

# CAPITULO 1: TELEVISIÓN DIGITAL VIA SATÉLITE

## 1.1. Antecedentes

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

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

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

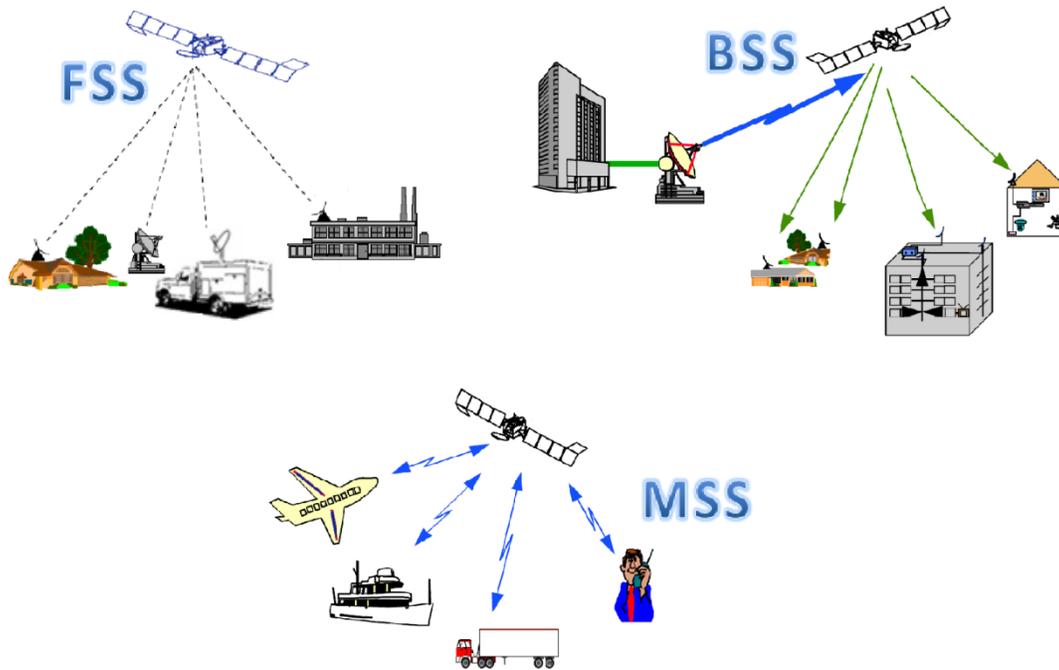
De acuerdo a la UIT, el FSS es un servicio de radiocomunicaciones entre dos estaciones dentro de la superficie de la Tierra cuando se usa uno o más satélites. Cada estación cuenta con un enlace ascendente (Tierra-espacio) y otro descendente (espacio-Tierra), permitiendo comunicaciones bidireccionales.

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

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

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

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

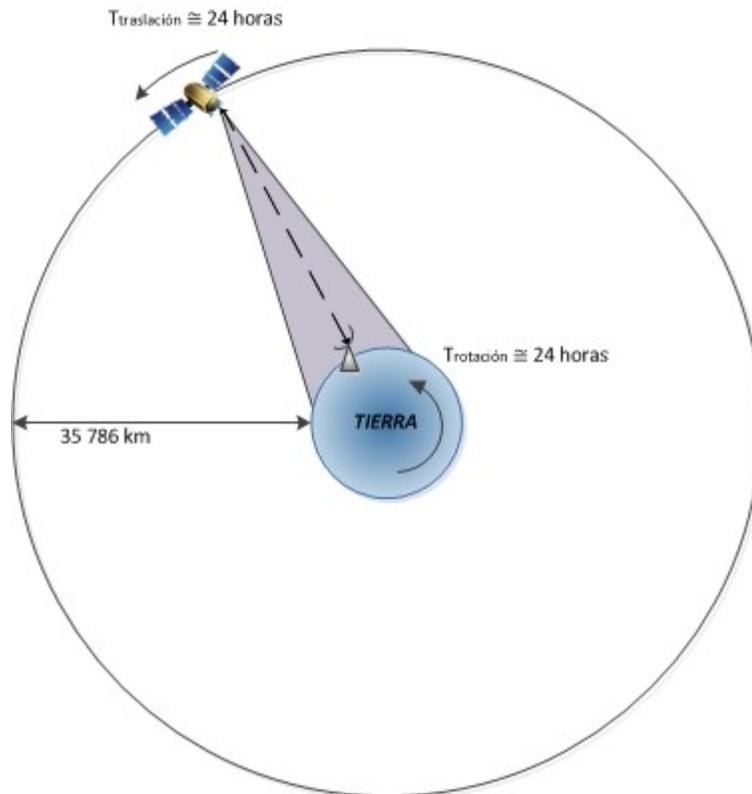


**Figura 1.1.** Tipos de servicio que se prestan por satélite.

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

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

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



**Figura 1.2.** Órbita geoestacionaria o GEO

### 1.1.1. Reseña histórica de la televisión

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

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

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

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

Los avances continuaron con la llegada de los sistemas de TV electrónicos y el invento del iconoscopio<sup>1</sup>. Estos avances trajeron consigo la necesidad de estandarizar los diferentes parámetros en la emisión de la señal.

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

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

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

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

### 1.1.2. Reseña histórica de los satélites

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

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

---

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

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

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

A finales de la década de los 60, la NASA llevó a cabo experimentos que proporcionaron valiosos datos sobre la propagación de las ondas radioeléctricas desde las frecuencias comprendidas en la banda VHF (30MHz-300MHz) hasta los 40GHz<sup>2</sup> (EHF). Los satélites *ATS-1*, *ATS-3*, *ATS-5* y *ATS-6* fueron los encargados de proporcionar dicha información que permitió mejorar la caracterización de los enlaces satelitales.

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

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

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

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

---

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

## 1.2. Panorama general.

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

La era digital busca entre otras ventajas:

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

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

### 1.2.1. Ventajas y desventajas de las comunicaciones vía satélite

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

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

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

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

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

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

### 1.3. Sistemas de televisión digital

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

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

#### 1.3.1. Televisión De Definición Estándar.

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

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

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

#### 1.3.2. Televisión De Definición Mejorada

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

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

### 1.3.3 Televisión De Alta Definición.

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

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

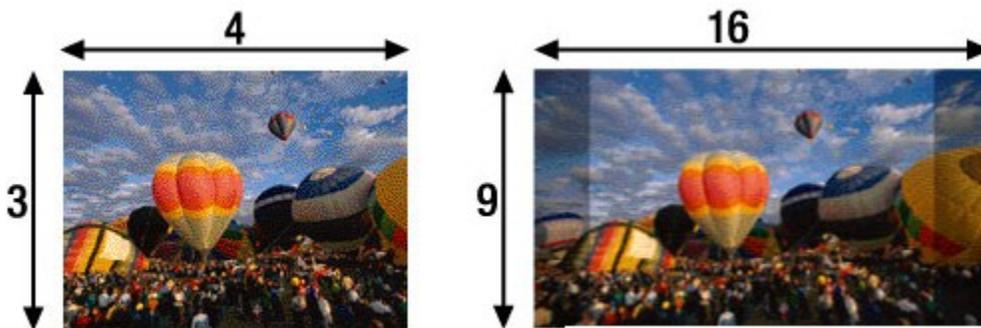


Figura 1.3. Comparación entre relaciones de aspecto 4:3 y 16:9

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

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

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

### 1.3.4. WQHD, QFHD y ULTRA HD.

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

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

### 1.3.5. Estructura de un sistema de Televisión Digital

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

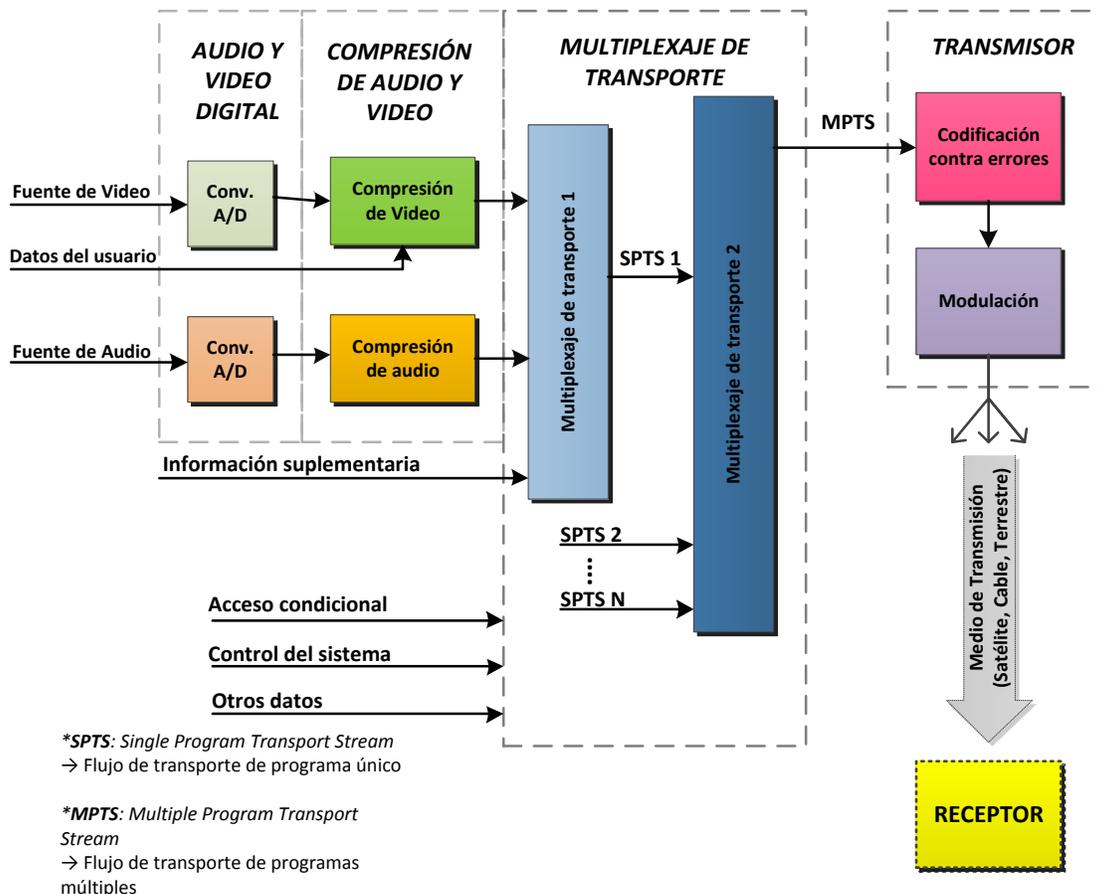


Figura 1.4. Esquema representativo de un sistema DTV.

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

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

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

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

#### **1.4 Códecs de audio y video**

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

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

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

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

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

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

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

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

#### *1.4.1. Códecs de video*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### 1.4.2. Códecs de Audio

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

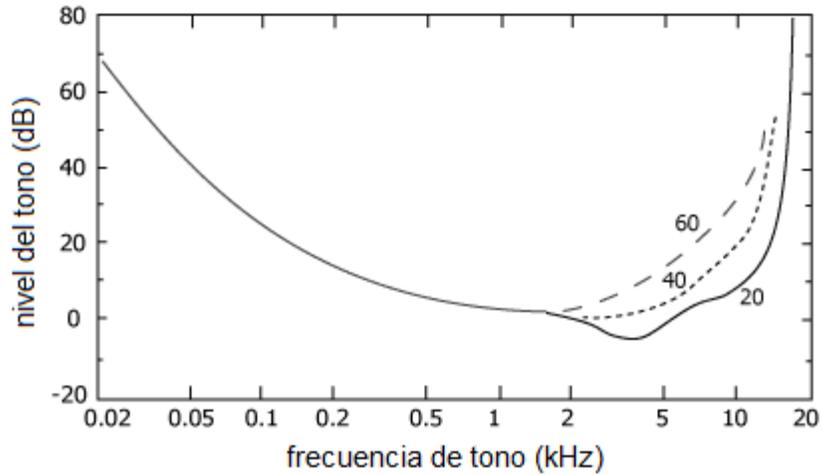


Figura 1.7. Modelo psicoacústico del oído humano.

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

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

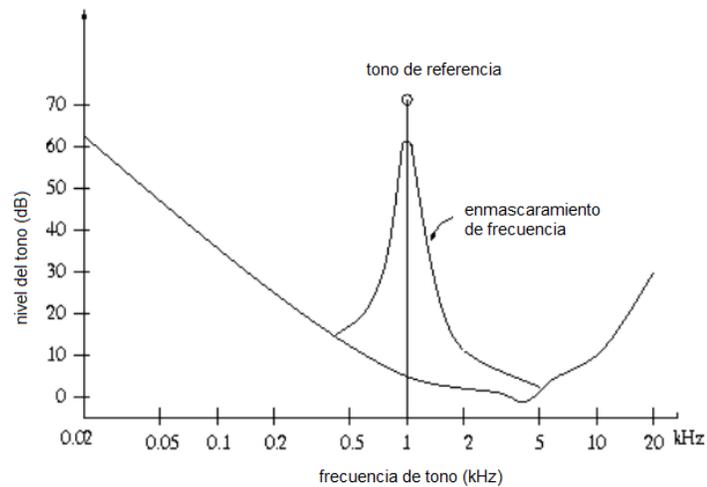


Figura 1.8. Enmascaramiento de frecuencias del oído humano.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

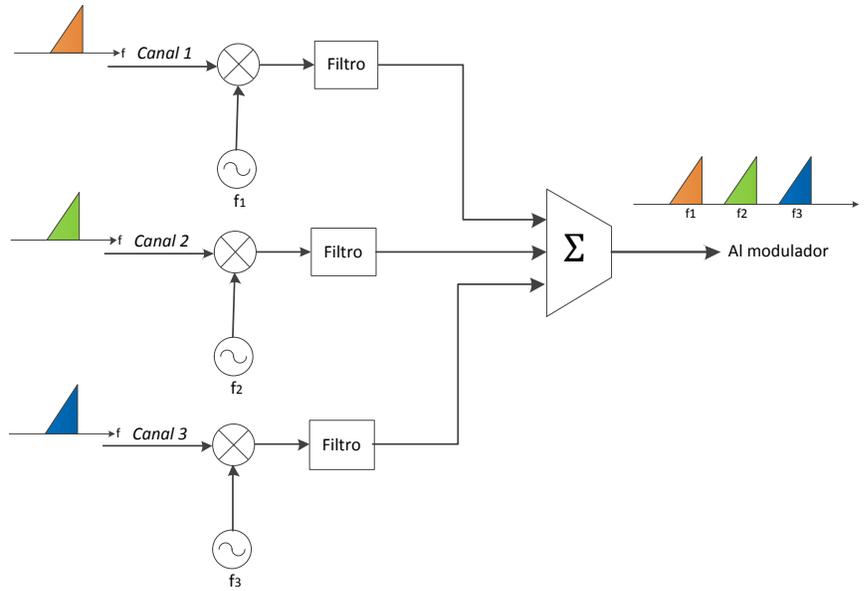
Figura 1.9: Características principales de los códecs de audio utilizados en radiodifusión.

## 1.5. Multiplexaje, Modulación y Técnicas de Acceso Múltiple

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

### 1.5.1. Multiplexaje por división de frecuencia (FDM)

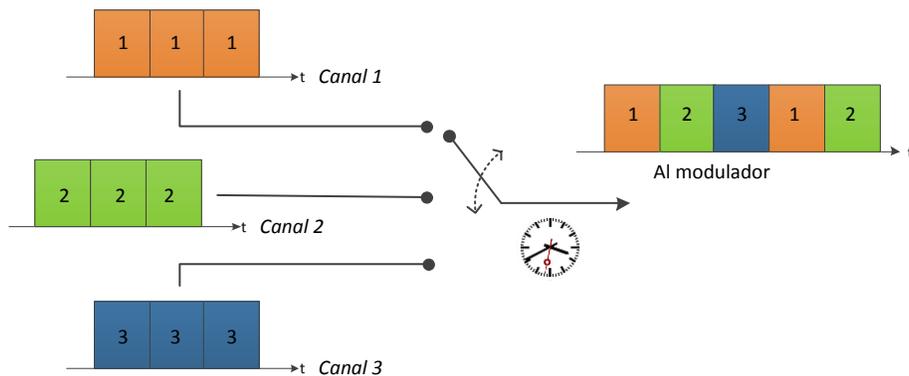
Esta técnica, considerada la más simple, consiste en asignar una frecuencia a cada una de las señales que va a ser transmitida hacia el satélite dentro de su ancho de banda disponible sin importar su naturaleza (digital o analógica). De esta forma, se tienen bloques de señales limitadas en ancho de banda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



**Figura 1.10.** Multiplexaje por división de frecuencia.

### 1.5.2. Multiplexaje por división de tiempo (TDM)

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



**Figura 1.11:** Multiplexaje por división de tiempo.

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

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

### 1.5.3. Modulación digital

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

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

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

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

La expresión analítica para PSK es:

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

Donde  $A$  es la amplitud de la señal,  $T$  es el tiempo que dura un símbolo en ser transmitido,  $\omega_0$  es la frecuencia angular de la señal,  $\theta$  es la fase de referencia de la señal transmitida y  $\phi_i(t)$  es el término que define al símbolo mediante el cambio de fase, y tiene  $M$  valores discretos dados por la expresión:

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

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

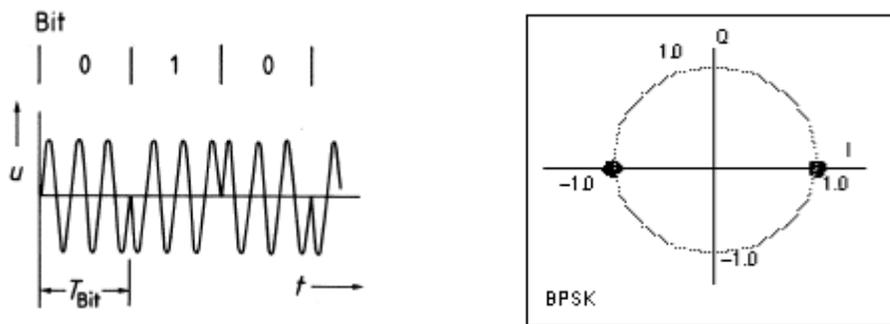


Figura 1.12: Representaciones temporal y fasorial de una señal BPSK .

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

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

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

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

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

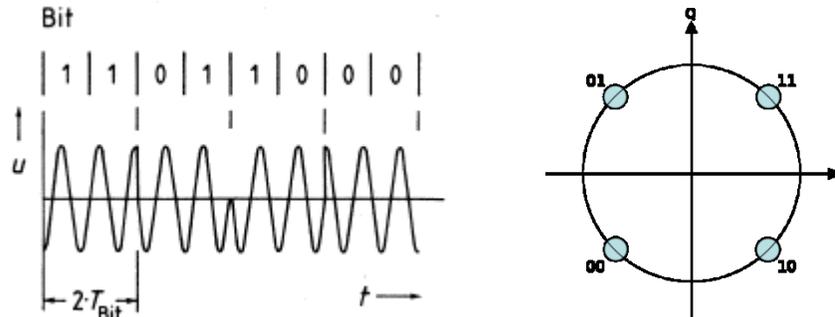


Figura 1.13. Representación temporal y fasorial de una señal QPSK.

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

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

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

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

La relación existente entre  $P_s$  y  $P_b$  es:

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

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

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

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

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

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

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

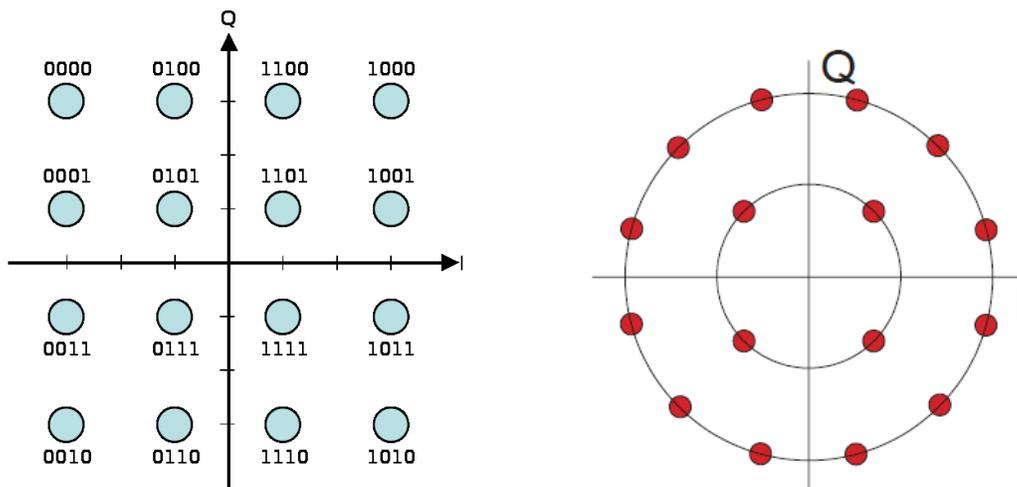


Figura 1.14. Representaciones fasoriales de señales moduladas en 16-QAM y 16-APSK.

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

#### 1.5.4 Técnicas de Acceso Múltiple.

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

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

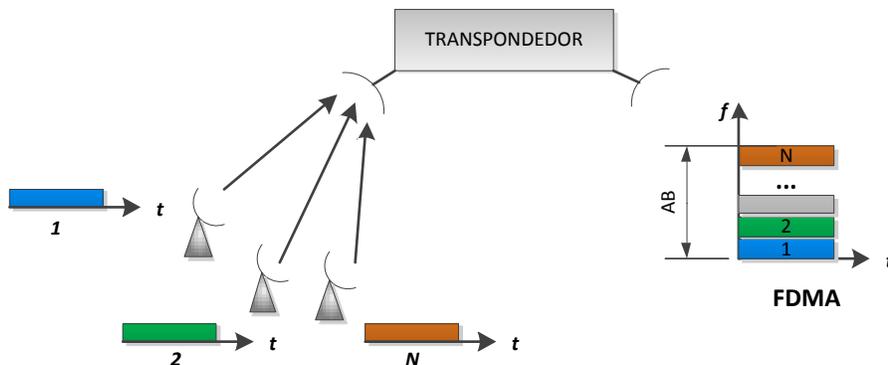


Figura 1.15. Acceso múltiple por división de frecuencia.

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

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

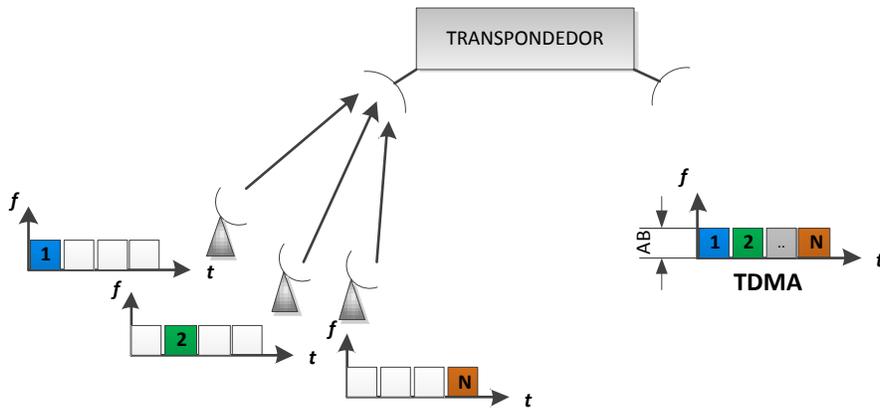


Figura 1.16. Acceso múltiple por división de tiempo.

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

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

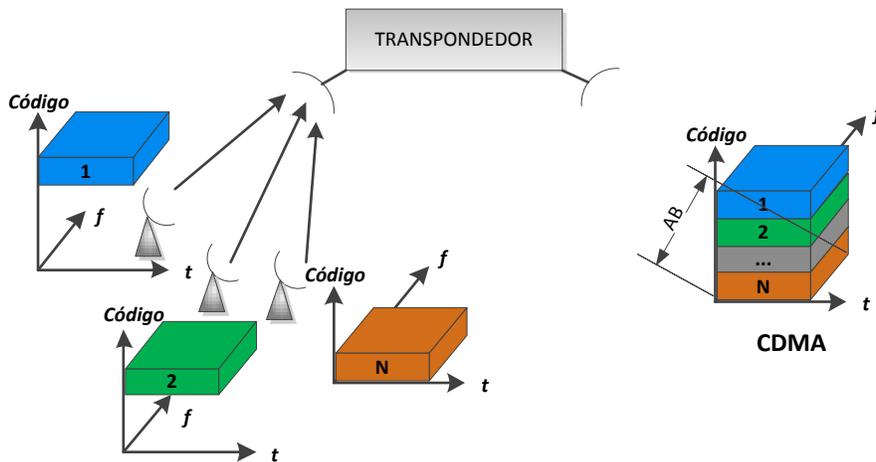
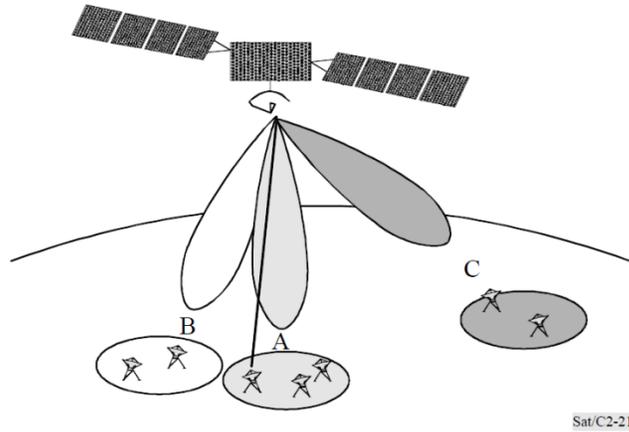


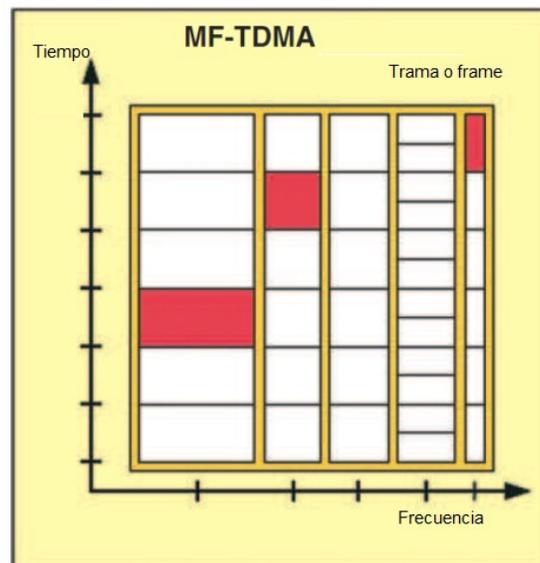
Figura 1.17. Acceso múltiple por división de código.

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



**Figura 1.18.** Acceso múltiple por división espacial.

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



**Figura 1.19.** Acceso múltiple por slot dinámico MF-TDMA

## 1.6. Códigos para corrección de errores

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

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

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

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

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

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

### 1.6.1. Códigos lineales de bloque

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

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

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

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

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

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

### 1.6.2. Códigos cíclicos

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

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

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

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

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

### 1.6.3. Códigos convolucionales

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

### 1.6.4. Códigos entrelazados y concatenados

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

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

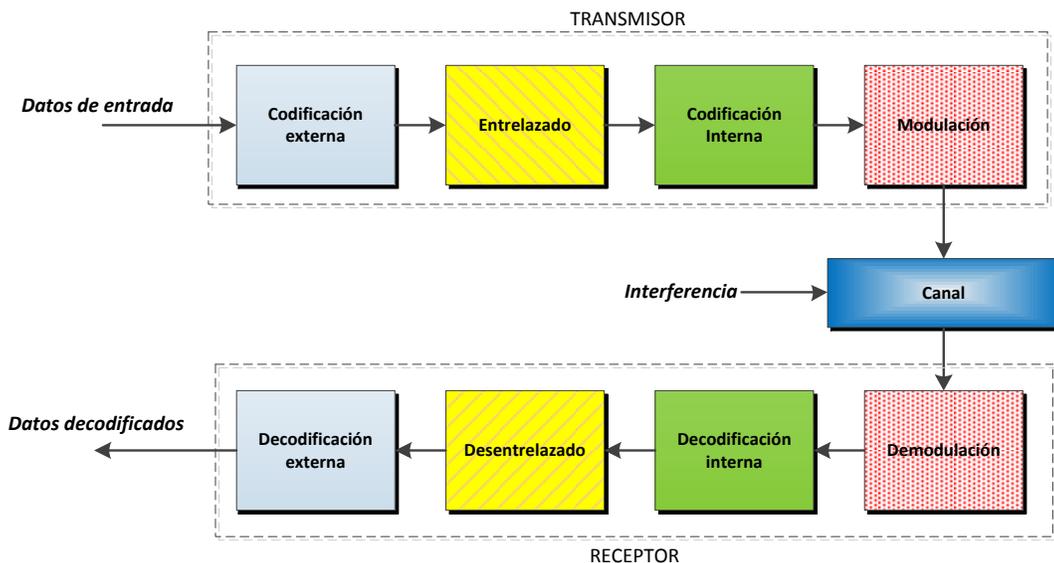


Figura 1.20. Diagrama a bloques de codificación concatenada.

#### *1.6.5. Turbo códigos*

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

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