como parte de la misma PES que transporta la información del programa.

El codificador MPEG-2 multiplexa numerosas PES individuales, de tal forma que se crea una sola cadena unificada para ser transportada en la que se adiciona además información de texto e información adicional del sistema. Esta cadena unificada de transporte, que consiste de una longitud fija de paquetes de 188 bytes cada uno, puede contener un gran número de programas, que son independientes entre si. Cada cadena incluye un encabezado al inicio con información para la identificación de la cadena.

El estándar de compresión MPEG-2 es en la actualidad una familia de sistemas, cada uno de los cuales ha sufrido algunas modificaciones para lograr la compatibilidad entre los sistemas. El estándar MPEG-2 soporta cuatro distintos niveles: Alto, Alto-1440, Principal y Bajo. El diseño para cada nivel soporta una gran variedad de arreglo de píxeles según se muestra a continuación:

- Nivel Bajo: Corresponde a lo que se llama resolución SIF usada en MPEG-1 y cuenta con una resolución de 360 x 288 píxeles.
- Nivel Principal: Corresponde a los estándares de TV 4:2:0 con una resolución de 720 x 576 píxeles.
- Nivel Alto-1440: Puede soportar Televisión de Alta Definición HDTV con una resolución de 1440x1152 píxeles.
- Nivel Alto: Es optimizado para Televisión de Avanzada Definición ADTV con una resolución de 1920 x 1152 píxeles ⁽¹³⁾.

MPEG-2 también define cinco Perfiles: Simple, Principal, Escalable en SNR, Escalable en Espacio y Alto, los cuales determinan la resolución de la imagen. Cada Perfil consiste de un conjunto de herramientas de compresión que permiten lograr características específicas en las imágenes de video.

- Perfil Simple: Fue definido con la idea de simplificar la estructura del codificador y el decodificador, minimizando también los costos y la tasa de transferencia requerida. Para ello elimina la Trama B de predicción Bidireccional.
- Perfil Principal: Actualmente es el perfil que mejor equilibra el nivel de compresión y los costos de los codificadores. Este perfil usa las tres tramas de imagen (I, P y B), no obstante los codificadores son más costosos que los usados en Perfil Simple.
- Perfiles Escalables (jerarquía de código): Pretenden ser más utilizados en el futuro. Por el momento permiten transmitir un programa con los mismos estándares de resolución PAL y alta definición HD o, alternativamente, proveer una de calidad imagen básica en los casos en que las condiciones de recepción son malas y una calidad muy alta para buenas condiciones de recepción. Cabe mencionar que el estándar DVB no soporta ninguno de los perfiles escalables (Espacial o SNR).
- Perfil Alto: Está planteado para TV de Alta Definición (HDTV) con aplicaciones de radiodifusión en formatos 4:2:0 y 4:2:2.

El hecho de que el estándar MPEG-2 pueda manejar distintos perfiles y estándares permite que pueda ser utilizado en distintas aplicaciones, incluyendo DBS, ya que según la combinación de Perfil y Nivel que se use se pueden obtener características específicas en los requerimientos de tasa de transmisión y calidad de imagen.

13. E. Long, Mark
The Digital Satellite TV Handbook
Newnes
1ra Ed. Gran Bretaña, 1999. Pg. 24

Compresión, codificación, multiplexaje y modulación de canales de tv digital

Por ejemplo, el Perfil Principal puede usar 720 píxeles por línea empleando el Nivel Principal con una tasa de transferencia de 15 Mbps , o también puede utilizar 1920 píxeles por línea con el Nivel Alto y una tasa de transferencia de 80 Mbps. La mayoría de las radiodifusiones de TV con 526 y 625 líneas utilizan el Perfil Principal con el Nivel Principal en lo que llaman MP@ML (Main Profile, Main Level), mientras que las señales de HDTV o ADTV utilizarán el Perfil Alto y el Nivel Alto o Alto-1440.⁽¹⁴⁾

En la figura 2.13 se ilustran las características, en cuanto a tasa de transmisión se refiere, que se obtienen con el uso de cada perfil con cada nivel.

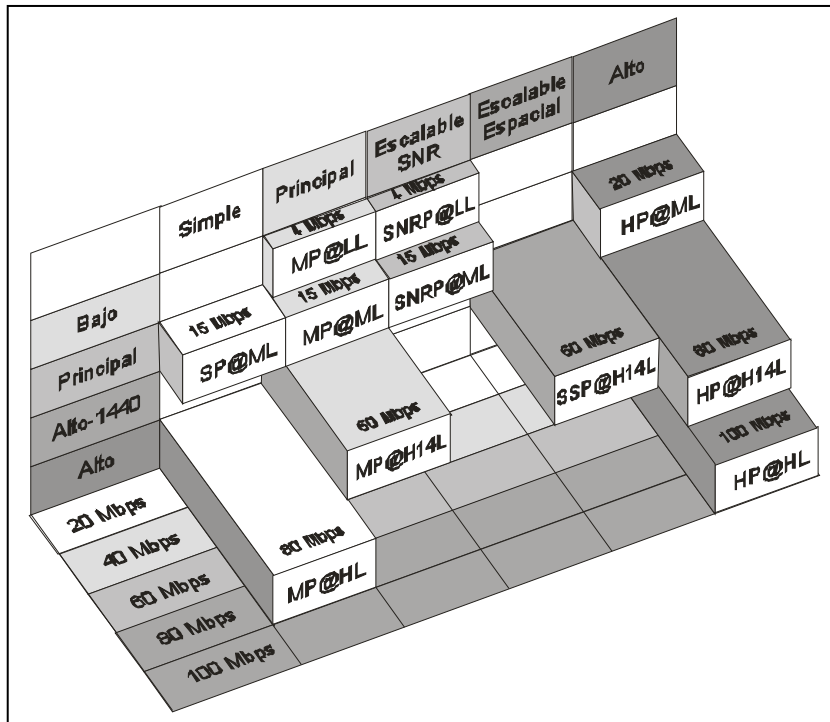


Figura 2.13 Perfiles y niveles del estándar MPEG-2 ⁽¹⁵⁾

14. H. Benoit
Satellite Television: Techniques of Analogue and Digital Television.
Ed. Arnold
1ra Ed. Londres 1999. Pg 93.
15. DVB Project Office 1995
Going Ahead Digital Television

Compresión, codificación, multiplexaje y modulación de canales de tv digital

Todos los Niveles excepto el Bajo, soportan dos Capas de resolución de espacio de pantalla, llamadas Capa Básica y Capa Mejorada. Esto hace al estándar MPEG-2 más versátil y flexible. Una sola cadena MPEG-2 puede llevar simultáneamente información para reproducir video, tanto en TV estándar como en HDTV o ADTV, en forma muy económica. Esto se logra usando la Capa Básica de baja resolución para llevar la señal estándar de TV, y al mismo tiempo utilizar una o más Capas Mejoradas para llevar la información adicional necesaria para producir imágenes de TV de alta definición. Las Capas Básica y Mejoradas juntas llevan toda la información necesaria para reproducir imágenes HDTV. La TV estándar recibe la información que requiere únicamente de la Capa Base e ignora la información de la Capa Mejorada.

La resolución de una pantalla también puede ser clasificada en base a la tasa de transferencia de las tramas que pueden ser de 25 o 30 Hz según el estándar del país. No obstante, es posible generar tramas con el estándar MPEG-2 que cumplan con ambos requerimientos. En la tabla 2.1 se muestran las Capas soportadas por cada combinación de Niveles y Perfiles.

Tabla 2.1 Perfiles, Niveles y Capas del estándar MPEG-2

		Perfiles			
		PRINCIPAL	SNR	ESPACIAL	ALTA
ALTA	Mejorada	1920x1151x25			1920x1151x25
	Básica	1920x1080x30			1920x1080x30
ALTA-1440	Mejorada	1440x1152x25		1440x1152x25	1440x1152x25
	Básica	1440x1080x30		1440x1080x30	1440x1080x30
PRINCIPAL	Mejorada	720x576x25	720x576x25	720x576x25	720x576x25
	Básica	720x480x30	720x480x30	720x480x30	720x480x30
BAJA	Mejorada	352x288x25	352x288x25		
	Básica	352x240x30	352x240x30		

La combinación MP@ML es la más utilizada en Europa y está basada en imágenes entrelazadas en formato 4:2:0 con una resolución de 720x480 @ 30 Hz o bien de 720 x 576 @ 25 Hz con un conjunto de herramientas de compresión que incluyen las tramas de imagen I, P y B. Dependiendo de la relación entre tasa de transferencia, la calidad de imagen y la naturaleza de las imágenes a transmitir se obtiene una tasa de transmisión entre 4 Mbps (dando una calidad de imagen semejante al estándar PAL o SECAM) y 9 Mbps (con una calidad de imagen cercana a los estudios de la CCIR-601).

2.2 COMPRESIÓN DE AUDIO

El uso del audio digital ha crecido enormemente desde la introducción del Disco Compacto en los inicios de la década de los 80's. Con la finalidad de obtener un sonido digital de alta calidad, se eligió un esquema de muestreo sobre la señal de audio analógica de 44.1 kHz, cada muestra con una representación de 16 bits, con el objetivo de obtener un ancho de banda de 20 kHz y una señal de audio con bajo ruido en un rango de 96 dB.

El resultado es una tasa de 1411.2 kbps para una señal estereofónica ($44.1 \text{ kHz} * 16 \text{ bits} * 2 \text{ canales} = 1411.2 \text{ kbps}$). Otras dos frecuencias de muestreo son comúnmente usadas: 32 kHz para el sistema D2MAC, y 48 kHz para audio profesional grabado en forma de datos, o para CD. La llegada del audio MPEG permitió la posibilidad de utilizar cualquiera de las tres frecuencias de muestreo. La tasa de transferencia variará de una a otra, pero de cualquier forma serán siempre aproximadamente del mismo orden (entre 1.0 y 1.5 Mbps), lo cual resulta ser demasiado alto para enviarse junto con una señal de video. Por lo tanto, para lograr enviar el audio junto con un canal de TV digital se hace necesario comprimir más la señal de audio generada simplemente por el muestreo y digitalización de la señal de audio analógica original.

2.2.1 Principios de la compresión de audio con MPEG

Nuevamente, las limitantes del oído humano para escuchar determinadas frecuencias es explotada con la finalidad de reducir el cúmulo de información requerida para

codificar señales de audio sin que sufran deterioros en forma perceptible al momento de reproducir dicha señal.

La curva de sensibilidad del oído, que se muestra en la figura 2.14, determina el umbral de percepción de una señal de audio en función de su frecuencia. De esta forma, toda señal que se encuentre por debajo del umbral no será perceptible por el oído humano; esto permite eliminar información innecesaria en una señal de audio disminuyendo la tasa de transmisión requerida.

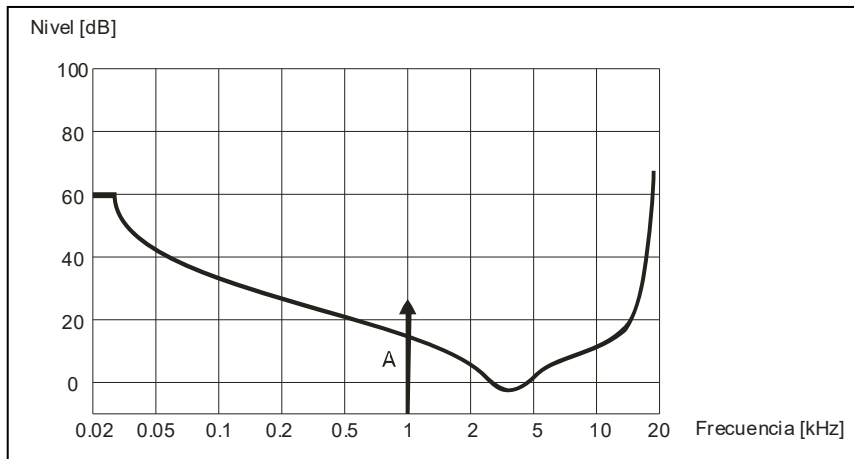


Figura 2.14 Sensibilidad del oído en función de la frecuencia. El nivel de la señal A supera el umbral, por lo tanto sí es perceptible por el oído humano.

Esta curva es característica para una sola señal de audio, pero tiende a modificarse en presencia de varias señales. No obstante, en el caso de dos señales de frecuencias relativamente cercanas, las frecuencias fuertes tienden a subir el umbral de percepción en las frecuencias cercanas, lo cual provoca que el oído humano sea menos sensitivo a estas frecuencias. A este efecto se le conoce como *enmascaramiento de frecuencias*. En la figura 2.15 se puede ver que la señal A que inicialmente era audible, en este caso es enmascarada por la señal B, que es de mayor potencia; esto provoca que no sea perceptible por el oído humano.

Existe otro efecto llamado *enmascaramiento temporal*. Aquí, un sonido de alta amplitud también enmascara sonidos que le preceden inmediatamente en tiempo. este efecto se muestra en la figura 2.16.

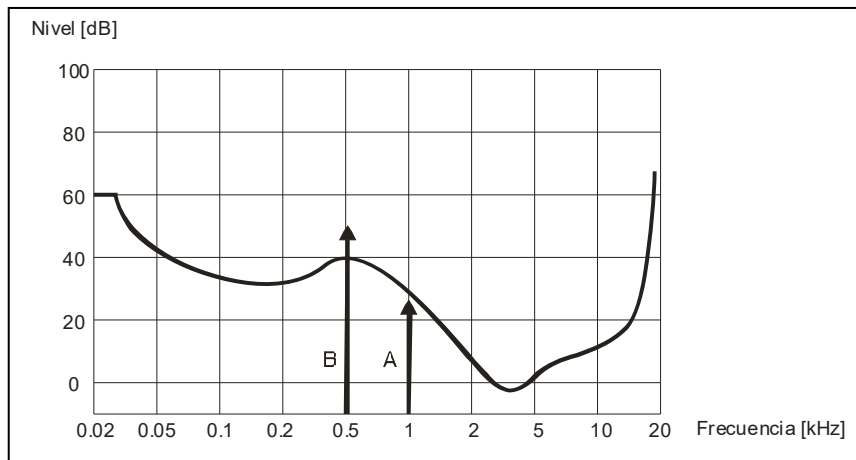


Figura 2.15 Efecto de enmascaramiento de frecuencias. La señal A es enmascarada por la señal B.

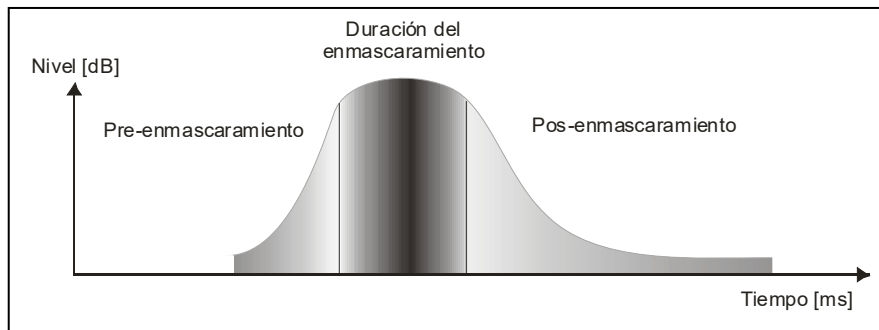


Figura 2.16 Efecto del enmascaramiento temporal.

Una serie de investigaciones ha conducido a la creación de un modelo *foto-acústico* del comportamiento del oído humano. Este modelo es la base del concepto de *codificación perceptual*, que es caracterizada por una curva de enmascaramiento y una variable de cuantificación que es función de la señal a ser codificada.

El principio del proceso de codificación consiste en digitalizar primero una señal analógica mediante un proceso llamado PCM, que consiste en tomar una muestra de la señal acústica cada intervalo definido de tiempo (dependiendo de la frecuencia que se maneje y que puede ser una de las tres mencionadas anteriormente). De esta señal se obtiene el espectro, que es una señal analógica, la cual es dividida en 32 sub-bandas iguales, es decir, es discretizada; para ello la señal requiere ser procesada por un banco de filtros *polifásico* generando una nueva señal llamada *muestreo de sub-bandas*.

El modelo foto-acústico elimina todas aquellas sub-bandas que se encuentran por debajo del umbral de percepción ya que éstas no podrán ser escuchadas por un espectador y conserva aquellas sub-bandas que sí son perceptibles y que permiten reconstruir la forma de la curva de enmascaramiento, como se muestra en la figura 2.17. El modelo también define los requerimientos de cuantificación adecuados para cada sub-banda, con la finalidad de dejar por debajo del umbral de percepción aquellas sub-bandas que son básicamente ruido. De esta forma, las regiones de frecuencia en las cuales el oído es más sensitivo, pueden ser cuantificadas con mejor precisión que en otras regiones.

Toda la información necesaria para la decodificación de la información y la reconstrucción de la curva de enmascaramiento es enviada durante un intervalo de tiempo en una trama. En la figura 2.18 se muestra el esquema básico del proceso de codificación de audio.

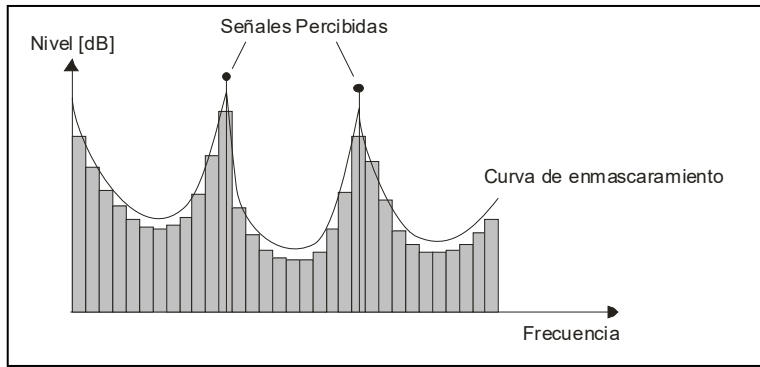


Figura 2.17 Sub-bandas de frecuencias obtenidas después de procesar la señal PCM de 32 pulsos con el banco de filtros.

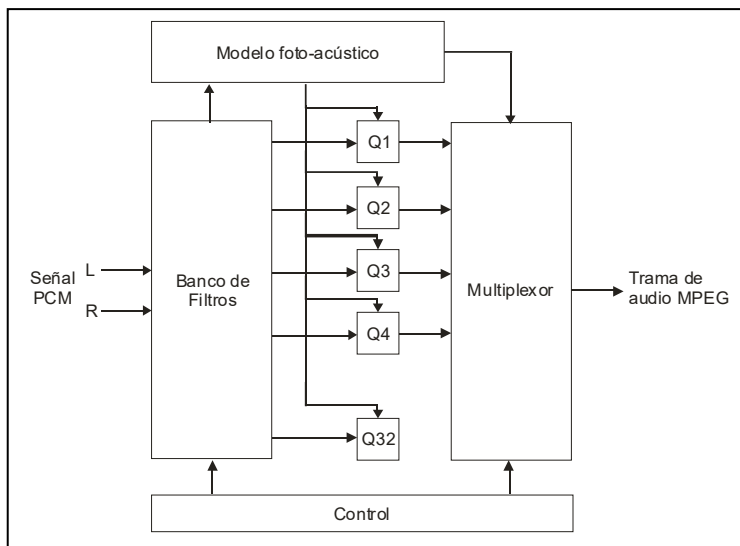


Figura 2.18 Proceso básico de codificación MPEG.

2.2.2 Capas de codificación de audio MPEG-1

El estándar de audio MPEG define tres *capas* de codificación, las cuales ofrecen muy variadas tasas de compresión para determinados niveles de calidad de audio.

- Capa I: Usa una tasa de transferencia fija de entre 14 posibles, que se encuentran en un rango de 32 a 448 kbps. Para calidad Hi-fi (Alta fidelidad) se requiere 192 kbps por canal de audio; de esta forma se requieren 394 kbps para una señal estéreo. La principal ventaja de la Capa I es la relativa simplicidad del codificador.
- Capa II: Usa un algoritmo llamado MUSICAM, el cual fue desarrollado por el Estándar Digital de Radio Europeo (DAB) y de TV (DVB). Para una calidad equivalente de audio, la capa II requiere una tasa de transferencia 30 o 50% menor que la Capa I, pero el codificador y decodificador crecen un poco en complejidad y costo. La tasa de transferencia es fija y se encuentra entre los 32 y 192 kbps por canal. La calidad Hi-Fi se logra con 128 kbps por canal, es decir 256 kbps en estéreo.
- Capa III: Permite una tasa de transferencia variable y una tasa de compresión aproximadamente del doble de la Capa II, pero el codificador y decodificador son sustancialmente más complejos. Además, el tiempo de codificación y decodificación es mucho mayor. Audio de calidad Hi-Fi requiere sólo 64 kbps por canal (128 kbps para señales estéreo). La Capa III se usa primordialmente para aplicaciones unidireccionales usando un medio que permite sólo bajas tasas de transferencia.

Al igual que los Perfiles y Niveles en el video MPEG-2, las capas de audio MPEG son completamente compatibles, lo cual significa que los decodificadores de Capa III son capaces de decodificar Capa II y Capa I; de igual forma, un decodificador de Capa II puede decodificar también Capa I.

Para la codificación de audio, el estándar de TV digital DVB usa la Capa II de las especificaciones MPEG-I, la cual ofrece cuatro modos principales de audio.

- Stereo (Estéreo): Los canales Derecho e Izquierdo son codificados en forma independiente cada uno.
- Joint-Stereo (Estéreo-Junto): Explota la redundancia entre los canales derecho e izquierdo para reducir la tasa de transmisión.
- Dual-Chanel (Canal Dual): Se transmiten dos canales independientes de audio (Por ejemplo, dos señales de audio en distintos idiomas).
- Mono (Único): Sólo se usa un canal de audio.

La Capa II de las especificaciones de audio MPEG-1 no prevé la multicanalización directa de sonido (Sonido surround); no obstante; este se puede lograr con los mismos métodos de la TV analógica convencional tales como Dolby ProLogic, lo cual significa que se requiere un decodificador integrado en el Televisor o bien en forma externa. Dos estándares se encuentran actualmente en competencia para optimizar la multicanalización de los sistemas de audio (para DVD video disc): MPEG-2, el cual es compatible con la señal estéreo de Capa II de MPEG-1 y que es preferida por Europa, y Dolby AC3, que requiere de un decodificador específico y fue elegido por Estados Unidos.

2.3 MULTIPLEXACIÓN DE SEÑALES, MEZCLADO Y ACCESO CONDICIONAL

Comúnmente un proveedor de TV digital por satélite ofrece entre 150 y 200 canales de programación, sin embargo cada satélite dedicado a brindar servicio de DBS puede tener aproximadamente 32 transpondedores con 24 MHz de ancho de banda cada uno, entonces cada transpondedor debe alojar entre cuatro y ocho canales.

Existen dos técnicas para realizar esta tarea.

Multiplexación por división de frecuencia (FDM): Cada uno de los canales a ser transmitido por un transpondedor recibe una frecuencia específica dentro del ancho de banda de este transpondedor.

Multiplexación por división de tiempo (TDM): Esta técnica consiste en asignar intervalos de tiempo a cada señal para que haga uso del transpondedor del satélite y cada señal emplea el ancho de banda total del sistema.

Cada técnica tiene sus ventajas y desventajas. FDM tiene la ventaja de que múltiples portadoras pueden hacer uso del transpondedor con un mínimo de coordinación. Sin embargo tiene la desventaja de aumentar lo que se conoce como ruido de Intermodulación, que básicamente es la degradación que sufre una señal de determinada frecuencia como efecto de las portadoras de frecuencias vecinas (este tema se abordara en el capítulo 3 de esta tesis). Para minimizar este efecto se tendrá que recurrir a lo que se conoce como *back-off*, que consiste en encontrar un punto óptimo de operación del amplificador de cada transpondedor dentro de la región lineal donde el ruido de intermodulación sea mínimo.

Por otro lado, TDM requiere que todas las portadoras sean transmitidas hacia el satélite desde la misma ubicación (al menos por cada transpondedor) ya que de lo contrario sería sumamente difícil coordinar los tiempos de acceso al satélite de cada señal ya que el tiempo que cada una tiene asignado es muy preciso, esto hace que el uso del ancho de banda del transpondedor sea muy ineficiente, lo cual es impermisible en sistemas DBS.

Por esta razón, todos los sistemas conocidos de DBS emplean TDMA ubicando todas las estaciones transmisoras en un mismo sitio, y generalmente también se procura que los satélites empleados tengan la misma posición orbital, de esta forma se puede hacer uso de la misma infraestructura para todos los canales y se aumenta mucho la eficiencia de la multiplexación TDM.

Estas estaciones terrenas son muy complicadas y equivalen a tener alrededor de 20 estaciones televisivas en un mismo sitio, transmitiendo un total aproximado de 200 canales, cada uno de los cuales es multiplexado.

2.3.1 Organización de la multiplexación MPEG-2

Un sistema de codificación MPEG-2 tiene siempre un codificador de audio y video para cada programa, el cual debe agregar la información necesaria para la sincronización y los recursos requeridos para la decodificación, formando una trama y entonces multiplexar la información proveniente de otros programas.

La cadena elemental resultante de la codificación de cada canal de audio y video es colocada dentro de paquetes que forman una PES (Cadena Elemental de Paquetes).

Una PES inicia con un Encabezado de Paquete; este encabezado es mucho mayor que cualquier encabezado que el sistema MPEG-2 haya agregado antes a las tramas; esto es debido a que se debe incluir información para resguardar la información.

El primer parámetro que debe incluir este encabezado es el código de inicio (**Packet Stars Code Prefix**), que sirve para identificar el inicio de una trama; este parámetro consta de una cadena de 16 bits y representa siempre el número 1 decimal⁽¹⁶⁾.

El siguiente parámetro es el identificador de cadena (**Stream Id**); especifica el tipo y número de Cadenas Elementales y debe proporcionar valores en el rango de valores hexadecimales 0xBC a 0xFF. El valor 0xBX indica **Program Stream Map**. Todos los identificadores que inician con 0xC y 0xD son utilizados para cadenas de audio. El identificador 0xE es utilizado para cadenas de video y los identificadores 0x0F0 y 0xF1 son usados para generar la información ECM (**Entitlement Control Messages**) y EMM (**Entitlement Management Messages**)⁽¹⁶⁾.

El parámetro que sirve para identificar la longitud del paquete es el **PES Packet Length**. Está conformado por 16 bits y especifica el número de bits una PES. Así una PES puede tener una longitud de hasta 65,536 bytes⁽¹⁶⁾.

El siguiente parámetro es el **PES Scrambling Control**; es un campo de 2 bits que incluye el modo de acoplamiento de la Carga útil de la PES .

Compresión, codificación, multiplexaje y modulación de canales de tv digital

Los siguientes once parámetros en el encabezado son banderas con longitud de un bit que indican la presencia o ausencia de alguna condición.

El siguiente parámetro **PES Extensión Flag** es siempre '1'; el parámetro **PES Header Data Length** de 8 bits, especifica el número total de bytes ocupado por los campos opcionales y algunos bytes de relleno contenidos en el encabezado del paquete del PES. El parámetro **Market_bit** es una bandera de un bit que siempre tiene el valor de 1

Los siguientes tres parámetros son varios indicadores de tiempo (cuando están presentes): **PTS (Presentation Time Stamp)**, **DTS (Decoding Time Stamp)**, y **ESCR (Elementary Stream Clock Reference)**. El **PTS** y **DTS** indican el tiempo de presentación y decodificación. Son números de 33 bits que son medidos en números de períodos con un reloj de 27 MHz dividido por 300. El **ESCR** es un valor de 42 bits compuesto de 33 bits de base (**ESCR-base**) y 9 bits de extensión (**ESCR_ext**)⁽¹⁶⁾.

El siguiente campo, **ES Rate** es un entero positivo que especifica la tasa de transferencia de la PES⁽¹⁶⁾.

El **Trick Mode Control** es un campo de 3 bits que indica qué modo es aplicado para la asociación de cadenas de video. (Este campo no es aplicado para DBS).

El campo **Frequency Truncation** de 2 bits puede indicar qué coeficientes habrán de ser usados en la codificación de los datos de video.

Adittional Copy Info es un campo de 7 bits que contiene información privada referente a la información de los derechos de autor.

Le siguen 5 banderas de 1 bit: **PES Private Data Flag**, **Packet Header Field Flag**, **Program Packet Secuence Flag**, **P-STD buffer Flag**, y **PES Extension Flag 2**. Son banderas que indican la presencia o ausencia de las condiciones que su nombre indican⁽¹⁶⁾.

La longitud, en bytes del paquete de encabezado es indicada en el campo **Packet Field Length**, que consta de 8 bits.

Los paquetes PES de algún programa particular son contenidos en el campo de 7 bits, **Program Packet Sequence Counter**.

Se han indicado varios de los campos que contiene el encabezado de las PES's y se han omitido aquellos que carecen de importancia para sistemas DBS. Ninguno de los campos arriba mencionados serán objeto de estudio en el presente trabajo, pero permiten visualizar la cantidad de información que es llevada en una trama para el transporte de TV digital.

La Cadena de Programa MPEG-2 está compuesta de una o varias PES's multiplexadas en tiempo, las cuales necesariamente deben compartir el mismo reloj de sincronización **STC** (System Time Clock). Este tipo de cadenas se utiliza para aplicaciones donde el medio de transmisión genera un número muy pequeño de errores (medio cuasi-libre de errores), como es el caso de aplicaciones multimedia basadas en CD-ROM o disco duro. En estos casos, los paquetes pueden ser de una longitud relativamente larga (más de 2048 bytes). Este tipo de multiplexación es usado en aplicaciones de video MPEG-2 de Disco Versátil Digital DVD.

La Cadena de Transporte MPEG-2, que también está conformada de varias PES's multiplexadas en tiempo, es principalmente usada para transportar programas de TV a largas distancias en los que el medio de transmisión puede introducir un alto número de errores (medios propensos al error). En estos casos la longitud de la cadena debe ser relativamente corta con la finalidad de lograr la implementación de algoritmos eficientes de corrección de errores.

16. C. Mead, Donald
Direct Broadcast Satellite Communications An MPEG Enabled Service
Prentice Hall
1ra Ed. Estados Unidos, 2000. Pg 146

Es por ello que la longitud de estas cadenas llamadas **paquetes de transporte MPEG-2 (PT)** ha sido fijada en 188 bytes para transmisión de programas de TV por satélite, por cable o terrestre, siguiendo el estándar Europeo DVB ⁽¹⁷⁾.

En el Paquete de Transporte 4 bytes son asignados al Encabezado del Paquete (*packet header*) y los 184 bytes restantes son empleados para la carga útil (*payload*) que contiene la información procedente de las PES's. Un determinado Paquete de Transporte puede transportar únicamente información proveniente de una sola PES, y una PES inicia siempre al comienzo de un Paquete de Transporte y siempre termina al final del Paquete de Transporte.

Los Paquetes de Transporte de 188 bytes generalmente son mucho más cortos que una PES (típicamente de 2048 bytes). De esta forma una PES debe ser dividida en bloques de datos de 184 bytes, pero la longitud de una PES generalmente no es exactamente un múltiplo de 184 bytes, de tal forma que el último paquete de información, menor a 184 bytes, deberá ser completado con un Campo de Adaptación (AF), para que el Paquete de Transporte tenga la misma longitud que el resto. Además el Campo de Adaptación es utilizado también para llevar información del Reloj de Referencia del Programa (**PCR**).

Cada Paquete de Transporte es identificado por un campo llamado **PID** (Packet Identifier) contenido en el Encabezado del Paquete, que inicia con un byte de sincronización además de contener una serie de sub-campos con información adicional necesaria para la apropiada demultiplexación de la información.

17. <http://www.dvb.com>

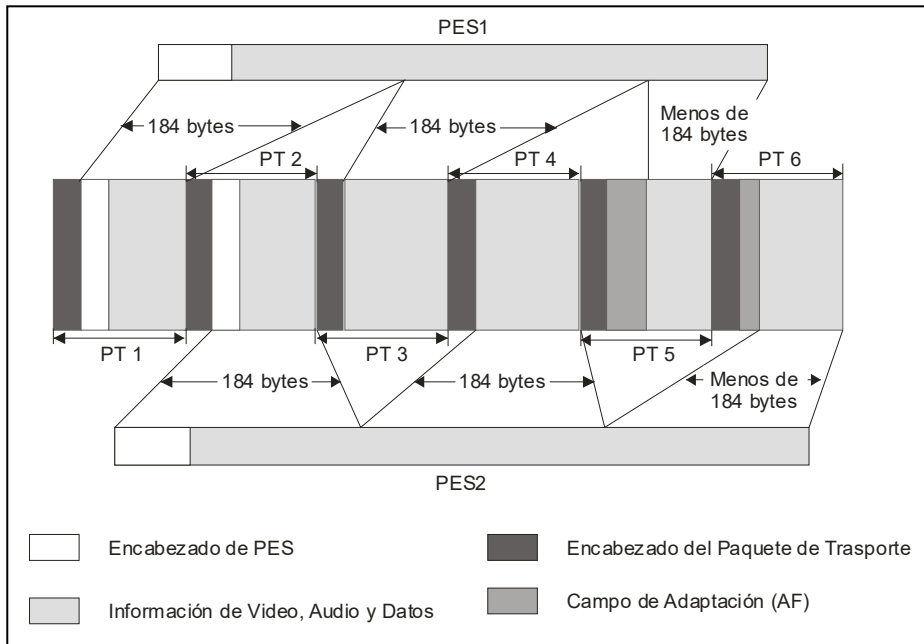


Figura 2.19 Multiplexación de las PES en los Paquetes de Transporte.

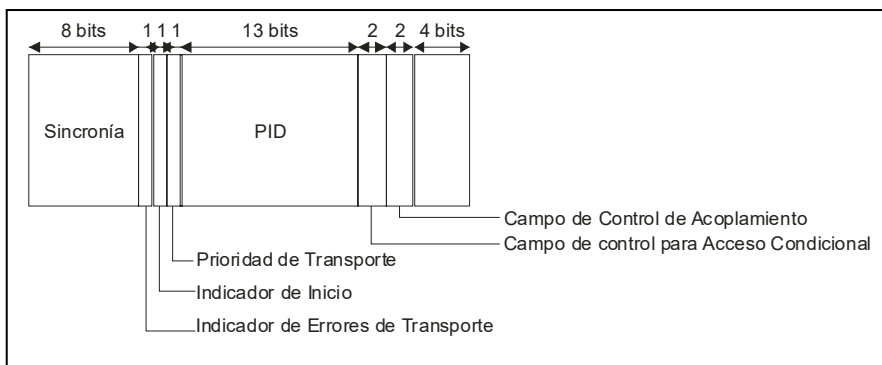


Figura 2.20 Detalles del Encabezado del Paquete de Transporte.

2.3.2 Tablas MPEG-2

Una vez que se ha hecho la multiplexación, la Cadena de Paquetes de Transporte generalmente lleva información de varios programas, cada uno compuesto de una o varias PES's. Con la finalidad de que el decodificador pueda demultiplexar adecuadamente cada señal, el estándar MPEG2 especifica una serie de características llamadas *tablas* y conocidas como **PSI** (Program Specific Information) las cuales proporcionan información acerca del contenido y la organización de la información dentro de la Cadena de Paquetes de Transporte. Estas tablas son divididas en secciones de 1024 bytes.

- **Tabla de Asociación de Programas (PAT):** La presencia de esta tabla es obligatoria. Es llevada por paquetes con PID =0. Su propósito es indicar, para cada programa dentro de la Cadena de Paquetes de Transporte, la relación entre el número de programa (del 0 al 65 535) y el PID de los Paquetes que llevan información del "Mapa" del Programa (Program Map Table, PMT).
- **Tabla de Mapa del Programa (PMT):** Existe un PMT por cada programa presente en la Cadena de Paquetes e indica principalmente el PID de la cadena elemental que constituye un determinado programa y, opcionalmente, otra información privada relacionada con el programa, la cual eventualmente será acoplada (Por ejemplo, el ECM, la primera pieza de información necesaria para desacoplar programas con acceso condicional). El PMT puede ser transportada por paquetes con un PID arbitrario (excepto 0 y 1) definido por el proveedor e indicado en la PAT.
- **Tabla de Acceso Condicional (CAT):** Esta tabla debe estar presente si por lo menos un programa en la Cadena de Paquetes de Transporte tiene acceso condicional. Esta tabla es transportada por paquetes con PID=1 e indica el PID de los paquetes que llevan el **EMM** para uno (o más) sistemas de acceso condicional (la segunda pieza de información necesaria para el desacoplamiento de programas con acceso condicional).
- **Tablas Privadas:** Estas tablas llevan información privada, que pueden tener cualquier formato o similar a la CA, excepto para la longitud de sección, que puede ser arriba de 4096 bytes.

MPEG-2 provee un Servicio de Información suplementaria (**SI**) , la cual ha sido agrupada bajo la descripción DVB-SI; estas tablas permiten la configuración automática del receptor y hace más sencilla la navegación del usuario a través de numerosos servicios disponibles. La información DVB-SI se provee con cuatro tablas principales y tres opcionales.

2.3.3 Tablas principales de DVB-SI

- **Tabla de Información de Red (NIT):** Esta tabla lleva información específica para una red conformada de más de un canal de Radio Frecuencia (más de una cadena de transporte); por ejemplo, número de frecuencias o canales utilizados por la red, los cuales el receptor puede utilizar para configurarse. Esta tabla es por definición el canal número 0 de la Cadena de Paquetes de Transporte.
- **Tabla de Descripción del Servicio:** Esta tabla lista los nombres así como otros parámetros asociados con cada servicio en la Cadena de Paquetes de Transporte.
- **Tabla de Información de Eventos (EIT):** Esta tabla es utilizada para transmitir información relativa a eventos que ocurren o ocurrirán durante el transporte de la Cadena de Paquetes o incluso otras Cadenas de Transporte.
- **Tabla de Fecha y Hora (TDT):** Esta tabla es usada para actualizar el reloj interno del dispositivo final (aparato ubicado en el hogar del usuario final conocido también como set-top box).

2.3.4 Tablas opcionales de DVB-SI

- **Tabla de Asociación de Conjunto (BAT):** Esta tabla puede ser empleada como herramienta para agrupar servicios que el dispositivo final debe utilizar para presentar al usuario los distintos servicios que se proveen. Un determinado servicio o programa puede ser parte de más de un Conjunto.
- **Tabla de Estado Actual (RST):** Esta tabla se transmite solamente una vez para la actualización del estado de uno o más eventos al tiempo que estos estados cambian, y no repetidamente como en el caso de otras tablas.

- **Tablas se Relleno (ST):** Estas tablas se utilizan, por ejemplo, para reemplazar tablas previamente utilizadas que se han hecho inválidas.

La frecuencia de repetición de estas tablas no ha sido estrictamente impuesta por el estándar; sin embargo, ésta debe estar entre los 10 y 50 Hz para permitir al decodificador acceder rápidamente al programa deseado.

La parte visible para el usuario de estas tablas es la presentación interactiva de la Guía Electrónica de Programación (**EPG**). Esto permite al usuario la fácil navegación entre numerosos programas y servicios.

2.3.5 Acoplamiento (Seguridad) y Acceso Condicional

La distribución gratuita de TV analógica se encuentra decreciendo y cada vez se hace más popular la transmisión de TV de paga ya sea por cable o por satélite y tiene una forma de cobro muy variada (suscripción convencional, pago por evento, etc). Sin embargo, hace algunos años, cuando existía la TV analógica por satélite, era muy sencillo que cualquier persona robara la señal, ya que simplemente con instalar una antena parabólica orientada hacia el satélite era posible captar la señal de TV, lo cual traía grandes pérdidas para los proveedores de TV. Con la llegada de la TV digital no sólo cambió la calidad del video y el audio, sino que también hizo más segura la transmisión de la señal. Para ello se realiza sobre ella una codificación específica que sólo aquel usuario que disponga de la contratación del servicio puede decodificar; de esta forma ya no es posible que la señal sea robada tan fácilmente.

El estándar DVB prevé la transmisión de datos de control de acceso a través del paquete CAT, que ya se ha explicado, así como otros paquetes indicados por el PMT. El estándar también define al Algoritmo de Acoplamiento Común (**CSA**) usado por muchos de los proveedores de servicios de TV digital. El Sistema de Acceso Condicional (**CA**) como tal no está definido por el estándar DVB, ya que muchos proveedores no desean tener un sistema común al resto, por razones de seguridad y piratería. De cualquier forma, con la finalidad de permitir al suscriptora acceder a

distintas redes de TV digital sin tener la necesidad de poseer un gran número de *dispositivos finales*, sino sólo uno, el estándar DVB da dos opciones.

1. *Simulcrypt*: Este proceso permite acceder al mismo programa con distintos *dispositivos finales*; esto implica que cada programa puede tener más de un sistema de acceso condicional. En este caso la Cadena de Paquetes de transporte debe llevar los paquetes de información de acceso condicional para cada sistema soportado, los cuales deben utilizar los mismos Algoritmos de acoplamiento (CSA o el DVB).
2. *Multicrypt*: Todas las funciones requeridas para el acceso condicional y desacoplamiento están contenidas en una tarjeta electrónica o módulo desmontable (PC-CARD también conocida anteriormente como PCMCIA). Esto se logra con una interfaz estandarizada (Common Interface, **DVB-CI**), la cual también incluye el procesador de información de intercambio entre el módulo y el dispositivo final. El dispositivo final puede tener más de una ranura para módulos DVB-CI; de esta forma es posible la conexión de varios módulos de acceso condicional. Para cada sistema de acceso condicional, el usuario puede conectar un módulo que junto con el software de acceso le permitirá acceder a los programas por los que esta pagando.

2.3.6 Principios del sistema de acoplamiento (seguridad) en el estándar DVB

Con objeto de evitar ataques de hackers tanto como sea posible, el algoritmo de seguridad está basado en dos capas de codificación, donde cada una refuerza los puntos donde la otra tiene debilidades. Las capas son: La capa de *Bloque* que utiliza bloques de 8 bytes, y, la capa de *Cadena* la cual se encarga de generar bytes en forma pseudo aleatoria.

El algoritmo de seguridad usa dos palabras de control (par e impar) alternando en un período aproximado de 2 segundos con la finalidad de dificultar aún más la piratería. Una de las palabras de control codificadas es transmitida en el campo de Mensajes de Control de Subtitulado (EMC's) durante el tiempo que la otra palabra es utilizada, de tal forma que la palabra debe ser almacenada temporalmente en los registros del

dispositivo desacoplador. También existe una palabra por default la cual se utiliza en los casos en que el acceso a un canal es libre.

La información requerida para el desacoplamiento es transmitida específicamente en el campo CAM (Conditional Acces Messages) de la PES's, el cual puede ser de dos tipos: ECM (Entitlement Control Messages) y EMM (Entitlement Management Messages)⁽¹⁸⁾.

Estos mensajes son generados por tres tipos distintos de datos de entrada:

- *Palabra de Control*: Es utilizada para inicializar la secuencia de desacoplamiento.
- *Llave de Servicio*: Es empleada para acoplar la palabra de control para un grupo de uno o varios usuarios.
- *Llave de Usuario*: Usada por la llave de servicio para el acoplamiento.

Cada uno de los mensajes generados son generados de la siguiente forma:

- ECM's (Entitlement Control Messages): Es función de la *Palabra de Control* y de la *Llave de Servicio* y es transmitido aproximadamente cada 2 segundos.
- EMM's (Entitlement Management Messages): Es función de la *Llave de Servicio* y de la *Llave de Usuario* y es transmitido cada 10 segundos aproximadamente.

En la recepción, el principio de decodificación consiste en recuperar la *llave de servicio*, que se encuentra codificada en el mensaje EMM, empleando para ello la *llave de usuario* almacenada en la tarjeta electrónica que el usuario posee. La *llave de servicio* es utilizada para descifrar el ECM con objeto de obtener la *palabra de control* que permite inicializar el dispositivo de desacoplamiento.

18. H. Benoit
Satellite Television: Techniques of Analogue and Digital Television.
Ed. Arnold
1ra Ed. Londres 1999. Pg 108-110.

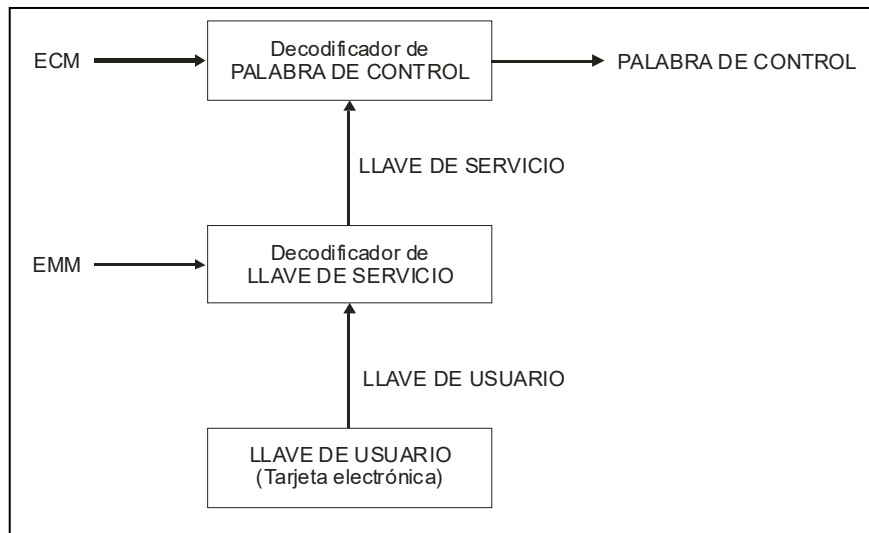


Figura 2.21 Decodificación de la *Palabra de Control* que permite iniciar el dispositivo de desacoplamiento.

A continuación se explica en forma esquemática el proceso que se sigue para recurrar la información necesaria para poder tener acceso a un programa de TV digital. Hay que hacer notar que debido a las políticas de seguridad de cada proveedor, la información detallada de los sistemas de acceso condicional no es de dominio público, por lo que sólo se puede hacer referencia a los detalles básicos de dicho sistema.

Cuando se localiza un paquete con PID = 0 se entiende que éste lleva información de la Tabla de Asociación del Programa (PAT) de un canal K determinado. Esta tabla es recuperada y a su vez indica el PID = N de aquellos paquetes que constituyen la Tabla de Mapa del Programa (PMT). Esta tabla contiene información que indica los PID's correspondientes a aquellos paquetes que contienen información del canal correspondiente (K en este caso), ya sea información de audio, video, PCR (Program Clock Reference) o ECM.

Por otra parte la Tabla de Acceso Condicional (CAT), reconstruida a partir de aquellos paquetes cuyo PID = 1, indica (mediante el PID) cuáles son los paquetes que contienen información de el EMM para uno o más sistemas de acceso condicional⁽¹⁹⁾.

Con esta información y la *llave de usuario* almacenada en la tarjeta electrónica, el sistema de desacoplamiento puede calcular la *palabra de control* requerida para desacoplar la siguiente serie de paquetes y reproducirla en el televisor.

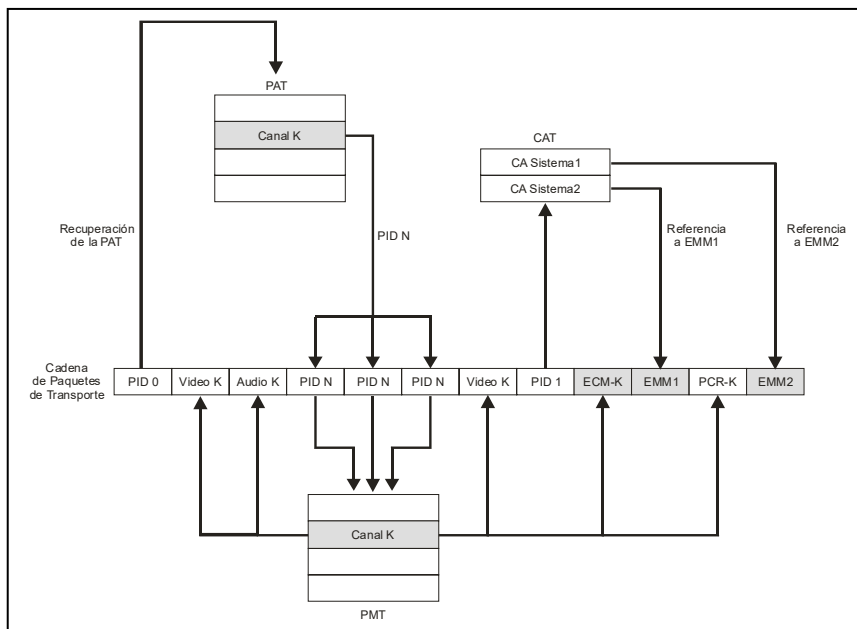


Figura 2.22 Proceso mediante el cual los mensajes EMM y ECM son encontrados en la Cadena de Paquetes de Transporte.

19. H. Benoit
Satellite Television: Techniques of Analogue and Digital Television.
Ed. Arnold
1ra Ed. Londres 1999. Pg 57-62.

2.4 MODULACIÓN DE CANALES DE TV DIGITAL

Una vez que la información ha sido codificada, multiplexada, acoplada, y conformada en cadenas de 188 bytes, esta entonces lista para ser transmitida al usuario final mediante un enlace de radiofrecuencia ya sea vía satélite, cable o terrestre. Desafortunadamente esta transmisión no está libre de errores ya que la señal sufre distintas perturbaciones que pueden alterar la integridad de la señal (ruido, interferencia, atenuaciones, etc). De cualquier forma, una señal de TV digital, en la cual los bits de redundancia ya han sido removidos, requiere una muy pequeña Tasa de Errores (BER), para un buen desempeño del sistema se requiere una BER del orden de 10^{-10} a 10^{-12} . Esto es necesario para tomar medidas preventivas contra errores producidas antes de la modulación con la finalidad poder detectar la señal en un punto lo más lejano posible de la antena transmisora, en el receptor la gran mayoría de los errores son debidos al canal físico de transmisión. Estos errores, en su mayoría son detectados mediante el uso de bits de redundancia que son enviados en el transmisor y recalculados en el receptor, para corroborar la integridad de la información, esto se hace mediante una técnica llamada Forward Error Correction (FEC), en la figura 2.23 se puede ver el proceso de codificación de un canal de TV digital.

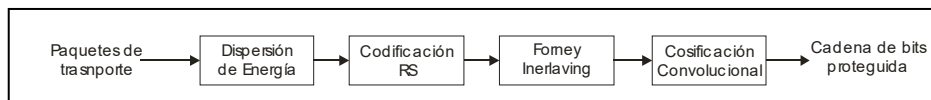


Figura 2.23 Principales procesos realizados en el transmisor para el Forward Error Correction

2.4.1 Dispersión de energía y codificación externa (Reed-Solomon coding)

El propósito de la dispersión de energía es permitir largas series de 0's o 1's y hacer que su aparición en la cadena sea cuasi aleatoria con la finalidad de tener una distribución de energía más o menos uniforme a lo largo del canal de transmisión. Esto se logra codificando la señal con secuencias pseudo aleatorias.

Como ya se ha mencionada, para tener una buena confiabilidad en que la señal será recibida en forma correcta, es necesario agregar algunos bits de redundancia a la cadena, de esta forma se espera obtener un canal cuasi-libre de errores (QUEF).

Compresión, codificación, multiplexaje y modulación de canales de tv digital

La primera capa de corrección de errores, llamada "outer coding", es usada por todos los medios de transmisión especificados en la DVB; una segunda capa llamada "inner coding" es empleada sólo para transmisiones por satélite y terrestre. El "outer coding" es un código *Reed-Solomon* RS (204,155, T = 8) el cual en combinación con el "Forney convolucional interlaving", que se explica en la siguiente sección, permite corregir una gran cantidad de errores producidos por el medio de transmisión

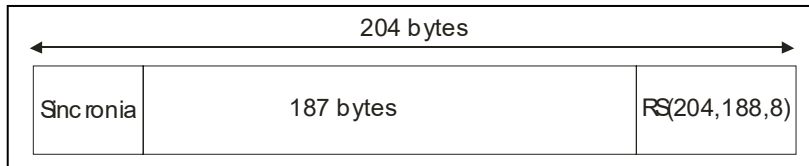


Figura 2.24 Paquete de transporte después de la codificación Reed-Solomon

2.4.2 Forney convolucional interlaving

El propósito de esta etapa es incrementar la eficiencia de la codificación Reed-Solomon incrementando en gran medida el intervalo de tiempo de aparición de errores introducidos por el canal, de otra forma se podría exceder la capacidad de corrección de errores de la codificación RS (ocho bytes por paquete).

Convolucional coding (inner coding)

Una vez que las operaciones de codificación han sido realizadas se tiene una cadena de datos lista para ser modulada y transmitida al usuario final.

Para la transmisión por satélite en la banda Ku, el ancho de banda del canal es aproximadamente de 26 MHz para el caso de los satélites Astra 1A-1D y 1G y de 36 MHz para satélites Telecom, el valor más común para servicios directos al hogar es de 33 MHz como es el caso de los satélites ASTRA 1E y 1F, Eutelsat "Hot Birds". Pero para el caso de los satélites DirecTV 2,3,1-R así como los empleados por SKY es de 25 MHz La transmisión digital ha cambiado a lo largo de su historia, por lo que actualmente existen distintos tipos de transmisión digital, los cuales deben de coexistir en el mismo satélite y además las nuevas señales deben ser compatibles con la mayoría de los equipos de transmisión existentes.

2.4.3 Modulación QPSK (DVB-S)

El esquema de modulación más simple usa la modulación directa de la portadora por la cadena, representando la información a ser transmitida, ya sea en amplitud (**APSK**, Amplitude Shift Keying) o en frecuencia (**FSK**, Frecuency Shift Keying). Con la finalidad de aumentar la eficiencia espectral en el proceso de modulación, distintos tipos de Modulación en Amplitud por Cuadratura pueden ser usados. La Figura 2.25 ilustra el proceso de modulación y demodulación en cuadratura.

La señal **I** modula la salida del oscilador local y la señal **Q** modula la misma salida del oscilador pero desfasada $\pi/2$. El resultado de este proceso de modulación puede ser representado como una constelación de puntos en el dominio de **I**, **Q**. Esta constelación representa el número de estados posibles en la salida **S** que dependen de los valores que **I** y **Q** deben tomar. En la figura 2.26 se ilustra la constelación ideal para modulación QPSK (cuatro estados).

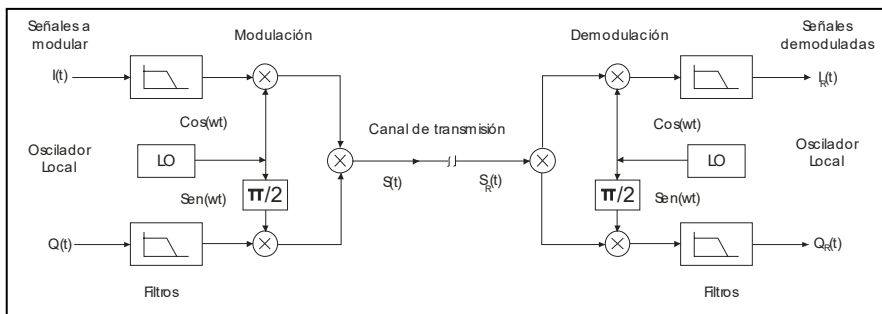


Fig 2.25 Proceso básico de modulación y demodulación e cuadratura

La información que los bits llevan, la cual queda definida por la amplitud de las señales moduladas **I** y **Q**, es llamada *símbolo* (codificada en n bits si las señales **I** y **Q** son codificadas en $n/2$ bits cada una). De esta forma la constelación tendrá 2^n puntos.

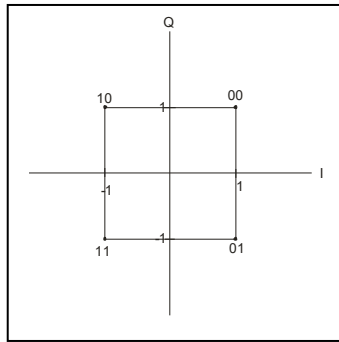


Fig 2.26 Constelación de la señal QPSK

Para incrementar la eficiencia espectral, resulta obvio que el número de bits por símbolo debe ser lo más alto posible, la tasa de símbolos (que determina el ancho de banda) es igual a la tasa de bits (símbolos/segundo dividido por el número de bits por símbolo 2 en el caso de QPSK). De cualquier forma la amplitud relativa del ruido de las señales **I** y **Q** recibidas (reflejadas en la relación señal ruido S/N) limita la posibilidad de distinguir entre varios posibles estados de **I** y **Q**: Si la "nube" de puntos contiene puntos muy cercanos uno del otro, esto provocara que no se pueda distinguir entre un estado y otro. De esta forma el número máximo de estados que se puede tener en un esquema de modulación quedará definido por la relación señal ruido S/N.

Tomando en cuenta que en la recepción del satélite se tiene un valor bajo de S/N, se ha determinado que la modulación QPSK (dos bits por símbolo, correspondiente a cuatro estados) es el mejor esquema práctico de modulación. En este caso, las señales **I** (en fase) y **Q** (en cuadratura) sumadas es las salida de codificador convolutivo.

2.5 RECEPCIÓN DE TV DIGITAL

2.5.1 Visión Global del proceso de transmisión y recepción

En la figura 2.27 se ilustran los principales pasos para la transmisión de una señal.

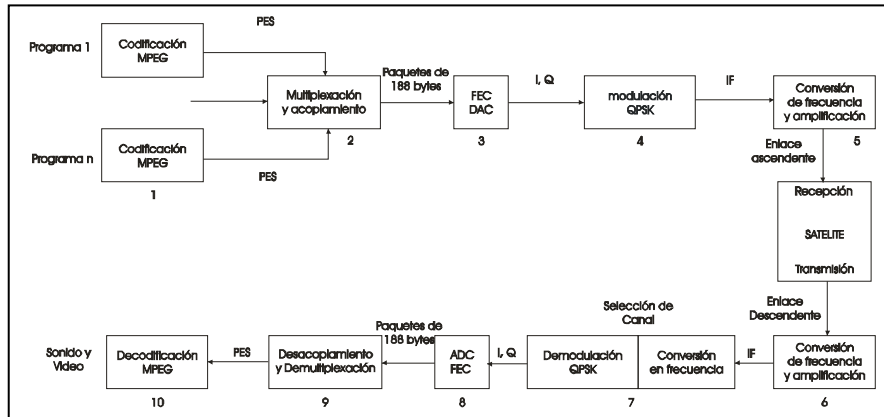


Figura 2.27 esquema completo para la transmisión y deceptión de un canal de TV digital en el estándar DVB.

Del lado del transmisor tenemos:

1. El audio y el video de los programas que serán transmitidos deben ser codificados aplicando el estándar MPEG-2, con lo que se obtiene las PES's de audio y video que serán multiplexadas (en el orden de 4 a 8 programas por canal de RF dependiendo de los parámetros elegidos para la codificación).
2. Estas PES's son usadas por el multiplexor para formar paquetes de transporte.
3. El RS de corrección de errores incrementa la longitud del paquete a 204 bytes; en adición, la codificación convolucional multiplica la tasa de bits por un factor de 1.14 ($R_c = 7/8$) a 2 ($R_c = 1/2$); dando formato a los datos, posteriormente se filtra y se realiza la conversión D/A, produciendo las señales analógicas I y Q.

Compresión, codificación, multiplexaje y modulación de canales de tv digital

4. Las señales I y Q moduladas es QPSK y IF (Frecuencias intermedias) tienen portadoras del orden de 70 MHz.
5. Esta IF son convertidas a frecuencias más altas para acondicionar la señal para ser transmitida al satélite.

Este cambio de frecuencia brinda el valor de frecuencia que se requiere (del orden de 14 GHz) para el enlace de subida hacia el satélite donde nuevamente será convertido en frecuencia en la banda Ku (de 10.70 a 12.75 GHz) para su difusión hacia el usuario final en el enlace de bajada.

En el lado del receptor, que en la figura 2.27 se muestra en la parte inferior, se pueden ver los pasos complementarios, que resultan ser los mismos que en el transmisor pero en forma inversa.

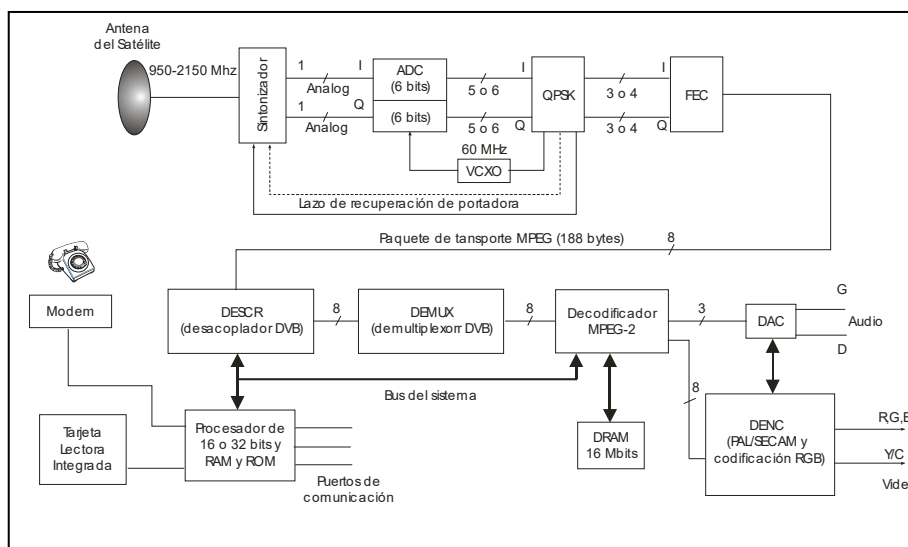
6. Antena: Amplificación y primera conversión de frecuencia hacia una frecuencia inferior. Esto se realiza en el Convertidor de Bajo Ruido (LNB), el cual cambia la frecuencia al rango de 950 a 2150 MHz, una vez realizado este proceso se envía la señal a través de cable coaxial hacia el IRD.
7. En el IRD, se realiza una segunda conversión en frecuencia hacia frecuencias intermedias, 480 MHz; la demodulación de estas IF recobran las señales analógicas I y Q.
8. Después de la conversión A/D, se filtra la señal y se recuperan los símbolos de las señales I y Q (desmapeo de símbolos), El FEC recobra los paquetes de 188 bytes.
9. El demultiplexor selecciona la PES correspondiente al programa seleccionado por el usuario, la cual eventualmente es desacoplada con la ayuda de los ECM, EMM y la llave del usuario.
10. Finalmente el decodificador de MPEG-2 reconstruye las señales de audio y video.

2.5.2 Estructura del receptor/decodificador integrado de TV (IRD)

La evolución tecnológica que presenta este campo es sorprendente, en cortos periodos de tiempo salen al mercado nuevos productos que han tenido grandes mejoras en la integración del hardware, es decir cada vez son más compactos. Es por eso que no se puede hablar específicamente de un IRD en general y en se abordará el tema tratando de abarcar las principales características de los IRD en general.

El diagrama de bloques que se muestra en la figura 2.29 ilustra la estructura general de un IRD. Sin embargo, como se mencionó antes la estructura real varía de un fabricante a otro y se pueden tener diferencias substanciales.

Las señales recibidas de el satélite (en el rango de frecuencias 10.7 a 12.75 GHz) , son amplificados y convertidos, en dos bandas, a una frecuencias menores (en el rango de 950 a 2150 MHz). De esta tarea se encarga el convertidor de bajo ruido LNB o LNC localizado en el foco de la antena, y estas señales son alimentadas a la entrada del IRD's.



(generación 1995/96) ⁽²⁰⁾

El *sintonizador*, se encarga de seleccionar el canal de radio frecuencia requerido en el rango de los 950-1250 MHz, convirtiéndolo a una frecuencia de 480 MHz, la señal es amplificada y demodulada acorde a los 0° y 90° de desfase necesario para obtener las señales **I** y **Q**. Es entonces necesario recobrar la fase de la señal portadora, para ello se usa un “lazo de recuperación de portadora” que hace una comparación entre la señal recibida y el oscilador local con la finalidad de identificar que señal es la correspondiente a un desfase de 0° y al cual le corresponde el desfase de 90° .

El ADC (Convertidor Analógico Digital) recibe las señales analógicas I y Q, las cuales son convertidas a símbolos. En la mayoría de los casos esto se realiza con una implementación de un convertidor A/D dual con 6 bits de resolución, que trabajan a una frecuencia de muestreo de 60 MHz aproximadamente. Aquí se hace necesario una vez más el uso del “lazo de recuperación de portadora” para identificar los símbolos correspondientes a cada una de las señales I y Q, es decir se hace la recuperación del reloj.

El bloque QPSK, en complemento con los bloques anteriores, además de recuperar el reloj del sistema elimina algunos bits de control que fueron agregados y conserva aquellos que llevan información, siguiendo el criterio de Nyquist. Una vez realizado este proceso sobre las señales I y Q estas son enviadas al siguiente bloque funcional (FEC).

El bloque correspondiente el FEC (Forward Error Correction) se encarga de distinguir los 1's de los 0's y emplea algoritmos de corrección de errores. Los datos de salida son paquetes de transporte de 188 bytes, los cuales son enviados a la siguiente etapa generalmente en forma paralela, ocho de los bytes de esta cadena son empleados para llevar la información del reloj y para indicar cuando se tienen errores incorregibles.

20. H. Benoit
Satellite Television: Techniques of Analogue and Digital Television.
Ed. Arnold
1ra Ed. Londres 1999. Pg 122.

Compresión, codificación, multiplexaje y modulación de canales de tv digital

El bloque de DESCR (desacoplador) recibe los paquetes de transporte y mediante una comunicación con el procesador principal mediante un bus paralelo se encarga de realizar una transferencia de datos muy cuidadosa. Aquí se realiza la selección y desacoplamiento de paquetes del programa requerido bajo el control del dispositivo de acceso condicional. Esta función es en ocasiones combinada con el uso del demultiplexor.

El DEMUX (demultiplexor) se encarga de seleccionar y filtrar la PES correspondiente al programa seleccionado por el usuario.

Las PES de salida de audio y video del multiplexor son alimentadas a bloque de MPEG que generalmente combina las funciones MPEG de audio y las funciones controladoras de graficas requeridas, entre otras cosas, como es la guía electrónica de programación (EPG). El decodificador MPEG-2 generalmente requiere del uso de memorias DRAM y SDRAM de 16 bits.

La señal de video reconstruida por el decodificador MPEG-2 es aplicada a un codificador de video (DENC) que garantiza la conversión de la señal digital en una señal analógica de tipo RGB de alta calidad. Con esto la señal final puede ser vista en un televisor convencional según el estándar de cada país, así como ser grabada en videograbadoras comunes.

La descompresión de la señal de audio digital es similar a la de video. Se hace uso de un convertidor analógico digital (DAC) dual con una resolución de 16 bits o más para obtener una señal analógica de dos canales, derecho e izquierdo, en ocasiones se provee una señal óptica.

El sistema en general es controlado por un procesador muy poderoso de 32 bits que se encarga de controlar toda la circuitería, e interpreta comandos solicitados por usuario a través del control remoto. El software necesario para el total funcionamiento del dispositivo se aloja en una memoria **Flash-EPROM** que permite actualizar el software eventualmente.

Compresión, codificación, multiplexaje y modulación de canales de tv digital

El dispositivo de acceso condicional generalmente incluye una o dos tarjetas lectoras una de las cuales se usa como reserva en caso de que la otra falle, ambas usan una interfase común con un modulo de acceso condicional bajo el estándar DVB-CI, los circuitos de acceso condicional y el software. También en algunos casos el desacoplador y la tarjeta lectora, se localizan en un modulo PCMCIA, que es una ranura estandarizada para la colocación de circuitos dentro del dispositivo del IRD.

El IRD también puede establecer comunicación con otros dispositivos externos como es una PC o un MODEM, por lo que se requiere tener varios puertos de comunicación, desde el simple puerto serial hasta sofisticados puerto paralelos para estándares de la IEEE. Se hace necesario tener conexión entre el equipo y una línea telefónica para tener puntos de comunicación con el equipo por parte del proveedor; de esta forma el usuario puede solicitar distintos servicios, como es la interacción en programas, eventos sobre pago y otros servicios especiales.

El receptor digital es en ocasiones equipado con otras funcionalidades que le permiten interconectarse con un segundo receptor, generalmente analógico; de esta forma se logra que la señal continúe siendo recibida, así el LNB relega al control al receptor analógico cuando el IRD se encuentre en estado de reposo, (stand by); además los dispositivos como televisión y video caseteras pueden conectarse al receptor analógico sin causar ningún conflicto.

CAPITULO III

ECUACIONES GENERALES PARA EL CÁLCULO DE ENLACES

3.1 CONCEPTOS GENERALES DE LOS ENLACES RF

Toda señal de radiofrecuencia que se propaga en algún medio distinto al vacío sufre de distintas atenuaciones debido a distintos fenómenos que se dan en el medio; en el caso de un enlace satelital una señal que viaja de una estación terrena hacia el satélite y viceversa tiene que viajar una distancia considerable entre uno y otro punto y entre la antena transmisora y receptora existen muchas irregularidades en el medio de propagación que producen atenuaciones a la señal, como es el caso de la lluvia y vapor de agua, o la simple absorción atmosférica ya que la presencia de la atmósfera genera atenuaciones considerables sobre la señal; y otros fenómenos de los que se hablará más adelante. Además de los fenómenos que producen atenuación existen otros más que añaden ruido a la señal algunos ejemplos son la interferencia con otros canales de radiofrecuencia, el ruido generado por alguna tormenta eléctrica, ruido industrial, etc. Sumando todos los efectos nos encontramos con que la señal que originalmente fue transmitida al llegar a su destino, ya sea en el satélite o la estación terrena, ha sufrido varias alteraciones y para poder recuperar la información de esta señal es necesario que la intensidad de señal con la información propiamente dicha sea considerablemente mayor a la intensidad del ruido; de esta forma se define la relación señal ruido o portadora ruido **C/N** (Carrier/Noise) , y cuando a la entrada del demodulador en el receptor se tiene una relación portadora sobre ruido mayor a un valor determinado se puede garantizar entonces que la información será recuperada, aún después de que la señal fue degradada por el ruido y la atenuación. La relación **C/N** mínima útil depende del tipo de información, su acondicionamiento, codificación y si está codificada o no. En el presente capítulo se estudiará la forma de obtener dicho coeficiente.

3.2 CONFIGURACIÓN BÁSICA DE UN ENLACE EN RF

En la figura 3.1 se puede apreciar la configuración típica de un enlace en RF en la cual se incluyen todos aquellos elementos capaces de generar atenuaciones, agregar ruido o potencia a la señal con lo que se obtiene toda la información necesaria para obtener la relación **C/N**. Del lado del transmisor en la estación terrena los elementos de interés son el amplificador de potencia **PA** (Power

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

Amplifier), y la antena que radiará la señal portadora ya amplificada, así como las atenuaciones debidas a los conectores y guías de onda. En el satélite, para el sistema de recepción hay que considerar nuevamente las características de la antena receptora, el amplificador de bajo ruido **LNA** (Low Noise Amplifier) y los elementos atenuadores como guías de ondas. En el trayecto de subida, la señal portadora sufrirá atenuación por propagación en el espacio libre, por absorción atmosférica, por lluvia, por despolarización y por desapuntamiento; además de esto hay que considerar la interferencia que seguramente se tendrá debido a interferencias de otras señales de RF y otros ruidos adicionales. Al calcular la relación **C/N** todos aquellos factores que añadan potencia a la señal o que la atenúen quedarán englobados en el factor **C** y todo el ruido acumulado quedará representado por el factor **N**. Todos estos factores tienen que estar referidos a un mismo punto, que por convención es a la entrada del amplificador de bajo ruido después de la antena del satélite, como se muestra en la figura, con lo que se obtiene el factor $(C/N)_s$, que es la relación portadora sobre ruido en el enlace de subida.

En la estación terrena transmisora es necesario elegir un punto de operación para el amplificador de potencia dependiendo del número de portadoras que se han de transmitir, ya que la presencia de más de una de éstas genera ruido de intermodulación, y así poder ejercer determinado control sobre este ruido se hace necesario el uso de atenuadores antes del **PA**, ya que a mayor potencia de salida del amplificador mayor ruido de intermodulación será generado. De esta forma se puede elegir un punto óptimo de operación y reducir al máximo este ruido.

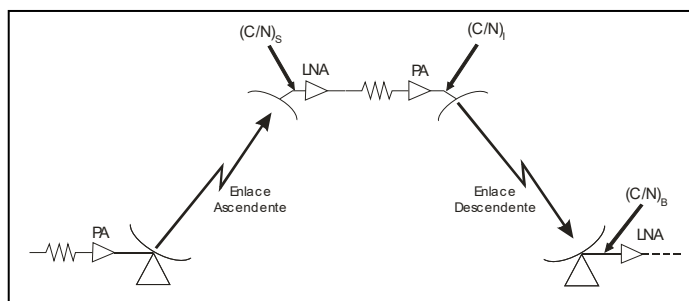


Figura 3.1 Configuración típica de un enlace satelital

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

La señal recibida en el satélite, que es en realidad la suma de la portadora y el ruido, es amplificada dentro de él para posteriormente ser reenviada a la tierra. Este proceso se realiza dentro del transpondedor que corresponde donde primeramente la señal es procesada por un **LNA** (amplificador de bajo ruido) para darle un nivel de potencia adecuado para procesarla, pero sin degradarla más, y posteriormente la señal es amplificada mediante un **PA** (amplificador de potencia) para darle la potencia suficiente para llegar a la tierra.

También dentro del transpondedor existirá ruido de intermodulación si se tiene más de una portadora. Con la finalidad de reducir este ruido al máximo se añade también un atenuador antes de amplificar la señal; con esto se logra controlar el nivel de potencia en la señal y por consiguiente también el ruido de intermodulación. Es por ello que para el satélite también se define el coeficiente de portadora sobre ruido de intermodulación **(C/N)_i**, valor que generalmente es proporcionado por el fabricante del satélite mediante tablas o gráficas.

Por último se tiene el enlace descendente, donde se tienen las mismas características que en enlace de subida, es decir, la señal portadora se ve degradada por las mismas razones que en el enlace ascendente, sólo que en esta ocasión la estación transmisora se ubica en el satélite. De esta forma también es posible calcular la relación portadora ruido en esta etapa que se denota **(C/N)_b**, donde *b* indica que se trata del enlace descendente o de bajada. Cabe remarcar que debido a que la frecuencia en el enlace descendente es distinta a la del enlace ascendente, los niveles atenuación y ruido son distintos en cada etapa.

Una vez que se han obtenido los tres cocientes de potencia se puede calcular el cociente de portadora sobre ruido total **(C/N)_T**, como se verá más adelante, pero previo a esto es necesario asimilar algunos conceptos importantes que se estudian en las siguientes secciones.

3.3 GANANCIA DE LA ANTENA

Actualmente el tipo de antenas más utilizadas en los satélites son monopolos, dipolos, helicoidales, cornetas, platos parabólicos, y ya en antenas más avanzadas se tienen arreglos de antenas más pequeñas así como antenas “perfiladas” o de superficie irregular. Estas últimas están teniendo un gran auge en la actualidad ya que con ellas se logra tener huellas de radiación muy caprichosas, logrando tener una cobertura mucho más específica y selectiva de áreas geográficas.

En lo que respecta a las antenas de apertura, como son las antenas parabólicas simples y de tipo offset que son las que se usan en los enlaces de TV digital, se tiene que la ganancia máxima $G_{m\acute{a}x}$, que se da siempre en la dirección del eje de la antena, está dada por la expresión.

$$G_{m\acute{a}x} = \eta \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (3.1)$$

donde:

η : Eficiencia de la antena

A : Área física de la apertura de la antena

λ : Longitud de onda de la frecuencia de trabajo

Para los platos parabólicos la eficiencia es del 55% al 65%⁽¹⁾ y en la práctica es común tomar el valor del 60%; para el caso de algunas antenas offset se logra tener eficiencias de hasta el 75%. Es muy complicado obtener la eficiencia total de una antena, sin embargo éste es un dato que el fabricante proporciona en forma indirecta ya que su producto tiene valores específicos de ganancia máxima, así como las dimensiones físicas, con lo que se puede obtener la eficiencia.

1. Stutzman, W.L.
Estimating Directivity and Gain of Antennas
IEEE Antennas and Propagation Magazine Volume: 40, Issue: 4, Aug 199

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

Partiendo de la ecuación 3.1 tenemos que:

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

De esta forma, al sustituir en la ecuación 3.1 obtendremos.

$$G_{\text{máx}} = \eta \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \right) \cdot \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)$$

por lo que finalmente se tiene:

$$G_{\text{máx}} = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (3.2)$$

De esta forma es posible obtener la ganancia para cualquier antena de apertura.

Es común expresar esta ganancia en decibeles con relación a la ganancia unitaria de una antena isotrópica [dBi], para lo que se usa la siguiente expresión.

$$[G]_{\text{dBi}} = 10 \log G \quad (3.3)$$

En la práctica es muy importante conocer la ganancia en otras direcciones además del eje de la antena, por ello se usa el concepto de **ancho del haz del lóbulo principal**, que se define como el ángulo entre los dos puntos de media potencia del haz y que se puede calcular en forma aproximada de la siguiente manera.

$$\theta_{-3\text{dB}} \cong \frac{75\lambda}{D} [\text{grados}] \quad (3.4)$$

Empleando este factor es posible calcular la ganancia de la antena en una dirección a un ángulo α del eje de la antena de la siguiente manera:

$$[G_{\alpha}]_{dBi} = [G_{m\acute{a}x}]_{dBi} - 12 \left(\frac{\alpha}{\theta_{-3dB}} \right)^2 [dBi] \quad (3.5)$$

donde tanto α como θ son sustituidos en grados.

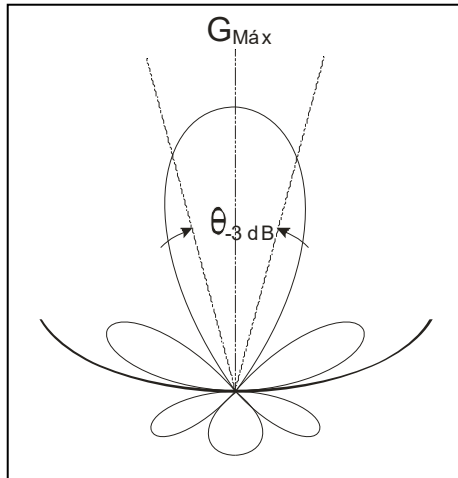


Figura 3.2 Ancho del haz del lóbulo principal

Cabe hacer notar que la expresión (3.5) es válida sólo cuando el patrón de radiación de la antena es simétrico, sin embargo la mayoría de los satélites de la actualidad utilizan antenas perfiladas con patrones de radiación irregulares, por lo que es preferible recurrir a las huellas de PIRE que el fabricante proporciona como el que se muestra en la figura 3.3.

El PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Efectiva) se define como el producto de la ganancia \mathbf{G} de la antena transmisora por la potencia \mathbf{P}_T en una determinada dirección.

$$PIRE = P_T \cdot G[W] \quad (3.6)$$

$$[PIRE]_{dBW} = 10 \log PIRE_W = 10 \log P_{TW} + [G]_{dBi} \quad (3.7)$$

Sin embargo, hay que notar que los contornos proporcionados por el fabricante corresponden a una frecuencia específica y que el valor de la ganancia de la antena cambia con la frecuencia, así como también la forma de la huella se puede modificar un poco; estos detalles deben ser tomados en cuenta para realizar el cálculo de enlaces como se verá más adelante.

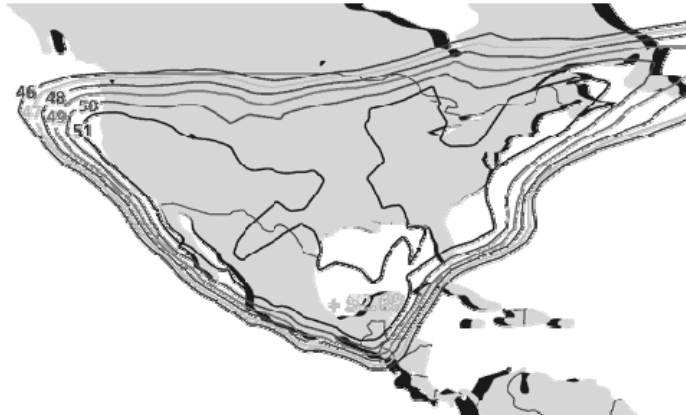


Figura 3.3 Contornos de PIRE en la banda Ku para el satélite Satmex 5 ⁽²⁾

3.4 ATENUACIÓN POR ESPACIO LIBRE

Las principales causas de atenuación en un enlace satelital se deben a las grandes distancias que se tienen entre el satélite y las estaciones terrenas. A esta atenuación se le llama **atenuación por espacio libre**. A continuación se realiza el proceso para la deducción de esta fórmula.

2. <http://www.satmex.com/flota/satmex5.php#>

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

En la estación transmisora la salida de potencia del amplificador P_T es radiada por la antena y concentrada en una región donde la intensidad con que la señal es concentrada depende de la ganancia de la antena G_T . Tomando como referencia la antena isotrópica, sabemos que si la antena transmisora fuera de este tipo entonces el patrón de radiación sería de forma uniforme con frente de onda esférico distribuido alrededor de la antena, de tal forma que a una distancia r de la antena (el cálculo de r se estudia en la sección 3.17 de esta tesis), la potencia radiada por la antena se distribuiría en forma uniforme sobre una esfera de área $4\pi r^2$. Entonces por unidad de área se tendrá un nivel de potencia que la antena radia, a lo cual se le llama **densidad de flujo** y que se define de la siguiente manera:

$$F_d = \frac{P_T}{4\pi r^2} \left[W / m^2 \right] \quad (3.8)$$

Pero dado que nuestra antena es directiva y de ganancia G_T en la dirección de máxima concentración, entonces esta ganancia amplifica la densidad de flujo de potencia dada por la ecuación 3.8, por lo que en la dirección de máxima intensidad de potencia se tendrá:

$$F_d = \left(\frac{P_T}{4\pi r^2} \right) G_T \left[W / m^2 \right] \quad (3.9)$$

Si el PIRE es el producto de la potencia transmitida por la ganancia de la antena transmisora, entonces expresado de dBW tendremos lo siguiente:

$$[PIRE]_{dBW} = 10 \log P_T + 10 \log G_T \left[dBW \right] \quad (3.10)$$

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

$$Potencia \text{ Capturada} = C = (F_d) [W / m^2] (A_{efectiva}) [m^2] \quad (3.11)$$

$$C = \left(\frac{P_T G_T}{4\pi r^2} \right) \cdot (A_{efectiva}) [W] \quad (3.12)$$

Sin embargo sabemos de la ecuación (3.1) que:

$$G_R = \eta \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \right) \cdot A_{física} \quad (3.13)$$

y considerando que el área efectiva de la antena es:

$$A_{efectiva} = \eta A_{física} \quad (3.14)$$

entonces la ecuación (3,13) queda de la forma:

$$G_R = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \right) \cdot A_{efectiva} \quad (3.15)$$

$$A_{efectiva} = \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} [m^2] \quad (3.16)$$

Sustituyendo la ecuación (3.16) en la (3.12)

$$C = \left(\frac{P_T G_T}{4\pi r^2} \right) \cdot \left(\frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \right) [W] \quad (3.17)$$

$$C = (PIRE) \cdot (G_R) \cdot \left(\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 r^2} \right) [W] \quad (3.18)$$

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

$$L_{e.l} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \quad (3.19)$$

De esta forma:

$$C = \frac{(PIRE)(G_R)}{L_{e.l}} [W] \quad (3.20)$$

Expresado en decibeles:

$$C_{dW} = [Potencia Recibida]_{dBW} = [PIRE]_{dBW} + [G_R]_{dBi} - [L_{e.l}]_{dB} \quad (3.21)$$

o bien:

$$C_{dW} = 10 \log P_T + [G_T]_{dBi} + [G_R]_{dBi} - [L_{e.l}]_{dB} \quad (3.22)$$

Esta ecuación es aplicable tanto para un enlace ascendente como descendente. En el caso ascendente la estación transmisora se ubica en la tierra y la receptora en el satélite. En el enlace descendente se tiene el caso inverso, sin embargo no hay que olvidar que las frecuencias en los enlaces de subida y bajada son distintas; es por

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

ello que es común expresar las pérdidas por espacio libre en términos de la frecuencia f en vez de la longitud de onda:

$$L_{e.l} = \left(\frac{4\pi r f}{c} \right)^2 \quad (3.23)$$

siendo c la velocidad de la luz.

Expresando en decibeles:

$$[L_{e.l}]_{dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi r f}{3 \times 10^8} \right) \quad (3.24)$$

Es común que para simplificar los cálculos se use la expresión en que r se sustituye directamente en kilómetros y f en Gigahertz, con lo que se obtiene:

$$[L_{e.l}]_{dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi r f \times 10^4}{3} \right)$$
$$[L_{e.l}]_{dB} = 20 \log r + 20 \log f + 92.44 \quad (3.25)$$

3.5 ATENUACIÓN POR ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA

Cuando las frecuencias de transmisión son lo suficientemente altas existe una interacción de éstas con las moléculas de los gases contenidos en la atmósfera, lo cual se ve reflejado como una atenuación en las señales que la atraviesan. Aunque en general toda señal se ve atenuada en su trayecto por la atmósfera cuando la frecuencia de una señal coincide con la frecuencia de resonancia del vapor de agua (H₂O), oxígeno (O₂) o bióxido de carbono (CO₂) entonces las atenuaciones son

mucho mayores. En el caso de los satélites de comunicaciones la única frecuencia de resonancia que afecta a las señales son las de vapor de agua centrada a los 22.2 GHz, y la del oxígeno situada en los 60 GHz.

En sentido estricto, la atenuación total acumulada sobre una señal depende de la longitud exacta del trayecto de la señal a través de cada una de las capas que componen la atmósfera. Es decir, depende del ángulo de elevación de la estación terrena, de su altitud, la temperatura y la densidad de vapor de agua. Sin embargo, la mayoría de estudios existentes al respecto toman como referencia una estación terrena a nivel del mar con una trayectoria en dirección al cenit, como la que se muestra en la figura 3.4, es decir directamente hacia arriba, de tal forma que si el ángulo de elevación de la estación terrena es distinto es necesario corregir la estimación de dicha absorción atmosférica por medio de la fórmula (3.26)⁽³⁾ cuando el ángulo de elevación θ se encuentra entre los 10° y 90° .

$$[L_{a.a}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \operatorname{cosec} \theta \quad (3.26)$$

donde:

L_{cenit} es la lectura obtenida de la figura 3.4

$L_{a.a}$ es la atenuación por absorción atmosférica para el ángulo θ

Para las bandas C y Ku que se encuentran por debajo de los 20 GHz las atenuaciones siempre son menores o cercanas a 1 dB, pero esto es en condiciones de cielo despejado. Cuando se tiene la presencia de lluvia estas atenuaciones se incrementan considerablemente como se verá en la siguiente sección.

3. Report **719-1** "Attenuation by gases" **CCIR** 15th Plenary Assembly, Geneva, Vol5, **1982**.

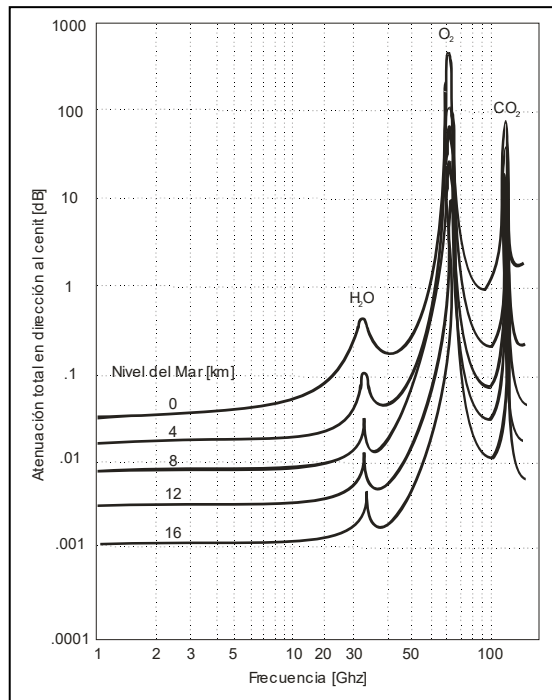


Figura 3.4 Atenuación por absorción atmosférica en dirección al cenit con temperatura de 20°C latitud 45° N y humedad moderada⁽⁴⁾

3.6 ATENUACIÓN POR LLUVIA

Cuando una señal atraviesa una región del aire donde hay precipitación pluvial, ésta se ve atenuada conforme avanza en el área donde llueve; la distancia total d que las señales viajan a través de la lluvia depende de la altura h de las nubes con relación al piso y del ángulo de elevación θ de la antena.

4. **HACBSS NEWS**
Department of Communications
No. 5 Septiembre 1985

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

Durante varias décadas se ha estudiado el fenómeno y propuesto diversos modelos para tipificar el efecto de la lluvia sobre las señales electromagnéticas, tal es el caso del método propuesto por Crane⁽⁵⁾ o el modelo DAH⁽⁶⁾ para la banda Ka.

Conforme la frecuencia de la portadora de una señal aumenta, la longitud de onda se hace cada vez más comparable al tamaño de las gotas de lluvia, estas funcionan como pequeñas antenas y tanto absorben como dispersan energía, por lo que conforme mayor es la frecuencia de la portadora el efecto de atenuación se hace más severo.

Existen dos tipos de modelos para determinar la atenuación por lluvia: empíricos y teóricos. Los modelos DAH tanto como los empleados por la UIT son de tipo empírico, sin embargo tienen la deficiencia de que aún no se tienen mediciones estadísticas para todas las frecuencias. Para el caso de los modelos teóricos como el de Crane se basan en el tamaño esperado de las gotas de lluvia para cada distribución de lluvia, estos modelos son aplicables a cualquier frecuencia pero obviamente requieren de un mayor trabajo de cálculo que en el caso de los métodos empíricos.

Para el cálculo de un enlace es de suma importancia tomar en cuenta la atenuación por lluvia, pero dado que no todo el tiempo está lloviendo, se hace necesario determinar el porcentaje de tiempo total en que determinado valor de precipitación pluvial en mm/h es excedido. Es común tomar como referencia de tiempo un año; de esta forma, cuando se menciona que se ha diseñado un enlace para un **intensidad de lluvia** de 0.01%, significa que, cuando llueva, la intensidad excederá el promedio durante un año tomado como referencia para esa zona, por lo que muy probablemente la señal esté por debajo del nivel necesario para una transmisión o

-
5. Crane, R. K.
Prediction of attenuation by rain
IEEE Trans. Communications, Vol COM-28, 1980
 6. Dissanayake, A. W.
A prediction model that combines rain attenuation and other impairments along Earth-Space paths
IEEE Trans. On Antennas and Propagation, Vol 45, No 10, 1997

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

recepción de calidad, entonces la señal no tendrá la calidad ideal por el 0.01% del año, es decir durante 53 minutos en un año. De esta forma se usa el concepto de **disponibilidad del enlace**, que se define como la diferencia de una disponibilidad del 100% y la intensidad o tasa de lluvia; de esta forma para una intensidad de lluvia del 0.01% tendremos una disponibilidad del enlace de 99.99% del tiempo en un año.⁽⁷⁾

Hoy en día se cuenta con datos estadísticos sobre la probabilidad acumulativa de las tasas de lluvia por áreas geográficas, para ello se han subdividido los continentes en regiones climáticas e hidrometeorológicas para cada una de las cuales se tienen distintas intensidades de lluvia. En la figura 3.5 se muestra la subdivisión del continente americano, hecha por la CCIR, en áreas geográficas para distintas intensidades de lluvia.

Los valores de intensidad de lluvia correspondientes a cada zona de la figura 3.5 se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Datos estadísticos de intensidad de lluvia para las regiones designadas por la CCIR

PEX *	Estadística de Tasa de Lluvia Acumulada														
	Intensidad de Lluvia Excedida (mm/h)														
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
1	<.01	0.5	0.7	2.1	0.6	1.7	3	2	8	1.5	2	4	5	12	24
0,3	0.8	2	2.8	4.5	2.4	4.5	7	4	13	4.2	7	11	15	34	49
0,1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
0,03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105	96
0,01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0,003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200	142
0,001	12	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250	170

* PEX: Porcentaje de tiempo excedido en un año [%]

7. Neri Vela, Rodolfo
Comunicaciones Por Satélite
 Thomson
 1ra Edición, México 2003
 Pg. 265

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

Es importante mencionar que de acuerdo con diversos estudios, se ha comprobado que una señal no se ve afectada de la misma forma por la lluvia en su trayectoria a través de ella, ni durante todo el tiempo que llueve y sin mencionar que se pueden tener distintas distribuciones de agua en algún fenómeno meteorológico como un huracán. De igual manera, la intensidad u distribución de la lluvia pueden variar de un año a otro. Por esta razón, para poder realizar los cálculos con un menor margen de error, la CCIR también publica mapas de contornos de intensidad de lluvia que es excedida por ciertos porcentajes de tiempo, en la figura 3.6 se muestra estos contornos correspondientes a un enlace con disponibilidad del 99.99%.⁽⁸⁾

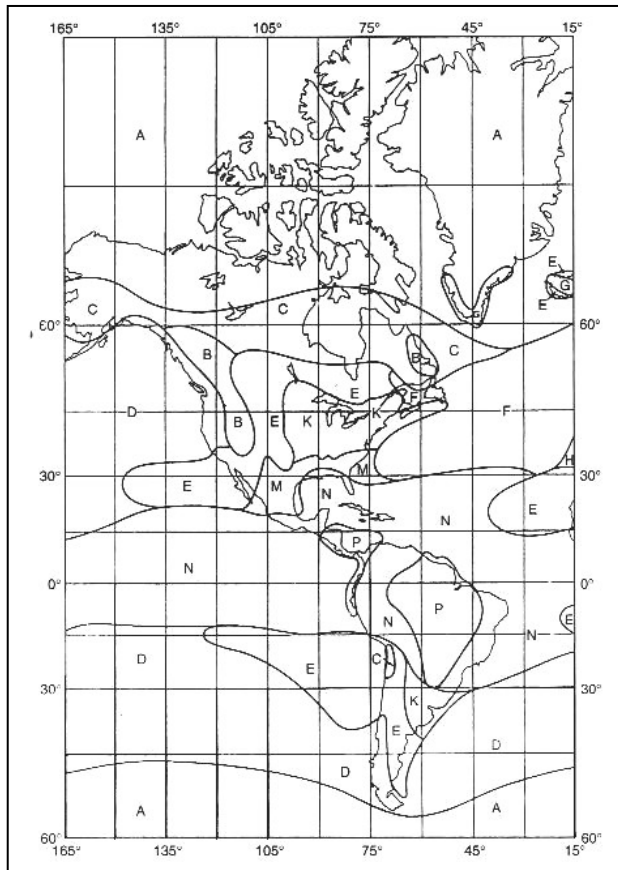


Figura 3.5 División del continente americano en áreas geográficas por intensidad de lluvia según la CCIR.

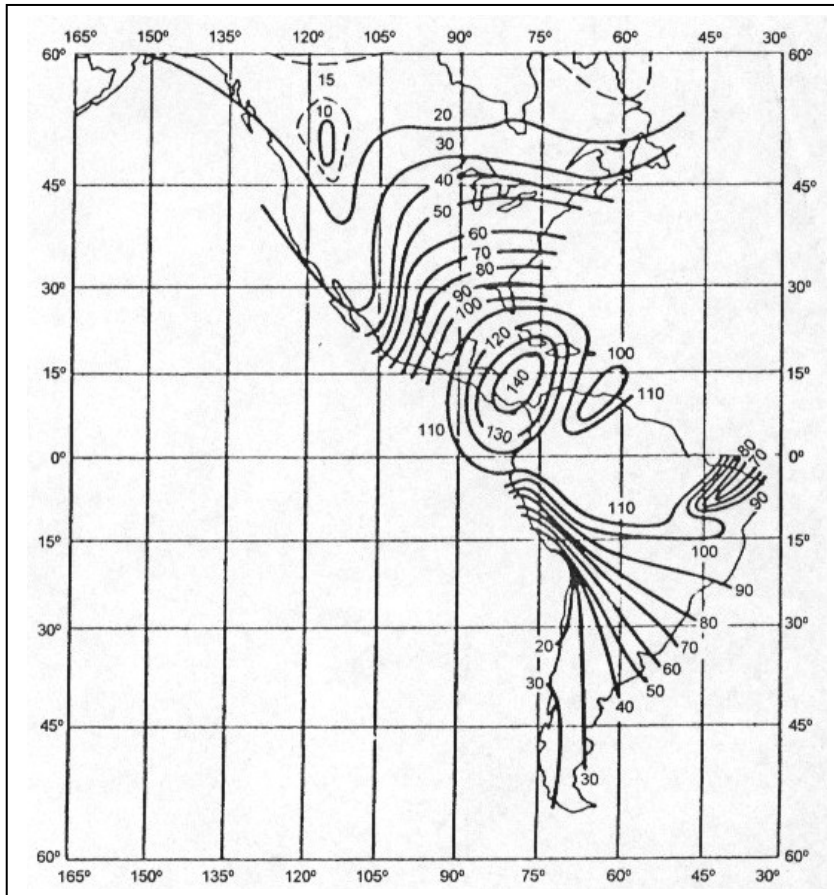


Figura 3.6 Contornos de intensidad de lluvia en mm/h que es excedida durante 0.01% del tiempo en un año según la CCIR.

8. Neri Vela, Rodolfo
Comunicaciones Por Satélite
Thomson
1ra Edición, México 2003
Pg. 267

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

Existen actualmente varios métodos para calcular la atenuación por lluvia, sin embargo se ha comprobado que el de la CCIR actualmente es el mejor en lo que respecta a precisión ⁽⁹⁾ en las bandas C y Ku. Aunque por otra parte es común que el dueño del satélite proporcione a los usuarios la información que se debe tomar sobre márgenes de lluvia que deben tomar en cuenta para sus cálculos de enlace, con lo que la tarea se simplifica en gran medida.

A continuación se presentan los pasos que recomienda el método publicado por CCIR en su reporte 564-4 publicado en 1990⁽¹⁰⁾.

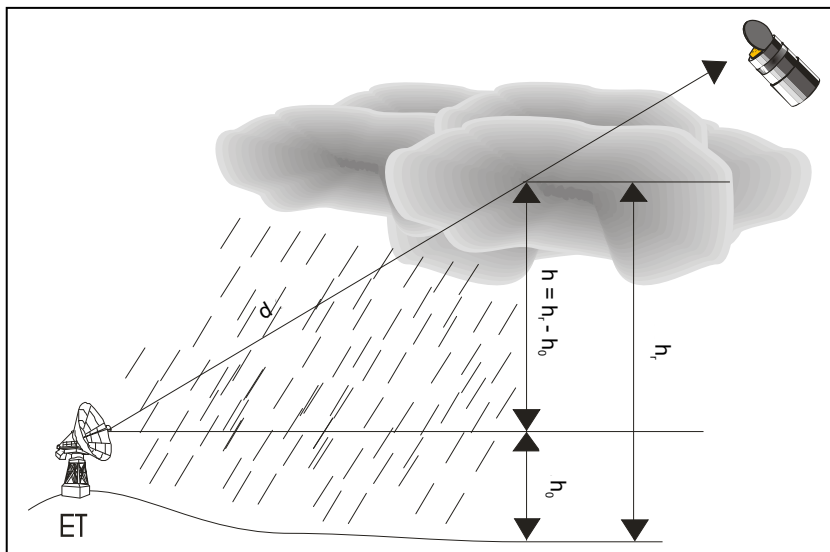


Figura 3.7 Modelo típico para realizar el cálculo de un enlace satelital.

-
9. Mauri, M
Italsat Propagation Experiments: an Update on the Available Results
Third Ka band utilization Conferencia, Sorrento Italia, Sept. 15-18, 1997
 10. Neri Vela, Rodolfo
Comunicaciones Por Satélite
Thomson
1ra Edición, México 2003
Pg. 269-273

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

1. Como ya se había mencionado, la distancia total d que las señales viajan a través de la lluvia depende de la altura h de las nubes con relación al piso y del ángulo de elevación θ de la antena según se muestra en la figura 3.7, es por ello que es necesario calcular h_r de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} h_r [km] &= 3 + 0.028l & 0^\circ \leq l \leq 36^\circ \\ h_r [km] &= 4 - 0.075(l - 36) & l \geq 36^\circ \end{aligned} \quad (3.26)$$

siendo l la latitud de la estación terrena, ya sea norte o sur.

2. Conocida h_r se calcula la longitud del trayecto oblicuo por la cual la señal atraviesa la lluvia.

$$d = \frac{h_r - h_0}{\text{sen}\theta} \quad (3.27)$$

siendo h_0 la altitud de la estación terrena sobre el nivel del mar expresada en kilómetros.

La CCIR indica que la ecuación (3.27) es válida en los casos en que $\theta \geq 10^\circ$ pero en caso contrario se recomienda usar la expresión (3.28) que considera la curvatura de la tierra.

$$d = \frac{d(h_r - h_0)}{\sqrt{\text{sen}^2\theta + \frac{2(h_r - h_0)}{R_e} + \text{sen}\theta}} [Km] \quad (3.28)$$

en donde R_e es el radio equivalente de la Tierra, 8,500 km aproximadamente.

3. A continuación hay que calcular un factor reductor designado como $r_{0.01}$ que es aplicable para una disponibilidad del 99.99% y que sirve para hacer un ajuste a

la distancia oblicua (d) y obtener la longitud efectiva, dicho factor toma en cuenta la no uniformidad de la distribución de la lluvia a diferentes alturas.

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + \left(\frac{d}{35 \cdot e^{-0.015 R_{0.01}}} \right) \cos \theta} \quad (3.29)$$

donde $R_{0.01}$ es la intensidad de la lluvia en [mm/hr] excedida 0.01% en un año.

4. El siguiente paso consiste en obtener un coeficiente de atenuación específica γ , expresado dB/km.

$$\gamma = a \cdot R_{0.01}^b \left[\frac{dB}{Km} \right] \quad (3.30)$$

donde a y b son coeficientes de atenuación específica que dependen de la polarización y de la frecuencia de la señal, se calculan teóricamente tomando como base la propagación electromagnética a través de gotas de lluvia. Estos coeficientes ya han sido calculados para varias frecuencias y polarizaciones, en la tabla 3.2 se dan algunos de los valores publicados por la CCIR⁽¹⁰⁾ para polarizaciones lineal horizontal y lineal vertical, si la polarización de la señal es circular, se hace un promedio de los coeficientes de dicha tabla son las siguientes fórmulas.

$$a_c = \frac{a_h + a_v}{2} \quad (3.31) \quad \text{y} \quad b_c = \frac{a_h \cdot b_h + a_v \cdot b_v}{2 \cdot a_c} \quad (3.32)$$

10. **Attenuation by Hydrometeors en Particular Precipitation, and other Atmospheric Particles**
Vol V, Reporte 564-2, 192

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

Tabla 3.2 Coeficientes de atenuación específica para polarización horizontal y vertical publicados por la CCIR⁽¹⁰⁾

Frecuencia [GHz]	a_h	a_v	b_h	b_v
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
2	0.0001544	0.000138	0.963	0.923
4	0.000650	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
10	0.0101	0.0087	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.200
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
30	0.187	0.167	1.021	1.000

donde a_h y b_h son los coeficientes para polarización horizontal y a_v y b_v para polarización vertical.

Los valores de los coeficientes a y b también pueden ser aproximados por las siguientes expresiones empíricas, con f en GHz, para ciertos rangos de frecuencia.

$$a = 4.21 \times 10^{-5} f^{2.42} \quad 2.9 \text{GHz} \leq f \leq 54 \text{GHz}$$

$$b = 1.41 f^{-0.0779} \quad 8.5 \text{GHz} \leq f \leq 25 \text{GHz}$$

Al utilizar estas dos aproximaciones se supone que los coeficientes son iguales para ambas polarizaciones, sin embargo el error es poco ya que se puede ver que en efecto son casi iguales, y que son mucho más dependientes de la frecuencia que de la polarización.

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

5. Finalmente la atenuación por lluvia (L_{lluvia}) para una disponibilidad del 99.99% estará dada por:

$$L_{lluvia0.01} = \gamma \cdot d \cdot r_{0.01} \quad (3.33)$$

6. En el caso de una disponibilidad distinta al 99.99% e igual a (100%-p) la atenuación obtenida en el paso 5 se multiplica por el siguiente factor.

$$\left[0.12p^{-(0.546+0.043\log(p))}\right] \quad (\text{Margen de Lluvia, Rain Margin}) \quad (3.34)$$

Por lo tanto:

$$L_{lluvia p} = \left[0.12p^{-(0.546+0.043\log(p))}\right] \bullet L_{lluvia0.01} \quad (3.35)$$

Para calcular el ángulo de elevación θ se usa la siguiente expresión.

$$\theta = \text{ang} \cos \left\{ \frac{(\cos \theta)(\cos \Delta L) - \frac{R_e}{h}}{\text{sen}[\text{ang} \cos((\cos \theta)(\cos \Delta L))]} \right\} \quad (3.36)$$

Donde: $R_e=6.378$ [Km]

$h = 42.164$ [Km]

l = latitud de la estación terrena

$\Delta L = | \text{longitud del satélite} - \text{longitud de la estación terrena} |$

Existe otro modelo para la predicción de atenuación por lluvia, el modelo DAH⁽¹¹⁾, este modelo totalmente empírico es particularmente útil en las banda Ka, donde el modelo propuesto por la CCIR ya no es tan efectivo. De hecho, este modelo ha sido adoptado por la UIT a partir de 1999; sin embargo para la banda Ku es preferible utilizar el modelo planteado por la CCIR ya que es teórico y los resultados obtenidos mediante él son muy aproximados a resultados estadísticos.

3.7 PÉRDIDAS POR DESAPUNTAMIENTO

La ecuación (3.2) que aquí se repite nos permite calcular la ganancia máxima de la antena, es decir la ganancia en la dirección en que se tiene mayor concentración de potencia.

$$G_{m\acute{a}x} = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda^2} \right)^2 \quad (3.37)$$

donde: D es el diámetro de la antena

λ es la longitud de onda de la frecuencia de operación

η es la eficiencia de la antena

En el caso ideal la antena transmisora y receptora se encuentran con sus ejes de máxima radiación alineados, en este caso se dice que los ejes de las antenas están alineados por lo que las ganancias de ambas antenas se aprovechan al máximo. Sin embargo esta situación rara vez ocurre en la práctica, por lo que es normal tener pérdidas por desapuntamiento de las antenas. Estas pérdidas pueden ser calculadas según la ecuación 3.2 y la figura 3.8 como se indica en la ecuación 3.38 y 3.39.

$$[L_{transmisor}]_{dB} = [L_T]_{dB} - 12 \left(\frac{\alpha_T}{\theta_{-3dB}} \right)^2 [dB] \quad (3.38)$$

-
11. Landeros, S., Neri, R., Cruz, H. y Hernández H.,
Cálculo de atenuación por lluvia usando el modelo DAH y diámetros de antena para la banda Ka en México
Ingeniería, Investigación y Tecnología
UNAM, Vol. II, No.1 Enerp-Marzo 2002

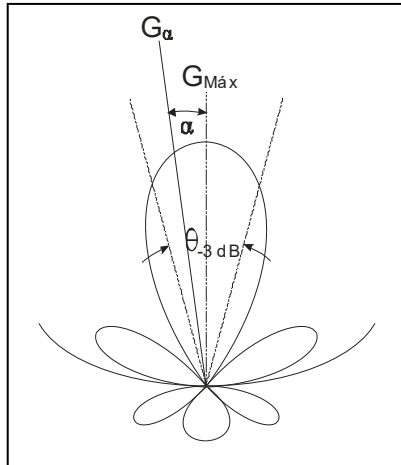


Figura 3.8 Ganancia G_α en una dirección que forma un ángulo de α con el eje principal de la antena.

$$[L_{receptor}]_{dB} = [L_R]_{dB} - 12 \left(\frac{\alpha_R}{\theta_{-3dB}_R} \right)^2 [dB] \quad (3.39)$$

para:

$$\left(0^\circ \leq \alpha \leq \frac{\theta_{-3dB}}{2} \right)$$

en donde α_T es el ángulo en grados entre los ejes de la antena terrestre transmisora y la antena del satélite; α_R es el ángulo comprendido entre los dos puntos de media potencia del lóbulo principal del patrón de radiación de la estación terrena. Como se muestra en la figura 3.9.

Las ecuaciones (3.38) y (3.39) determinan las pérdidas por desapuntamiento en el enlace ascendente y el descendente respectivamente y estas pérdidas de ganancia deberán ser restadas a la potencia de una señal resultante durante el cálculo del enlace.

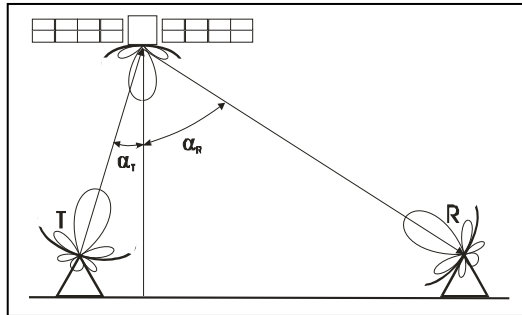


Figura 3.9 Modelado de la orientación de las antenas transmisora y receptora en un enlace.

3.8 PÉRDIDAS POR CONECTORES

En un enlace satelital cuando la señal es transmitida o recibida, ésta debe recorrer la línea de transmisión que se encuentra entre el alimentador de microondas y el amplificador tanto del lado del receptor como del transmisor. Durante este recorrido la señal es atenuada por la línea de transmisión, por lo tanto las pérdidas de potencia L debidas a la línea de transmisión y a los conectores deben ser consideradas al momento de realizar el cálculo del enlace. Estas pérdidas de potencia dependen tanto de la longitud de onda de la señal portadora, como del material con que han sido fabricados; de esta forma en la banda C, la atenuación debida a conectores y guías de onda de $\%m$ es del orden de 0.4 dB y es ligeramente mayor en las bandas Ku y Ka. Sin embargo es importante hacer notar que cuando se cuenta con los contornos de PIRE de un satélite, estas pérdidas de potencias ya han sido consideradas.

3.9 RUIDO EN UN ENLACE SATELITAL

En el transcurso de la estación terrena al satélite o viceversa la potencia de la portadora disminuye drásticamente de tal forma que la señal recibida es del orden de nanowatts o picowatts. Estos niveles de potencia son muy bajos. Sin embargo, en el caso ideal, con simplemente amplificar la señal ésta podría alcanzar el nivel de potencia suficiente para ser procesada pero en la realidad esto no ocurre ya que a

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

la entrada del receptor siempre hay ruido presente que se añade a la portadora, con lo que recuperar la información aún amplificando la señal se hace más complicado. El ruido es toda señal no deseada contenida en la misma banda de la portadora que se añade a ésta enmascarándola. Es importante entonces que aún después de que la señal ha sido atenuada durante el recorrido entre la antena del satélite y la estación terrena, su nivel de potencia sea lo suficientemente mayor a la señal de ruido, de tal forma que la portadora pueda ser distinguida sin problemas del ruido. Es importante mencionar que aun amplificando la señal recibida el amplificador incrementará la potencia, tanto de la señal portadora como la del ruido, por lo que la relación de potencias se conservará o incluso empeorará ya que todo equipo electrónico añade ruido interno al sistema de comunicaciones. De aquí es que surge la importancia de que un enlace satelital pueda garantizar que la relación de potencias entre la portadora y el ruido sea igual o mayor a un cierto valor de umbral, de tal forma que la información útil pueda ser recuperada con confiabilidad.

El ruido eléctrico en el equipo receptor y en los amplificadores es debido principalmente al movimiento térmico aleatorio de los electrones en su interior al que se le nombra **ruido térmico**, aunque también los conectores y guías de ondas añaden ruido a la señal, al igual que las radiaciones provenientes del espacio exterior o desde la tierra. En pocas palabras, son varias las fuentes de ruido térmico que degradan una señal en un enlace satelital, las que deben ser consideradas para el cálculo de un enlace satelital se muestran en la tabla 3.3 y cada uno de los cuales será estudiado.

Tabla 3.3 Fuentes de ruido⁽¹¹⁾

Enlace ascendente/descendente
Amplificadores
Guías de onda y conectores en la estación terrena
Guías de onda en el satélite
Radiaciones indeseables
Lluvia

3.9.1 Ruido térmico

La potencia N del ruido producido por una fuente de ruido térmico puede ser calculado mediante la fórmula siguiente:

$$N = kTB \quad (3.40)$$

Donde k es la constante de Boltzman igual a 1.38×10^{-23} [J/K]

T es la temperatura de ruido equivalente

B es el ancho de banda del ruido

Si T se sustituye en grados Kelvin y B en Hertz entonces N tiene unidades de Watts

Una característica importante del ruido térmico es que es constante a lo largo del ancho de banda de interés por lo que también se le conoce como ruido blanco y sirve como base para el cálculo del coeficiente de **densidad de ruido** (N_0) que es la potencia de ruido que existe en una Hertz y resulta muy útil para el cálculo de enlaces satelitales.

$$N_0 = \frac{N}{B} \left[\frac{W}{Hz} \right] = kT \quad [J] \quad (3.41)$$

Cuando se calcula el ruido térmico de un amplificador, esto se realiza a su entrada aunque el ruido se produzca dentro de él. Esto se debe a que para fines de facilitar los cálculos siempre se considera al amplificador como un elemento ideal con una resistencia en serie a la entrada que genera la misma cantidad de potencia de ruido que el amplificador donde dicha potencia aumenta con la temperatura física del amplificador. De esta forma, la **temperatura de ruido** del amplificador será entonces aquella temperatura equivalente T_e de la resistencia, que genera la misma potencia de ruido a la salida del amplificador ideal, es decir, es una medida del ruido generado por todos los componentes internos del aparato. Dado que el amplificador tiene una ganancia G , el ruido total generado será igual a $G(kT_e B)$; de esta forma es entonces posible calcular el ruido térmico a la entrada del amplificador empleando la temperatura equivalente de ruido T_e que proporciona el fabricante, la cual se

relaciona directamente con la temperatura física que el fabricante proporciona como dato, aunque no es necesariamente igual a ella.

3.9.2 Figura de ruido

Es común que para un amplificador en las bandas Ku y Ka en vez de indicar la temperatura de ruido el fabricante proporcione la **figura de ruido**. Esta se define como el cociente de la potencia total del ruido a la salida del amplificador sobre la componente o parte de dicha potencia que se tenía a la entrada, asumiendo que a la entrada se tenía una temperatura de ruido T_0 igual a la temperatura ambiente de referencia de 290 K, es decir se considera que el ruido a la entrada será amplificado junto con el ruido interno del amplificador. Es decir, el ruido total a la salida del amplificador se obtiene a partir de la ecuación 3.40 sustituyendo como T a la suma de las temperaturas de ruido T_0 y T_e multiplicadas por la ganancia del amplificador, como se indica en la ecuación (3.42).

$$N_{salida} = G[k(T_0 + T_e)B] \quad (3.42)$$

La parte de esta potencia que se debe al ruido que ya existía a la entrada es:

$$N_{parcial} = G[kT_0B] \quad (3.43)$$

de esta forma la figura de ruido F de que se había hablado quedará de la siguiente manera.

$$F = \frac{N_{salida}}{N_{parcial}} = \frac{T_0 + T_e}{T_0} = 1 + \frac{T_e}{T_0} \quad (3.44)$$

de tal forma que si el fabricante proporciona el valor de F en dB, la temperatura de ruido equivalente del amplificador podrá obtenerse despejando de la ecuación 3.44 quedando de la siguiente forma.

$$T_e = T_0(F - 1) = 290(F - 1) \quad (3.45)$$

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

Se puede ver que mientras F sea más cercana a 1 (0 dB), mejor será el amplificador, pues T_e disminuye.

3.9.3 Temperatura de ruido de varios amplificadores en cascada

Es común que un sistema de recepción ya sea en el satélite o en la estación terrena consista de varios componentes electrónicos conectados en serie. Suponiendo una configuración de dos amplificadores como la que se muestra en la figura 3.10 donde a cada amplificador le corresponde una temperatura de ruido y ganancia específica, entonces a la salida del conjunto se tendrá:

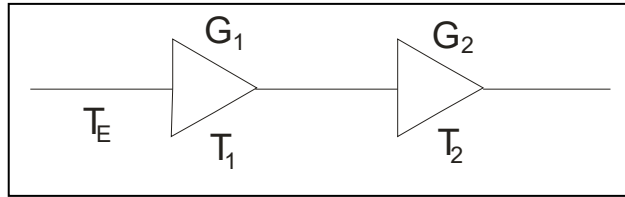


Figura 3.10 Dos amplificadores en cascada

$$T_{\text{salida conjunto}} = (T_1 G_1) G_2 + T_2 G_2 \quad (3.46)$$

Por otra parte, si la temperatura del ruido total a la entrada de la pareja fuese T_e , se tendría a la salida del conjunto:

$$T_{\text{salida conjunto}} = T_e (G_1 G_2) \quad (3.47)$$

igualando las ecuaciones (3.46) y (3.47) se obtiene:

$$(T_1 G_1) G_2 + T_2 G_2 = T_e (G_1 G_2)$$
$$T_e = T_1 + \frac{T_2}{G_1} \quad (3.48)$$

En el caso generalizado de la figura 3.11 se tendrá:

$$T_e = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 G_2} + \frac{T_4}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{T_n}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad (3.49)$$

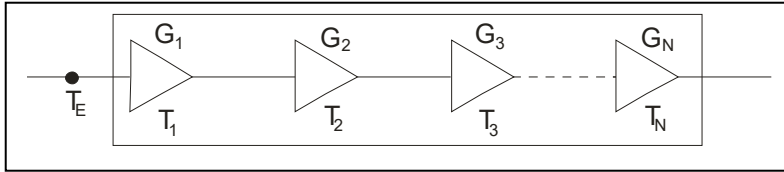


Figura 3.11 N amplificadores en cascada

Es importante notar que la principal contribución a la temperatura de ruido equivalente del conjunto es del primer amplificador, y el resto de las contribuciones se hacen cada vez mas pequeñas y tienden a hacerse despreciables. Esta es la razón por la que se busca tener un preamplificador de bajo ruido en la primer etapa de un conjunto de amplificadores en serie.

3.9.4 Temperatura de ruido de un atenuador

Todo elemento pasivo que puede ser considerado o modelado como una resistencia es un atenuador. En un enlace satelital los atenuadores que se tienen son las líneas de transmisión y los conectores así, como la lluvia. La temperatura de ruido de estos atenuadores depende del grado de atenuación y de la temperatura ambiente o física T_f que tengan. Si un atenuador produce una atenuación L , entonces la temperatura de ruido T_L del mismo, referida a la salida, será:

$$T_L = T_f \left(1 - \frac{1}{L} \right) [K] \quad (3.50)$$

La temperatura T_f es igual a temperatura ambiente del atenuador. Para objetos en la superficie terrestre se considera igual a 289 K, para las nubes se considera 270 K, y para la lluvia 280 K, aunque se pueden tener variaciones⁽¹¹⁾. Por definición, la atenuación L es el cociente de la potencia de entrada P_i entre la potencia de salida P_o .

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

$$L = \frac{P_i}{P_o} \quad (3.51)$$

De esta forma la potencia total a la salida del atenuador, N_o , es igual a la potencia del ruido que entra, N_i , pero atenuada afectada por atenuación L , más la potencia del ruido generado por el propio atenuador, N_L :

$$N_o = \frac{N_i}{L} + N_L = \frac{kT_i B}{L} + kT_L B \quad (3.52)$$

en donde T_i es la temperatura física del atenuador, es decir T_f . También se puede considerar que, T_o a la salida del atenuador es igual a T_f .

$$N_o = kT_o B = kT_f B \quad (3.53)$$

de las ecuaciones (3.52) y (3.53) dividiendo además entre kB , se tiene:

$$T_f = \frac{T_f}{L} + T_L$$

$$T_L = T_f \left(1 - \frac{1}{L} \right) \quad (3.54)$$

Esta expresión es igual a la (3.50). Hay que tomar en cuenta que esta temperatura de ruido está referida a la salida del atenuador, en un punto idéntico a la entrada del preamplificador de bajo ruido, de tal forma que pueden sumarse correctamente las temperaturas de ruido de ambos.

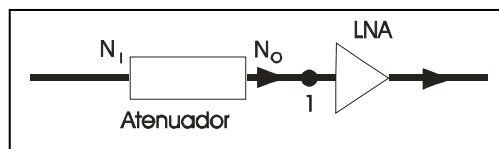


Figura 3.12 En el punto 1 se suman las temperaturas de ruido del atenuador (referida a su salida) y del ABR (referida a su entrada).

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

Si se quisiera conocer la temperatura de ruido del atenuador pero referida a la entrada del mismo, se puede hacer dividiendo todo el ruido de salida entre su ganancia de potencia ($1/L$).

$$T_L = T_f \left(1 - \frac{1}{L}\right) = T_f (L - 1) \quad (3.55)$$

Tomando como referencia la temperatura ambiente T_0 igual a la temperatura física $T_f = 290$ K entonces:

$$F = 1 + \frac{T_e}{T_0} \text{ igual a la expresión (3.44)}$$

entonces

$$T_e = T_0 (F - 1) \quad (3.56)$$

se puede ver entonces de las ecuaciones (3.56) y (3.55) que para el atenuador con "ganancia" $1/L$, la figura de ruido F es igual a la atenuación L que produce.

3.9.5 Temperatura de ruido de una antena para el enlace de bajada

La antena de una estación terrena puede percibir ruido de distintas fuentes, como son, interferencias con enlaces terrestres, ruido producido por lluvia, ruido cósmico, ruido solar, ruido galáctico, ruido atmosférico, etc.

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

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

El ruido cósmico proviene de radiaciones que se originaron desde partes muy profundas del universo y tiene una temperatura de 2.76 K en frecuencias de radio. En cambio, el ruido galáctico proviene de nuestra galaxia y aumenta conforme mayor concentración de estrellas se tenga, es dependiente de la frecuencia y puede alcanzar valores en su temperatura de hasta varias decenas de grados Kelvin. Por otra parte, el ruido generado por la atmósfera y que es captado en su mayoría por el lóbulo principal, depende tanto de la frecuencia como del ángulo de elevación de la antena aunque generalmente es bajo. En la figura 3.13 se muestra una curva que denota el efecto combinado de las temperaturas de ruido generadas por el ruido cósmico, el ruido galáctico y el atmosférico (que es generado principalmente por la troposfera) de la antena de una estación terrena.

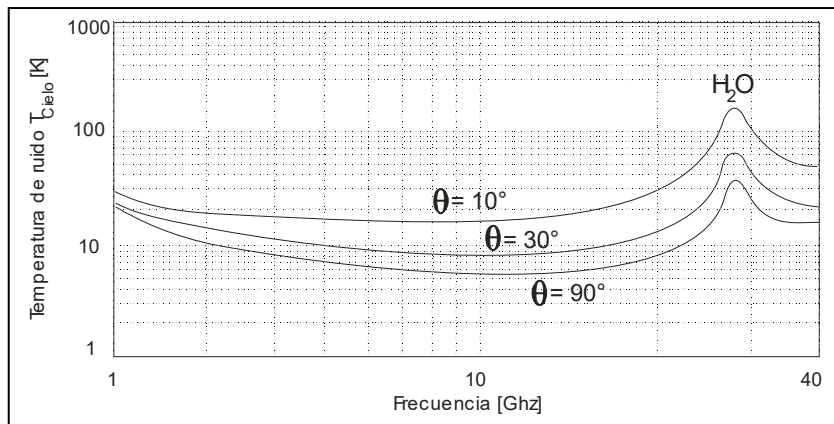


Figura 3.13 Contribución en conjunto del ruido cósmico, galáctico y atmosférico para la temperatura de ruido de una antena en una estación terrena ⁽¹²⁾.

Las curvas de la figura 3.13 son dadas para condiciones de cielo despejado ($T_{c,d}$) por lo que no hay lluvia presente, para el caso en que si se tiene lluvia es necesario establecer el margen de lluvia, en estos casos el fenómeno meteorológico añade ruido al sistema el cual se calcula mediante la ecuación (3.54) con una temperatura física $T_f = a 280$ K, de esta forma la temperatura de ruido generada por la lluvia se obtiene como se indica en la ecuación 3.57.

$$T_{lluvia} = 280 \left(1 - \frac{1}{L_{lluvia}} \right) [K] \quad (3.57)$$

donde L_{lluvia} se obtiene a partir de las ecuaciones (3.33) y (3.35), el valor de 280 K es para el caso extremo de precipitación pluvial, como es un huracán. La posibilidad de una situación similar es poca y muchas veces la señal de TV bajo estas condiciones deja de estar disponible, ya que para mantener la disponibilidad de una señal en estas condiciones se requeriría de una potencia de transmisión muy elevada en el satélite lo que resulta muy costoso.

Por otra parte en lo que respecta al ruido solar éste puede ser considerado despreciable, excepto en la situación cuando se encuentran alineados el haz principal de la antena de la estación terrena, el satélite y el sol, En este caso la señal puede incluso perderse por completo por unos instantes hasta que el sol salga del lóbulo principal del patrón de radiación de la antena, sin embargo esta situación es poco común y en la mayoría de los casos el ruido solar tanto como el lunar que se introduce a través de los lóbulos laterales puede ser despreciado. No ocurre lo mismo con el ruido térmico generado por la tierra ya que los niveles captados por los lóbulos laterales sí son de consideración y es necesario añadirlo a la temperatura de cielo despejado. Una aproximación para la contribución terrestre a la temperatura de ruido se puede expresar de la siguiente manera.

$$T_{tierra} = 50K \quad \text{si } 0^\circ < \theta < 10^\circ \quad (3.58)$$

$$T_{tierra} = 10K \quad \text{si } 10^\circ < \theta < 90^\circ \quad (3.59)$$

11. Crane, R. K.
Propagation Phenomena affecting Satellite Communications Systems
Proc. IEEE, Vol. 59, 1971, pp 173-188

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

Sin embargo, estas relaciones no son precisas e introducen bastante incertidumbre, ya que la T_{tierra} no depende sólo del ángulo de elevación θ , sino también del diámetro, geometría de la antena, patrón de radiación y frecuencia. La única forma de conocer con exactitud la temperatura de ruido de una antena determinada es realizando una medición para distintos ángulos de elevación, sin embargo aquí se presentan valores⁽¹³⁾, en la figura 3.14, que resultan una muy buena aproximación para situaciones prácticas por lo que es recomendable usarlos, también existen

$$T_{antena} = 15 + \frac{30}{d} + \frac{180}{\theta} [K] \quad (3.60)$$

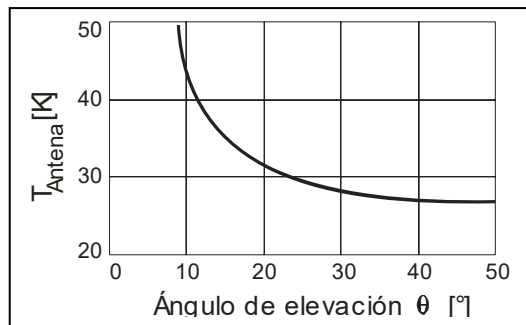


Figura 3.14 Aproximación de la temperatura de ruido de una antena *offset* de 2.4 m de diámetro en la banda Ku.

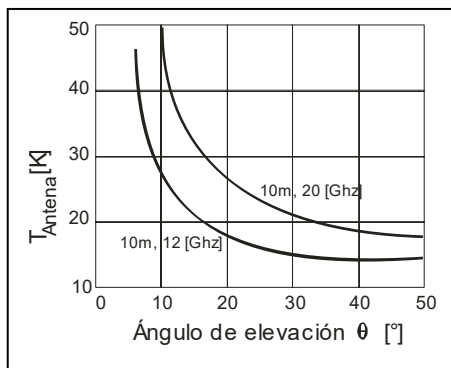


Figura 3.15 Temperatura de ruido de una antena en función del ángulo de elevación

algunas gráficas publicadas por la UIT como la mostrada en la figura 3.15 para antenas de 10 m de diámetro, en las bandas Ku y Ka, que ya contienen todas las contribuciones de ruido a excepción de la lluvia. Sin embargo es común que el fabricante de la antena proporcione estos datos, una forma aproximada de calcular la temperatura total de ruido de la antena en la banda Ku es mediante la siguiente expresión⁽¹⁴⁾.

3.9.6 Temperatura de ruido de una antena para el enlace de subida

En el caso del enlace ascendente el cálculo de la temperatura de ruido es mucho más simple que para el caso de un enlace de bajada ya que las antenas de los satélites apuntan siempre hacia la tierra y su haz principal abarca pequeñas porciones de la esfera terrestre por lo que recibe toda la radiación térmica de la tierra lo que provoca que su temperatura equivalente de ruido sea muy aproximada a los 290 K, y aunque este dato puede variar ligeramente dependiendo si el haz principal enfoca tierra o mar (el mar radia menos ruido) o si se trabaja a una u otra frecuencia, la aproximación es muy buena y se recomienda usar a menos que se disponga de un dato más preciso⁽¹³⁾.

Es importante hacer notar que la presencia de lluvia sobre la tierra no afecta casi en nada la calidad del enlace de subida porque la presencia de lluvia nunca es sobre toda la superficie terrestre a la vez sino que se limita a áreas pequeñas por lo que el promedio de temperatura de toda la tierra prácticamente permanece igual por lo que no se afecta demasiado el enlace satelital, en el caso de que la lluvia fuera lo suficientemente intensa como para degradar la calidad del enlace ascendente se puede aumentar la potencia de transmisión y el problema quedara resuelto.

13. Neri Vela, Rodolfo
Comunicaciones Por Satélite
Thomson
1ra Edición, México 2003
Pg. 325

14. Stephenson, D. J
Newness Guide to Satellite TV Installation
Newnes, Oxfon, 1994

3.10 RUIDO DE INTERMODULACIÓN

Además del ruido térmico, las señales portadoras y demás ruidos, una portadora puede ser afectada por lo que se conoce como **ruido de intermodulación**. Este ruido tiene la característica de ser generado en el interior de los amplificadores de potencia. El ruido de intermodulación tiene lugar tanto en los amplificadores transmisores del satélite como de la estación terrena cuando trabajan con más de una portadora situación a la que se le conoce como **operación multiportadora**. La cantidad de ruido de intermodulación es directamente proporcional a la cantidad de portadoras así como de la potencia que se demanda tener a la salida del amplificador hasta llegar al caso en que se llega al punto de saturación del amplificador en cuya situación el ruido de intermodulación será máximo. Es por esta razón que es necesario operar el amplificador de potencia por debajo de su punto de saturación.

Siempre que se tenga más de una portadora existirá ruido de intermodulación y este se incrementará conforme más portadoras se tengan, de tal forma que para reducir este ruido se hace necesario reducir la potencia en el amplificador de salida, lo que provoca que mientras más portadoras se tengan menor será la potencia con la que opere el amplificador.

La característica de transferencia no lineal de potencia de un amplificador puede ser expresada mediante una serie de Taylor, relacionando al voltaje de entrada v_i con el voltaje de salida v_o como se muestra a continuación:

$$v_o = a_1 v_i + a_2 v_i^2 + a_3 v_i^3 + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} a_n v_i^n \quad (3.61)$$

donde el valor de cada uno de los coeficientes depende de las características de transferencia del aparato.

Con excepción del primer término, todos los demás producen ruido de intermodulación, ya sea dentro o fuera de la banda; sin embargo, el que más influye en cuanto a contribución de ruido dentro de la banda es el término de tercer orden.

Cuando se tienen dos portadoras de distintas amplitudes se puede demostrar que si la portadora de mayor intensidad está del lado derecho como se muestra en la figura 3.16a, entonces los productos de intermodulación de mayor potencia de la ecuación (3.61) quedan a la derecha de la portadora. Análogamente, si la portadora de mayor intensidad queda a la izquierda como se ve en la figura 3.16b; por lo tanto es recomendable que las portadoras de mayor potencia se ubiquen a los extremos del ancho de banda de cada transpondedor; de esta forma los productos de intermodulación más potentes quedarán fuera del ancho de banda del transpondedor ⁽¹⁵⁾.

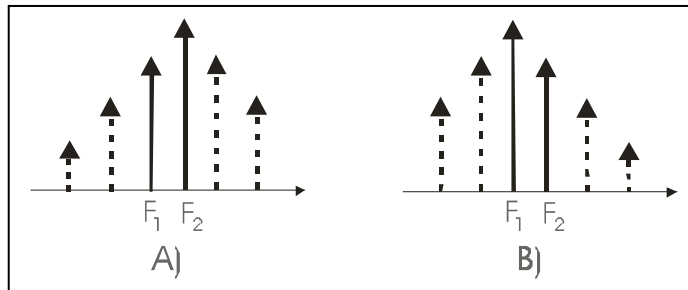


Figura 3.16 Intermodulación generada por un par de portadoras (las portadoras aparecen como líneas continuas y las armónicas aparecen como líneas punteadas)

Los sistemas que trabajan sobre el esquema el acceso múltiple FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia) son particularmente sensibles al ruido de intermodulación, porque dentro del transpondedor siempre se tienen muchas portadoras simultáneas, por lo que es necesario reducir la potencia de salida del amplificador para poder trabajar en una región más lineal del amplificador. A esta reducción de potencia se le conoce como **back-off** que generalmente se expresa en dB. En los sistemas TDMA el back-off necesario es de 1 a 2 dB, dependiendo del número de portadoras.

15. Westcott, J
Investigation of multiple f.m./f.d.m carriers through a satellite near to saturation
Proc. IEEE Vol 114 No.6 Junio 1967

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

En la figura 3.17 se muestran algunas curvas comunes de la relación portadora/ruido de intermodulación $(C/N_0)_i$ en función del número N de portadoras y el back-off de entrada. Por lo general estas curvas son proporcionadas por el fabricante del satélite.

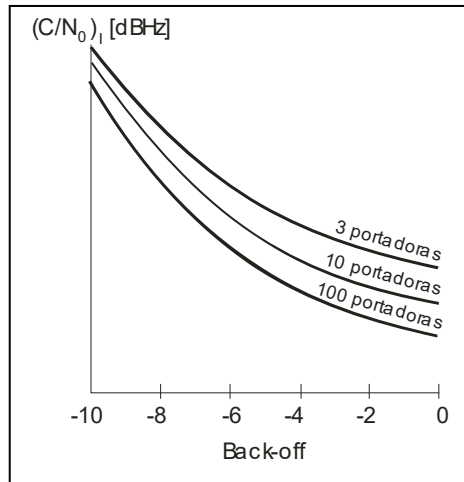


Figura 3.17 Relación portadora/ruido de intermodulación en función del back-off de entrada y del número de portadoras.

3.11 FACTOR DE CALIDAD O FIGURA DE MÉRITO (G/T)

El valor del cociente G/T (Ganancia/Temperatura de ruido) conocido como **factor de calidad o figura de mérito** es una cantidad que define las cualidades de recepción de una estación terrena, y qué valor mínimo se debe tener de él para que el enlace funcione de forma aceptable.

Dado que la ganancia está expresada en dB y la temperatura de ruido en grados Kelvin, entonces las unidades de la figura de mérito es dB/K, y se define como sigue:

$$\left[\left(\frac{G}{T} \right)_{sat} \right]_{\frac{dB}{K}} = \left[\frac{(G_R)_{m\acute{a}x}}{T_s} \right] - L_{conectores} - L_{conectores\ receptor} \quad (3.62 a)$$

El valor del G/T para cada satélite depende de las características de su antena (ganancia y su patrón de radiación), del número de transpondedores y en general del sistema de comunicaciones, así como de la posición de la estación terrena transmisora dentro de la huella de iluminación del satélite. Es por esta razón que en algunos casos el valor del coeficiente G/T es cercano a 0 dB/K o incluso negativo, un rango de valores un poco exagerado que puede tomar el coeficiente G/T es de -20 a 10 dB/K.

Cuando se realiza el cálculo de un enlace es necesario conocer el patrón de radiación de la antena para determinar el valor del PIRE que se ha de utilizar. Sin embargo como el patrón de radiación de las antenas con huellas irregulares es similar tanto en la transmisión como en la recepción, aún siendo distintas las frecuencias en el enlace ascendente y descendente, conviene usar los contornos de G/T (que son proporcionados por el fabricante), porque ya contienen la información de ganancia de la antena, en la frecuencia de subida, en la dirección donde se ubica determinada ciudad, así como la temperatura de ruido proveniente de esa dirección.

3.12 DENSIDAD DE FLUJO DE SATURACIÓN Y ENLACE ASCENDENTE

El concepto de densidad de flujo de saturación sirve para conocer qué niveles de potencia se deben recibir en el satélite para que un transpondedor llegue a la saturación y otras condiciones que garanticen un óptimo funcionamiento del enlace.

Para poder calcular la relación portadora sobre ruido hay que sumar todas las contribuciones de ganancia y pérdidas por atenuación y restar el factor de ruido térmico N_o que como se vio en la ecuación (3.41) es igual a kT . Todos los términos anteriores deben ser expresados en dB, por lo que la relación queda de la siguiente forma.

$$\left(\frac{C}{N_o} \right)_{\text{ascendente}} = \underbrace{\text{PIRE}}_{\text{est.terrena [dBW]}} - \underbrace{L_{\text{propagación}}}_{[\text{dB}]} + \underbrace{\left(\frac{G}{T} \right)_{\text{sat}}}_{[\text{dB/K}]} - 10 \log k \quad [\text{dBHz}] \quad (3.62 \text{ b})$$

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

Donde $L_{\text{propagación}}$ incluye, además de las pérdidas por propagación en espacio libre, las pérdidas por absorción atmosférica, las de atenuación por lluvia, y por desapuntamiento, De la ecuación (3.9) se tiene que la densidad de flujo de potencia, F_d , que llega al satélite y el PIRE de la estación terrena están relacionados de la siguiente forma:

$$F_d = \left(\frac{PIRE}{4\pi r^2} \right) [W / m^2] \quad (3.63)$$

siendo r la distancia entre la estación terrena y el satélite. A la densidad de flujo F_d se le acostumbra designar con la letra Φ de tal forma que la ecuación (3.63) puede ser reescrita de la siguiente forma:

$$\phi = \left(\frac{PIRE}{4\pi r^2} \right) [W / m^2] \quad (3.64)$$

si por otra parte consideramos de la ecuación (3.19) que las pérdidas por propagación en espacio libre son:

$$L_{e.l} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \quad (3.65)$$

Entonces r^2 puede ser despejada de la siguiente forma:

$$r^2 = \frac{\lambda^2 L_{e.l.}}{(4\pi)^2} \quad (3.66)$$

y sustituyendo este resultado en la ecuación (3.64) se obtiene:

$$\phi = PIRE \left[\frac{4\pi}{\lambda^2 L_{e.l.}} \right] [W / m^2] \quad (3.67)$$

y que puede ser expresado en decibels de la siguiente forma:

$$[\phi]_{dB} = \underbrace{PIRE}_{[dBW]} - \underbrace{L_{e.l.}}_{[dB]} + \underbrace{10 \log \left[\frac{4\pi}{\lambda^2} \right]}_{[dB / m^2]} [dBW / m^2] \quad (3.68)$$

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

Si se considera que el enlace es bajo cielo despejado y despreciamos las pérdidas por desapuntamiento, entonces, despejando el PIRE de la ecuación (3.68) y sustituyendo en (3.62) tenemos.

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{ascendente}} = \underbrace{[\Phi]}_{[dBW/m^2]} - 10 \log \underbrace{\left[\frac{4\pi}{\lambda^2}\right]}_{[dB/m^2]} + \underbrace{\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{sat}}}_{[dB/K]} - 10 \log k \quad [dBHz] \quad (3.69)$$

Si el valor de Φ es tal que el HPA del transpondedor es saturado, entonces esta variable se designa como ψ y se le conoce como **densidad de flujo de saturación** y es proporcionado por el fabricante del satélite. El valor de ψ depende también de la distancia entre las estaciones terrenas y el satélite, por lo que también depende de la huella de radiación. Si ahora expresamos la ecuación para la densidad de flujo de saturación, para la frecuencia en vez de la longitud de onda y considerando que el valor de $10 \log k$ es constante e igual 228.6 [dB], entonces.

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{\text{ascendente}} = \underbrace{[\psi]}_{[dBW/m^2]} - 10 \log \underbrace{\left[\frac{4f^2}{c^2}\right]}_{[dB/m^2]} + \underbrace{\left(\frac{G}{T}\right)_{\text{sat}}}_{[dB/K]} + 228.6 \quad [dBHz] \quad (3.70)$$

3.13 RELACIÓN TOTAL DE POTENCIAS

De las ecuaciones anteriores podemos darnos cuenta que el valor del coeficiente (C/N_o) se ha expresado en decibeles. Sin embargo, estrictamente hablando, un cociente se da en forma absoluta, por lo que para poder obtener la relación total de las potencias de todas las contribuciones (Relación portadora ruido del enlace ascendente, descendente y de intermodulación) es necesario trabajar con el valor absoluto de este cociente. De esta forma, la relación portadora-ruido total queda descrita de la siguiente manera ⁽¹⁶⁾.

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total}} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{ascendente}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{inter\ modulación}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{descendente}} \quad (3.71)$$

Para el diseño preeliminar de enlaces satelitales, aunque existen modelos matemáticos más elaborados y completos, basta con utilizar esta ecuación para estimar los parámetros necesarios. Existe un punto óptimo de (C/N_0) correspondiente a un determinado *back-off* de entrada, el cual para obtenerlo existen curvas como la mostrada en la figura (3.18) que permiten localizar dicho punto.

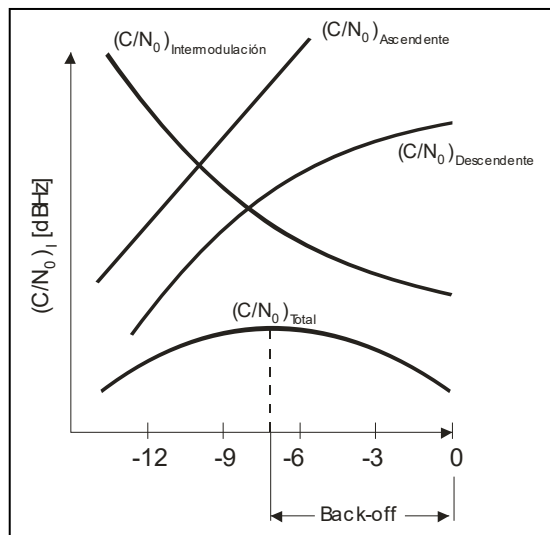


Figura 3.18 Curvas de relaciones de potencias parciales y totales que permiten determinar el *back-off* necesario para un óptimo punto de operación.

16. Neri Vela, Rodolfo
Comunicaciones Por Satélite
Thomson
1ra Edición, México 2003
Pg. 355

3.14 BER (BIT ERROR RATE)

La señal digital recuperada a la salida del demodulador QPSK tendrá algunos bits erróneos, lo cual conduce a la definición de BER o probabilidad de error. Esta probabilidad de error está relacionada directamente con el cociente de la energía promedio de un bit y la densidad espectral de ruido (E_b/N_0).

Cuando una réplica de la señal portadora es generada localmente en el receptor, en fase con la señal proveniente del satélite y usada para demodularla se dice que la demodulación es coherente, bajo estas circunstancias la relación entre el BER y (E_b/N_0) queda expresada de la siguiente manera para modulaciones BPSK y QPSK⁽¹⁷⁾

$$BER = Q\left(\sqrt{2\left(\frac{E_b}{N_0}\right)}\right) \quad (3.72)$$

donde la función Q es:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt \quad (3.73)$$

La función Q se encuentra tabulada en tablas estadísticas y en textos de telecomunicaciones, pero también existen ya curvas trazadas del BER contra (E_b/N_0), como la mostrada en la Figura 3.19 y la Tabla 3.4.

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

17. B. G. Evans
Satellite Communication Systems
IEE
3ra Edición, Reino Unido 2000
pp. 171-173

$$\left(\frac{C}{N_0}\right) = \left(\frac{E_b}{N_0}\right) + 10 \log R_{bits} \quad [dBHz] \quad (3.74)$$

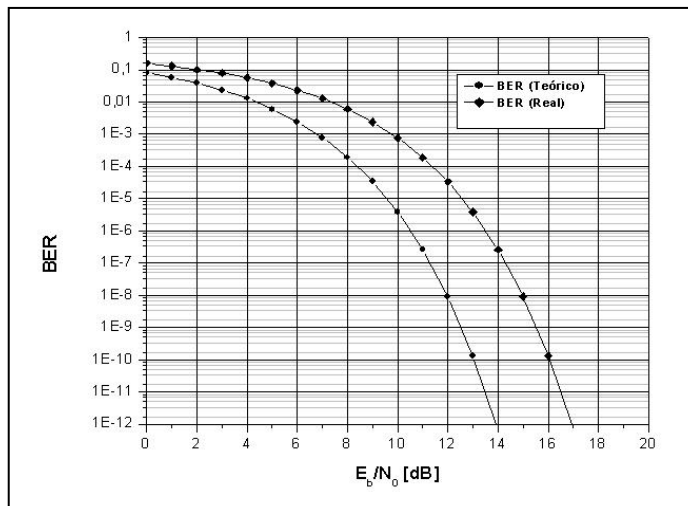


Figura 3.19 Tasa de bits con error (BER) o P_e en función del cociente (E_b/N₀) para señales moduladas en BPSK y QPSK.

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

El valor deseado de BER depende del tipo de señal transmitida y del uso que se le vaya a dar. Así por ejemplo, un BER de 10⁻⁴ es aceptable en telefonía, pero muy alto para transmisión de datos, que lo requiere de 10⁻⁸. En el caso de transmisión de TV digital el BER debe estar entre 10⁻¹⁰ y 10⁻¹¹.

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

Tabla 3.4 Tabulación de valores de Tasa de bits con error (BER) o P_e en función del cociente (E_b/N_0)

MODULACIÓN QPSK					
E_b/N_0	BER (teórico)	BER (real)	E_b/N_0	BER (teórico)	BER (real)
0	7,90E-02	1,60E-01	11	2,60E-07	1,90E-04
1	5,60E-02	1,30E-01	12	9,00E-09	3,40E-05
2	3,80E-02	1,00E-01	13	1,30E-10	3,90E-06
3	2,30E-02	7,90E-02	14	6,90E-13	2,60E-07
4	1,30E-02	5,60E-02	15	0,00E+00	9,00E-09
5	6,00E-03	3,80E-02	16	0,00E+00	1,30E-10
6	2,40E-03	2,30E-02	17	0,00E+00	6,90E-13
7	7,70E-04	1,30E-02	18	0,00E+00	0,00E+00
8	1,90E-04	6,00E-03	19	0,00E+00	0,00E+00
9	3,40E-05	2,40E-03	20	0,00E+00	0,00E+00
10	3,90E-06	7,70E-04			

3.15 TASA DE BITS Y EFICIENCIA ESPECTRAL

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

$$M = 2^N \quad (3.75)$$

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

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

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

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

$$R_{símbolos} = \frac{R_{bits}}{\log_2 M} \quad [bauds] \quad (3.76)$$

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

$$\eta = \frac{R_{bits}}{BW} \left[\frac{\frac{bits}{s}}{Hz} \right] \quad (3.77)$$

Se puede ver entonces que la modulación BPSK tiene una eficiencia teórica de 1 bit/s/Hz, mientras que QPSK tiene el doble. En la práctica, estas eficiencias son menores, porque hay que aumentar el ancho de banda para reducir la interferencia entre símbolos (ISI)* producidos por usar filtros no ideales al limitar la banda de los trenes de pulsos; considerando esto, las eficiencias máximas y prácticas BPSK y QPSK son, respectivamente, de 0.8 a 1.6 bits/s/Hz⁽¹⁸⁾. De esta forma se puede emplear la siguiente fórmula empírica para calcular el ancho de banda necesario para transmitir ambas modulaciones.

$$B_{RF} = 1.2R_{símbolos} [Hz] \quad (3.78)$$

18. Pritchard, W. L.
Satellite Communications Systems Engineering
Prentice-Hall
2da Edición, Londres 1993

3.16 ÁNGULOS DE ELEVACIÓN Y AZIMUT

Tanto el ángulo de elevación y azimut son conceptos básicos e indispensables para el cálculo de enlaces satelitales que tal vez debieron tratarse el principio de este capítulo, sin embargo se tratan ahora ya que será más adelante cuando se realicen cálculos completos de enlaces.

Los ángulos de elevación y azimut permiten orientar la antena de la estación terrena hacia el satélite. Estos ángulos son medidos tomando como referencia la línea sobre la cual la antena tiene ganancia máxima, y en el caso de las antenas parabólicas, la referencia es el eje del plato. El ángulo de elevación θ se define como el ángulo formado entre el plano horizontal local y la línea de vista entre la estación terrena y el satélite, como se indica en la figura 3.20.

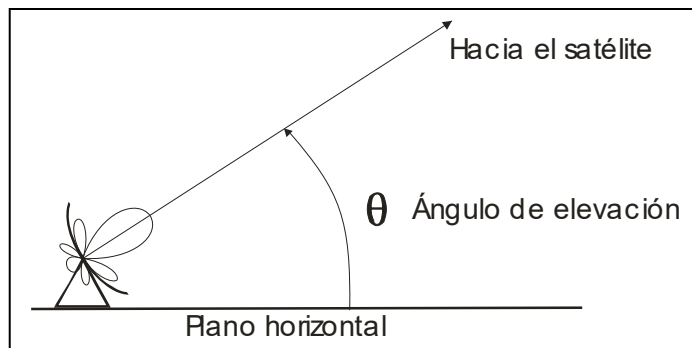


Figura 3.20 Ángulo de elevación

Tanto el valor del ángulo de elevación θ como el de azimut Φ dependen de las coordenadas geográficas de la estación terrena y de la posición orbital del satélite. El ángulo de azimut Φ es medido en sentido horario entre la línea que une la estación terrena con el norte geográfico y la proyección horizontal local de la línea de máxima radiación de la antena que apunta hacia el satélite.

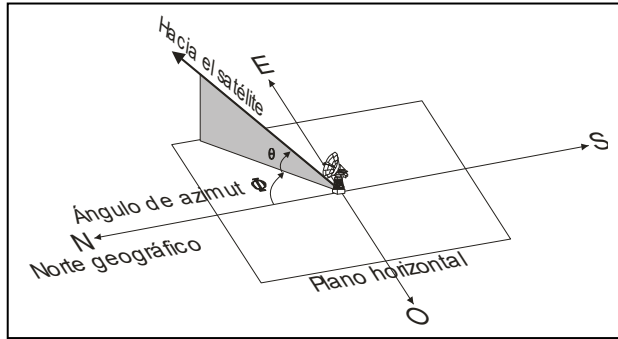


Figura 3.21 Ángulo de azimut

Las fórmulas para obtener los ángulos de elevación y azimut son respectivamente⁽¹⁸⁾.

$$\theta = \text{ang tan} \left\{ \frac{(\cos l)(\cos \Delta L) - \frac{R_e}{h}}{\text{sen}[\theta']} \right\} \quad (3.79)$$

donde:

$$\theta' = \text{ang cos}(\cos l \cos \Delta L)$$

l = Latitud de la estación terrena

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

R_e = radio de la tierra (6,378 km)

h = radio de la órbita (42, 164 km)

El ángulo de elevación toma uno de los siguientes valores dependiendo de la localización de la estación terrena respecto al satélite.

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

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

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

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

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

Donde:

$$\phi' = \text{ang} \tan \left[\frac{\tan \Delta L}{\text{sen} l} \right] \quad (3.80)$$

Las fórmulas anteriores suponen al satélite en órbita geoestacionaria.

3.17 RANGO

La distancia que hay entre una estación terrena y un satélite se denomina **rango**. Esta distancia puede ser calculada con ayuda de la figura 3.22. El ángulo de elevación θ se calcula a partir de la ecuación 3.79. Al ángulo, θ' se le llama "ángulo de cobertura central".

Recordemos que:

$$\theta' = \text{ang} \cos(\cos l \cos \Delta L) \quad (3.81)$$

De esta forma podemos determinar el rango de la siguiente manera:

$$r = 35,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos \theta'} \quad [km] \quad (3.82)$$

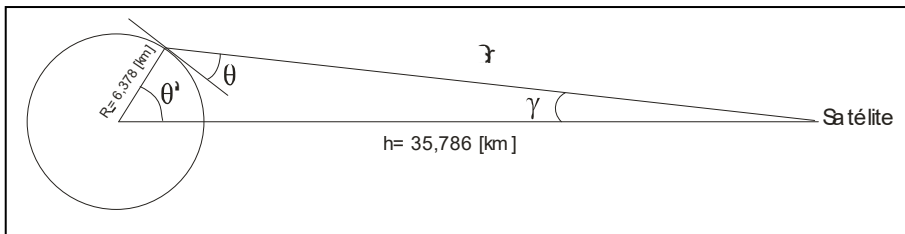


Figura 3.22 Geometría para el cálculo del rango r.

18. Neri Vela, Rodolfo
Comunicaciones Por Satélite
Thomson
1ra Edición, México 2003
Pg. 355

Ecuaciones generales para el cálculo de enlaces

Cabe hacer notar que se hace la consideración de que la estación terrena se encuentra sobre el nivel del mar. Sin embargo, la diferencia que se obtiene en el rango S es muy pequeña y generalmente se desprecia en los cálculos de niveles de potencia.

Más adelante, el capítulo cinco, se realizaran cálculos de enlaces completos en los que se emplearán todos los conceptos vistos en este capítulo.

CAPITULO IV

EJEMPLOS DE SISTEMAS DE RADIODIFUSIÓN DIRECTA DE TV DIGITAL Y EQUIPOS CASEROS

4.1 ANTENAS RECEPTORAS

Cuando una señal proveniente de un satélite es captada en la tierra, los niveles de potencia recibidos son muy reducidos comparados con la potencia transmitida por el satélite. Por ello es importante captar el máximo de potencia para poder reconstruir la señal, pero a la vez empleando la antena más pequeña posible. Esto toma mayor importancia en los servicios DBS ya que la señal proveniente del satélite es captada directamente por una antena instalada en el hogar del usuario final. Esto hace indispensable que la antena sea lo más eficiente, pequeña y barata posible ya que es impráctico instalar una antena de gran volumen en una casa, donde las dimensiones suelen ser muy reducidas y por otra parte pocos usuarios estarían dispuestos a pagar una cantidad elevada de dinero por un enorme plato parabólico, como llegó a ser el caso de las antenas empleadas para Televisión analógica.

Para el caso de la televisión digital el plato parabólico, en sus distintas variantes, es la antena más popular de todas. Esto es debido a la propiedad que tienen de concentrar toda la energía que reciben en un solo punto, llamado foco de la antena y que se ubica sobre el eje del plato parabólico.

4.1.1 La antena parabólica

La antena parabólica, en cualquiera de sus formas, consiste siempre de una superficie cónica receptora que se encarga de concentrar las ondas que sobre ella inciden en un punto llamado foco, donde se ubica el **LNB** o **LNC** que es la parte activa de la antena. El **LNB** consiste de un amplificador selectivo y un convertidor de frecuencia que se encarga de reducir la frecuencia de la señal recibida, de tal forma que pueda ser transmitida a través de un cable coaxial, al rango de frecuencias en el que se introduce la señal después de que se le ha reducido la frecuencia proveniente del satélite se le llama **Frecuencia Intermedia de Satélite (SAT-IF)**, y se ubica en el rango de 1 a 2 [GHz].

Como ya se ha mencionado, una antena parabólica tiene la propiedad de concentrar toda la energía incidente sobre el plato reflector en un punto llamado foco, además de tener la siguiente propiedad que la hacen destacar del resto de las antenas. Si colocamos un plano imaginario perpendicular al eje del plato, a una distancia del vértice de la parábola superior a la distancia focal, entonces, todo rayo perpendicular al plano imaginario incidente sobre el plato y reflejado hacia el foco recorre la misma distancia sin importar el punto de incidencia sobre la superficie reflectora. Esto se ilustra en la figura 4.1.

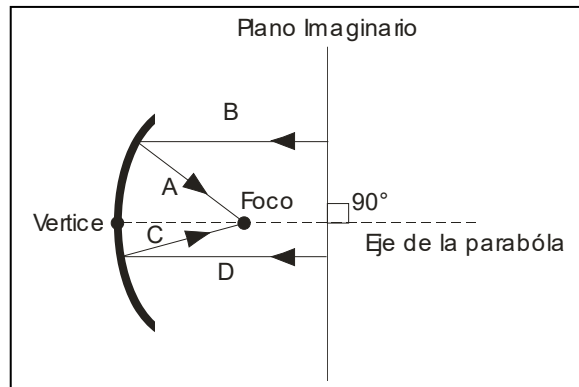


Figura 4.1 Estructura del un plato parabólico. La distancia $A + B$ es la misma que la distancia $C + D$.

Como se ve en la figura 4.,1 una onda incidente sobre la superficie reflectora en el plato recorre la misma distancia del foco a un plano perpendicular al eje de la antena, sin importar el punto de incidencia, siempre y cuando el rayo o haz sea paralelo al eje de la antena. Esta propiedad resulta muy útil en una antena, ya que como el satélite se encuentra muy alejado se puede considerar que todo haz de ondas que inciden sobre el plato son paralelos entre sí. De esta forma todos los rayos recorren la misma distancia para llegar al foco y es por ello que al concentrarse aquí todas las ondas se encontrarán en fase, por lo que todas las ondas captadas se sumarán y podrá obtenerse una señal resultante en el foco de mayor intensidad lista para ser procesada por el LNB.

Como ya se había visto en el capítulo anterior; para una longitud de onda, λ , relativamente corta comparada con las dimensiones de la antena, la ganancia teórica para una eficiencia del 100% en una antena parabólica es:

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (4.1)$$

Siendo A el área de la apertura física de la antena.

Expresado en decibeles:

$$G_R = 10 \log\left(\frac{4\pi A}{\lambda^2}\right) \quad (4.2)$$

Y el **ancho del haz del lóbulo principal**, que es definido como el ángulo entre los dos puntos de media potencia del haz y que se puede calcular en forma aproximada, también expresado en dB, de la siguiente manera:

$$\theta_{-3dB} \equiv \frac{75\lambda}{D} [\text{grados}] \quad (4.3)$$

De esta forma es posible calcular la ganancia de la antena en una dirección a un ángulo α del eje de la antena de la siguiente manera

$$[G_\alpha]_{dBi} = [G_{m\acute{a}x}]_{dBi} - 12 \left(\frac{\alpha}{\theta_{-3dB}} \right)^2 [dBi] \quad (4.4)$$

En la tabla 4.1 se muestra la ganancia teórica para un plato parabólico a una frecuencia de 12 GHz, para distintos diámetros del reflector parabólico.

Tabla 4.1 Ganancia teórica

D[m]	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
G [dB]	34.0	35.9	37.5	38.9	40.0	41.1	41.9

4.1.2 Tipos de antenas parabólicas

En la práctica es común encontrar distintos tipos de antenas parabólicas, cada una de las cuales tiene sus propias ventajas y desventajas. Entre las principales se encuentran las antenas de **foco primario**, tipo **offset** y **Cassegrain**.

Antena de foco primario

Esta antena es una aplicación directa de la teoría de las antenas parabólicas, el foco se ubica justo al centro de la antena, de tal forma que el LNB se encuentra justo al el centro del plato parabólico. Para sostener el LNB se hace uso de tres varillas que lo soportan; esto provoca que existan pérdidas ya que los elementos que bloquean la antena evitan que toda el área sea aprovechada. Esta es una de las principales razones por las que estas antenas son empleadas en aquellos casos donde se puede sacrificar un poco en cuanto al tamaño de la antena, para justificar las pérdidas por bloqueo de los elementos.

En este tipo de antenas el tamaño común es superior a un metro y son fabricadas por lo general con acero galvanizado, con aluminio, o bien con algún material plástico que sea más barato y duradero, recubierto con una capa de material conductor. La eficiencia para este tipo de antenas se encuentra entre el 55 y 65%.

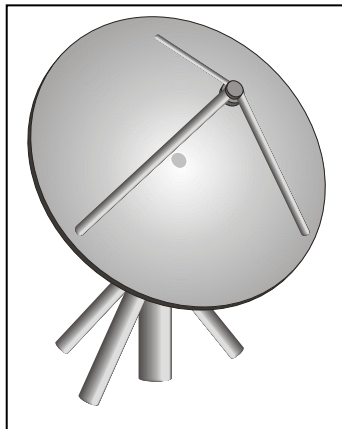


Figura 4.2 Antena de foco primario.

Antena tipo offset

Esta antena utiliza como superficie reflectora sólo una parte de lo que sería la parábola completa; es decir, es más bien como una parte de una parábola completa como se muestra en la figura 4.3. De esta forma, el LNB montado sobre el foco no obstruye el paso de las ondas hacia la superficie reflectora.

Dado que no existe obstrucción por elementos como el LNB o barras de soporte, la eficiencia de la antena aumenta considerablemente. Esta antena, comparada con una de tipo foco primario del mismo tamaño, puede tener una eficiencia que va

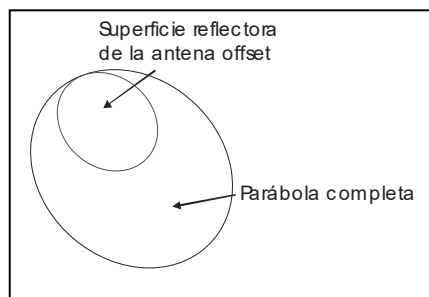


Figura 4.3 Parte de la superficie de una parábola completa es empleada para crear la antena tipo offset.

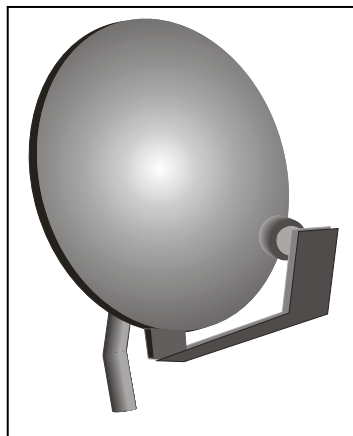


Figura 4.4 Antena tipo offset.

desde el 65% hasta el 75 %, y esto permite crear antenas mucho más pequeñas y baratas. Actualmente estas antenas son las preferidas para los servicios DBS por las razones que se acaban de mencionar; suelen ser fabricadas con materiales plásticos resistentes a los factores climáticos de desgaste y recubiertos de alguna capa metálica conductora.

Antena Cassegrain

Esta antena obtiene su nombre del científico que la creó, y es una variante de la antena de foco primario. Consta de dos superficies reflectoras; una de ellas es el plato parabólico y la superficie subrefleitora se ubica en el foco; el LNB se posiciona en un hueco en el centro del plato parabólico. Esta antena tiene la ventaja de disminuir la obstrucción de las ondas por parte del LNB y se pueden alcanzar eficiencias de hasta el 80%, pero resulta ser más costosa y es por ello que no se usan en servicios DBS. Son mucho más comunes en telescopios y antenas de gran tamaño donde se requiere tener la máxima eficiencia aún sacrificando costos.

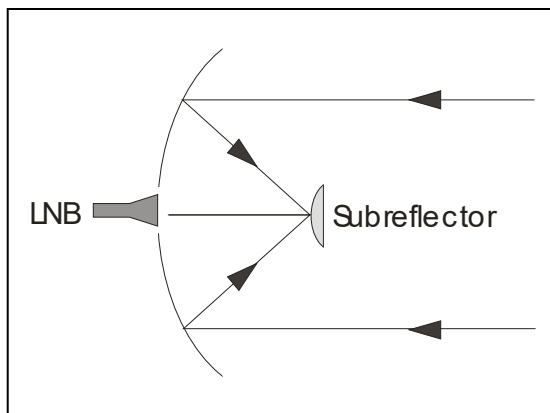


Figura 4.5 Antena Cassegrain.

4.2 INSTALACIÓN DE LA ANTENA

Los proveedores de servicio de TV digital por satélite en México, Sky y Direct TV, usan antenas de tipo offset para la recepción de la señal de TV digital y su montaje es fijo, ya que si el satélite es geoestacionario éste debe ser un punto fijo en el espacio. Estas antenas deben ser ajustadas en sus ángulos de azimut y elevación al momento de ser instaladas, sin embargo existen antenas motorizadas que se emplean cuando se requieren hacer algunos ajustes finos para optimizar la calidad de la señal recibida debido a la polarización.

4.2.1 Ángulos de azimut y elevación

Los ángulos de azimut y elevación son las dos coordenadas básicas que determinan la posición de cada satélite en el cielo. La coordenada del azimut representa la posición del satélite en relación al meridiano de Greenwich, mientras la elevación es el ángulo de inclinación que la antena debe tener hacia el cielo, como se ve en la figura 4.6.

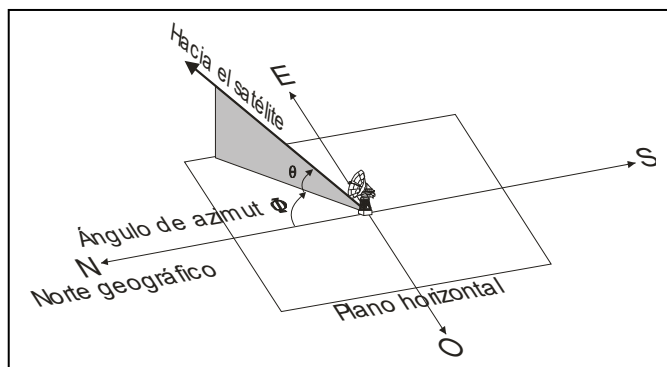


Figura 4.6 Ángulos de elevación y azimut.

Cada satélite para una estación terrena de una instalación específica tiene su propio y único valor de azimut y elevación. Dado la latitud del sitio y longitud, pueden determinarse las coordenadas para cualquier satélite a través del uso de una calculadora científica, un programa de computadora, o los mapas de referencia disponibles.

Una vez que el instalador ha determinado la coordenada del azimut para un satélite específico, una brújula puede usarse para encontrar la dirección precisa de la ubicación del sitio. La brújula debe ajustarse de tal forma que se tomen en cuenta las variaciones entre el polo Norte geográfico y el polo Norte magnético en que la Tierra realmente gira. Aunque los mapas están disponibles y puede proporcionar el factor de la corrección requerido (Figura 4.7), la ubicación del polo Norte magnético de la Tierra realmente cambia periódicamente. A menos que el mapa de declinación magnética sea bastante actual, es aconsejable llamar a la torre de mando en el aeropuerto más cercano para obtener la última información de factor de corrección para el área.

El factor de la corrección debe substraerse de las lecturas de la brújula si el verdadero norte geográfico está al este del norte magnético; y debe sumarse a las lecturas de la brújula si el norte geográfico está al oeste del norte magnético, en la figura 4.8 se muestra una carta universal de elevación y azimut tomando como referencia la ubicación del satélite.

Objetos de metal grandes o líneas de poder de CA y transformadores pueden afectar la exactitud de lecturas de la brújula. Todas las medidas deben hacerse por consiguiente en un sitio que esté fuera de cualquier dispositivo que pueda afectar la exactitud de las lecturas de la brújula.

En cualquier sitio dado, la órbita geoestacionaria describe un arco que va desde el horizonte oriental al horizonte occidental. El punto más alto de este arco, llamado el cenit del arco, se localiza directamente en la línea que describe la longitud del sitio que también son los verdaderos norte y sur geográficos.

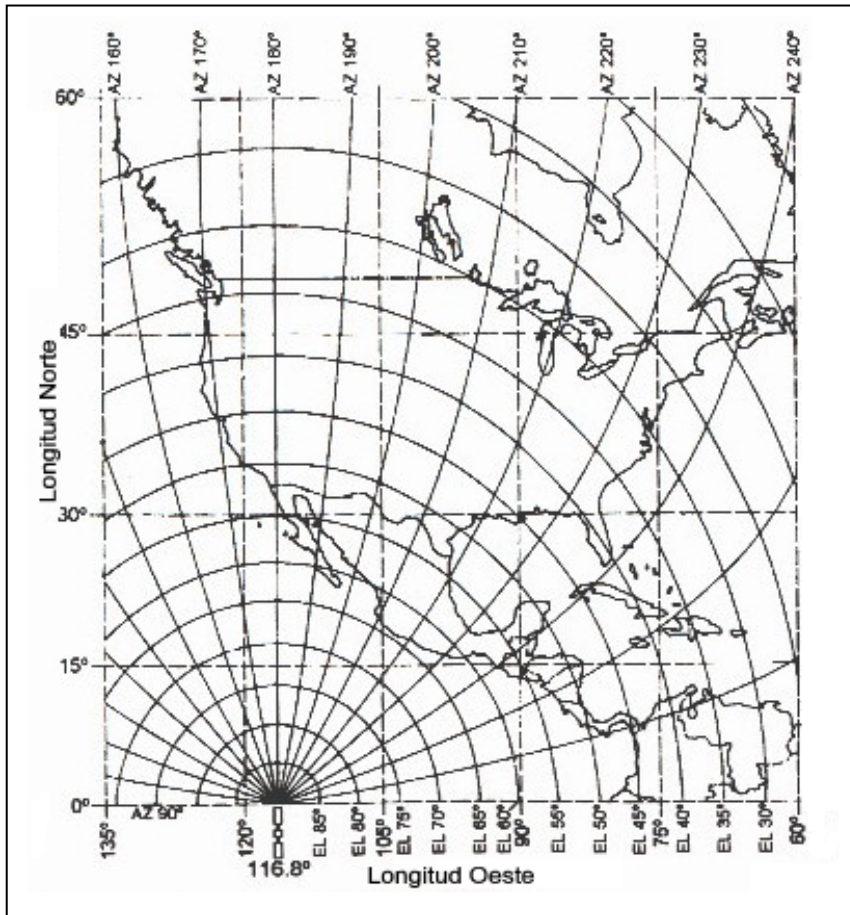


Figura 4.7 Mapa ángulos de orientación magnética para un satélite ubicado a los 116.8°⁽¹⁾

7. Neri Vela, Rodolfo
Comunicaciones Por Satélite
Thomson
1ra Edición, México 2003, pg 254
Pg. 265

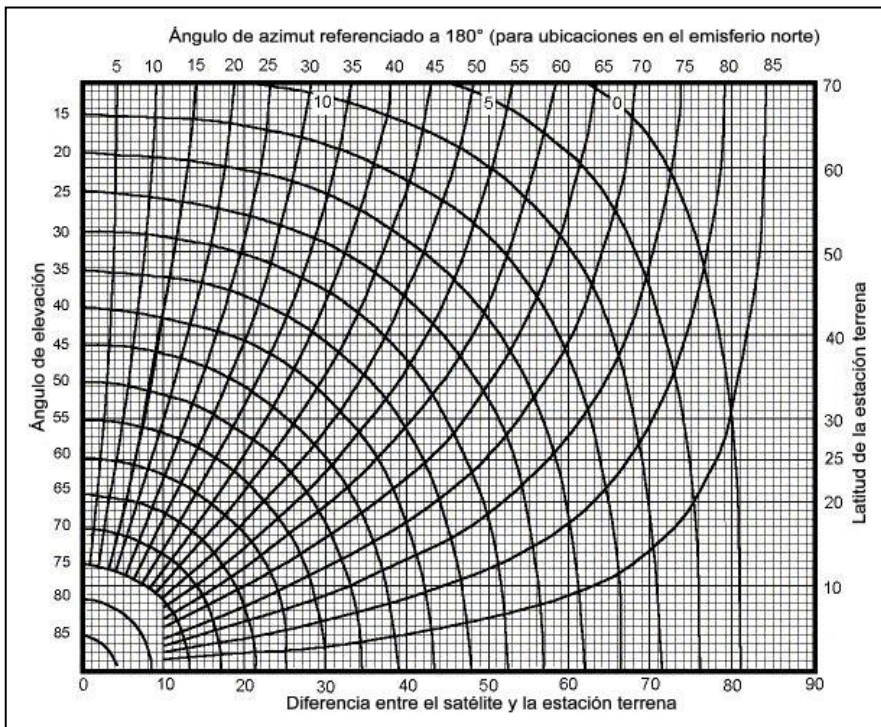


Figura 4.8 Carta universal para el cálculo correcto de los ángulos de elevación y azimut

La cantidad total del arco geoestacionario que es visible de cualquier sitio es una función directa de la latitud del sitio. Los sitios ubicados relativamente cerca del ecuador de la Tierra podrán acceder a una sección más amplia del arco geoestacionario que aquellos localizados a las latitudes más altas. Por ejemplo, un sitio localizado a 15 grados latitud norte puede recibir señales de cualquier satélite geoestacionario que este ± 76 grados de la longitud del sitio en cuestión. Otro sitio localizado a 55 grados que la latitud norte sólo podrá recibir satélites que estén a ± 65 grados de la longitud del sitio. El mapa en Figura 4.8 permite al instalador calcular el rango del arco visible rápidamente para cualquier sitio.

Un inclinómetro es una herramienta de instalación de satélite normal que mide los grados de elevación, o "inclinación", de la antena receptora (Figura 4.8). El instalador también puede usar un inclinómetro para determinar si la señal proveniente del satélite tendrá obstrucciones. Se posiciona el inclinómetro en una superficie nivelada al centro del sitio, se ubica al brújula y se hace la corrección en azimut para el satélite deseado; entonces se inclina el inclinómetro hasta que indique el ángulo de elevación del satélite deseado (vease Figura 4-9). Viendo a lo largo del borde recto del inclinómetro, el instalador puede determinar visualmente si hay algún obstáculo entre la antena y el satélite.

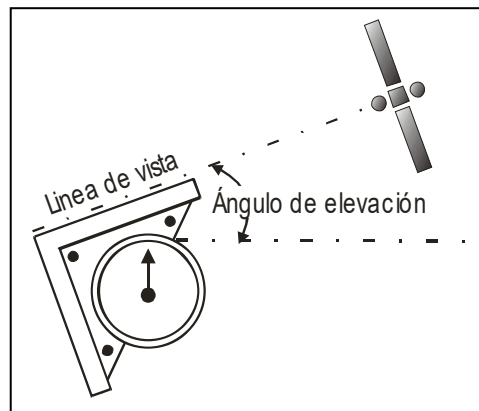


Figura 4.8 Inclinómetro usado para determinar el ángulo de elevación

Si el instalador encuentra árboles, follaje, u otras obstrucciones que pueden interferir con la recepción inicialmente, puede ser posible quitarlos o bien puede elevarse la antena del nivel del piso a una azotea o balcón, de tal forma que no existan obstáculos.

-
2. E. Long, Mark
The Digital Satellite TV Handbook
Newnes
1ra Ed. Gran Bretaña, 1999. Pg. 21

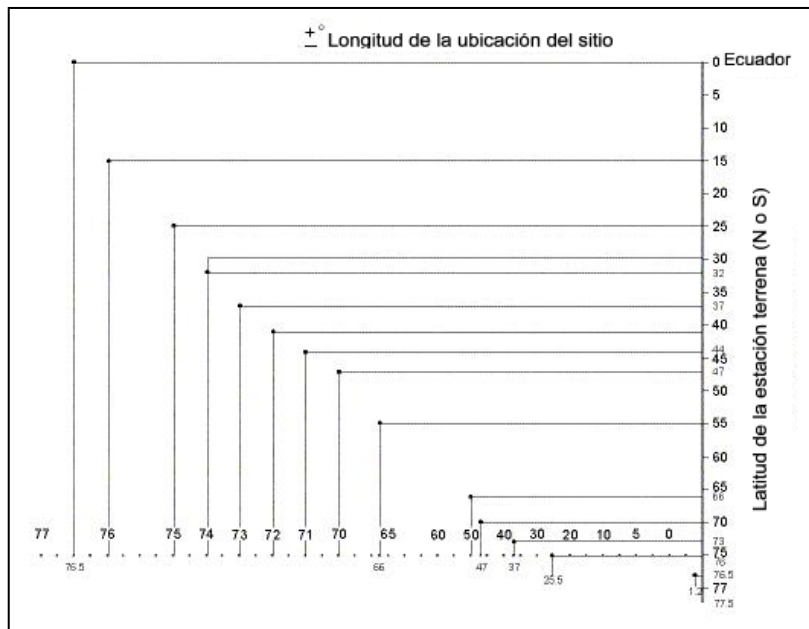


Figura 4.9 Carta para el cálculo de la visibilidad del arco geoestacionario para una ubicación específica de una estación terrena⁽²⁾.

4.2.2 Montaje de antenas fijas

Una pequeña abertura en el montaje de la antena receptora permite fijarla en una posición para recibir una sola plataforma DTH. El montaje de la antena ofrece una variedad de posibles colocaciones como en el suelo, atada a una pared externa, hay algunos montajes que permiten instalar la antena en techos, tejados o paredes y existen otros que permiten atarlas a vigas del edificio. El instalador debe seccionar el tipo de montaje más apropiado a la situación y sitio de instalación. En la figura 4.10 se muestra los tipos de montaje más comunes.⁽³⁾

También se puede apreciar en la figura 4.10 las formas más comunes en que pueden ser fijadas y orientadas estas antenas, empleando distintos mecanismos para su posicionamiento con los ángulos de elevación y azimut indicados.

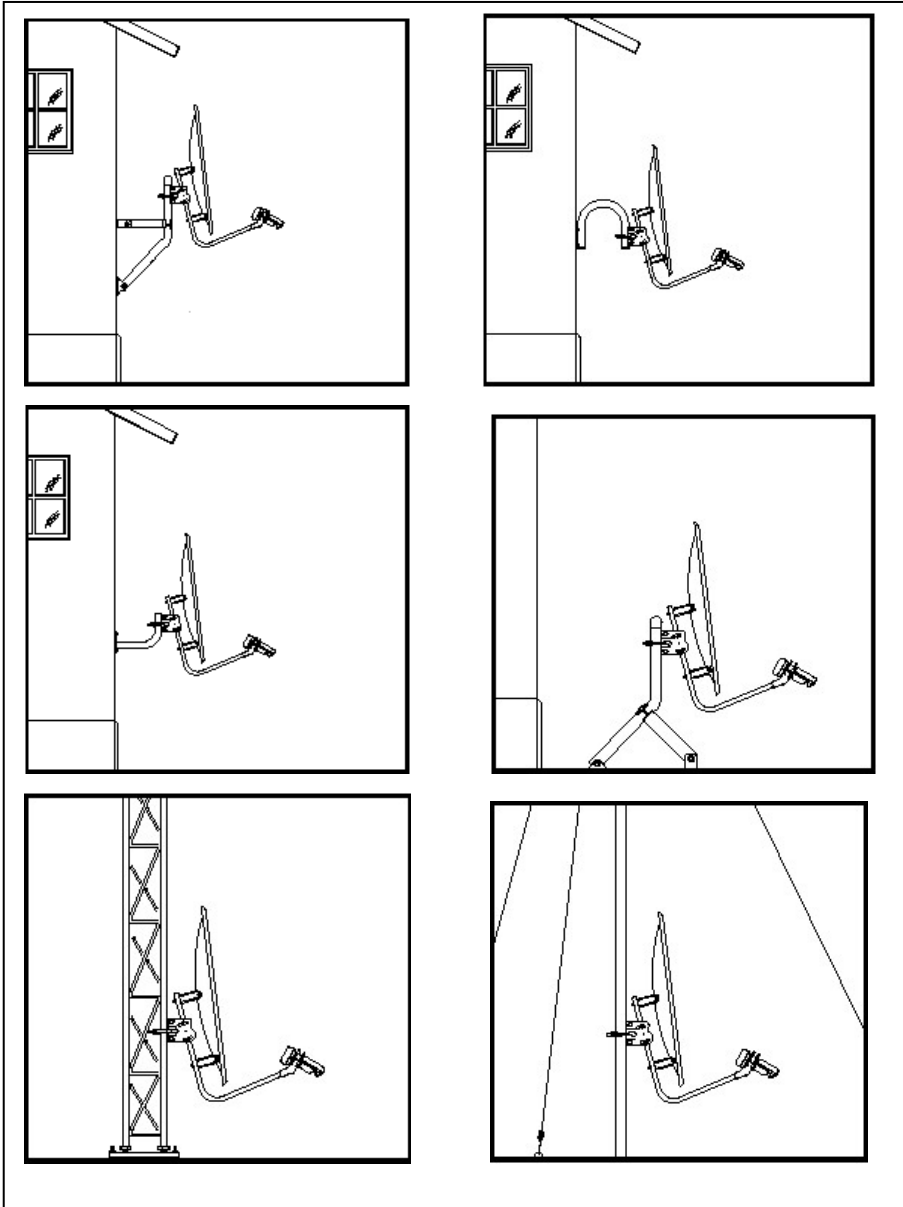


Figura 4.10 Montajes típicos de antenas tipo offset para recepción de TV digital ⁽³⁾.

Instalación del LNF

La mayoría de los sistemas proporciona una combinación de corneta y LNB llamada un LNF-corto para al alimentador de bajo ruido. Muchos de estos productos se diseñan para cambiar la polarización de horizontal a vertical-o de derecha a izquierda y se tiene la presencia de un voltaje de DC (normalmente 17/13 voltios) que el IRD envía por medio del cable coaxial. Esto simplifica el montaje entre las unidades al aire libre e interiores, limitando las conexiones a un solo cable coaxial. El LNF debe ser girado manualmente mientras se monitorea el nivel de la señal hasta que se llega al punto óptimo en la recepción de la señal. El IRD cambiará el voltaje de DC para restablecer el alimento automáticamente para recibir el sentido opuesto de polarización siempre que se requiera.

Los satélites con plataformas DBS de gran potencia, como DBS-1, usan polarización circular para transmitir las señales de DTH digitales. En este caso, no hay ninguna necesidad de girar el LNF porque se ha prefijado en la fábrica para la recepción óptima de señales de la polarización circular. Muchos otros satélites, sin embargo, emplean polarización lineal (horizontal o vertical). En este caso, el LNF debe girarse en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario para encuadrarlo con la polarización de la señal entrante del satélite.

Las antenas ofset normalmente usadas para la recepción de DTH digital tienen un soporte para el LNF que fija la distancia focal entre el plato y la corneta. Sin embargo, puede existir alguna pequeña desviación o error que el instalador deberá corregir manualmente mientras monitorea el nivel de la señal hasta llegar a la posición donde se tenga el nivel de señal óptimo. Generalmente los IRD están provistos de un sistema de monitoreo que despliega en el monitor los datos de nivel de señal.

3. <http://www.televes.com/>

Alineación de la antena

El proceso de alineación para una antena receptora de TV digital es muy simple. En un montaje para una antena dedicada a captar la señal proveniente de un satélite del cual se conoce su posición, se ajustarán los ángulos azimut y la elevación, con el ángulo del azimut corregido según la declinación magnética del sitio de instalación.

Se deben hacer finalmente ajustes finos a la alineación de la antena mientras se recibe un canal de TV digital. Cuando se ha llegado al punto óptimo de orientación de la antena hay que fijarla apretando los tornillos pertinentes.

En las figuras 4.11a,b, c se muestran los mecanismos más comunes con los que cuenta una antena de tipo offset para ser orientada.

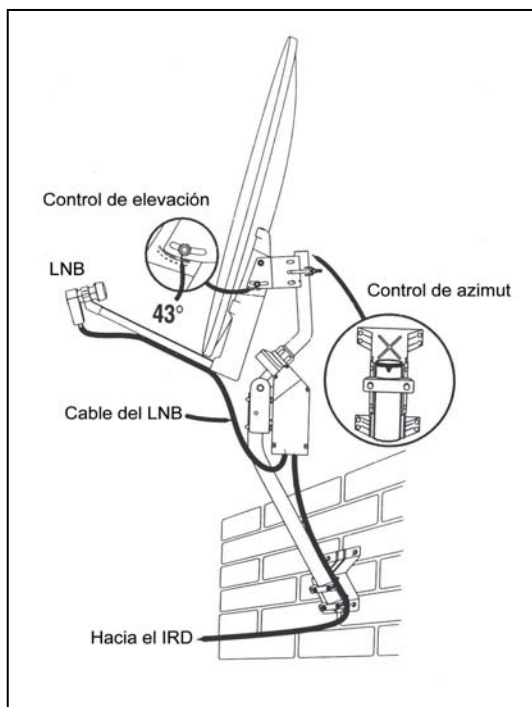


Figura 4.11a Montaje más común de una antena para recepción de TV digital.

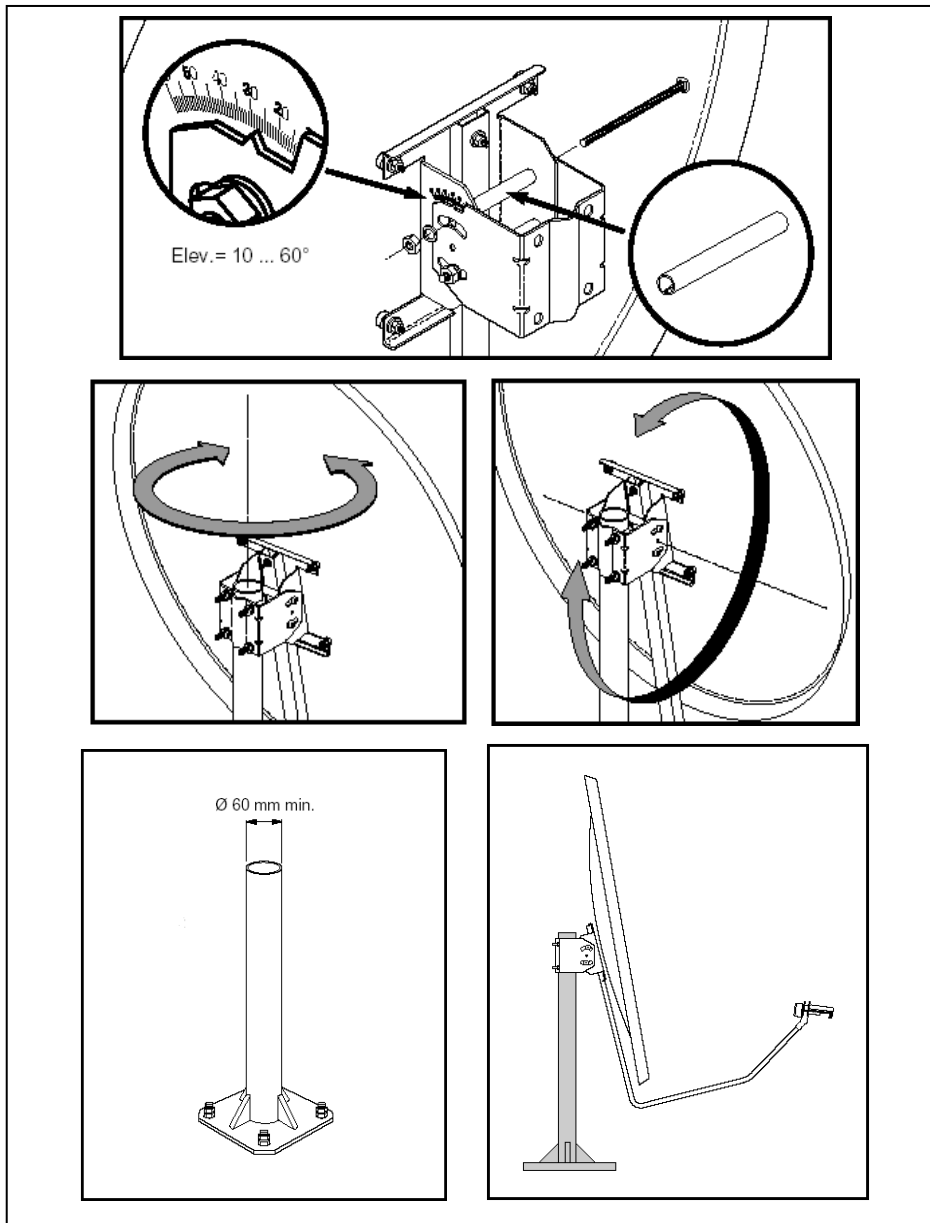


Figura 4.11b Mecanismos de orientación con graduación en elevación.

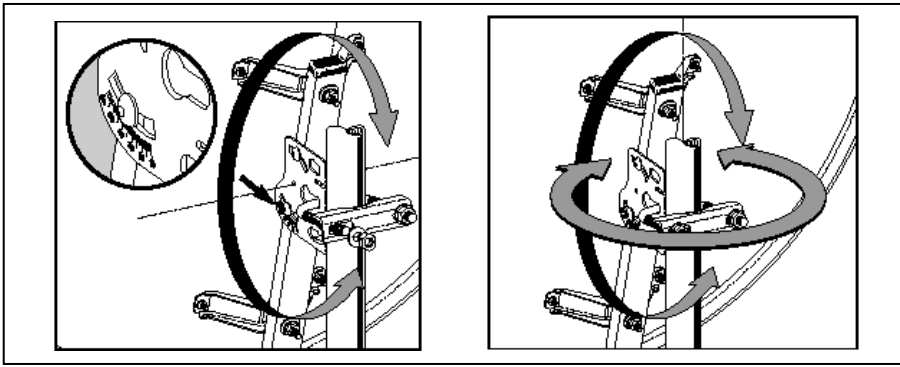


Figura 4.11c Mecanismos de orientación con fijado simple de tornillos.

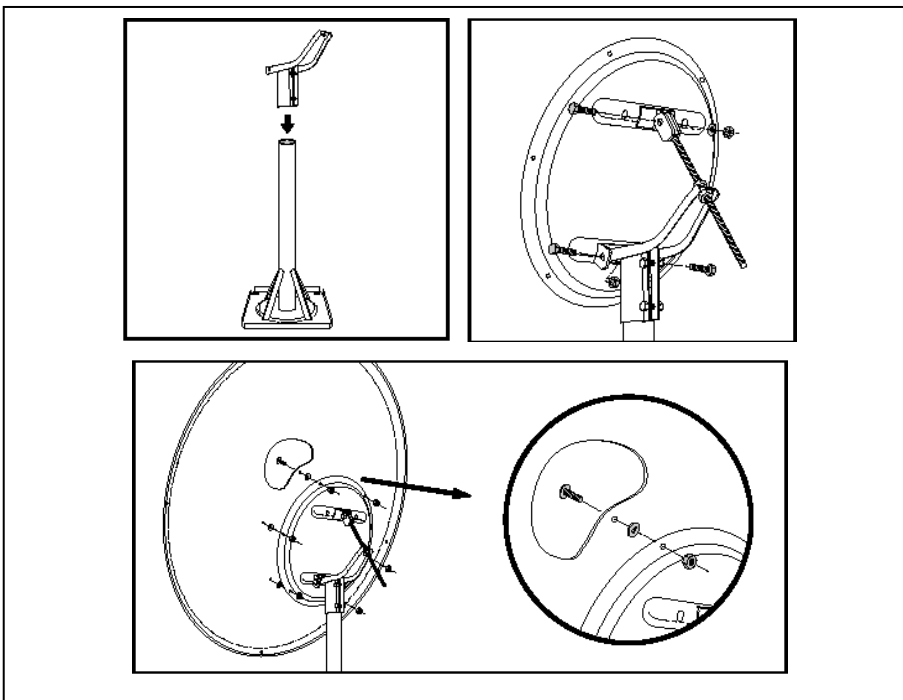


Figura 4.11d Mecanismo de orientación mediante tornillos y giros simples.

4.3 FUENTES

La energía reflejada por el reflector parabólico debe ser transferida hacia el LNB en la forma más íntegra posible mediante un elemento llamado **fuelle** o **source**. Este dispositivo se sitúa en el foco de la antena parabólica y consiste de una serie de anillos concéntricos (en el caso de las antenas de foco primario) como se muestra en la figura 4.12, o bien de una corneta corrugada para el caso de las antenas tipo offset seguida de una guía de ondas que lo adapta al LNB.

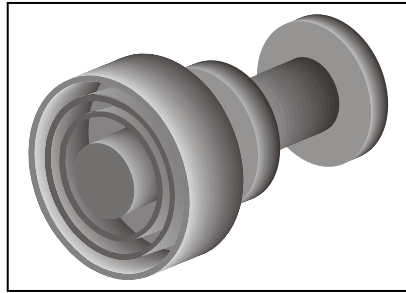


Figura 4.12 Fuente de anillos concéntricos para antenas de foco primario.

El papel del fuelle es adaptar la impedancia de entrada del LNB de tal forma que la señal no sea reflejada y poder así recuperar la mayor cantidad de energía posible de la señal captada por la antena. El coeficiente de reflexión debe ser lo más cercano a cero; en la práctica un valor del coeficiente de reflexión aceptado es de 0.2.

La conexión entre la fuente y el LNB se realiza generalmente mediante un adaptador de guía circular a rectangular (como se ve en la figura 4.13) que permite adaptar la salida de la fuente a la entrada del LNB.

La energía captada por la antena es transmitida hacia el LNB, el cual está hecho de un cuarto de la longitud de onda (aproximadamente 0.8 cm). El ángulo de apertura de la fuente debe cubrir o iluminar lo más completo que se pueda la superficie reflectora del plato parabólico, pero sin excederla, ya que podría captar interferencia

proveniente del ambiente exterior o de los lóbulos laterales con interferencia de satélites vecinos.

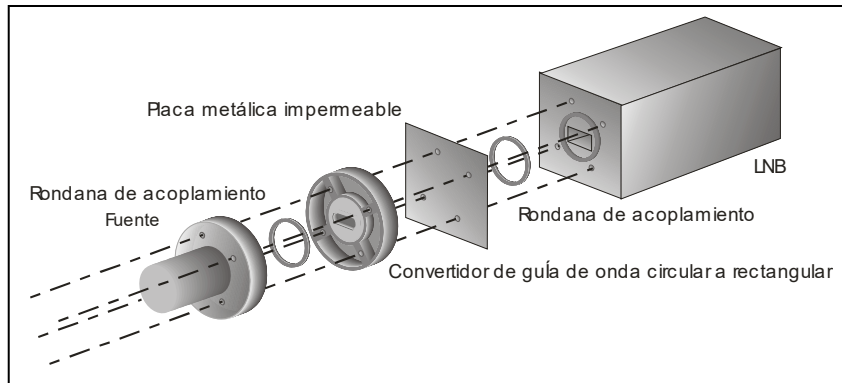


Figura 4.13 Adaptación de la fuente a la entrada del LNB.

4.4 POLARIZADORES

4.4.1 Polarización lineal

Si la fuente es conectada al LNB de la forma descrita en la figura 4.10, asumiendo que la fuente tiene una sola sonda, entonces sólo se puede recibir una polarización lineal, ya sea horizontal o vertical, dependiendo de la orientación de la sonda.

Con la mayoría de los satélites usando ambas polarizaciones (horizontal y vertical), se hace necesario el uso de un dispositivo entre la fuente y el LNB que bajo la orden de un comando electrónico es capaz de seleccionar las señales con polarización que se precisa.

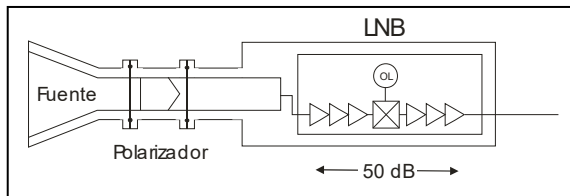


Figura 4.14 Diagrama simplificado de una fuente acoplada a un LNB mediante un polarizador.

El **polarizador** debe cumplir con esta función y al mismo tiempo rechazar las señales de aquella polarización no deseada. La diferencia de nivel de potencia entre las señales de la polarización deseada y la no deseada se llama atenuación por *polarización-cruzada* y debe ser por lo menos de 25 dB para una buena recepción.

Este dispositivo es principalmente usado con antenas motorizadas con la finalidad de cubrir una parte substancial del arco geoestacionario, desde donde la polarización puede tomar valores intermedios entre las polarizaciones horizontal y vertical, en cuyo caso se hace indispensable.

4.4.2 Polarización circular

La polarización circular, que aunque actualmente se usa cada vez menos en la banda Ku, es común su uso actualmente. La forma de captar esta señal es simple; lo que se hace es insertar entre la corneta y el LNB una tira o cinta de teflón de aproximadamente 3 cm de largo que forma un ángulo de 45° entre la sonda y el LNB. Esta tira, o despolarizador, resulta en una transformación de la onda con polarización circular en una onda con polarización lineal. Dependiendo de la diferencia del ángulo ($\pm 45^\circ$) de la cinta comparada con la sonda, según sea captada una señal con polarización circular derecha o izquierda.

Con la finalidad de seleccionar entre las dos polarizaciones se puede hacer alguna de las siguientes acciones.

- Insertar un polarizador magnético o mecánico entre la guía de ondas que contiene la cinta y el LNB.
- Usar un LNB que tenga integrada la cinta en la guía de ondas de adaptación.

Existen varios LNB capaces de recibir tanto señales de polarización lineal como circular. Se suele emplear también LNB diseñados para captar señales con polarización lineal para captar también señales con polarización circular, aunque

éstos se ven reflejado en una atenuación de la señal de hasta 3 dB, que no es tan malo ya que la potencia que se recibe del satélite permite estas pérdidas.

4.5 BLOQUE CONVERTIDOR DE BAJO RUIDO (LNB)

El amplificador de bajo ruido es un elemento clave para la recepción de la señal en la estación receptora, y el factor temperatura de ruido determinará qué tan eficiente será este amplificador. El LNB está constituido de una sonda receptora, un amplificador de bajo ruido (LNA), filtros pasa banda y un convertidor que baja la frecuencia de la señal proveniente del satélite mediante un oscilador local. Estas frecuencias son más fáciles de transportar a través de un cable coaxial que puede llegar a tener hasta varios metros de longitud. Este mismo cable coaxial suministra de energía al LNB con 18 V y una corriente aproximada de 200 mA, dependiendo del tipo de LNB.

La ganancia eléctrica del LNB (entre la potencia recibida y la salida hacia el cable) esta entre 45 y 55 dB.

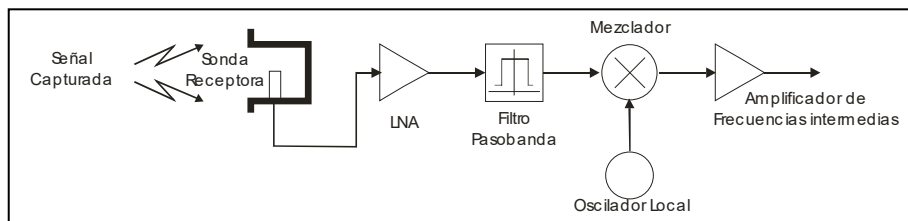


Figura 4.15 Diagrama de bloques de un LNB.

El amplificador se encarga de aumentar la potencia de la señal recibida del satélite, sin embargo el propio LNB genera ruido térmico internamente al cual se añade a la señal original, de tal forma que las siguientes etapas de amplificación reciben la señal con el ruido generado por el LNB. Actualmente los LNB de alta eficiencia usan arseniuro de galio como semiconductor y transistores con alta movilidad de electrones (HEMT) para minimizar la contribución interna de ruido del LNB.

El comportamiento del ruido en un LNB para la banda C se expresa en grados Kelvin, mientras que para la banda Ku generalmente se expresa mediante una figura de ruido graduada en decibelios sobre grados Kelvin como la mostrada en la figura 4.16. Actualmente, para la banda C los LNB tienen una temperatura menor a los 40 K, y para el caso de la banda Ku se tiene una temperatura de ruido de alrededor 1 dB/K.

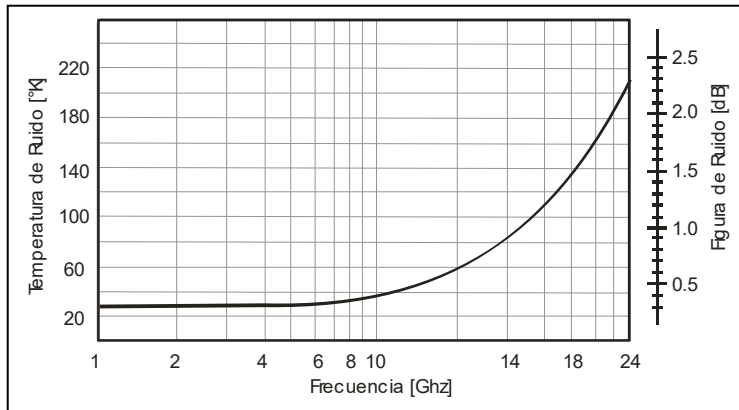


Figura 4.16 Carta para conversión de temperatura de ruido a figura de ruido.

La respuesta en cuanto al ruido que un LNB añade a una señal no es totalmente plana a lo largo del ancho de banda del filtro paso banda del dispositivo. Comúnmente el fabricante proporciona una curva para cada LNB que indica en qué segmento de banda se tiene la menor temperatura de ruido así como su comportamiento a lo largo del ancho de banda del dispositivo.

La salida de IF (Frecuencias Intermedias) de cada LNB es una entrada potencial de humedad que obviamente llega a degradar los materiales y por consiguiente la calidad de las señales. El instalador debe aislar del ambiente la conexión entre el LNB y el cable coaxial de IF. Existen algunos compuestos que se pueden poner alrededor de la conexión o bien el instalador puede sellar con silicón estas conexiones.

El LNB también cuenta con un **aislador** que es un dispositivo pasivo que separa electrónicamente la entrada del LNB de la primera entrada de amplificación. El aislador tiene varias funciones; se encarga de atenuar señales que son localizadas fuera de la banda de frecuencias permisibles por el LNB. Esto ayuda a bloquear señales que son producidas por estaciones terrenas que se encuentren cerca de la antena. Más aún, el aislador previene señales generadas internamente, como es el caso de las señales producidas por el oscilador local y que pueden excitar el amplificador. También provee una buena impedancia entre el alimentador y la etapa inicial de amplificación.

Cada LNB cuenta también con un oscilador local (**LO**) que genera una señal de microondas de referencia. Ambas señales, la proveniente del satélite y la del oscilador local son inyectadas a un mezclador, donde las dos señales generan una señal de frecuencia intermedia IF que contiene toda la información presente en la banda original del satélite. El proceso para producir la señal de IF es llamada bloque de conversión a frecuencia baja.

El costo de los cables de bajas pérdidas que conducen las señales de microondas debe ser barato, ya que este costo lo debe pagar el usuario y de ser elevado simplemente el número de usuarios será más reducido, es por ello que el LNB debe bajar la frecuencia de la señal con la finalidad de que ésta pueda ser transmitida a través de un cable coaxial sin que la señal se vea muy degradada.

Dentro del circuito mezclador, la señal proveniente del satélite y la frecuencia del LO son sumadas y restadas. De esta forma, si un LNB de la banda C, que generalmente utiliza un LO de 5,150 MHz, que es una frecuencia mucho más alta que la señal proveniente del satélite. A esta señal se le llama lado alto de inyección de frecuencia. Cuando la frecuencia de un LO de 5,150 MHz se encuentra con la señal de satélite estándar de 3,100-4,200 MHz, produce las bandas de frecuencia de la suma (8,850-9,350 MHz) y la diferencia (1,450-950 MHz). Un filtro es usado para eliminar la banda de frecuencia más alta (8,850-9,350 MHz) y conservar la banda de frecuencia más baja (1,450-950 MHz).

Sistemas de radiodifusión directa de tv digital y equipos caseros

Un LNB de la banda Ku comúnmente usa un LO con un frecuencia que es mucho menor a la señal proveniente del satélite. Es llamada lado bajo de inyección. Por ejemplo, cuando la frecuencia del LO de 11.3 GHz se encuentra en el mezclador con la banda de la señal del satélite 12.25-12.75 GHz, se producen las banda de frecuencia de la suma (23.55-24.05 GHz) y la diferencia (950-1,450 MHz) produciendo las frecuencias intermedias requeridas.

Durante le instalación inicial del IRD, el instalador necesitará fijar la frecuencia IF que con la que el IRD deberá trabajar. Si sólo se conoce la frecuencia original del transpondedor del satélite, entonces el instalador deberá calcular el rango de IF para el cual deberá trabajar el IRD. Para eso debe conocer la frecuencia del oscilador local LO que el fabricante del LNB debe especificar.

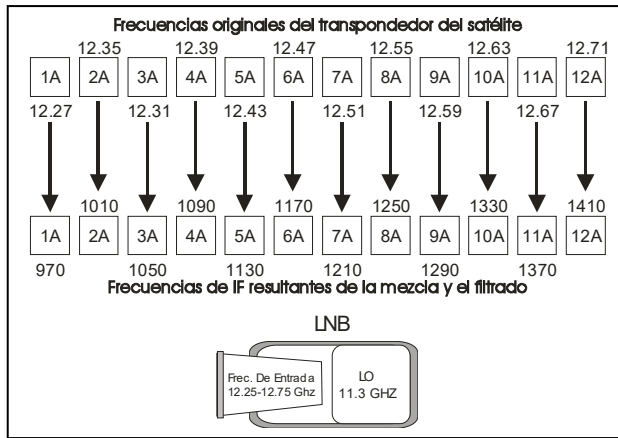


Figura 4.17 Bandas de frecuencia en el Satélite y LNB para la banda Ku.

4.5.1 Tipos comunes de LNB

LNB Universal

El LNB universal es un bloque de bajo ruido capaz de switchear electrónicamente entre las bandas de frecuencia 10.7-11.7 y 11.7-12.75 GHz para proporcionar una cobertura completa de la banda Ku. El receptor IRD envía un voltaje del switcheo de 13 o 17 V DC al LNB que automáticamente cambia el rango de frecuencia de

entrada. No obstante una LNB Universal puede ser usado sólo si se cuenta también con un receptor IRD compatible que use el mismo rango de frecuencias.

LNB de bajo ruido de fase

Toda modulación digital para servicios DTH son basados en una detección precisa de variaciones de fase y amplitud. El IRD debe tener la habilidad de detectar estas sutiles variaciones para poder reproducir las señales de video y audio. La habilidad del IRD para detectar estas variaciones de fase y amplitud puede verse frustrada si el LO del LNB produce excesivo ruido de fase.

El ruido de fase es producto de la inestabilidad del oscilador local o alguna otra frecuencia instantánea que pueda alterar la calidad de la señal del oscilador, es decir que pueda ensanchar su espectro de frecuencias. Un LNB de bajo ruido de fase emplea tecnologías que permiten que el oscilador local tenga un espectro de alta pureza, los cuales se usan normalmente en LNB dedicados a la recepción de TV analógica.

Un LNB con excesivo ruido de fase puede causar que el IRD reproduzca imágenes con errores. La industria DTH llama a este fenómeno como mosaico o azulejo.

LNB de banda lateral única

Existen tres posibles bandas para la transmisión de servicios directos al hogar vía satélite para lo que se hace necesaria la fabricación de tres distintos LNB que cumplan con los requerimientos que requiere cada una de estas bandas. En la tabla 4.2 se muestran estas bandas.

Sólo la banda DBS ha sido asignada oficialmente para servicios de TV directa al hogar, y usa polarización circular. Las otras dos bandas llamadas FSS (Fixed Satellite Services), usan polarización lineal y en principio fueron dedicadas a aplicaciones profesionales como la transmisión de programación de TV entre

estaciones para proveedores de este servicio por cable o transmisión ocasional entre sitios de radiodifusión.

Tabla 4.2 Las tres bandas usadas para servicios DTH y las características de su correspondiente LNB en la banda Ku

Banda	Frecuencia [GHz]	Polarización	Frecuencia del LO [GHz]	SAT-IF [MHz]
FSS low	10.95-11.70	Lineal	10.000	950-1700
DBS	11.70-12.50	Circular	10.750	950-1750
FSS high	12.50-12.75	Lineal	11.475	1025-1275

Cada tipo de LNB está caracterizado por la frecuencia de su oscilador local y se selecciona de tal forma que la salida de frecuencia intermedia IF del LNB corresponda a la que el IRD requiere para operar correctamente.

4.5.2 Ganancia de un LNB

Una especificación importante del LNB es la ganancia que cada unidad provee y es cuantificada en decibeles. Un LNB comercial produce una ganancia de 50-65 DB. Las especificaciones de ganancia de cada LNB es importante para realizar su instalación, ya que la salida de éste alimenta al IRD, y éste tiene especificaciones para la señal de entrada que el LNB debe cumplir. Por ejemplo un LNB con ganancia de 65 dB es una buena elección para una instalación en que la distancia de la antena al IRD a través del cable es grande, ya que ésta sufrirá atenuación a lo largo del recorrido y al llegar al IRD tendrá el nivel indicado. Sin embargo para una instalación en la que la antena no se encuentra muy alejada del IRD es preferible un LNB con ganancia de 50 dB.

4.6 EL RECEPTOR/DECODIFICADOR INTEGRADO IRD

El IRD es un dispositivo encargado de procesar la señal recibida por la antena de tal forma que pueda ser vista y escuchada por el usuario final a través de su televisor. Existen dos tipos básicos de IRD, el IRD analógico que se encarga de decodificar

señales de TV análoga y el IRD digital que se emplea en TV digital. En esta sección hablaremos únicamente de los IRD digitales.

4.6.1 IRD's digitales

Toda transmisión de DTH es compatible con el estándar de video digital DVB del cual se habló en el primer capítulo. La compresión digital permite transportar múltiples señales de audio y video mediante una cadena que, además de la programación de los canales, lleva información adicional como es la guía de programación y componentes de información de servicios. Esta cadena es transportada a mediante uno o varios transpondedores del satélite.

Algunas señales son destinadas a servicios de recepción libre, mientras otras son encriptadas para prevenir la recepción no autorizada de éstas. Para que el usuario final pueda recibir estas últimas señales requiere disponer de una suscripción autorizada, y, en la mayoría de los casos, requerirá también de una tarjeta electrónica que el proveedor entrega para que pueda decodificar las señales de aquellos canales por los que ha pagado el usuario.

Los estándares MPEG-2 y DVB no especifican algún sistema de acceso condicional en particular, cada proveedor es libre de elegir su propio sistema de CA según sus necesidades. Aquí existe otra restricción que debe cumplir el IRD, y es que cada IRD funciona sólo para un sistema de acceso condicional.

Para la transmisión vía satélite, la DVB primero la cadena binaria de información es convertida primero de dígitos binarios a símbolos, cada uno de los cuales se crea con dos bits. La tasa de transferencia de símbolos para transmisión por satélite es de aproximadamente 30 Msímbolos/seg pero puede variar algunos miles de símbolos por segundo, dependiendo del número de servicios que cada transpondedor contiene. El IRD digital debe ser capaz de procesar la cantidad de símbolos para una tasa de transferencia específica, a lo que se le llama rango de sintonización.

Sistemas de radiodifusión directa de tv digital y equipos caseros

La mayoría de los IRD son programados desde su fabricación para captar servicios DTH de un solo transpondedor de satélite. Esta configuración inicial incluye la frecuencia central de dicho transpondedor y formato de polarización.

Un IRD digital no tiene internamente ningún dispositivo reductor de ruido o filtro que el espectador pueda ajustar. Esta es una diferencia notable con los IRD analógicos que sí cuentan con un dispositivo como tal. Otra diferencia considerable es que la calidad de una señal en TV digital depende de la tasa de transferencia de bits mientras que para una señal analógica depende más directamente de la relación portadora ruido y una variación en éste se reflejará inmediatamente en la calidad de la imagen y sonido.

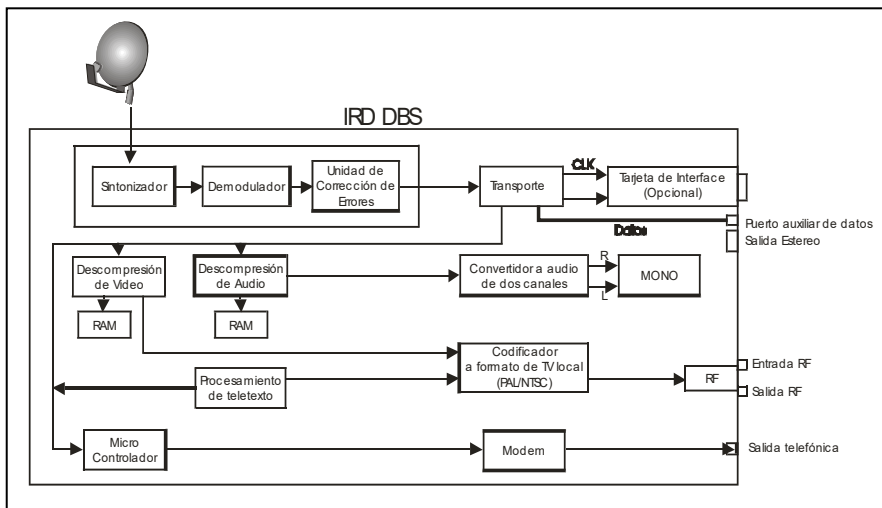


Figura 4.18 Diagrama de bloques de un IRD

Los accesos condicionales del estándar MPEG-2 usan varios de los aspectos usados por su contraparte analógica. Por ejemplo, una secuencia pseudoaleatoria de bits genera una llave electrónica. Se requiere una sincronización precisa del codificador y el decodificador, por lo que se requiere una tarjeta integrada compatible (llamada módulo de acceso condicional).

De hecho, algunos servicios DTH usan alguna versión específica de un sistema de acceso condicional que ya fue utilizado previamente para encriptar señales de TV

analógica para radiodifusión. Por ejemplo, DirectTV en Europa usa una versión del sistema de acceso condicional VideoCrypt creado por News Datacom para TV analógica de uso en Europa. Los sistemas VideoCipher RS (analógico) y DigiCipher II (digital) también tienen muchos elementos en común.

En resumen, viendo la figura 4.18 se pueden ver las principales etapas que la señal tiene que atravesar dentro de un IRD antes de poder ser desplegada y escuchada en el televisor. A continuación se hace una breve descripción de cada uno de estas etapas.

Sintonizador: Traslada la señal procedente del LNB a una segunda frecuencia intermedia mediante un oscilador sincronizado al canal seleccionado por el usuario.

Demodulador QPSK: Una vez con la señal a frecuencia fija se procede a su demodulación. La señal viene modulada en QPSK -debido a las limitaciones de potencia de los servicios DTH se exige un compromiso entre robustez contra ruido e interferencias sin excesiva penalización del espectro- por lo que la demodulación tendrá que ser coherente.

Módulo de corrección de Errores: Se emplean dos técnicas, una encaminada a evitar los errores de ráfaga y otra a evitar los de tipo aleatorio. Para recuperar estos últimos se utiliza un algoritmo de Viterbi, y para los primeros se usa un código bloque del tipo Reed-Solomon junto con un entrelazado de los símbolos en el transmisor para dispersar los errores de ráfaga y convertirlos en aleatorios.

Con todas estas técnicas se consigue una salida prácticamente libre de errores (Quasi-Error-Free) con un BER de $10e-10/10e-11$ o de $7x10e-4$ en presencia de errores de ráfagas.

Además de esto, también hace falta deshacer la aleatorización introducida en el transmisor con el objeto de mantener la anchura del espectro lo más constante posible y tener una señal con transiciones uniformemente distribuidas a la entrada del ecualizador.

Transporte (Demultiplexado): Una vez que se tiene el flujo de datos -la trama de transporte MPEG2- libre de errores, es necesario demultiplexar toda la información contenida para obtener las tramas comprimidas de video, audio y datos que pasarán al decodificador MPEG-2.

Módulo de descompresión MPEG: De él saldrá la información de audio en formato PCM y la de video en formato digital 4:2:2. Ambas serán tramas de datos digitales.

Microprocesador: Será la CPU, el cerebro encargado de controlar todos los sistemas que estamos describiendo. De arquitectura de 16/32 bits, será capaz de trabajar con al menos 5 MIPS y almacenará la información en una memoria DRAM con capacidad superior a 512Kb. Además dispondrá de una ROM de 512Kb con posibilidad de cargar el software de operaciones y su futura expansión.

Salidas: Como aún los televisores seguirán siendo exclusivamente analógicos, es necesario convertir las señales digitales de audio y video procedentes de decodificador MPEG-2 a formato analógico (PAL, SECAM o NTSC), bien en banda base para sacarlo a través del euroconector, o bien en RF para usar la entrada de antena, siendo necesario que existan ambos tipos de salidas para poder funcionar con cualquier televisor. También hará falta tener otro euroconector para un equipo de grabación de vídeo analógico y otro para digital así como la posibilidad de estar conectado a un segundo IRD analógico.

Otra salida indispensable será un modem telefónico, para poderlo usar como vía de retorno y permitir la interactividad.

También debe disponer el IRD de una salida RS-232 para poder transmitir datos con un dispositivo del tipo PC y un RS-422 para transmisión por el puerto de alta velocidad.

Tarjetas de Interfase (Acceso condicional): Puesto que en la mayoría de los casos las señales llegarán encriptadas para permitir servicios de pago, el receptor deberá disponer además de un lector de tarjetas, ya sea PCMCIA o inteligente (smart card), que enviará los códigos de criptografiado pertinentes al demultiplexor.

El acceso condicional puede ser uno de los grandes problemas que encuentre la TV digital para su expansión, al no haberse llegado a un acuerdo en el sistema de encriptado a utilizar. Debido a esta falta de acuerdo podríamos llegar a la situación de tener un IRD para cada paquete digital de pago que quisiera verse.

El DVB define solamente un tipo de interfase común que permita añadir un módulo externo que variará según el modo de acceso condicional. Parece que en principio habrá en el mercado dos maneras de gestionar este acceso. Una primera solución será alquilar el IRD con un sistema decodificador incorporado, las cadenas de TV contratarán con un fabricante y un sistema de encriptado para tener su receptor específico (ejemplos ya existentes los de Telepiú/Pace/Irdeto o Canal+/Thomson/Mediaguard). El segundo método es la compra del IRD por parte del usuario, del tipo con interfase común definido en DVB. Estos receptores incluirán un sistema de decodificación por defecto y tendrán el conector adicional para incorporar otro.

4.7 CORRECCIÓN DE PROBLEMAS EN SISTEMAS DIGITALES DE RECEPCIÓN

4.7.1 Corrección de la mala calidad de la señal debido a la mala orientación de la antena

Si en alguna ocasión el IRD deja de recibir la imagen, un técnico deberá determinar el origen de la falla. Por ello el IRD está provisto de un medidor de señal que despliega una gráfica en el televisor, como se ve en la figura 4.19. De esta forma se

toma una lectura de la señal al momento de la instalación que se usa como referencia para futuros problemas, así el instalador puede comparar los niveles de señal leídos con el que se obtuvo al momento de la instalación y tener así una idea de la falla del sistema.

Es también común que inmediatamente después de la instalación de la antena el instalador haga unas marcas que indiquen qué ángulos de elevación y azimut tenía la antena al momento de ser instalada, y de esta forma si el problema en la recepción en la señal era debido a la orientación de la antena éste podrá ser corregido inmediatamente.

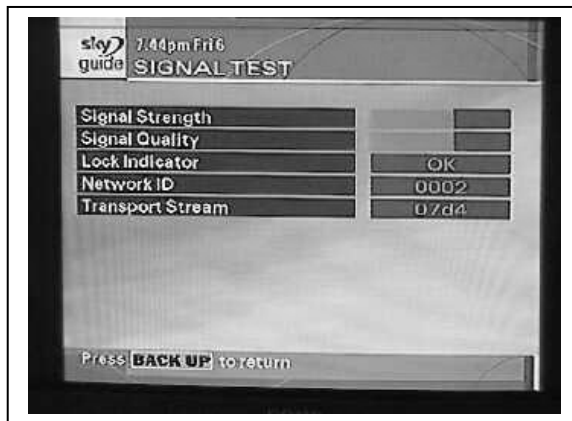


Figura 4.19 Despliegue en pantalla de las mediciones de señal recibida.

Si el IRD no está provisto de un medidor de señal entonces, el técnico necesitará conectar algún dispositivo que le permita medir la intensidad de la señal. Generalmente los dispositivos con los que estos técnicos cuentan son muy pequeños y baratos y son conectados al cable coaxial proveniente del LNB. El dispositivo proveerá al LNB el mismo voltaje de alimentación que provee el IRD. Una desventaja de este tipo de medidores es que sólo son capaces de medir la intensidad de las señales de todos los canales en conjunto, por lo que el ajuste talvez no sea el mejor; otra desventaja es que al ser estos dispositivos de bajo costo no pueden ser calibrados por lo que es común tener algunos errores en las lecturas. No obstante estos errores no son muy considerables y el ajuste hecho

generalmente es suficiente para que la calidad de los canales sea lo suficientemente buena para que el usuario quede satisfecho.

La mejor y más poderosa herramienta para solucionar este tipo de problemas es el analizador de espectros. En este aparato es posible medir tanto la intensidad de la señal como el ancho de banda de ésta, sin mencionar que se puede seleccionar cada uno de los canales en forma individual para ver la intensidad de su señal y distinguir entre polarizaciones. Sin embargo este aparato sólo se usa en ocasiones excepcionales y no todos los instaladores cuentan con él debido a su elevado costo.

4.7.2 Corrección de problemas cuando la imagen se recibe en forma intermitente

Cuando la señal de TV se recibe en forma intermitente el problema puede ser más complicado de resolver. Puede ser causado por una variedad causas, como puede ser una mala alineación del plato o que el LNB tenga pérdidas adicionales por efectos del ambiente que lo ha contaminado, o la corneta también está sucia o deforme.

En muchas ocasiones el usuario no sabe los problemas que la lluvia origina en la recepción de la señal y puede llamar al centro de atención por una solución al problema, sin embargo esta es una de las situaciones en las que el problema no puede ser resuelto por los técnicos ya que es intrínseco del sistema en total y la única forma de solucionarlo sería aumentando la potencia del satélite para la transmisión de la señal o aumentar la ganancia del LNB. Ninguna de las dos soluciones puede hacerse, la primera sería sumamente costosa en caso de poder hacerse, pero no es posible ya que se tiene un punto de operación para el transpondedor. La segunda tampoco es posible ya que el LNB se encuentra instalado en el hogar del usuario y su ganancia es fija, y la mayoría de los casos es máxima.

La forma en la que la lluvia puede afectar la imagen es de dos formas: la primera es dejando en la pantalla una imagen congelada, la última que el buffer de memoria

almacenó antes de perder la señal proveniente del satélite; la otra forma es que simplemente en la pantalla no se despliegue ninguna señal y aparezca en negro.

En la figura 4.20 se puede ver el grado de atenuación de una señal para distintas intensidades de lluvia y se puede apreciar lo considerables que pueden ser, lo que se ve reflejado directamente como fallas en la recepción.

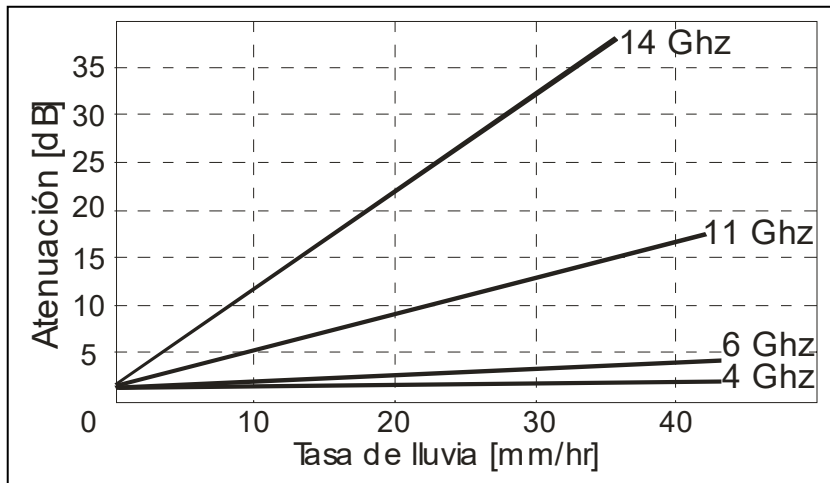


Figura 4.20 Tasa de atenuación para señales en distintas frecuencias.

4.8 DIRECTV Y SKY

4.8.1 DirectTV Latin América

DIRECTV Latin America, LLC, una empresa multinacional fundada el 13 de febrero de 1995, es propiedad de DIRECTV Latin America, Inc., una subsidiaria de Hughes Electronics Corporation y la Organización Cisneros. GLA fue creada para proveer el servicio DIRECTV™ a América Latina y el Caribe, y así ofrecer a la región entretenimiento televisivo vía satélite directo-al-hogar. DIRECTV está actualmente disponible en: Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador,

Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Puerto Rico, Trinidad & Tobago, Uruguay, Venezuela y varias Islas Caribeñas. ⁽⁴⁾

El 8 de diciembre de 1997, el satélite, Galaxy VIII-i, fue lanzado para expandir el servicio DIRECTV en América Latina en la posición de 95° W. El satélite provee a DIRECTV con 32 transpondedores adicionales que cubren toda América Latina y el Caribe. Este satélite tiene la capacidad de transmitir más de 300 canales de audio y video, además de servicios de data y entretenimiento actualmente en desarrollo. ⁽⁵⁾

El 15 de Junio de 2002 fue lanzado el satélite Galaxy IIIIC cubriendo Norte y SurAmerica en la misma posición de satélite Galaxy VIII-i. Este satélite fue lanzado exclusivamente para proveer servicios de TV directa al hogar a Latinoamérica, con 32 traspondedores. La potencia de transmisión de cada traspondedor es de 115 Watts cubriendo Latino América y el Caribe. ⁽⁶⁾

El servicio se lanzó en 1996 y DIRECTV ahora cubre 97 por ciento de su mercado potencial. DIRECTV está actualmente disponible en Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Puerto Rico, Trinidad y Tobago, Venezuela y varias islas del Caribe, llegando a un total de 27 mercados. El servicio será próximamente lanzado en Perú, Paraguay, Uruguay y los demás países de la región. ⁽²⁾

Actualmente operan cinco centros de transmisión localizados en Long Beach, California, EE.UU.; Ciudad de México, México, Caracas, Venezuela; São Paulo, Brasil y Buenos Aires, Argentina y tiene sede en San José, Costa Rica. El 22 de Mayo de 1995 se conforma GRUPO GALAXY MEXICANA (GGM) para comercializar en toda a República Mexicana.

4. <http://www.directvla.com/newcc/spanish/>

5. E. Long, Mark

The Digital Satellite TV Handbook

Newnes

1ra Ed. Gran Bretaña, 1999. Pg. 21

6. <http://directstage.directvla.com/paises/mexico/que/>

Sistemas de radiodifusión directa de tv digital y equipos caseros

La programación de DirecTV es distribuida por cuatro satélites de alta potencia construidos por Hughes Electronics Corp, estos satélites son: DirecTV 1 (DBS 1), DirecTV 2 (DBS 2), DirecTV 3 (DBS 3), DirecTV 1-R (DBS 4); dos satélites construidos por BOEING: DirecTV 4S y DirecTV 7S; y también con dos satélites construidos por LORAL SPACE: DirecTV 5 (TEMPO1) y DirecTV 6 (TEMPO 2).⁽⁷⁾

Los satélites que brindan servicio a Latinoamérica son: DirecTV 4S y DirecTV 7S, DirecTV 5 y DirecTV 6, las estaciones terrenas es una antena tipo Cassegrain con un diámetro 13.2 metros y ganancia aproximada de 65 dBi en la banda ku. La potencia de transmisión varía según las condiciones climáticas y va desde aproximadamente 30 wats hasta 2 kilowatts, sin embargo la potencia común de transmisión en días lluviosos no excede un kilowatt de potencia, las antenas cliente de tipo off-set de 60 cm, 90 cm o 120 cm dependiendo del PIRE del satélite sobre el área geográfica. En la tabla 4.3 se muestran las principales características de cada uno de los satélites usados por DirecTV.

Tabla 4.3 Satélites de DirecTV y sus principales características⁽⁷⁾

*Las especificaciones mostradas son sólo para la banda Ku

Satélite	Posición Orbital	Transpondedores	Canales	Potencia de Transmisión	Lanzamiento
DirecTV 1 (DBS 1)	110,0 °W	32	100	120 W cada transpondedor	17/12/1993
DirecTV 2 (DBS 2)	101,0 °W	16	100	240 W cada transpondedor	03/08/1994
DirecTV 3 (DBS 3)	101,0 °W	16	100	240 W cada transpondedor	10/06/1995
DirecTV 1-R (DBS 4)	101,0 °W	16	100	310 W cada transpondedor	10/10/1999
DirecTV 4S (Galaxy VIII-i)	95 °W	48	300	ases múltiples de alta directividad (30, 45, 65 y 88 W)	27/11/2001
DirecTV 5 (TEMPO 1)	119 °W	32	200	220 W cada transpondedor	08/03/1997
DirecTV 6 (TEMPO2)	119 °W	32	200	220 W cada transpondedor	05/07/2001
DirecTV 7S (Galaxy IIIIC)	95 °W	32	200	115 W cada transpondedor	15/06/2002

7. http://www.skyrocket.de/space/doc_sdat/directv-1.htm

4.8.2 SKY TV Latin América

Sky TV Latin America es una compañía conformada por Grupo Televisa, Globo, News Corporation y Tele-Communications Internacional. La compañía usa la capacidad de cuatro satélites (PAS-3R, PAS-5, PAS-6, PAS-6B, PAS-9 y hasta finales del 2001 también el Solidaridad 2) para transmitir servicios de DTH a Latino América incluyendo México y Brasil comenzando a funcionar a mediados de 1996.

Según los planes originales, el servicio se proporcionaría a través del satélite PAS III, de la empresa Panamsat, en el cual se rentarían 8 transpondedores a un costo de 24 millones de dólares anuales. Se planeaba colocar en órbita este satélite a finales de noviembre o principios de diciembre de 1994.

Sin embargo, su iniciación se vio frustrada debido a que el satélite PAS III no puede ser colocado en órbita en diciembre de 1994. El día primero de ese mes, el cohete de la empresa francesa Arianespace que se encargaría de llevar el satélite al espacio falla en su tercera etapa y cayó al mar poco después de haber despegado de su base en Kourou, Guyana Francesa. El PAS III quedó destruido.⁽⁸⁾

Los socios de SKY y Panamsat explicaron que la pérdida del satélite no revistió gravedad, pues en menos de un año se construiría un satélite sustituto. El nuevo PAS III fue enviado al espacio el 28 de noviembre de 1995, casi un año después del fracaso de su antecesor.

Ante la solidez mostrada por el proyecto DirecTV, el consorcio mexicano Televisa, el conglomerado estadounidense News Corporation, la empresa brasileña O'Globo y la compañía Tele Communications Internacional Inc. (TCI), la operadora de sistemas de cable más grande de Estados Unidos, deciden unir esfuerzos y firman el 20 de noviembre de 1995 un convenio para prestar de manera conjunta el servicio de televisión directa vía satélite, o DTH, en Latinoamérica. En esta sociedad, Televisa, News Corporation y O'Globo aportan cada una el 30 por ciento

8. http://www.skyrocket.de/space/doc_sdat/directv-1.htm

de la inversión, mientras que TCI participa con el 10 por ciento restante. El servicio se proporcionará a nivel latinoamericano por medio de los satélites Panamsat, aunque en México, Televisa decide hacerlo inicialmente a través del satélite Solidaridad del sistema Satmex; pero a finales del año 2001 se migró por completo al sistema Panamsat pasando las señales al satélite PAS-9 que es exclusivo para México y algunas regiones de Europa y reemplazó al PAS-5. Todos los transpondedores individuales tienen un ancho de banda de 36 MHz. El nombre que se asigna a este nuevo proyecto es el de Sky Entertainment Services, sin embargo para fines publicitarios se le conoce simplemente como Sky. ⁽⁹⁾

La empresa controla el 75 por ciento del mercado mexicano de la televisión por satélite, mientras que el 25 por ciento restante corresponde a DirecTV.

Las estaciones Tx son tipo Cassegrain con un diámetro de entre 9 y 11 metros, la potencia de transmisión en un día soleado es de aproximadamente de 100 a 120 watts. Las antenas cliente de tipo off-set de 75 cm, 90 cm, 100 cm y 120 cm dependiendo del PIRE del satélite sobre el área geográfica. En la tabla 4.4 se muestra las principales características de los satélites empleados por SKY TV LatinAmerica, la tasa de transmisión es de 4 a 10 Mbps y de 34 Mbps en grupo. ⁽¹⁰⁾
(11) (12)

Cabe mencionar que SKY, a diferencia de DirecTV, cuenta con un satélite que brinda servicio específicamente a México (PAS-9), a este satélite fueron migradas las señales que tenía originalmente el Solidaridad II y el PAS-5, el resto de los satélites que SKY utiliza son para cubrir el resto de Latinoamérica. En las Tablas 4.5 y 4.6 se muestra las áreas de servicio principales que cada satélite tiene.

-
8. http://www.video.com.mx/articulos/historia_de_la_television.htm
 9. <http://www.noticiasdot.com/publicaciones/2002/0902/0509/noticias0509/noticias0509-16.htm>
 10. <http://www.panamsat.com/news/pressview.asp?article=1022>
 11. http://www.boeing.com/defense-space/space/bss/factsheets/601/pas_9/pas_9.html
 12. <http://www.sat-address.com/df/ESPN-International.shtml>

Sistemas de radiodifusión directa de tv digital y equipos caseros

Tabla 4.4 Características de los Satélites usados por SKY TV LatinAmerica

*Las especificaciones mostradas son sólo para la banda Ku

Satélite	Posición Orbital	Transpondedores	Canales	Potencia de Transmisión	Lanzamiento
PAS-3	43 °W	32 (8 en uso)	100	63 W cada transpondedor	12/06/1997
Solidaridad (dejo de usarse en 2001)	113 °W	16 (ninguno en uso actualmente)			dic-94
PAS-5 (dejo de funcionar, y lo sustituyo el PAS-9)					
PAS-6	43 °W	32	200 (alta fidelidad)	110 W cada transpondedor	08/08/1997
PAS-6B	43 °W	32	200 (alta fidelidad)	140 W cada transpondedor	21/12/1998
PAS-9	58 °W	32	200 (alta fidelidad)	108 W cada transpondedor	28/07/2000

Tabla 4.5 Principales áreas de servicio por satélite según el proveedor para DirecTV⁽¹³⁾

Satélite	Posición Orbital	Proveedor	Polarización
DirecTV 1 (DBS 1)	110,0 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 2 (DBS 2)	101,0 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 3 (DBS 3)	101,0 °W	DirecTV LatinAmerica	Lineal
DirecTV 1-R (DBS 4)	101,0 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 4S (Galaxy VIII-i)	95 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 5 (TEMPO 1)	119 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 6 (TEMPO2)	119 °W	DirecTV LatinAmerica	Lineal
DirecTV 7S (Galaxy IIIC)	95 °W	DirecTV LatinAmerica DirecTV Brazil	Lineal

13. <http://www.sateliteinfos.com/gateway.asp?s=www.lyngsat.com/america.shtml>

14. <http://www.sat-address.com/df/ESPN-International.shtml>

Tabla 4.6 Principales áreas de servicio por satélite según el proveedor para SkyTV⁽¹⁴⁾.

Satélite	Posición Orbital	Proveedor	Polarización
PAS-3	43 °W	SKY Latin America	Lineal
PAS-6	43 °W	SKY Latin America, SKY Brazil	Lineal
PAS-6B	43 °W	SKY Latin America, SKY Brazil	Lineal
PAS-9	58 °W	SKY México	Lineal

CAPITULO V

CÁLCULOS DE ENLACE PARA TRANSMITIR VARIOS CANALES DIGITALES EN UN TRANSPONDEDOR COMPLETO

5.1 CALCULO DE ENLACE PARA LA TRANSMISIÓN DE CANALES DE TV DIGITAL

En esta sección nos concentraremos en calcular algunos enlaces en base a lo estudiado hasta ahora en esta tesis. Posteriormente se hará uso de un programa de cómputo para realizar la misma tarea.

5.1.2 Cálculo de enlace para el canal 4 establecido por la RARC 83 a través del satélite DirecTV 1

Se desea realizar el cálculo de enlace para una estación transmisora ubicada en México DF. La estación terrena es una antena tipo Cassegrain con un diámetro de 13.2 m y una potencia de transmisión de 800 W. Consideraremos también que se encuentra lloviendo en México DF. La estación receptora se ubica en Monterrey NL en el domicilio de un usuario final, con una antena tipo offset de .9 m de diámetro. El diámetro de la antena receptora en el satélite es de 2.5 m y se maneja un back-off de entrada de 3 dB y de 1 dB para la salida. Considere que todas las pérdidas por conectores son de 1 dB. El transpondedor contiene 3 portadoras (programas de TV). Considere 0.4 dB de pérdidas de desapuntamiento en el enlace ascendente y una relación portadora/ruido de intermodulación 95 [dBHz].

Obtención de datos preliminares

La información proporcionada es insuficiente para proceder inmediatamente con el cálculo del enlace. Sin embargo, contamos con la información suficiente para deducir el resto de la información requerida empleando los conceptos vistos hasta ahora en la presente tesis.

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

- **Información general**

Según la RARC 83 de la tabla 5.1 (vease también Tabla 1.12 y A.1 del Apéndice) podemos ver que las frecuencias del canal 4 para el enlace son:

Enlace ascendente: 17,368 MHZ

Enlace descendente: 12,268 MHz

Tabla 5.1 Plan de Frecuencias para la región 2 planteado por la RARC 83.

Canal	Polarización	Frecuencia (Enlace de subida)	Frecuencia (Enlace de bajada)	Canal	Polarización	Frecuencia (Enlace de subida)	Frecuencia (Enlace de bajada)
1	R	17324.00	12224.00	17	R	17557.28	12457.28
2	L	17338.58	12238.58	18	L	17571.86	12471.86
3	R	17353.16	12253.16	19	R	17586.44	12486.44
4	L	17367.74	12267.74	20	L	17601.02	12501.02
5	R	17382.32	12282.32	21	R	17615.60	12515.60
6	L	17396.90	12296.90	22	L	17630.18	12530.18
7	R	17411.48	12311.48	23	R	17644.76	12544.76
8	L	17426.06	12326.06	24	L	17659.34	12559.34
9	R	17440.64	12340.64	25	R	17673.92	12573.92
10	L	17455.22	12355.22	26	L	17688.50	12588.50
11	R	17469.80	12369.80	27	R	17703.08	12603.08
12	L	17484.38	12384.38	28	L	17717.66	12617.66
13	R	17498.96	12398.96	29	R	17732.24	12632.24
14	L	17513.54	12413.54	30	L	17746.82	12646.82
15	R	17528.12	12428.12	31	R	17761.40	12661.40
16	L	17542.70	12442.70	32	L	17775.98	12675.98

- **Información del Satélite**

Dado que se trata del satélite DirecTV 1 de las tablas 5.2 y 5.3 (véanse también tablas 4.3, 4.5 y A.2, A.3 del apéndice) se pueden obtener los siguientes datos:

Posición orbital: 110.0 °W

Polarización: Circular (izquierda según la tabla 1.12)

Potencia de transmisión: 120 W por transpondedor

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

Según la sección 2.4 dado que el transpondedor es empleado únicamente para la transmisión de TV digital entonces tendremos que:

Ancho de Banda del transpondedor: 24 MHz

Tabla 5.2 Satélites de DirecTV y sus principales características

Satélite	Posición Orbital	Transpondedores	Canales	Potencia de Transmisión	Lanzamiento
DirecTV 1 (DBS 1)	110,0 °W	32	100	120 W cada transpondedor	17/12/1993
DirecTV 2 (DBS 2)	101,0 °W	16	100	240 W cada transpondedor	03/08/1994
DirecTV 3 (DBS 3)	101,0 °W	16	100	240 W cada transpondedor	10/06/1995
DirecTV 1-R (DBS 4)	101,0 °W	16	100	310 W cada transpondedor	10/10/1999
DirecTV 4S (Galaxy VIII-i)	95 °W	48	300	ases múltiples de alta directividad (30, 45, 65 y 88 W)	27/11/2001
DirecTV 5 (TEMPO 1)	119 °W	32	200	220 W cada transpondedor	08/03/1997
DirecTV 6 (TEMPO2)	119 °W	32	200	220 W cada transpondedor	05/07/2001
DirecTV 7S (Galaxy IIIC)	95 °W	32	200	115 W cada transpondedor	15/06/2002

Tabla 5.3 Polarización de señales para los satélites DirecTV.

Satélite	Posición Orbital	Proveedor	Polarización
DirecTV 1 (DBS 1)	110,0 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 2 (DBS 2)	101,0 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 3 (DBS 3)	101,0 °W	DirecTV LatinAmerica	Lineal
DirecTV 1-R (DBS 4)	101,0 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 4S (Galaxy VIII-i)	95 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 5 (TEMPO 1)	119 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 6 (TEMPO2)	119 °W	DirecTV LatinAmerica	Lineal
DirecTV 7S (Galaxy IIIC)	95 °W	DirecTV LatinAmerica DirecTV Brazil	Lineal

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

- **Información de la estación terrena transmisora**

En la tabla 5.4 (ver también tabla A.6 del apéndice) se muestran las coordenadas geográficas y altitudes de varias ciudades de México ⁽¹⁾.

Tabla 5.4 Coordenadas geográficas de algunas ciudades de México

Ciudad	Latitud	Longitud	Altitud ho[M]	R0,01
México D.F.	19.433 °N	99.133 °W	2240	80
Guadalajara	20.67 °N	103.38 °W	1567	60
Monterrey	25.67 °N	100.307 °W	538	60
Mérida	20.96 °N	89.622 °W	10	100
Pto. De Veracruz	19.2 °N	96.137 °W	14	90
Hermosillo	29.07 °N	110.96 °W	210	20
Acapulco	16.85 °N	99.89 °W	10	80
Tapachula	14.54 °N	92.17 °W	60	100

Podemos ver entonces que para la ciudad de México las coordenadas geográficas son las siguientes:

Estación Terrena transmisora (México DF): Latitud: 19.433 °N
Longitud: 99.133 °W

Altitud: 2240 m

- **Información de la estación terrena receptora**

Para la estación terrena receptora ubicada en Monterrey NL, también de la tabla 5.4 podemos obtener su posición geográfica:

Estación Terrena receptora (Monterrey NL): Latitud: 25.67 °N
Longitud: 100.307 °W

Altitud: 538 m

1 Neri Vela, Rodolfo
Comunicaciones Por Satélite
Thomson
1ra Edición, México 2002
Pg. 274

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

Con esta información, es suficiente para comenzar con los cálculos:

Calculo del enlace ascendente

Sabemos de la ecuación 3.62 que:

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{ascendente} = \underbrace{PIRE}_{[dBW]} - \underbrace{L_{propagación}}_{[dB]} + \underbrace{\left(\frac{G}{T}\right)_{sat}}_{[dB/K]} - 10 \log k \quad [dBHz] \quad 5.1$$

Donde las pérdidas de propagación incluyen las pérdidas por espacio libre, por absorción atmosférica y lluvia.

Calculando entonces las pérdidas por espacio libre, de la ecuación 3.24 tenemos:

$$[L_{e.l}]_{dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi r f}{3 \times 10^8} \right) \quad (5.2)$$

donde r es la distancia entre la estación terrena receptora y el satélite que se calcula mediante la ecuación (3.82):

$$r = 35,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos \theta'} \quad [km] \quad (5.3)$$

siendo θ' , según la ecuación (3.81):

$$\theta' = \text{ang} \cos[\cos l \cos \Delta L] \quad (5.4)$$

donde l es la latitud de la estación terrena y ΔL es la diferencia entre las longitudes del satélite y la estación terrena, entonces:

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

$$\Delta L = 110 - 99.133 = 10.867^\circ$$

Sustituyendo en (5.4) tenemos:

$$\theta' = \text{ang} \cos[\cos(19.433^\circ)\cos(10.867^\circ)] = 22.16^\circ$$

Sustituyendo en la ecuación (5.3):

$$r = 35,786\sqrt{1.4199 - 0.4199\cos(22.16^\circ)} = 36,336 \quad [km]$$

Y dado que la frecuencia en el enlace ascendente es 17,368 MHz, de la ecuación (5.2) tenemos:

$$[L_{e.l}]_{dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi (36,336 \times 10^3) (17,368 \times 10^6)}{3 \times 10^8} \right) = 208.44 \quad [dB]$$

Ahora, para calcular las pérdidas por absorción atmosférica nos valemos de la ecuación (3.26).

$$[L_{a.a}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \text{ cosec} \theta \quad (5.5)$$

L_{cenit} es la a atenuación por absorción atmosférica en dirección al cenit

$L_{a.a}$ es la atenuación por absorción atmosférica para el ángulo θ

y el ángulo de elevación θ lo calculamos mediante la ecuación (3.79):

$$\theta = \text{ang} \tan \left\{ \frac{(\cos l)(\cos \Delta L) - \frac{R_e}{h}}{\text{sen}[\text{ang} \cos(\cos l \cos \Delta L)]} \right\} \quad (5.6)$$

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

donde:

l = Latitud de la estación terrena

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

R_e = radio de la tierra (6,378 km)

h = radio de la órbita (42,164 km)

de esta forma:

$$\theta = \text{ang tan} \left\{ \frac{\cos(19.433^\circ) \cos(10.867^\circ) - \frac{6,378}{42,164}}{\text{sen}[22.16]} \right\} = 64^\circ$$

Sustituyendo en la ecuación (5.5):

$$[L_{a.a}]_{dB} = [L_{cenit}]_{dB} \cos ec(64^\circ)$$

Para calcular la atenuación por absorción atmosférica en dirección al cenit empleamos la figura 5.1 (véanse también figura 3.4 y A.1 del Apéndice). De esta forma obtenemos que la atenuación por absorción atmosférica es:

$$[L_{a.a}]_{dB} = [0.05]_{dB} \cos ec(64^\circ) = 0.055 \quad [dB]$$

La última atenuación que hay que considerar es la atenuación por lluvia, para ello seguiremos el procedimiento planteado en la sección 3.6.

dado que la latitud de la estación terrena es menor a 36° , de la ecuación (3.26) podemos obtener la distancia entre la estación terrena y las nubes de la siguiente manera:

$$h_r [km] = 3 + 0.028l \quad (5.7)$$

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

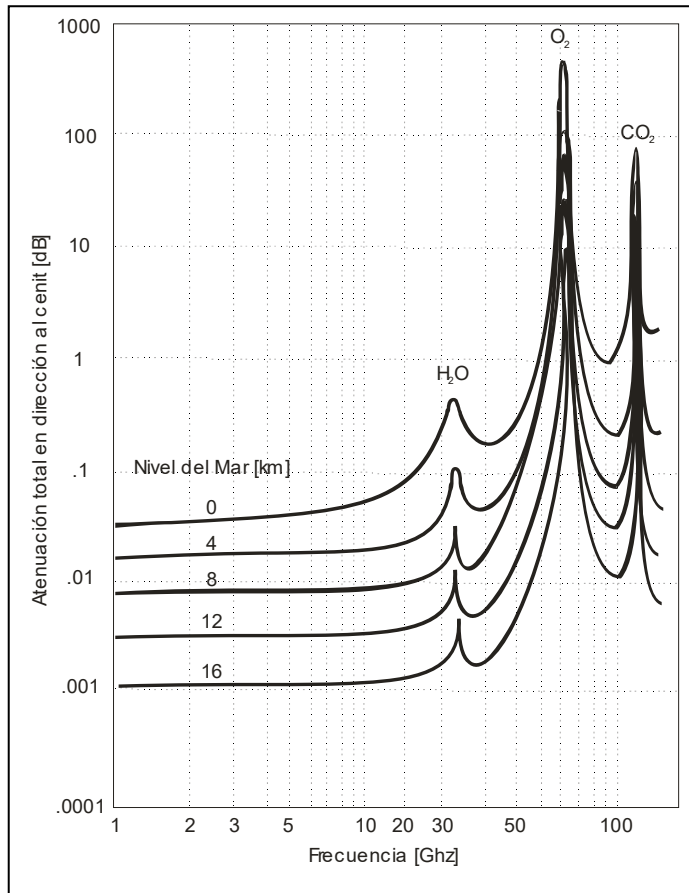


Figura 5.1 Atenuación por absorción atmosférica en dirección al cenit con temperatura de 20°C latitud 45° N y humedad moderada.

Entonces el valor de h_r será:

$$h_r [km] = 3 + 0.028(19.433) = 3.54 [km]$$

Y de la ecuación (3.27)

$$d = \frac{h_r - h_0}{\text{sen } \theta} \quad (5.8)$$

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

sabiendo que la altitud de la estación terrena es $h_0=2240$ m, obtenemos:

$$d = \frac{3.54 \times 10^3 \text{ [m]} - 2.240 \times 10^3 \text{ [m]}}{\text{sen}(64^\circ)} = 1.44 \text{ [km]}$$

A continuación hay que calcular un factor reductor $r_{0.01}$ que para una disponibilidad del 99.99%. La ecuación (3.29) dice:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + \left(\frac{d}{35 \bullet e^{-0.015 R_{0.01}}} \right) \cos \theta} \quad (5.9)$$

$R_{0.01}$ es la intensidad de la lluvia en [mm/hr] excedida 0.01% en un año, para obtener este dato nos valemos de la figura 5.2 (véanse también las figuras 3.5 y A.2 del apéndice). De ella podemos determinar que zona hidrometeorológica corresponde a la ubicación de la estación terrena, y con este dato podemos obtener de la tabla 5.5 (veanse también tabla 3.1 y A.5 del apéndice) la intensidad de lluvia que corresponde a esa región para una disponibilidad del 99.99%.

De esta forma vemos que a la ciudad de México le corresponde una zona hidrometeorológica N, con lo que podemos ver de la tabla 5.5 que la intensidad de lluvia para una disponibilidad del 99.99% es $R_{0.01} = 95$, o bien se puede obtener directamente de la figura 5.3 (ver figuras 3.6 y A.3 del apéndice). Sustituyendo este dato en la ecuación (5.9) obtenemos el factor $r_{0.01}$.

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1.44}{35 \bullet e^{-0.015(95)}} \right) \cos(64^\circ)} = 0.93$$

A continuación hay que obtener el coeficiente de atenuación específica γ , expresado dB/km, según la expresión (3.30)

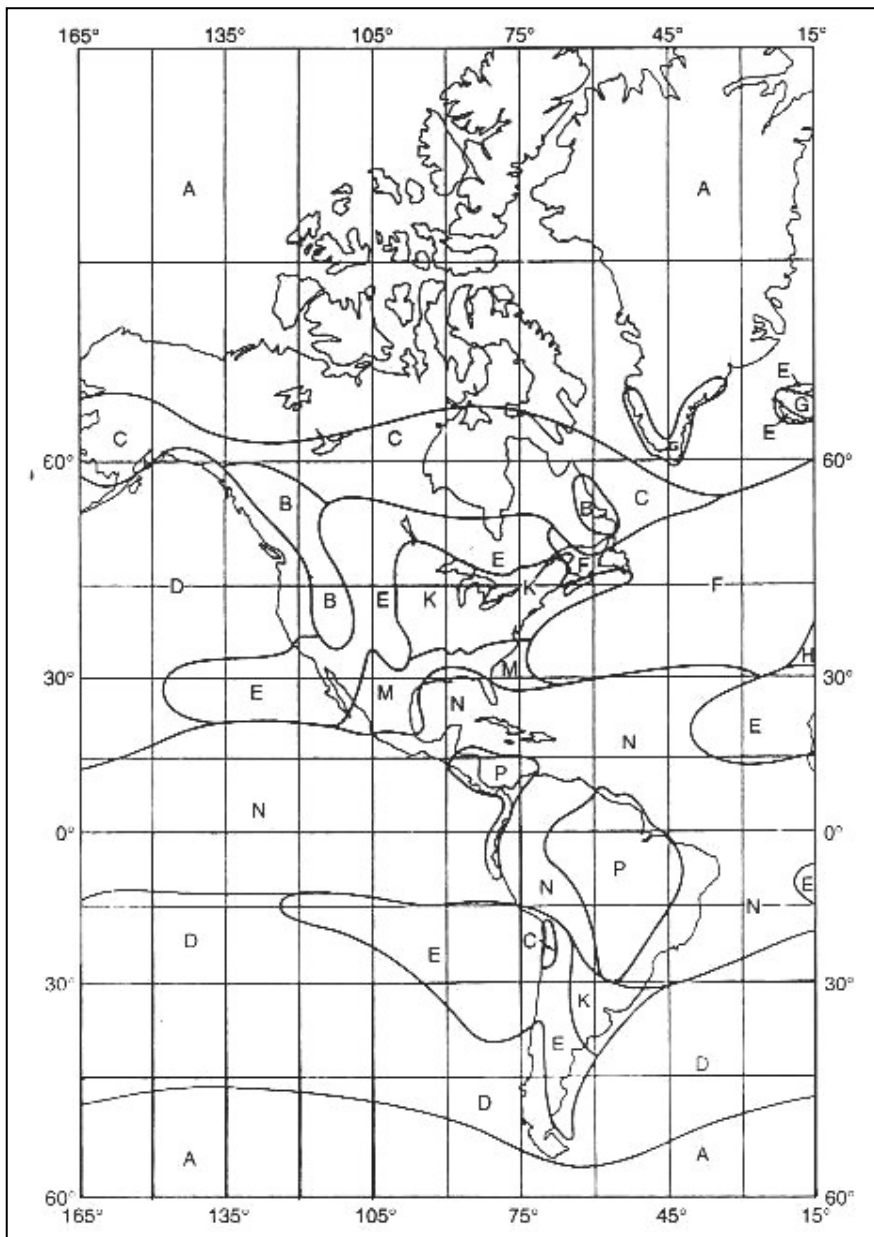


Figura 5.2 Zonas hidrometeorológicas para el Continente Americano.

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

Tabla 5.5 Intensidad de lluvia para las regiones designadas por la CCIR

PEx *	Estadística de Tasa de Lluvia Acumulada														
	Intensidad de Lluvia Excedida (mm/h)														
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
1	<.01	0.5	0.7	2.1	0.6	1.7	3	2	8	1.5	2	4	5	12	24
0,3	0.8	2	2.8	4.5	2.4	4.5	7	4	13	4.2	7	11	15	34	49
0,1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
0,03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105	96
0,01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0,003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200	142
0,001	12	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250	170

- PEx: Porcentaje de tiempo excedido en un año [%]

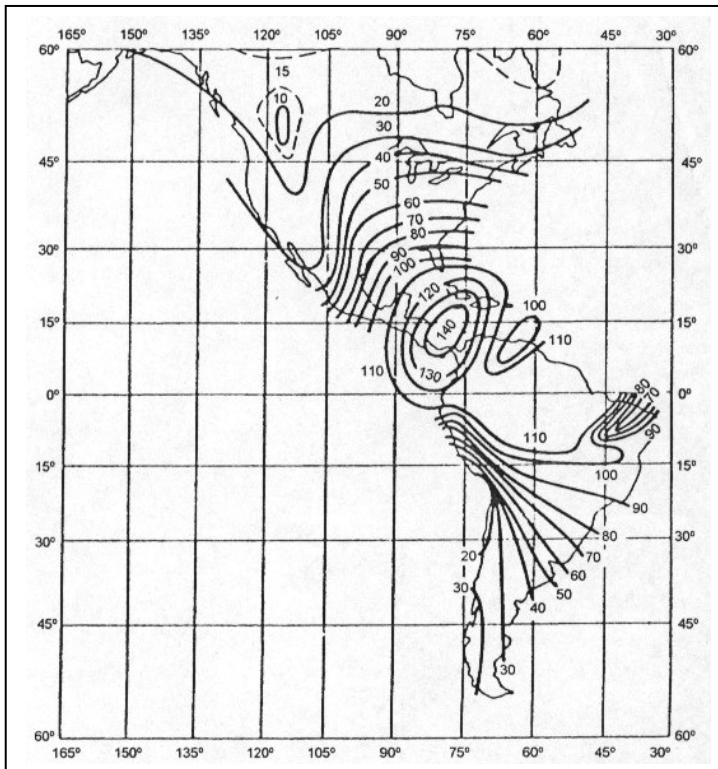


Figura 5.3 Contornos de intensidad de lluvia en mm/h que es excedida durante 0.01% del tiempo en un año según la CCIR.

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

$$\gamma = a \cdot R_{0.01}^b \left[\frac{dB}{Km} \right] \quad (5.10)$$

los coeficientes a y b se obtiene de la tabla 5.6 (ver también tabla 3.2 y A.6 del apéndice), sin embargo dado que la polarización es circular entonces para obtener estos coeficientes empleamos las expresiones (3.31) y (3.32).

$$a_c = \frac{a_h + a_v}{2} \quad (5.11) \quad \text{y} \quad b_c = \frac{a_h \cdot b_h + a_v \cdot b_v}{2 \cdot a_c} \quad (5.12)$$

Tabla 5.6 Coeficientes de atenuación específica para polarización horizontal y vertical publicados por la CCIR

Frecuencia [GHz]	a _h	a _v	b _h	b _v
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
2	0.0001544	0.000138	0.963	0.923
4	0.000650	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
10	0.0101	0.0087	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.200
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
30	0.187	0.167	1.021	1.000

De estos datos podemos trazar una curva aproximada de los coeficientes a y b para todo el rango de frecuencias, como se muestra en la figuras 5.4 y 5.5 (ver también figuras A.4 y A.5 del apéndice), o bien interpolando, de esta forma tenemos que:

$$a_c = \frac{0.0559 + 0.0513}{2} = 0.0536 \quad b_c = \frac{(0.0559)(1.1265) + (0.0513)(1.0965)}{2 \cdot (0.0536)} = 1.11$$

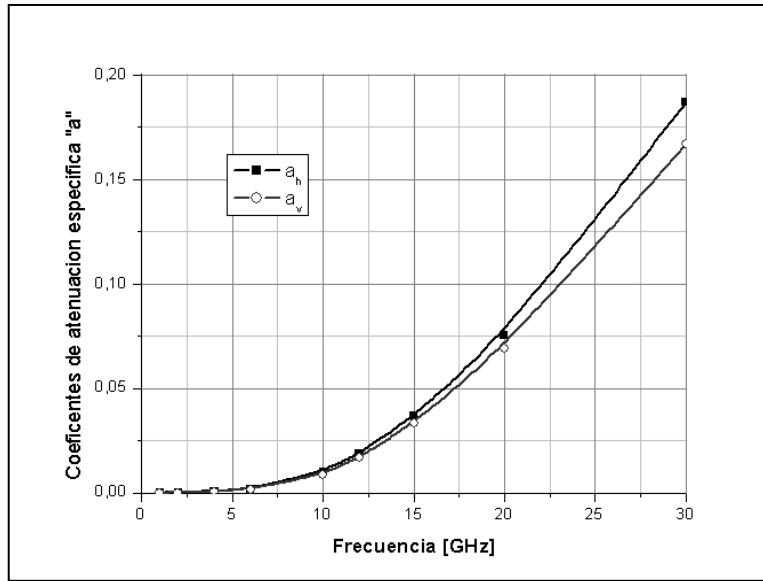


Figura 5.4 Curva aproximada para los coeficientes a_h y a_v

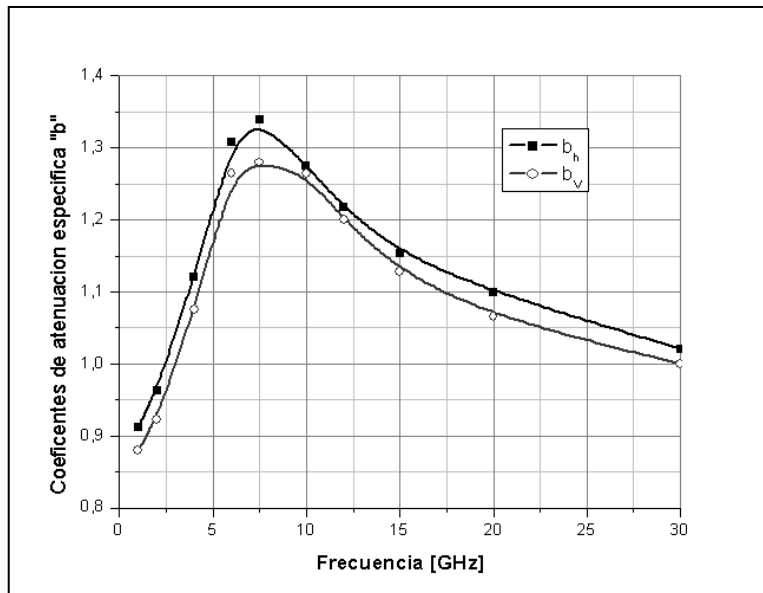


Figura 5.5 Curva aproximada para los coeficientes b_h y b_v

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

Sustituyendo en (5.10):

$$\gamma = 0.0536 \cdot 95^{1.1} = 8.02 \left[\frac{dB}{Km} \right]$$

La atenuación por lluvia (L_{lluvia}) para una disponibilidad del 99.99% estará dada por la ecuación (3.33):

$$L_{lluvia0.01} = \gamma \cdot d \cdot r_{0.01} \quad [dB] \quad (5.13)$$

Sustituyendo los datos con lo que ya contamos:

$$L_{lluvia0.01} = 8.02 \cdot 1.44 \cdot 0.93 = 10.74 \quad [dB]$$

Ajustando para una disponibilidad del 99.9% conforme a la ecuación (3.34)

$$L_{lluvia p} = \left[0.12 p^{-(0.546+0.043 \log(p))} \right] \bullet L_{lluvia0.01} \quad (5.15)$$

siendo $p = 100-99.9 = 0.1$, de esta forma:

$$L_{lluvia p} = \left[0.12 \cdot (0.1)^{-(0.546+0.043 \log(0.1))} \right] \bullet 10.74 = 4.1$$

Finalmente podemos sumar todas las atenuaciones para obtener la atenuación total en el enlace de subida.

$$L_{total} = L_{e.l.} + L_{a.a.} + L_{lluvia}$$

Por lo tanto la atenuación total en el enlace de subida será:

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

$$L_{total} = 208.4 + 0.055 + 4.1 = 212.55 \text{ [dB]}$$

Calculando el PIRE en la transmisión:

$$[PIRE]_{dBW} = 10\log P_T + 10\log G_T - \text{Backoff}_{salida} - L_{conectores} \quad (5.16)$$

Calculando G_T según la ecuación (3.2)

$$G_T = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (5.16)$$

obteniendo λ para la frecuencia ascendente:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{17,368 \times 10^6} = 17.27 \times 10^{-3} \text{ [m]}$$

Como se vio en la sección 4.1.2 podemos considerar que para una antena tipo Cassegrain se tiene una eficiencia de hasta 80%. Para ser realistas la consideraremos del 75%, de esta forma:

$$G_T = 0.75 \left(\frac{\pi \cdot 13.2}{17.27 \times 10^{-3}} \right)^2 = 4,324 \times 10^3$$

Sustituyendo en la ecuación (5.16) junto con los demás datos proporcionados al inicio del problema:

$$[PIRE]_{dBW} = 10\log(800) + 10\log(4323 \times 10^3) - 3 - 1 = 91.33 \text{ [dBW]}$$

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

Calculando la figura de mérito, referida a la entrada del LNA según la ecuación (3.61)

$$\left[\left(\frac{G}{T} \right)_{sat} \right]_{\frac{dB}{K}} = G_{\max} - L_{desapuntamiento} - 10 \log T_{sat} - L_{conectores} \quad (5.17)$$

Si la antena tienen un diámetro de 2.5 m y una eficiencia del 80%, entonces:

$$G_{\max} = 0.8 \left(\frac{\pi \cdot 2.5}{17.27 \times 10^{-3}} \right)^2 = 165.45 \times 10^3$$

$$G_{\max} = 52.18 [dB]$$

Obteniendo la Temperatura de ruido a la entrada del LNA. Como no está lloviendo en toda la extensión de la huella del satélite entonces podemos considerar que la temperatura de la antena es igual a 290°K, de la expresión (3.50) y suponiendo considerando una temperatura nominal ,proporcionada por el fabricante, del LNA igual a 500 °K, tenemos que:

$$T_{S1} = \frac{T_{antena}}{L_{conectores}} + T_{conectores} + T_{LNA}^{(nominal)} \quad (5.18)$$

entonces:

$$T_{S1} = \frac{290}{\text{antilog}\left(\frac{1}{10}\right)} + 290 \left(1 - \frac{1}{\text{antilog}\left(\frac{1}{10}\right)} \right) + 500 = 790 [K]$$

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

Sustituyendo en la expresión (5.17)

$$\left[\left(\frac{G}{T} \right)_{sat} \right]_{\frac{dB}{K}} = 52.18 - 0.4 - 1 - 10 \log(790) = 21.8 \left[\frac{dB}{K} \right]$$

Con la información obtenida hasta este momento tenemos todos los recursos para calcular la relación portadora/ruido para el enlace ascendente, según la expresión (3.62):

$$\left(\frac{C}{N_o} \right)_{ascendente} = \underbrace{PIRE}_{est.terrena[dBW]} - \underbrace{L_{propagación}}_{[dB]} + \underbrace{\left(\frac{G}{T} \right)_{sat}}_{[dB/K]} - 10 \log k \quad [dBHz] \quad (5.19)$$

sustituyendo:

$$\left(\frac{C}{N_o} \right)_{ascendente} = 91.33 - 212.55 + 21.8 - 10 \log(1.38 \times 10^{-3}) \quad [dBHz]$$

$$\left(\frac{C}{N_o} \right)_{ascendente} = 128.58 \quad [dBHz]$$

Cálculo de enlace descendente

Con los datos de la ubicación de la estación terrena receptora podemos calcular según las expresiones (5.3) y (5.4) la distancia real entre la antena receptora y el satélite, entonces:

$$\theta' = \arccos[\cos(25.67) \cos(110^\circ - 100.307^\circ)] = 27.32^\circ$$

$$r = 35,786 \sqrt{1.4199 - 0.4199 \cos(27.32^\circ)} = 36,614 \quad [km]$$

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

De las expresión (5.2) obtenemos la atenuación por espacio libre, considerando que la frecuencia descendente es de 12,268 MHz:

$$[L_{e.l}]_{dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi \cdot 36,614 \times 10^3 \cdot 12,268 \times 10^6}{3 \times 10^8} \right) = 205.5 \text{ [dB]}$$

Para la atenuación por absorción atmosférica, de las ecuaciones (5.6) y (5.5):

$$\theta = \text{ang tan} \left\{ \frac{0.88 - \frac{6,378}{42,164}}{\text{sen}[27.32]} \right\} = 57.8^\circ$$

Sustituyendo en la ecuación (5.5), y obteniendo la atenuación por absorción atmosférica en dirección al cenit de la figura 5.1:

$$[L_{a.a}]_{dB} = [0.04]_{dB} \cos ec(57.8^\circ) = 0.047$$

Sumando la atenuación por espacio libre y de absorción atmosférica obtenemos la atenuación total en el enlace descendente:

$$L_{total} = 205.5 + 0.047 = 205.547 \text{ [dB]}$$

Ahora es necesario calcular el PIRE para la ubicación de la estación terrena receptora, los cuales proporciona el proveedor de servicios o el fabricante del satélite. En la figura 5.6 (ver también figura A.7 del apéndice) se muestra los contornos de PIRE para el satélite DirecTV1.

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

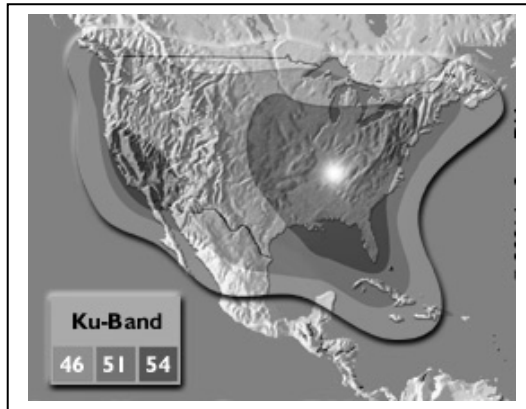


Figura 5.6 Contornos de Pire para el satélite DirecTV-1 ⁽²⁾

Entonces para la ubicación de la estación terrena en Monterrey NL, tenemos que el PIRE es de 51 dBW.

$$PIRE = 51 \text{ [dBW]}$$

Obteniendo la figura de mérito, de las ecuaciones (5.16) y (5.18) obtenemos la ganancia de la antena receptora y la temperatura de ruido referida a la entrada del LNA en la estación terrena para posteriormente sustituir en la ecuación (5.17):

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{12,268 \times 10^6} = 24.45 \times 10^{-3} \text{ [m]}$$

Si consideramos, según la sección 4.1.2, que una antena offset tiene una eficiencia del 70% aproximadamente entonces:

$$G_T = 0.8 \left(\frac{\pi \cdot 0.9}{24.45 \times 10^{-3}} \right)^2 = 10698.35$$

2. <http://www.SatcoDX6.com/2500>

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

$$G_{\max} = 40.3 [dB]$$

Calculando la temperatura de la antena según la expresión (3.60) tenemos:

$$T_{\text{antena}} = 15 + \frac{30}{0.9} + \frac{180}{57.8^\circ} = 51 [K]$$

Para la temperatura a la entrada del LNA , si la temperatura del LNA es de aproximadamente 40 °K.

$$T_{s2} = \frac{51}{\text{antilog}\left(\frac{1}{10}\right)} + 290 \left(1 - \frac{1}{\text{antilog}\left(\frac{1}{10}\right)} \right) + 40 = 140.31 [K]$$

Ahora podemos calcular la figura de mérito según la expresión (5.17).

$$\left[\left(\frac{G}{T} \right)_{\text{sat}} \right]_{\frac{dB}{K}} = 40.3 - 1 - 10 \log(140.31) = 17.8 \left[\frac{dB}{K} \right]$$

Con esta información podemos calcular finalmente la relación portadora ruido en el enlace descendente según la ecuación (5.20).

$$\left(\frac{C}{N_o} \right)_{\text{descendente}} = \underbrace{PIRE}_{[dBW]} - \underbrace{L_{\text{propagación}}}_{[dB]} + \underbrace{\left(\frac{G}{T} \right)_{\text{est}}}_{[dB/K]} - 10 \log k \quad [dBHz] \quad (5.20)$$

De esta forma:

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{descendente} = 51 - 205.5 + 17.8 + 228.6 = 90.9 \text{ [dBHz]}$$

Ahora podemos calcular la relación portadora/ruido total mediante la expresión (3.71):

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total}} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{ascendente}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{inter\ modulación}} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{descendente}} \quad (5.21)$$

De esta forma tenemos:

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total}} = \frac{1}{anti\ log\left(\frac{128.58}{10}\right)} + \frac{1}{anti\ log\left(\frac{95}{10}\right)} + \frac{1}{anti\ log\left(\frac{90.9}{10}\right)}$$

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total}} = 1.38 \times 10^{-13} + 316.22^{-12} + 812.8 \times 10^{-12} = 1.29 \times 10^{-9}$$

por lo tanto:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{total} = 89.5 \text{ [dBHz]}$$

Para saber si este enlace cumple con la calidad requerida para la transmisión de TV digital por satélite hay que corroborar, como se indica en la sección 2.4, que el BER sea del orden de 10^{-10} a 10^{-12} .

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

Sabemos que la tasa de bits para el grupo de programa es de 6.8 Mbps para cada una de las 5 portadoras por lo tanto para el grupo $R_{bits} = 34$ Mbps. De la ecuación (3.74) podemos despejar la relación (E_b/N_0) .

$$\left(\frac{C}{N_0}\right) = \left(\frac{E_b}{N_0}\right) + 10 \log R_{bits} \quad [dBHz] \quad (5.22)$$

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = \left(\frac{C}{N_0}\right)_{total} - 10 \log R_{bits} \quad [dBHz] \quad (5.23)$$

Para obtener la tasa de transmisión es necesario hacer algunas consideraciones. Como se habló en el capítulo 2, el ancho de banda de un transpondedor es de 24 MHz, también se vio que en los sistemas DBS se utiliza la modulación QPSK, con dos bits por símbolo.

La experiencia ha mostrado que 20 mega símbolos por segundo pueden ser transmitidos empleando un ancho de banda de 24 MHz, de esta forma tenemos:

$$20 \text{ mega símbolos por segundo} * 2 \text{ bits/símbolo} = 40 \text{ Megabits / segundo}$$

En el caso de DIRECTV, la codificación Reed-Solomon es del tipo (146, 130), con un byte de sincronía. Esto quiere decir que la tasa de codificación efectiva es 130/147. El código Reed-Solomon puede entonces corregir arriba de 8 bytes erróneos en una cadena de 147 bytes.

Los estándares DVB utilizan la estructura de compresión MPEG 2, la cual de una cadena de 188 bytes de longitud. En este caso se emplea una codificación de (200, 188). Un código llamado inherente puede ser seleccionado de cinco diferentes valores: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, y 7/8.

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

Para DIRECTV el código inherente convolucional puede tomar dos valores: 2/3 o 6/7, dependiendo de la potencia de transmisión del transpondedor. De esta forma la tasa de codificación es⁽³⁾:

$$\frac{130}{147} * \frac{2}{3} = .5896 \quad \text{Para baja potencia de transmisión del transpondedor}$$

$$\frac{130}{147} * \frac{6}{7} = .758 \quad \text{Para alta potencia de transmisión del transpondedor}$$

Generalmente los contornos de PIRE que el fabricante de satélites proporciona es para una potencia baja de transmisión. Por lo tanto, volviendo con el problema, la tasa de transmisión correspondiente será:

$$40 \text{ Mbps} * 0.5896 = 23.58 \text{ Mbps}$$

Entonces obtenemos el siguiente resultado, de relación (E_b/N_0):

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right) = 89.2 - 10 \log(23.58 \times 10^6) = 15.47 \text{ [dBHz]}$$

Comparando este valor en la gráfica de la figura 5.7 (ver también figura 3.19 y A.6 del apéndice), podemos apreciar que la tasa del BER real correspondiente es de aproximadamente 10^{-9} . Debe notarse que la tasa de error obtenida se encuentra por arriba de lo que el estándar requiere, sin embargo, debemos tomar en cuenta que el estándar está planteado para el caso teórico. En este caso la tasa de error obtenida es muy satisfactoria ya que está por debajo incluso de 10^{-12} .

3. C. Mead, Donald
Direct Broadcast Satellite Communications An MPEG Enabled Service
Prentice Hall
1ra Ed. Estados Unidos, 2000. Pg 32

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

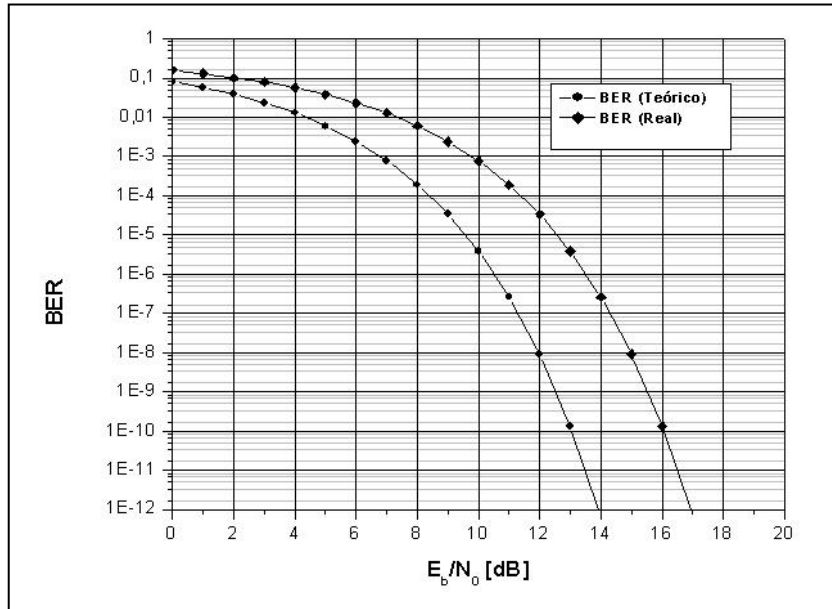


Figura 5.7 Tasa de bits con error (BER) o P_e en función del cociente (E_b/N_0) para señales moduladas en BPSK y QPSK.

Hay varias consideraciones que se deben tomar en cuenta antes de hacer un juicio concreto sobre los resultados. Los datos con los que se trabajó en este ejercicio son aproximados. Por ejemplo, el ruido de intermodulación es un dato que el fabricante del satélite no proporciona; esto hace difícil tener un cálculo de precisión. Sin embargo, el factor más importante es la tasa de errores que se encuentra directamente ligado a la tasa de transmisión. Los datos que aquí se proporcionan de BER práctico no son los que utilizan en la realidad los proveedores de TV digital; la información que aquí se presenta son un promedio de varios datos estadísticos pero no de los que el proveedor emplea para sus cálculos. El BER real está relacionado con la ubicación geográfica de la estación receptora, factores climáticos y otros aspectos que varían de sitio en sitio. Es por ello que los resultados obtenidos aquí son una aproximación que permiten ver la forma en que un proveedor realiza sus cálculos de enlace, pero no quiere decir que éstos sean los valores reales que ellos tienen.

Cálculos de enlace para transmisión de canales de TV digital en un transpondedor completo

Para facilitar los cálculos, en esta tesis se incluye un programa, del cual se habla en el apéndice B, que realiza cálculos de enlaces para TV digital por satélite en el territorio mexicano. Existen actualmente varios programas que pueden realizar cálculos de enlaces más complicados. Sin embargo el programa que aquí se presenta es completamente didáctico, de uso muy sencillo y práctico y se especializa en calcular enlaces para señales de TV digital por satélites para radiodifusión en México. Este puede ser utilizado por estudiantes de ingeniería para complementar sus conocimientos en materias como “Satélites y Microondas” o cualquier otra materia relacionada; incluso puede ser tomado como referencia para cálculos prácticos reales para la instalación de antenas receptoras en distintas regiones del territorio mexicano.

CONCLUSIONES

La televisión digital por satélite y todos los servicios de radiodifusión directa al hogar vía satélite son todo un avance tecnológico y son incluso un símbolo de nuestra época. Muchas veces el usuario no ve todo lo que existe detrás de una imagen desplegada en su televisor. Sin embargo existe un gran cúmulo de tecnología e investigación que ha tomado decenas de años para llegar al punto donde se encuentra hoy. Este desarrollo tecnológico es una obra creada por la ingeniería y es todo un logro tener los resultados que hoy se tienen en el área de las telecomunicaciones vía satélite.

En esta tesis se estudió a detalle la transmisión de señales de TV digital, desde la codificación y compresión hasta la propia radiodifusión mediante el uso de satélites y su recepción en el hogar de los usuarios. Por ello podemos decir que se tienen bases sólidas para comprender los conceptos que existen detrás de los servicios DBS y se cuenta además con los conceptos necesarios para realizar completamente los cálculos necesarios para un enlace de radiodifusión de TV digital vía satélite. Esto es útil tanto en la instalación de una antena receptora, hasta para elegir la mejor ubicación de una estación transmisora y las características que ésta debe tener para optimizar los recursos con que se cuenta en el satélite.

Ya en forma específica debemos decir que para lograr una transmisión de calidad en una señal de TV digital es necesario tener teóricamente una tasa de errores entre 10^{-10} y 10^{-12} . La tasa de error teórica difiere de la tasa real, sin embargo es necesario cumplir con los requerimientos del estándar para tener una señal de calidad en el aparato receptor del usuario. En esta tesis se vio un ejemplo completo de cómo calcular un enlace en su totalidad y los resultados obtenidos no son del todo concordantes con los requerimientos del estándar. Esto tiene una sencilla explicación y es que todos los datos aquí empleados son una aproximación de los reales; desde la atenuación en los

conectores, el ruido de intermodulación en el satélite, hasta la tasa de error práctica empleada; que es de hecho el factor más importante. Debemos ser muy enfáticos en que la tasa de error (BER) práctica, está basada por completo en datos estadísticos y éstos difieren según la ubicación de la estación receptora, pero en esta tesis se presentó una aproximación de esta tasa, y debemos estar concientes que los datos estadísticos reales no se obtienen tan fácilmente, ya que es información que el proveedor del servicio no libera para el público en general sino que los reserva para uso exclusivo de su compañía.

Podemos también hablar de la penetración que este servicio ha tenido en el mercado, en comparación con otros sistemas televisivos como son la televisión por cable. Con el uso de satélites para la distribución de TV digital se puede tener una cobertura total del territorio mexicano, y la instalación de una antena para captar la señal proveniente del satélite es muy simple; pero para el caso de distribución por cable, para poder llegar a un punto del territorio mexicano es necesaria la creación de toda una red de distribución y el uso de una infraestructura altamente costosa, por lo que el proveedor tiene que realizar grandes inversiones para poder brindar el servicio a territorios alejados. Este costo es pagado por el usuario y provoca que las tarifas por este servicio sean mucho mayores a las tarifas que un proveedor de TV por satélite cobra. Esta es la razón por la cual prácticamente los distribuidores de TV por cable han desaparecido del mercado.

Podemos concluir de cualquier forma que las técnicas de modulación digital y los algoritmos de corrección de errores son eficientes, y permiten corroborar que el uso de tecnologías digitales hace mucho más eficiente un sistema de radiodifusión, comparados con un sistema de transmisión analógico. En el cuál se requiere mucha más potencia de transmisión, no se tienen sistemas eficientes de seguridad y la calidad de la señal es fácilmente degradable con cualquier fenómeno climático. Pero más aún, el uso del satélite ha logrado hacer que los servicios de transmisión digital, que antes eran tan costosos y tan limitados geográficamente, hoy en día se encuentran al alcance de un sector mucho más amplio de la sociedad y la ubicación geográfica del usuario ya no es un problema.

Entonces, la TV digital por satélite es sólo uno de los servicios de transmisión directa al hogar, también llamados DTH o DBS. Estos servicios prometen seguir evolucionando debido a sus grandes ventajas, como son la cobertura global del planeta con una infraestructura relativamente chica. En los próximos años seguramente se hará una realidad escuchar de Internet directo al hogar vía satélite y talvez tendrá un gran auge como el que hoy se tiene con la TV digital por satélite. Es por ello la importancia de permanecer a la vanguardia en la información al respecto ya que este tema es muy actual, pero la tecnología en el ámbito continuará evolucionando y el tema seguirá siendo de gran trascendencia durante los próximos años.

En esta tesis se realizaron varias aportaciones, se proporcionó información didáctica que será de gran utilidad para estudiantes de la materia "Microondas y Satélites" y afines. También se proporciona un programa para el cálculo de enlaces para TV digital por satélite, que es de uso muy sencillo y permitirá que toda persona que lo use se familiarice con este tipo de cálculos. De tal forma que el presente trabajo representa una base sólida para toda aquella persona o estudiante que quiera iniciarse en el estudio de la transmisión de TV digital por satélite y en general de cualquier servicio directo al hogar vía satélite.

APENDICE A

DATOS REQUERIDOS PARA LA REALIZACION DE UN CÁLCULO DE ENLACE COMPLETO

Apéndice

En este apéndice se conjuntan todas las herramientas que se requieren para realizar cálculos de enlace para la transmisión de canales digitales mediante satélites artificiales.

Tabla A.1 Plan de Frecuencias para la región 2 planteado por la RARC 83

Canal	Polarización	Frecuencia (Enlace de subida)	Frecuencia (Enlace de bajada)	Canal	Polarización	Frecuencia (Enlace de subida)	Frecuencia (Enlace de bajada)
1	R	17324.00	12224.00	17	R	17557.28	12457.28
2	L	17338.58	12238.58	18	L	17571.86	12471.86
3	R	17353.16	12253.16	19	R	17586.44	12486.44
4	L	17367.74	12267.74	20	L	17601.02	12501.02
5	R	17382.32	12282.32	21	R	17615.60	12515.60
6	L	17396.90	12296.90	22	L	17630.18	12530.18
7	R	17411.48	12311.48	23	R	17644.76	12544.76
8	L	17426.06	12326.06	24	L	17659.34	12559.34
9	R	17440.64	12340.64	25	R	17673.92	12573.92
10	L	17455.22	12355.22	26	L	17688.50	12588.50
11	R	17469.80	12369.80	27	R	17703.08	12603.08
12	L	17484.38	12384.38	28	L	17717.66	12617.66
13	R	17498.96	12398.96	29	R	17732.24	12632.24
14	L	17513.54	12413.54	30	L	17746.82	12646.82
15	R	17528.12	12428.12	31	R	17761.40	12661.40
16	L	17542.70	12442.70	32	L	17775.98	12675.98

Tabla A.2 Satélites de DirecTV y sus principales características

Satélite	Posición Orbital	Transpondedores	Canales	Potencia de Transmisión	Lanzamiento
DirecTV 1 (DBS 1)	110,0 °W	32	100	120 W cada transpondedor	17/12/1993
DirecTV 2 (DBS 2)	101,0 °W	16	100	240 W cada transpondedor	03/08/1994
DirecTV 3 (DBS 3)	101,0 °W	16	100	240 W cada transpondedor	10/06/1995
DirecTV 1-R (DBS 4)	101,0 °W	16	100	310 W cada transpondedor	10/10/1999
DirecTV 4S (Galaxy VIII-i)	95 °W	48	300	ases múltiples de alta directividad (30, 45, 65 y 88 W)	27/11/2001
DirecTV 5 (TEMPO 1)	119 °W	32	200	220 W cada transpondedor	08/03/1997
DirecTV 6 (TEMPO2)	119 °W	32	200	220 W cada transpondedor	05/07/2001
DirecTV 7S (Galaxy III-C)	95 °W	32	200	115 W cada transpondedor	15/06/2002

Apéndice

Tabla A.3 Polarización de señales para los satélites DirecTV

Satélite	Posición Órbital	Proveedor	Polarización
DirecTV 1 (DBS 1)	110,0 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 2 (DBS 2)	101,0 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 3 (DBS 3)	101,0 °W	DirecTV LatinAmerica	Lineal
DirecTV 1-R (DBS 4)	101,0 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 4S (Galaxy VIII-i)	95 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 5 (TEMPO 1)	119 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 6 (TEMPO2)	119 °W	DirecTV LatinAmerica	Lineal
DirecTV 7S (Galaxy IIIIC)	95 °W	DirecTV LatinAmerica DirecTV Brazil	Lineal

Tabla A.4 Satélites SKY TV y sus principales características

Satélite	Posición Órbital	Transpondedores	Canales	Potencia de Transmisión	Lanzamiento
PAS-3	43 °W	32 (8 en uso)	100	63 W cada transpondedor	12/06/1997
Solidaridad (dejo de usarse en 2001)	113 °W	16 (ninguno en uso actualmente)			dic-94
PAS-5 (dejo de funcionar, y lo sustituyo el PAS-9)					
PAS-6	43 °W	32	200 (alta fidelidad)	110 W cada transpondedor	08/08/1997
PAS-6B	43 °W	32	200 (alta fidelidad)	140 W cada transpondedor	21/12/1998
PAS-9	58 °W	32	200 (alta fidelidad)	108 W cada transpondedor	28/07/2000

Apéndice

Tabla A.5 Polarización de señales para los satélites DirecTV

Satélite	Posición Órbital	Proveedor	Polarización
DirecTV 1 (DBS 1)	110,0 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 2 (DBS 2)	101,0 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 3 (DBS 3)	101,0 °W	DirecTV LatinAmerica	Lineal
DirecTV 1-R (DBS 4)	101,0 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 4S (Galaxy VIII-i)	95 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 5 (TEMPO 1)	119 °W	DirecTV USA	Circular
DirecTV 6 (TEMPO2)	119 °W	DirecTV LatinAmerica	Lineal
DirecTV 7S (Galaxy IIIC)	95 °W	DirecTV LatinAmerica DirecTV Brazil	Lineal

Tabla A.4 Coordenadas geográficas de algunas ciudades de México

Ciudad	Latitud	Longitud	Altitud ho[M]	R0,01
México D.F.	19.433 °N	99.133 °W	2240	80
Guadalajara	20.67 °N	103.38 °W	1567	60
Monterrey	25.67 °N	100.307 °W	538	60
Mérida	20.96 °N	89.622 °W	10	100
Pto. De Veracruz	19.2 °N	96.137 °W	14	90
Hermosillo	29.07 °N	110.96 °W	210	20
Acapulco	16.85 °N	99.89 °W	10	80
Tapachula	14.54 °N	92.17 °W	60	100

Tabla A.5 Intensidad de lluvia para las regiones designadas por la CCIR

PEx *	Estadística de Tasa de Lluvia Acumulada														
	Intensidad de Lluvia Excedida (mm/h)														
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
1	<.01	0.5	0.7	2.1	0.6	1.7	3	2	8	1.5	2	4	5	12	24
0,3	0.8	2	2.8	4.5	2.4	4.5	7	4	13	4.2	7	11	15	34	49
0,1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
0,03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105	96
0,01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0,003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200	142
0,001	12	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250	170

* PEx: Porcentaje de tiempo excedido en un año [%]

Apéndice

Tabla A.6 Coeficientes de atenuación específica para polarización horizontal y vertical publicados por la CCIR

Frecuencia [GHz]	a_h	a_v	b_h	b_v
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
2	0.0001544	0.000138	0.963	0.923
4	0.000650	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
10	0.0101	0.0087	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.200
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
30	0.187	0.167	1.021	1.000

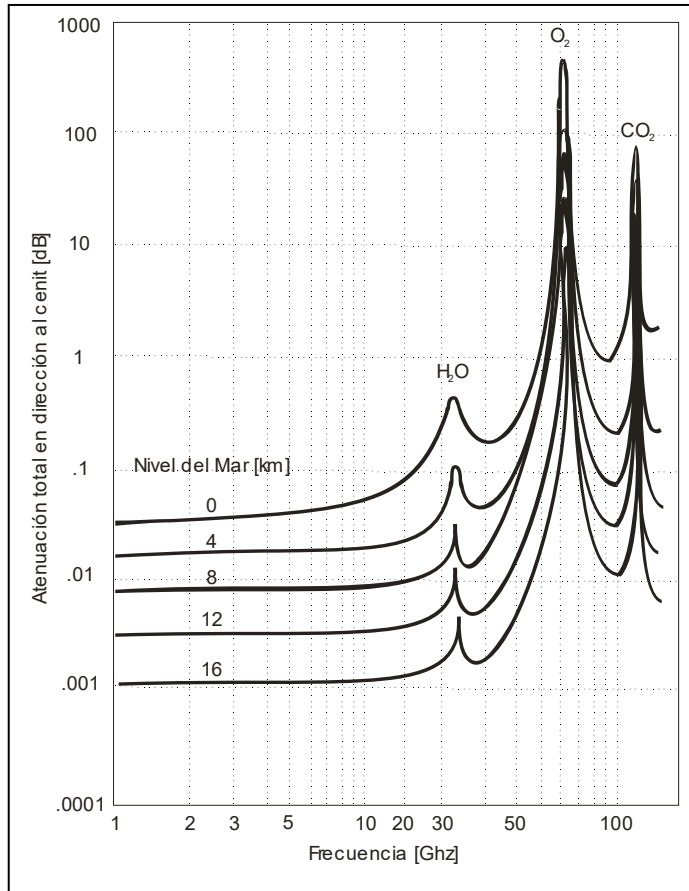


Figura A.1 Atenuación por absorción atmosférica en dirección al cenit con temperatura de 20°C latitud 45° N y humedad moderada.

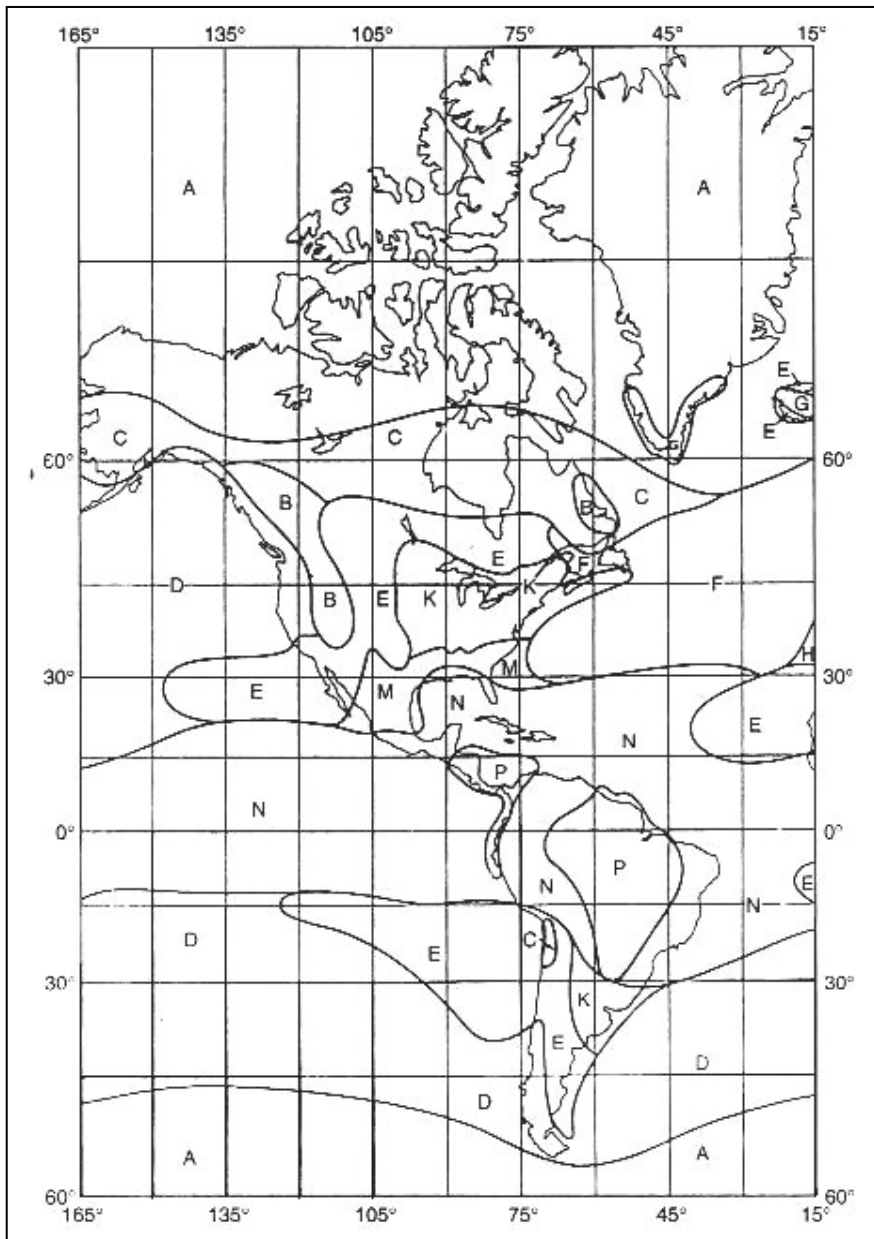


Figura A.2 Zonas hidrometeorológicas para el Continente Americano.

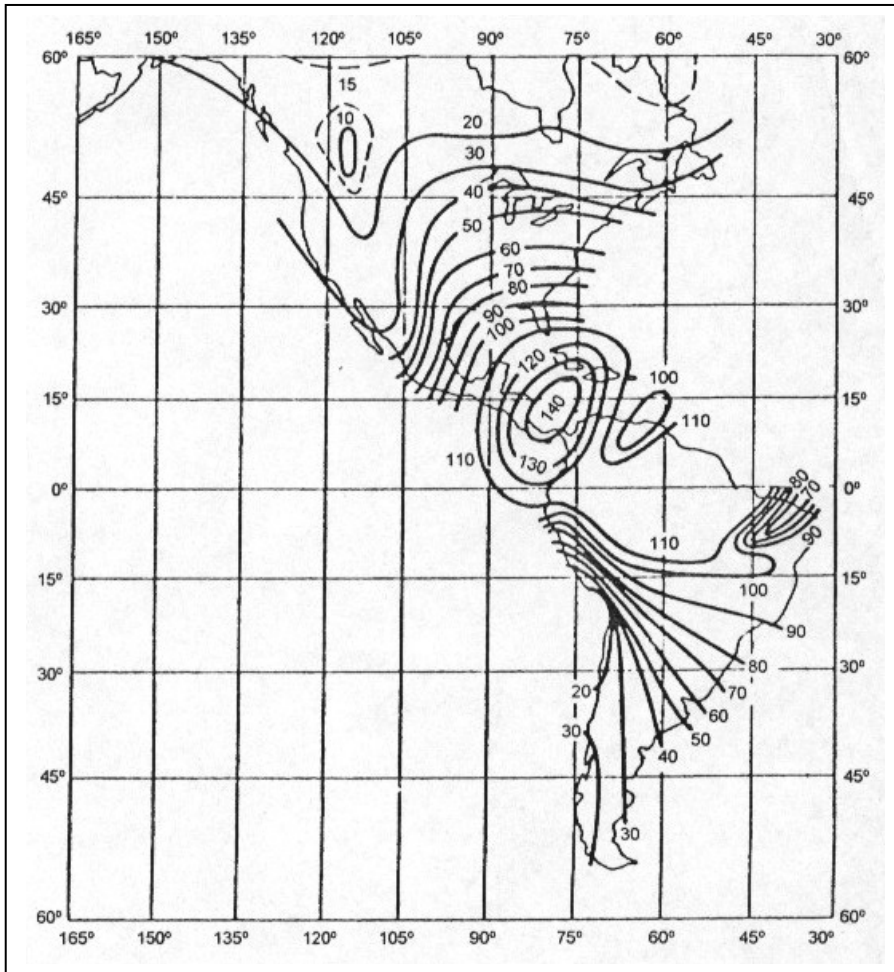


Figura A.3 Contornos de intensidad de lluvia en mm/h que es excedida durante 0.01% del tiempo en un año según la CCIR.

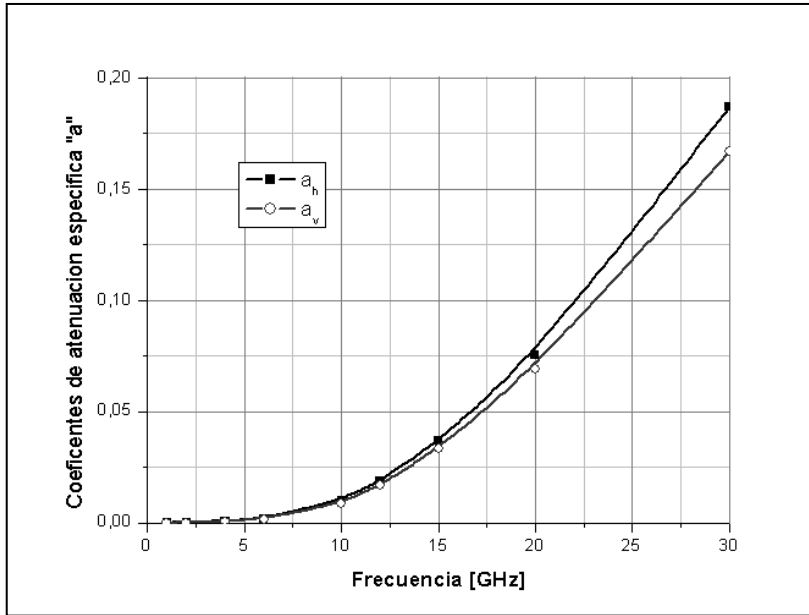


Figura A.4 Curva aproximada para los coeficientes a_h y a_v

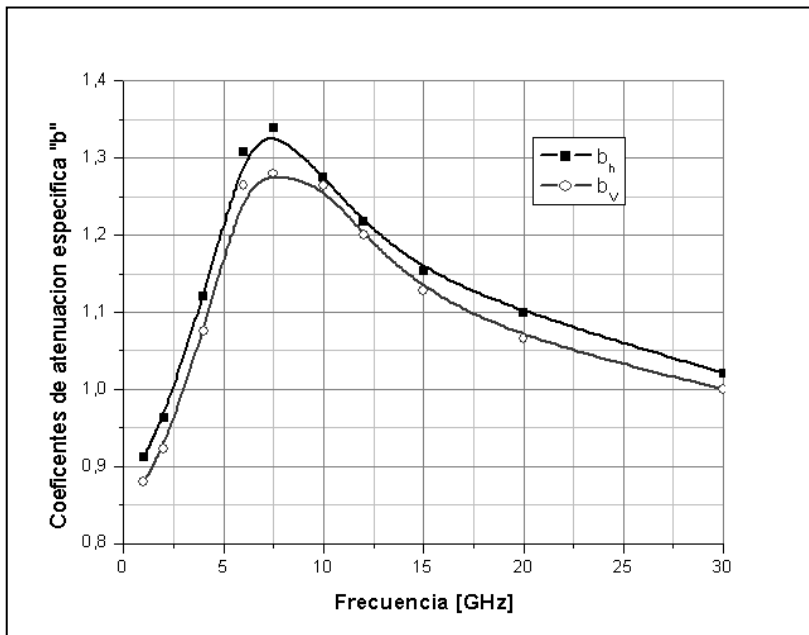


Figura A.5 Curva aproximada para los coeficientes b_h y b_v

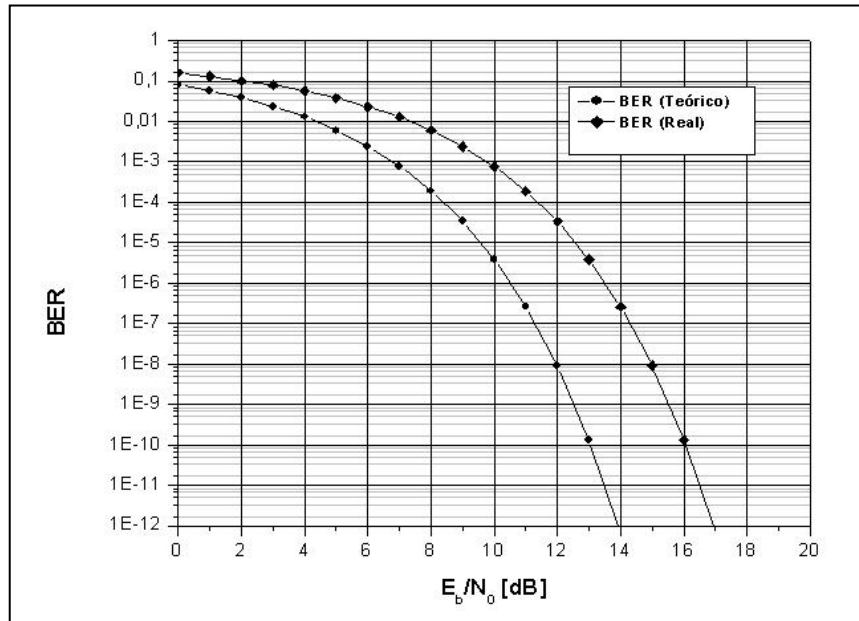


Figura A.6 Tasa de bits con error (BER) o P_e en función del cociente (E_b/N_0) para señales moduladas en BPSK y QPSK.

Contornos de PIRE de los satélites de DirecTV y SKY

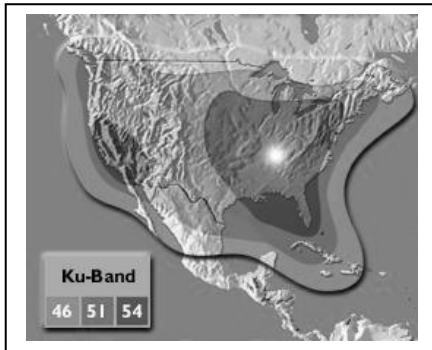


Figura A.7 DirecTV-1.

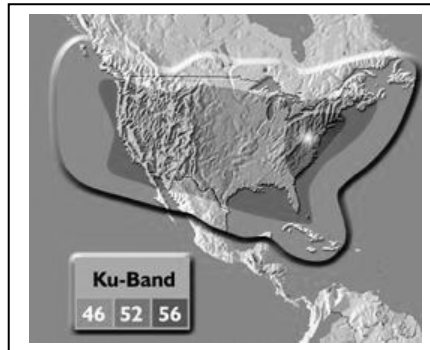


Figura A.8 DirecTV-1R/2/3.

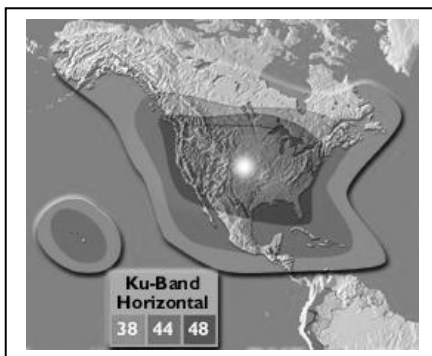


Figura A.9 DirecTV-4.

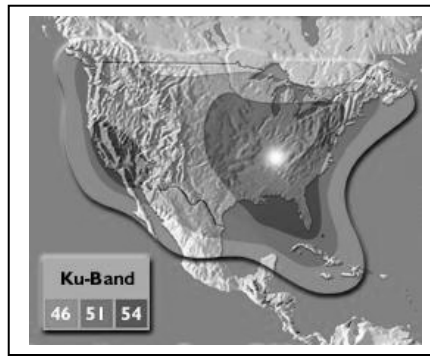


Figura A.10 DirecTV-5, 6.

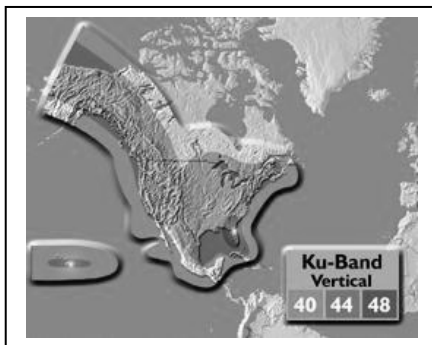


Figura A.11 DirecTV-7.

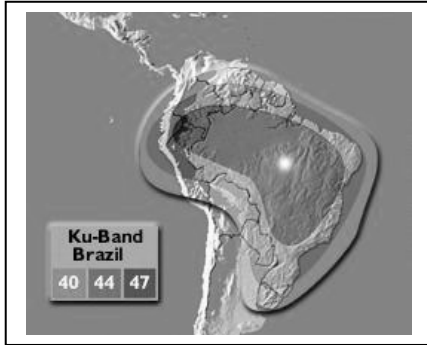


Figura A.12 PAS-6B (Brasil).

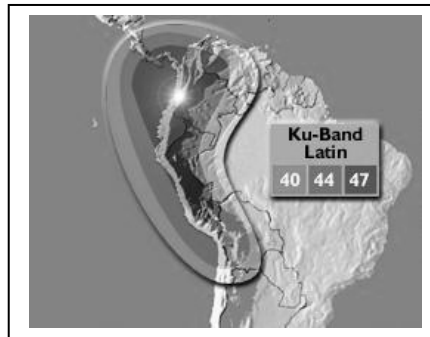


Figura A.12 PAS-6B (Latino América).

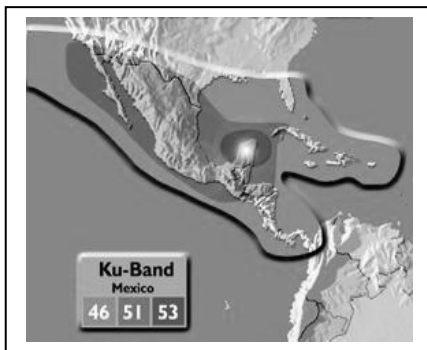


Figura A.13 PAS-9 (México).

APENDICE B

USO DEL PROGRAMA PARA CÁLCULOS DE ENLACES

Apéndice

En este apéndice se explica como usar el programa para realizar cálculos de enlace completos.

La primera pantalla corresponde a la introducción de datos. Esta pantalla consta de tres pestañas: Satélite, Estación Tx, y Estación Rx.

En la pestaña de "Satélite" se toman los datos que corresponden por completo al satélite. Como el programa esta diseñado básicamente para los satélites existentes, vasta con seleccionar el satélite deseado en la persiana, con ello se llenaran todos los datos que se tienen para este satélite. Vea la Figura A.14.

Pero también se puede seleccionar un canal específico navegando con las flechas que aparecen frente a la caja de texto que corresponde al "Canal"; de igual forma se puede seleccionar el número de portadoras y con ello se obtendrá también un ruido de intermodulación aproximado.

También se pueden introducir datos manualmente. Para ello es necesario presionar primero el botón "Introducir Datos Manualmente" y una vez hecho esto hay que proseguir con la introducción de los datos, es necesario ser cuidadoso en introducir datos correctos y validos ya que de lo contrario el programa nos indicara un error.

En esta misma pantalla el presionar el botón "Información de satélites comerciales", se desplegara una tabla, como la que se muestra en la figura A.15; en ella se puede ver los datos de cada uno de los satélites que se utilizan actualmente para la transmisión de TV digital. Esta tabla es sólo informativa y de consulta ya que de aquí no se pueden seleccionar datos.

Figura A.14 Pantalla de Datos, persiana de Satélite.

Satélite	Posicion Orbital [°]	Potencia de Transmision [W]	Transpondedores	Canales	Polarizacion	Lanzamiento
DirecTV 1 (DBS 1)	110	120	16	200	Circular	17/12/1993
DirecTV 2 (DBS 2)	101	240	16	100	Circular	03/08/1994
DirecTV 3 (DBS 3)	101	240	16	100	Lineal	10/06/1995
DirecTV 1-R (DBS 4)	101	310	16	100	Circular	10/10/1999
DirecTV 4S (Galaxy VIII-I)	95	88	48	300	Circular	27/11/2001
DirecTV 5 (TEMP0 1)	119	220	32	200	Circular	08/03/1997
DirecTV 6 (TEMP02)	119	220	32	200	Lineal	05/07/2001
DirecTV 7S (Galaxy IIIC)	95	115	32	200	Lineal	15/06/2002
PAS-3	43	63	32	100	Lineal	12/06/1997
PAS-6	43	110	32	200	Lineal	08/08/1997
PAS-6B	43	140	32	200	Lineal	21/12/1998
PAS-9	128	48	32	200	Circular	28/07/2000

Figura A.15 Tabla con información de satélites comerciales.

Apéndice

Una vez seleccionada toda la información necesaria para el satélite hay que proseguir a proporcionar los datos de la estación terrena transmisora. Para ello nos posicionamos en la persiana “Estación Tx”, como se ve en la figura A.16 en ella existen dos secciones, la de “Ubicación” y la de “Antena”. En la sección de ubicación se selecciona la ciudad en la cual se encuentra la estación transmisora. Existen tres formas de seleccionar la ciudad, la primera es navegando con las flechitas que se muestran frente a la caja de texto que indica la Ciudad, la otra es presionando el botón “Ver Mapa” que se ubica en la parte inferior del recuadro. Al presionar este botón aparecerá un mapa como el mostrado en la figura A.17, para seleccionar una ciudad donde se ubique la estación transmisora, bastará con hacer clic con el botón del Mouse en la ciudad seleccionada. La tercer forma consiste en seleccionar la ciudad desea desde la tabla que aparece al presionar el botón “Ver Tabla” y que se puede apreciar en la figura A.18.

Datos
Principal Ver

Satélite **Estación Tx** Estación Rx

Ubicación

Ciudad: Puerto Escondo [K ◀ ▶ ▶]

Latitud: 15,5 °N

Longitud: 97 °O

Altitud: 20 [m]

Zona: N Mapa

R0.01: 100

Llueve: Si

Disponibilidad: 99.99 %

Ver Mapa

Ver Tabla

Antena

Diametro: 13.2 [m]

Eficiencia: 0.8

Potencia de Transmisión: 800 [W]

Perdidas por desapuntamiento: 0.5 [dB]

Calcular Salir

Figura A.16 Pantalla de Datos, persiana de Estación Tx.



Figura A.17 Mapa de ubicación geográfica de las ciudades de México.

Principales Ciudades de México

Ciudad	Latitud	Longitud	Altitud	Zona Hidrometeorológica	R0.01
Puerto Escondido	15.5	97	20	N	100
Tapachula	14.5	93	60	M	100
Manzanillo	19.5	105	20	E	60
Colima	19.5	103	490	N	80
Lázaro Cárdenas	18.5	103	20	E	70
Morelia	19.5	101	1920	M	80
Ciudad de México	19.5	99	2240	M	95
Veracruz	19.5	97	14	N	90
Cuernavaca	18.5	99	1510	N	80
Orizaba	18.5	97	1230	M	90
Oaxaca	17.5	97	1860	M	90
Acapulco	16.5	99	10	M	80
Campeche	19.5	91	10	M	110
Coatzacoalcas	18.5	95	10	M	100
Villahermosa	17.5	93	110	N	110
Tuxtla Gutiérrez	16.5	93	520	M	105
Chetumal	18.5	89	10	N	115
Mazatlán	23.5	107	20	M	50

Seleccionar Salir

Figura A.18 Tabla de las ciudades de México.

Apéndice

Posteriormente será necesario llenar los datos correspondientes a la antena, el programa tiene algunos valores predeterminados, pero estos pueden ser modificados manualmente. Una vez que se han proporcionado todos los datos de la estación transmisora hay que proseguir con la estación receptora, Figura A.19, para ello hay que seleccionar la tercera persiana y los datos se llenan en forma idéntica al caso de la estación transmisora. En lo que respecta al PIRE, este dato se llena automáticamente al momento de que se seleccionó un satélite, pero en caso de que el usuario decidiera introducir los datos en forma manual deberá llenar este campo.

Datos
Principal Ver

Satélite Estación Tx **Estación Rx**

Ubicación

Ciudad: Puerto Escondo [K] [L] [R]

Latitud: 15,5 °N

Longitud: 97 °O

Altitud: 20 [m]

Zona: N [Mapa]

R0.01: 100

Lluvia: Si [v]

Disponibilidad: 99,99 [%]

Ver Mapa

Ver Tabla

Antena

Diametro: 0,6 [m]

Eficiencia: 0,7

Perdidas por desapuntamiento: 0,6 [dB]

Temperatura Antena: 40 [*K]

Temperatura LNA: 100 [*K]

PIRE

Satélite: DirecTV 1 [DBS 1]

PIRE: 41 [dBW]

Calcular Salir

Figura A.19 Pantalla de Datos, persiana de Estación Rx.

Apéndice

Una vez que se han proporcionado todos los datos se puede proceder con el cálculo, para ello se presiona el botón “Calcular” que se encuentra en la parte inferior de la ventana “Datos”. Al realizar esto aparecerá la ventana que se muestra en la figura A.20 en la cual se muestran todos los resaltados parciales y finales tanto para el enlace descendente como para el ascendente y los resultados finales de BER.

The screenshot shows a software window titled 'Resultados' with a 'Principal' menu option. The window is divided into three main sections: 'Enlace Ascendente', 'Enlace Descendente', and 'Calculos Finales'. The 'Enlace Ascendente' section is active and contains several sub-sections for preliminary results:

- Atenuación por Espacio Libre:** Distancia al satélite: 36241,91 [km]
- Atenuación por Lluvia:** Ángulo de elevación: 67,18 °; hr: 3,434 [km]; d: 03,70 [km]; r0.01: 00,84 [dB/km]; Atenuación Específica: 08,90; a: 0,0536; b: 1,11
- PIRE:** Ganancia de la antena Tx: 66,62 [dBi]
- Figura de Mérito:** Ganancia de la antena Rx: 52,16 [dBi]; Ts1: 791,64 [K]

The 'Calculos Finales' section shows the following results:

- Atenuaciones:** Espacio Libre: 208,40 [dB]; Absorción Atmosférica: 00,05 [dB]; Lluvia: 00,18 [dB]; Atenuación Total: 208,63 [dB]
- Ganancias:** PIRE: 91,65 [dBW]; Figura de Mérito: 21,68 [dB/K]
- Relación Portadora/Ruido:** (C/No): 133,29 [dBHz]

Figura A.20 Pantalla de Resultados

Si se desea realizar un nuevo cálculo se selecciona esta opción del menú “Principal” ubicado en la parte superior de la ventana.

BIBLIOGRAFIA

LIBROS

H. Benoit
Satellite Television: Techniques of Analogue and Digital Televisión.
Ed. Arnold.
1ra Ed. Londres 1999.

C. Mead, Donald
Direct Broadcast Satellite Communications An MPEG Enabled Service
Prentice Hall
1ra Ed. Estados Unidos, 2000.

E. Long, Mark
The Digital Satellite TV Handbook
Newnes
1ra Ed. Gran Bretaña, 1999.

Roddy, Dennis
Satellite Communications Systems
McGraw-Hill
7ma Ed. Estados Unidos, 2001

Neri Vela, Rodolfo
Comunicaciones Por Satélite
Thomson
1ra Edición, México 2002

Stephenson, D. J
Newness Guide to Satellite TV Installation
Newnes, Oxfon, 1994

B. G. Evans
Satellite Communication Systems
IEE
3ra Edición, Reino Unido 2000

Pritchard, W. L.
Satellite Communications Systems Engineering
Prentice-Hall
2da Edición, Londres 1993

PUBLICACIONES PERIÓDICAS

International Journal Of Satellite Communications
Jhon Wilwy & Sons
Digital video broadcasting over satellite (DVB-S): a system for broadcasting and contribution applications. 2000

HACBSS NEWS
Department of Communications
No. 5 Septiembre 1985

PAGINAS DE INTERNET

International Captioning Project (Worldwide Video Standards):

<http://ncam.wgbh.org/resources/icr/appendixa.html>

Direct Video Broadcasting

<http://www.dvb.com>

Established Terrestrial DTV Standards.

<http://64.26.128.84/news/slides.htm>

YCC colour space and image compression.

<http://astronomy.swin.edu.au/~pbourke/colour/ycc/>

Estándares Internacionales de Televisión y HDTV/DTV

<http://www.cybercollege.com/span/typ009.htm>

Satélites de México

<http://www.satmex.com/flota/satmex5.php#>

Fabricante de Antenas y Dispositivos de Microondas

<http://www.televes.com/>

DirecTV Latin América

<http://www.directvla.com/newcc/spanish/>

DirecTV México

<http://directstage.directvla.com/paises/mexico/que/>

Skyrocket DBS Satellites Characteristics

http://www.skyrocket.de/space/doc_sdat/directv-1.htm

Artículos: Historia de la Televisión

http://www.video.com.mx/articulos/historia_de_la_television.htm

Publicaciones periódicas

<http://www.noticiasdot.com/publicaciones/2002/0902/0509/noticias0509/noticias0509-16.htm>

Panamsat

<http://www.panamsat.com/news/pressview.asp?article=1022>

Boeing

<http://www.boeing.com>, <http://www.sat-address.com/df/ESPN-International.shtml>

Satellites Characteristics

<http://www.sateliteinfos.com/gateway.asp?s=www.lyngsat.com/america.shtml>

Satellites: Orbital Information

<http://www.sat-address.com/df/ESPN-International.shtml>

Tele Satellite Magazine

<http://www.SatcoDX6.com/2500>

ARTÍCULOS

Diálogos de la Comunicación

Romero Sanjinés, Carlos

La televisión Digital: Perspectivas para su introducción en América Latina

Artículo, Honduras, 2002.

Executive Summary

Issues to be considered for the evaluation of standard for digital television, ATSC answers

to Mexico's questionnaire

Octubre 21, 1999

DVB Project Office 1995

Going Ahead Digital Television

Report 719-1 "Attenuation by gases" CCIR 15th

Plenary Assembly, Geneva, Vol5, 1982

Crane, R. K.

Prediction of attenuation by rain

IEEE Trans. Communications, Vol COM-28, 1980

Stutzman, W.L

Estimating Directivity and Gain of Antennas

IEEE Antennas and Propagation Magazine Volume: 40, Issue: 4, Aug 1999

Dissanayake, A. W.

A prediction model that combines rain attenuation and other impairments along

Earth-Space paths

IEEE Trans. On Antennas and Propagation, Vol 45, No 10, 1997

Mauri, M

Italsat Propagation Experiments: an Update on the Available Results

Third Ka band utilization Conferencia, Sorrento Italia, Sept. 15-18, 1997

Attenuation by Hydrometeors en Particular Precipitation, and other Atmospheric Particles

Vol V, Reporte 564-2

Landeros, S., Neri, R., Cruz, H. y Hernández H.,

Cálculo de atenuación por lluvia usando el modelo DAH y diámetros de antena para la banda Ka en México

Ingeniería, Investigación y Tecnología

UNAM, Vol. II, No.1 Enerp-Marzo 2002

Crane, R. K.

Propagation Phenomena affecting Satellite Communications Systems

Proc. IEEE, Vol. 59, 1971

Westcott, J
Investigation of multiple f.m./f.d.m carriers through a satellite near to saturation
Proc. IEEE Vol 114 No.6 Junio 1967

NORMAS

[ISO 13818-1] Information Technology. Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information. Part 1: Systems. Norma Internacional ISO/CEI. Noviembre, 1994.

[ISO 13818-2] Information Technology. Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information. Part 2: Video. Norma Internacional ISO/CEI. Noviembre, 1994. El documento TM 1764 incorpora correcciones a esta Norma.

[ISO 13818-3] Information Technology. Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information. Part 3: Audio. Norma Internacional ISO/CEI. Noviembre, 1994.

[ETS 300 421] Digital Broadcasting Systems for Television, Sound and Data Services. Norma ETSI. Diciembre, 1994.

[TM 1751] Preferred Implementation for non-standard BPSK signals. Documento interno Módulo Técnico DVB.

[TM 1438] Definition of the Convolutional Encoder in the DVB-S System. Documento interno Módulo Técnico. Julio, 1995.

[ETS 300 429] Digital Broadcasting Systems for Television, Sound and Data Services; Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Cable Systems. Norma ETSI. Diciembre, 1994. Los documentos TM 1759 y TM 1620 incluyen modificaciones (128-QAM y 256-QAM) a incorporar en futura revisión.

[ETS 300 473] Digital Broadcasting Systems for Television, Sound and Data Services; Satellite Master Antenna Television (SMATV) Distribution Systems. Norma ETSI. Mayo, 1995.

[TM 1259] Satellite Digital TV in Collective Antenna Systems. SMATV Reference Channel Model for digital TV. Contribución del proyecto DIGISMATV. Julio 1994.

[ETS 300 744] Digital Broadcasting Systems for Television, Sound and Data Services; Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television. Norma ETSI. Mayo, 1996. El documento TM 1762 incorpora modificaciones a la especificación. El documento TM 1619 proporciona explicaciones sobre las razones básicas de selección de OFDM.

[TM 1743 rev 2] Specification of a Mega-frame for SFN Synchronisation. Documento interno Módulo Técnico DVB. Noviembre, 1996.

Bibliografía

[ETS 300 748] Digital Broadcasting Systems for Television, Sound and Data Services; Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Multipoint Video Distribution Systems (MVDS) at 10 GHz and Above. Norma ETSI. Octubre, 1996.

[ETS 300 749] Digital Broadcasting Systems for Television, Sound and Data Services; Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Multipoint Video Distribution Systems (MMDS) below 10 GHz. Borrador Norma ETSI. Noviembre, 1996.

ATSC DIGITAL TELEVISION STANDARD. Septiembre 1995

[RARC83] RARC, Proceedings of the 1983 Regional Administrative Radio Council,
Geneva, Suiza