1

INTRODUCCION A LOS SISTEMAS TRANSMISORES DE TELEVISION

Introducción

En este capítulo se pretende dar una idea básica de los diversos sistemas de transmisión de televisión con fines de distribución, es decir, la transmisión cuyo objeto es poner las señales de televisión al alcance del público en general, sin otra restricción que la de disponer con un receptor adecuado. Puede hablarse de cuatro tipos de sistemas de transmisión con este propósito:

- Sistemas de radiodifusión terrestre de televisión.
- Sistemas de radiodifusión de televisión por satélite.
- Sistemas de televisión por cable.
- Sistemas de distribución de televisión por microondas.

El enfoque de este trabajo se orienta, básicamente a los sistemas terrestres[1], tanto analógicos como digitales, desde el punto de vista de los procesos a que debe someterse la señal de televisión para su transmisión y los requisitos que debe satisfacer para cumplir con los requisitos de calidad necesarios para estos servicios.

Es relativamente frecuente encontrar la opinión de que los sistemas de transmisión digital son totalmente diferentes a los analógicos, por lo que entre los ingenieros y técnicos con experiencia en los sistemas analógicos suele producirse cierto temor e incertidumbre, respecto a la planificación, implementación y operación de los nuevos sistemas digitales que, en muchos casos tendrán que coexistir un número indeterminado de años, con los sistemas analógicos en funcionamiento desde hace décadas. Desde el punto de vista de la información a transmitir, puede decirse que la arquitectura general de los transmisores es, básicamente, la misma en el dominio analógico que en el digital y que un sistema transmisor es, en principio, *transparente* en el sentido de que la señal de entrada es modulada, amplificada y radiada al espacio o conducida a través de cable o fibra óptica. El receptor debe, también en principio, comportarse de forma transparente. Es bien conocido en el terreno analógico que ningún transmisor ni receptor es totalmente transparente, es decir, ideal, ya que la señal puede sufrir distintos tipos de distorsión a su paso por los diversos circuitos del transmisor y receptor, así como del medio de transmisión. Aquí nos limitaremos principalmente al estudio de los transmisores, en particular para los servicios de radiodifusión terrestre de televisión y, de acuerdo a lo expresado antes, puede decirse que, en condiciones ideales a un transmisor prácticamente "le da

[1] A veces también se emplea el término *terrenales*.

igual" si la señal que va a transmitir es digital o analógica. De hecho, para las primeras pruebas de transmisión de televisión digital se utilizaron transmisores analógicos con algunas modificaciones necesarias a causa de la naturaleza de la señal, de modo que con las modificaciones adecuadas, un transmisor fabricado hace digamos, treinta o cuarenta años, puede ser utilizado para transmisión digital de televisión.

En los últimos años se han tenido avances muy importantes en la tecnología de transmisores de televisión, que hacen difícil un tratamiento del tema totalmente actualizado. Aún cuando los principios fundamentales son los mismos aplicados a los transmisores de hace cinco décadas, los dispositivos empleados y las técnicas utilizadas han sido objeto de una evolución considerable que aún continúa. Se han introducido nuevas tecnologías para mejorar, tanto la calidad de la señal transmitida como la eficiencia de los equipos, así como reducir las necesidades de mantenimiento y costos de operación. Estas nuevas tecnologías comprenden principalmente el empleo de amplificadores de estado sólido para potencias elevadas, desarrollo de nuevos tipos de válvulas y dispositivos de estado sólido más eficientes para amplificación de potencia en UHF, así como combinadores que eliminan la necesidad de efectuar conmutaciones con el transmisor fuera del aire.

En el caso particular de la transmisión de televisión, la tecnología que se aplicó originalmente fue analógica y, en general así se ha mantenido durante más de medio siglo. Los desarrollos recientes en el terreno de compresión de información, así como la tecnología de circuitos integrados en gran escala (VLSI), dieron lugar a que sea posible aprovechar el espectro de manera mucho más eficiente y, por consecuencia, al aumento del número de servicios y de usuarios como está ocurriendo en el caso de la telefonía móvil y la televisión, por mencionar sólo dos ejemplos. Por todo esto parecería, quizá, innecesario tratar los aspectos relacionados con la transmisión analógica que, aparentemente está destinada a extinguirse. Sin embargo, hay algunas razones para dedicarle alguna atención y, una de ellas, es que aún se utiliza extensamente y necesariamente, debe coexistir con los nuevos sistemas digitales, por un tiempo que, aunque en algunos países como los de la Unión Europea[2] y los Estados Unidos entre otros, ha sido ya definido, en numerosos países la transición de analógico a digital muy posiblemente no será tan rápida. Otra razón, es que al momento de escribir esto, los receptores de televisión aún no se han comercializado extensamente a precios accesibles para la mayoría del público y que, aunque las emisiones sean digitales, continuarán utilizándose los receptores analógicos con equipos externos a ellos, de bajo costo, que permiten la conversión de las señales digitales en analógicas. Una razón más, es que hay una enorme cantidad de material audiovisual grabado en formatos analógicos, por ejemplo en VHS que, aunque vaya desechándose o convirtiéndose a formatos digitales, continuará siendo utilizado durante un número de años que no es posible definir.

1.1 Clasificación de los sistemas de transmisión terrestre de televisión

Independientemente de que se trate de señales analógicas o digitales, los sistemas de transmisión de televisión terrestre pueden clasificarse de acuerdo a diferentes criterios, en que los principales se resumen a continuación:

> Potencia: Según la potencia de salida que el transmisor entrega a la línea de transmisión y a la antena, los sistemas pueden clasificarse como:
>
> > *Baja potencia*: Clasificaremos aquí como sistemas de baja potencia a aquellos en que la potencia de salida del transmisor es inferior a 500 w.

[2] En España se ha determinado que esta transición o *apagón analógico* ocurrirá en el año 2008.

Media potencia: Cuando la potencia de salida es superior a 500 w, e inferior a 10 Kw.

Alta potencia: Cuando la potencia de salida del transmisor es superior a 10 Kw.

La clasificación anterior es enteramente arbitraria, pero establece un criterio inicial que depende, entre otras cosas, de la tecnología utilizada en el transmisor, de la complejidad de la instalación, de los requisitos necesarios en lo que respecta energía eléctrica, accesos, área de cobertura, etc.
Otra posible clasificación respecto a la potencia, es la que considera como transmisores de baja potencia aquellos cuya potencia de salida es inferior a 1 Kw y como de alta potencia a aquellos con potencias superiores a 1 Kw.

Tipo de señal: La señal de entrada al transmisor puede ser *analógica* o *digital*, en banda base o en un canal de RF. En este caso, se puede hacer una clasificación adicional:

Transmisor: Es el que recibe la señal, bien sea analógica o digital, en banda base, la traslada a un canal de radiofrecuencia, la amplifica y la transmite al aire.

Retransmisor o reemisor: Es que recibe la señal en un canal de RF y, sin demodularla, la traslada a otro canal de RF, generalmente distinto al de entrada, la amplifica y la transmite nuevamente al aire. La razón de que los canales de entrada y salida en un reemisor sean diferentes, es evitar que la señal radiada por la antena transmisora se realimente a la misma frecuencia a través de la antena receptora.

Tecnología: Según la tecnología utilizada en los amplificadores de potencia, los transmisores pueden ser de estado sólido o con válvulas de vacío. En general, el costo de operación de los transmisores de estado sólido es mayor que el de los de válvulas de vacío a potencias superiores a unos 7 Kw[3], por lo que en la mayor parte de los transmisores actuales de alta potencia, se emplea la tecnología de válvulas de vacío.

Amplificación común o separada. Esta clasificación solamente es aplicable a los transmisores analógicos, en que las señales de vídeo y audio se modulan con esquemas diferentes, se combinan o multiplexan en frecuencia y se transmiten. El nivel de potencia al que se realiza la combinación de las señales determina esta clasificación.

1.2 Arquitectura básica de los transmisores de televisión

En términos generales, la arquitectura de los transmisores, bien sean analógicos o digitales, es prácticamente la misma y se ilustra en la figura 1.1[4]

[3] G.W. Collins: *Fundamentals of Digital Television Transmission*. John Wiley & Sons, Inc. 2001.
[4] Este concepto de arquitectura se aplica prácticamente a todos los sistemas de comunicaciones eléctricas.

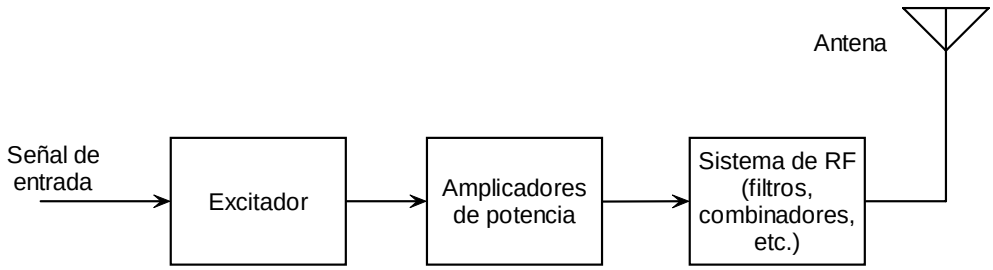

Fig. 1. Arquitectura básica de un transmisor

En la figura anterior, el excitador contiene, básicamente, al modulador, cuya salida es una señal modulada a la frecuencia de la portadora o a alguna frecuencia intermedia, en cuyo caso, contiene también un conversor ascendente para trasladar la señal en FI a la frecuencia de la portadora del canal de RF. En los transmisores digitales, el modulador puede incluir también al codificador de canal. Como parte del excitador también suelen incluirse los amplificadores de baja potencia para la señal modulada que, dependiendo del diseño particular del transmisor, pueden proporcionar una señal de RF desde unas fracciones de vatio hasta unos 50 vatios. En la tecnología actual de los transmisores de televisión el excitador está constituido por elementos de estado sólido.

En el caso de transmisión analógica en que las señales de audio y vídeo deben multiplexarse en frecuencia pueden darse dos variantes, una designada como de amplificación separada que se utilizó en los primeros transmisores de televisión y con algunas variantes, hasta finales de la década de 1960 y después, sólo en algunos transmisores de alta potencia y que se ilustra en la figura 1.2. Se trata, en realidad de dos transmisores, uno modulado en amplitud para el vídeo y otro modulado en frecuencia para el audio, por lo que en este caso se habla de un excitador o modulador de vídeo y otro de audio, la frecuencia central[5] de salida de este último es desviada 4.5 o 5.5 MHz de la frecuencia de la portadora de vídeo y enganchada a ésta. Por lo general la potencia de salida de audio es de 1/10 de la de vídeo.

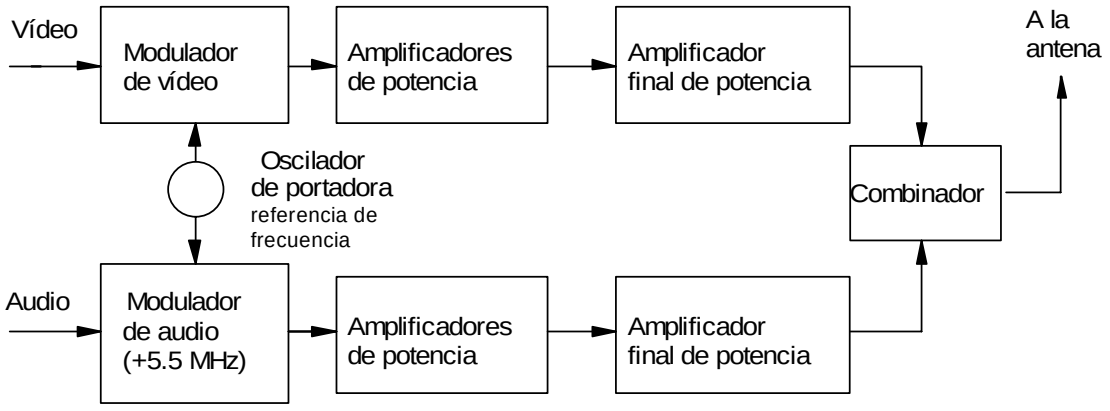

Fig. 1.2. Sistema transmisor de amplificación separada.

[5] En FM no puede hablarse estrictamente de una portadora, excepto cuando no hay modulación.

El multiplexado se realiza a la salida de los amplificadores de potencia mediante un circuito combinador o diplexor con filtro de ranura[6], que puede ser implementado mediante un acoplador de 3 dB. En el esquema de la figura 1.2 la modulación se realiza en *bajo nivel*, es decir, a niveles de unos cuantos milivatios, lo que hace que hace que la eficiencia del sistema sea relativamente baja. En los primeros transmisores se utilizó modulación de vídeo en alto nivel, de modo que la señal de vídeo en banda base, amplificada a veces a niveles de varios KW modulaba al amplificador final del transmisor. La ventaja aparente de este método era que todas las etapas previas de potencia de RF, podían ser no lineales, por ejemplo clase C, con mayor eficiencia. Sin embargo, el posible ahorro en consumo de potencia en estas condiciones, era muy pequeño, ya que todas las etapas de amplificación de vídeo tienen que ser lineales (clase A) y, por consecuencia su eficiencia es baja, de modo que lo que se ahorraba en la sección de RF se perdía en la sección de vídeo.

En el caso del transmisor de vídeo de la figura 1.2 no se indica, tampoco, el filtro de banda lateral vestigial, que puede insertarse a la salida del modulador, en alguna etapa subsiguiente, a bajo nivel de potencia, o bien a la salida del transmisor de vídeo. Esta última alternativa se utilizó en las primeras décadas de la televisión y el filtro, en esas condiciones, debe trabajar a la potencia de salida, por lo que este tipo de filtro se implementaba con cavidades resonantes que, en las bandas de VHF, resultaban de dimensiones considerables. La técnica utilizada a partir de la década de 1960 fue la de insertar el filtro de banda vestigial en las primeras etapas, a bajo nivel de potencia a menor costo y tamaño más compacto. Algo similar ocurre con la combinación de las señales de salida de los transmisores de audio y vídeo que, en la figura 1.2, se muestra también a la salida del transmisor. Sin embargo, hay algunas consideraciones que favorecen el uso del combinador en altos niveles de potencia. Entre ellas, el consumo de potencia resulta menor, la linealidad de luminancia y crominancia también es mejor y los productos de intermodulación fuera de banda se ven reducidos.

El diseño de los transmisores evolucionó en la década de 1960 hacia los sistemas con modulación en FI y amplificación común, si bien la técnica de amplificación separada se mantuvo en algunos fabricantes, principalmente en aplicaciones de alta potencia[7]. La arquitectura básica de un transmisor de televisión con amplificación común se muestra en la figura 1.3 y, en este caso, el excitador está constituido por el modulador, filtro de banda vestigial y conversor ascendente y no se indican en el diagrama, los amplificadores de FI a la salida del modulador o del filtro de banda vestigial.

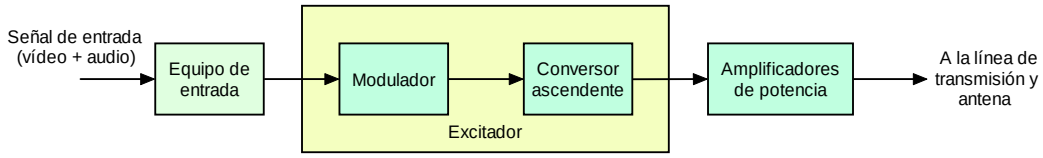

Fig. 1.3. Sistema transmisor de amplificación común.

Equipo de entrada.

La señal de entrada, un flujo binario único en el caso digital o bien dos señales, una de vídeo y otra de audio en el caso analógico suele recibir un procesado previo que, en el caso de vídeo analógico consiste principalmente en restablecer el nivel correcto de cc, la forma correcta de los pulsos de sincronismo y de la subportadora de color, así como

[6] Este filtro se designa en inglés como *notch filter* y el conjunto como *diplexer notch filter*.
[7] Los términos *alta* y *baja potencia* son, evidentemente ambiguos. En general, aquí entendemos por bajas las potencias inferiores a unos 1000 W.

corregir la amplitud de la señal para entregar 1 V_{PP} (0.7 V de vídeo y 0.3 V de sincronismo) al modulador. Suele incluirse también un *precorrector* cuya función es compensar las no linealidades introducidas principalmente por los amplificadores de potencia, predistorsionando la señal. La señal de audio suele pasar por un *limitador*, con el fin de que las señales de nivel elevado, al ser moduladas en frecuencia, no excedan el ancho de banda de audio. Estos equipos de entrada no forman parte del transmisor propiamente dicho y, eventualmente, puede prescindirse de ellos.

Modulador.

La función del modulador es trasladar la señal en banda base a una frecuencia superior, que puede ser el canal de radiofrecuencia (RF) o bien una frecuencia intermedia (FI) inferior a la de RF. Esta última técnica es la que se emplea en casi todos los transmisores actuales, ya que a esa frecuencia intermedia es posible realizar el control de algunos parámetros de la señal con mayor facilidad y a menor costo que a potencias grandes. La potencia de salida del modulador es muy pequeña, del orden de fracciones de watt.

Conversor ascendente

Cuando se emplea modulación en FI, la señal modulada debe trasladarse en el espectro a la frecuencia del canal de RF, mediante un conversor ascendente. La salida de este conversor se filtra a la banda de paso de RF deseada para eliminar los componentes espurios fuera de banda y se amplifica hasta niveles de varios watts. Todo el conjunto anterior, modulador, conversor y amplificadores de baja potencia suele designarse como *excitador*.

Amplificadores de potencia

La salida del excitador se aplica a uno o varios amplificadores de potencia, cuya salida final se entrega a una línea de transmisión para conducir la señal hasta la antena. Los amplificadores de potencia pueden utilizar tecnología de estado sólido o de válvulas al vacío. En general, para potencias superiores a unos 10 KW suelen preferirse éstas últimas.

La arquitectura de *amplificación común* se utiliza tanto en transmisores analógicos como digitales. El término "común" se refiere a la transmisión de señales analógicas de audio y vídeo, amplificadas simultáneamente por los mismos amplificadores de potencia. En el caso analógico se puede utilizar también amplificación separada de audio y vídeo, lo que significa que, en realidad, se tienen dos transmisores, uno para audio y otro para vídeo. La modulación inicial se realiza a una *frecuencia intermedia* (FI), que suele ser del orden del 10% de la frecuencia de RF del canal de salida.

El sistema de amplificación común reduce el número de componentes respecto al de amplificación separada, ya que de hecho, sólo se requiere un transmisor. En los transmisores analógicos, una desventaja es la intermodulación entre las señales de vídeo y audio, tanto en banda como fuera de banda, ya que al ser amplificadas conjuntamente en las etapas de potencia, están sujetas a las no linealidades de estas. Estos sistemas requieren de ajustes más delicados que los de amplificación separada, si bien en la práctica se consiguen niveles de intermodulación dentro de la banda inferiores a –57 dB.

Por otra parte, el sistema de amplificación común ofrece algunas ventajas, tanto en transmisión analógica como digital. Entre ellas, en el caso analógico, permite el filtrado de la banda lateral vestigial utilizando filtros de onda acústica superficial (SAW[8]) mucho mejor que en los sistemas de amplificación separada, con ajustes menos complicados y, además, tanto en el caso analógico como en el digital, a frecuencia intermedia es más fácil realizar las correcciones necesarias a la señal, para compensar las no linealidades de los amplificadores de potencia que afectan no sólo a la intermodulación, sino al retardo de grupo o de envolvente,.

La arquitectura básica de un transmisor digital es similar a la del transmisor analógico de amplificación común, a excepción de que en el caso digital no se tienen dos señales de entrada que es necesario multiplexar, sino una señal digital única, constituida por un flujo binario continuo que contiene la información tanto de vídeo, como de audio y otros datos adecuadamente codificados. Esta señal puede contener la información de uno o varios programas multiplexados en tiempo.

Como puede inferirse de todo lo anterior, los transmisores analógicos de amplificación común y los digitales son muy similares en su arquitectura. Las diferencias estriban en las características de las señales, el procesado previo a que deben someterse antes de su entrada al transmisor y los requerimientos en el rango dinámico de los amplificadores de potencia, ya que la que la relación entre la potencia de pico y la potencia efectiva es mayor en el caso digital (≈10 dB) que en el analógico (≈2 dB), lo que impone condiciones relativamente severas en el caso de transmisión digital. Aparte de esto, es la parte del procesado de señal, no el transmisor propiamente dicho, lo que marca las principales diferencias entre los sistemas analógicos y los digitales.

En los sistemas analógicos, el deterioro de la señal se manifiesta en términos del ruido, respuesta en frecuencia, retardo de grupo, no linealidad de luminancia, ganancia y fase diferenciales, modulación incidental de fase de la portadora, reinserción de banda lateral inferior y distorsión por intermodulación. En los sistemas digitales también se manifiesta en términos del ruido, respuesta en frecuencia y retardo de grupo y, entre las distorsiones no lineales se tienen las conversiones AM-AM y AM-PM[9]. Tanto en un sistema como en otro, el objetivo es reducir estas distorsiones a niveles tales, que el canal se comporte tan linealmente como sea posible.

1.3 Aspectos comunes a los sistemas de transmisión analógicos y digitales

Medio de transmisión. En los sistemas de transmisión terrestre de televisión el medio de transmisión es el mismo: la atmósfera terrestre en su porción inferior cercana a la superficie de la tierra. Las características del entorno terrestre como montañas, valles, construcciones, etc., influyen en el comportamiento de las ondas electromagnéticas y, por tanto, en las características de la señal que llega a la antena receptora. Esta influencia, aunque en algunos aspectos básicos como la atenuación, es similar ya sea que se trate de señales analógicas o digitales, hay algunos efectos, principalmente debidos a las trayectorias múltiples[10] que siguen las ondas electromagnéticas, que pueden afectar más a las señales digitales que a las analógicas. En condiciones de propagación en *espacio libre*, cuando no hay obstáculos entre las antenas transmisora y receptora, el comportamiento de la atmósfera es el mismo.

Antenas. Los sistemas de transmisión terrestre emplean antenas, tanto para transmitir como para recibir las señales de televisión. Las antenas son los elementos que convierten la energía de radiofrecuencia en un circuito a energía electromagnética radiada al espacio, si se trata de antenas

[8] *Surface Acoustic Wave*.
[9] AM = Modulación de amplitud. PM = Modulación de fase.
[10] El término habitual es el de *efectos multicamino.*

transmisoras, o la función inversa en el caso de antenas receptoras. Todas las antenas tienen la propiedad de que pueden actuar lo mismo como transmisoras que como receptoras. En el caso de antenas receptoras, la potencia que tienen que manejar suele ser muy pequeña y pueden construirse con elementos que no necesitan manejar voltajes, corrientes o potencias elevadas. Las antenas usadas como transmisoras deben ser capaces de manejar, sin sufrir daños, la potencia que les suministre el transmisor. Sin embargo, estos son aspectos a considerar en la implementación técnica y no tienen que ver con el tipo de señal que tengan que manejar las antenas.

En condiciones ideales, una antena es *transparente*, independientemente de que lo que transmita sean señales analógicas o digitales. Esto significa que el mismo tipo de antena puede usarse para televisión analógica que para digital. Las condiciones ideales suponen principalmente que la respuesta en frecuencia de la antena es plana en la banda de interés, en este caso, la banda correspondiente al canal de televisión de que se trate.

Líneas de transmisión y guías de onda. La "transparencia" mencionada para las antenas es también válida para las líneas de transmisión y guías de onda, sin embargo, hay que hacer aquí una aclaración. Las líneas de transmisión y guías de onda deben ser capaces de manejar, sin dañarse, tanto la potencia promedio como la potencia pico de radiofrecuencia. En televisión analógica, la relación entre la potencia de pico y la potencia promedio es del orden de 2 dB, en tanto que en televisión digital las características de la señal modulada hacen que esta relación sea del orden de 10 dB. Este es un factor importante a tener en cuenta en la implementación de los sistemas transmisores o, en el caso de sistemas analógicos preexistentes, en su adecuación para la transición de analógico a digital.

Transmisores. En las pruebas iniciales de transmisión digital terrestre se utilizaron transmisores analógicos operativos, para lo cual se les sometió a algunas modificaciones que pueden considerarse menores y que consisten principalmente en la modificación o substitución del modulador y en ajustes en el excitador y los amplificadores de potencia para poder manejar las mayores potencias de pico de la señal digital. Por lo demás, y asumiendo que el transmisor está bien ajustado y su respuesta en frecuencia es plana en la banda de paso del canal de interés, puede considerarse que el transmisor es también *transparente* y por así decirlo, "no le importa" si las señales a transmitir son analógicas o digitales.

1.4 Estructura general de los sistemas de radiodifusión terrestre de televisión

Aunque entre los sistemas de transmisión terrestre pueden incluirse no sólo los que funcionan en las bandas destinadas a los servicios de radiodifusión mencionadas antes, sino también los de cable, distribución por microondas y radioenlaces terrestres, aquí se tratarán sólo los primeros.

Se asume que la señal de televisión es generada en un centro de producción, bien sea de *producción propia*, o procedente de otras fuentes externas. La salida del centro de producción es una señal de audio y vídeo destinada a su transmisión al público en general. El destino de esta señal puede ser un transmisor local, o una red de transmisores para cubrir una región o un país. En cualquier caso, puede hablarse de una red de transporte para la señal que puede variar desde un par de cables, uno para audio y otro para vídeo, que conectan la salida del centro de producción a la entrada del transmisor, hasta una red terrestre de microondas o un enlace por satélite, como se ilustra esquemáticamente en la figura 1.4.

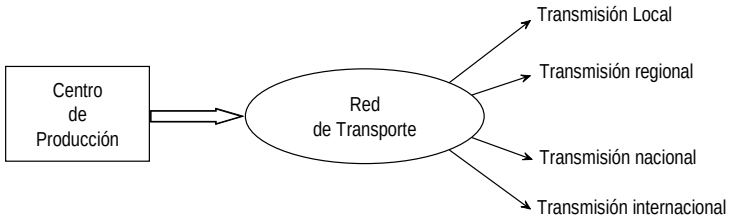

Fig 1.4. Estructura general del sistema de transmisión

Transmisión local. Es el caso típico de la transmisión destinada a cubrir una población y sus suburbios. El transmisor puede estar localizado o no en el propio centro de producción o en un lugar que, por sus condiciones orográficas, permita la cobertura adecuada de la población a la que se da servicio. Si el transmisor se localiza en el propio centro de producción, la conexión se realiza directamente mediante cables para vídeo y audio, en el caso analógico o un único cable en el caso digital, entre la salida del control maestro del centro de producción y la entrada del transmisor. Si el transmisor está fuera del centro de producción, el transporte de la señal puede hacerse por cable o fibra óptica, aunque en general se prefieren los radioenlaces de microondas como se ilustra en la figura 1.5.

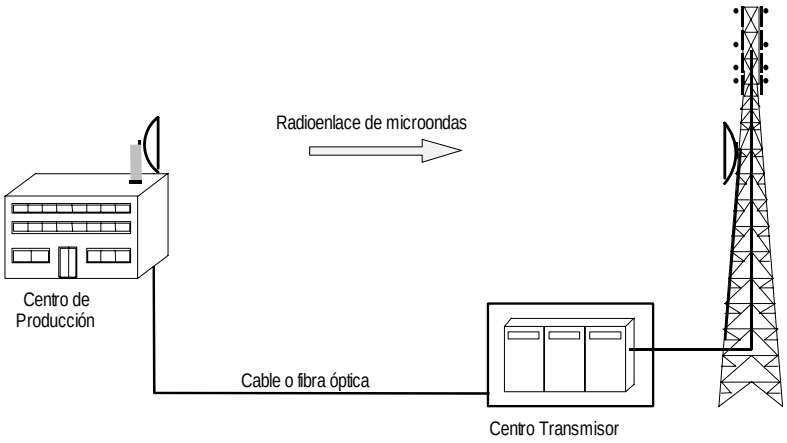

Fig. 1.5. Transmisión local de televisión

Transmisión regional. En este caso, la señal originada en el centro de producción, generalmente está destinada a más de un transmisor y es necesario transportarla bien mediante radioenlaces terrestres de microondas o por satélite. En algunos casos se han implementado redes de fibra óptica con este propósito, aprovechando la infraestuctura de las redes de distribución de energía eléctrica. La red de suministro a los transmisores es una red de contribución que se designa aquí como *red primaria*.

Con frecuencia, la señal transmitida por los emisores de la red primaria no alcanza a cubrir todos los núcleos de población en el área de servicio deseada y es necesario retransmitir esta señal primaria mediante reemisores emplazados en puntos adecuados, en que se tenga buena recepción de la señal primaria y cobertura adecuada hacia las zonas de población en sombra. Los reemisores reciben la señal de la estación primaria en el canal correspondiente de RF y la trasladan directamente a otro canal sin bajarla a banda base, la amplifican al nivel necesario y la transmiten en este nuevo canal hacia la zona no cubierta o en sombra de la señal primaria. La señal de un reeemisor puede ser retransmitida de nuevo hacia otras zonas extendiendo así la cobertura. Esta red de reemisores alimentados por las señales primarias o las procedentes de otros reemisores previos se designa aquí como *red secundaria.* La idea de esta estructura se ilustra en la figura 1.6, en que los transmisores regionales constituyen la red primaria y los retransmisores la red secundaria. El concepto anterior de estructura de una red de transmisión terrestre de televisión ha evolucionado en la última década y lo

que en el contexto anterior se ha designado como "red secundaria" en que los reemisores reciben la señal en un canal de RF y la transmiten en otro ya no es completamente aplicable.

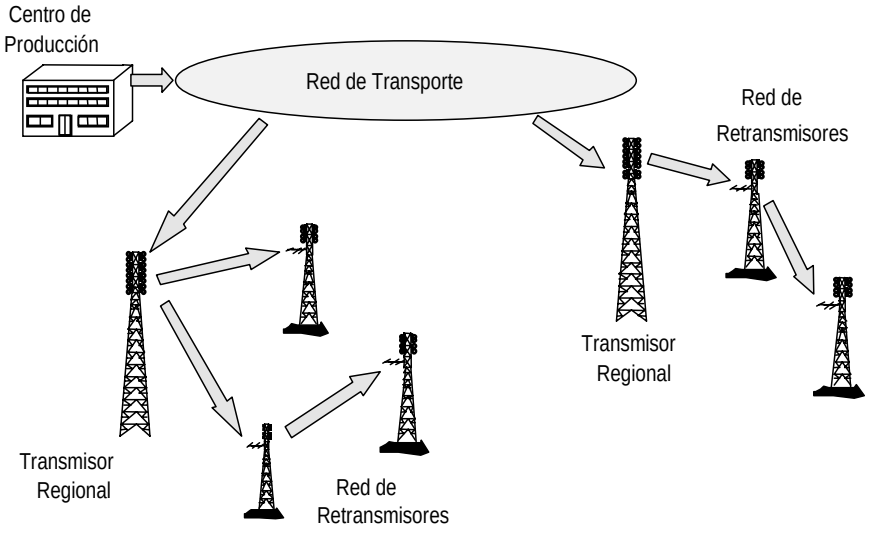

Fig. 1.6. Estructura de una red de transmisión terrestre.

Con el aumento de los sistemas de transmisión de televisión por satélite y, en particular, de los servicios designados como de *radiodifusión directa por satélite*, las señales de televisión son fácilmente accesibles para su transmisión en zonas de orografía accidentada. Así, en lugar de tener que localizar un lugar, generalmente en la cima de una colina o montaña, en que se reciban bien las señales de un transmisor primario y, al mismo tiempo, sea posible su retransmisión hacia las zonas en sombra, que además requiere de la construcción de vías de acceso y suministro de energía eléctrica, la retransmisión de señales de satélite ofrece la posibilidad de instalar pequeños transmisores directamente en los núcleos de población a servir. A diferencia de la retransmisión terrestre, en que la señal procede de un transmisor primario o de un retransmisor previo, en una red basada en satélite, la señal procede directamente del centro de producción y, en esas condiciones, su calidad es, en general, mejor que la que se tiene mediante retransmisión terrestre. Aún cuando la mayor parte de las redes existentes siguen la estructura descrita en las secciones anteriores, se estima que en el futuro dichos reemisores serán substituídos paulatinamente por transmisores alimentados por señales procedentes de satélites.

Red Nacional: La estructura de una red nacional es básicamente, la misma que se indica en la figura 1.6. En este caso, la señal "nacional", destinada por lo general a toda la población de un país, suele pasar a través de los centros regionales de producción, con el fin de insertar programas locales o regionales a ciertas horas del día, en substitución de la programación nacional. En estas condiciones, es posible cortar el paso de la programación nacional hacia la red regional de transmisores primarios y secundarios. En la actualidad, las redes de transporte incluyen tanto la transmisión terrestre por microondas, como la transmisión por satélite.

1.5 Bandas de frecuencias.

Las bandas de frecuencias asignadas a los servicios de radiodifusión terrestre de televisión comprenden segmentos de las bandas de VHF (30 a 300 MHz) y UHF (300 – 3000 MHz). Esta asignación se llevó a cabo por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) ya en los inicios de la televisión, a mediados del siglo XX y aunque estuvo condicionada, en cierta medida, por la

tecnología de la época, sigue manteniéndose en la actualidad para cada una de las regiones establecidas por la UIT. Las bandas asignadas para televisión se muestran en la tabla siguiente:

Región	VHF (Banda I)	VHF (Banda III)	UHF (Bandas IV y V)
1. Europa, incluyendo la porción asiática de Rusia, Africa y Cercano Oriente incluyendo Turquía.	47-68 MHz	174-230 MHz	470 – 790 MHz 790 – 862 MHz
2. Continente americano	54—68 MHz 68 – 72 MHz 76 – 88 MHz	174 – 216 MHz	470 – 608 MHz 614 – 806 MHz
3. Asia, excepto la porción asiática de Rusia y, además, Oceanía	47 – 50 MHz 54 – 68 MHz	174 – 223 MHz	470 – 585 MHz 610 – 960 MHz

Debido a la diferencia entre los estándares de televisión, originalmente para sistemas analógicos (6, 7 u 8 MHz por canal), las asignaciones de frecuencia de los canales individuales son diferentes en las diferentes regiones. Las bandas de frecuencias que aparecen en la tabla son las utilizadas actualmente y fueron asignadas hace más de cincuenta años, sin haber sufrido modificaciones significativas. Con el advenimiento de la televisión digital y el crecimiento que se prevé en la cantidad de programas a transmitir en menores anchos de banda, las actuales asignaciones de frecuencia pueden llegar a ser modificadas en el futuro, aunque por el momento esto resulta sólo una especulación. En la actualidad las bandas anteriores son válidas tanto para sistemas analógicos como digitales, si bien en bastantes países la tendencia es a que los servicios de radiodifusión terrestre de televisión ocupen solamente las bandas de UHF y las de VHF queden despejadas para emplearlas en otros servicios de comunicaciones.

1.6 Características del canal de radiofrecuencia

La señal de televisión que se transmite por un canal de radiofrecuencia contiene tanto la información de vídeo como de audio. En el caso analógico el ancho de banda de RF depende del estándard utilizado según lo define el Informe 624 del CCIR. En los sistemas M (525 líneas) y N (625 líneas) el ancho de banda es de 6 MHz. En el sistema B (625 líneas), es de 7 MHz y en todos los demás sistemas, el ancho de banda es de 8 MHz. La estructura general del canal de RF se muestra en la figura 1.7 para el caso de señales analógicas. Los canales ocupados por señales digitales ocupan el mismo ancho de banda que los analógicos. La diferencia consiste en que, en tanto que un solo programa analógico ocupa todo el ancho de banda, esa misma banda puede ser ocupada por cuatro o más programas digitales.

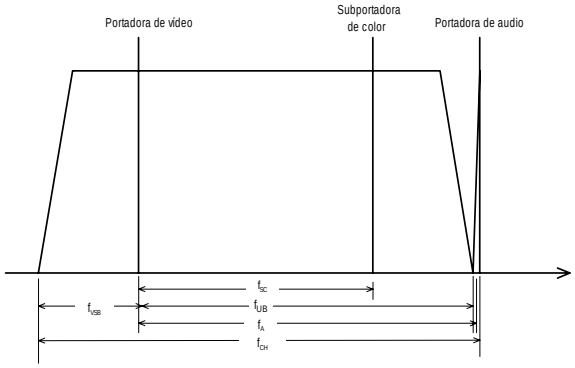

Fig. 1.7. Estructura general del canal de televisión en RF.

En la figura anterior:

f_{CH}: Ancho de banda total del canal.

f_{UB}: Ancho de banda nominal de la banda lateral principal.

f_{VSB}: Ancho de banda nominal de la banda lateral vestigial.

f_{SC}: Separación de la subportadora de color respecto a la portadora de vídeo (3.58 o 4.43 MHz según que el sistema de 525 o 625 líneas).

f_A: Separación de la portadora (frecuencia central) de audio de la portadora de vídeo.

Los valores para los sistemas M, B y G son los siguientes:

	M	B	G
f_{CH} (MHz)	6	7	8
f_{UB} (MHz)	4.2	5	5
f_{VSB} (MHz)	1.25	1.25	1.25
f_{SC} (MHz)	3.579545	4.43361875	4.43361875
f_A (MHz)	4.5	5.5	5.5

Conviene hacer énfasis en que la figura 1.7 se refiere a la característica espectral del canal de RF y no al espectro de la señal de vídeo o de audio. El espectro de una señal analógica de vídeo en banda base se muestra en la figura 1.8 y la respuesta en frecuencia de la figura 1.7 indica que el sistema debe pasar por igual todas las componentes espectrales de la figura 1.8. Es decir, el sistema, que incluye el transmisor, líneas de transmisión, antenas y medio de transmisión o propagación, debe tener una respuesta amplitud-frecuencia plana en el ancho de banda de interés. En NTSC (525 líneas/cuadro, 30 cuadros/s) el ancho de banda de la señal de vídeo en banda base es de 4.2 MHz y de 5 MHz en PAL (625 líneas/cuadro, 25 cuadros/s).

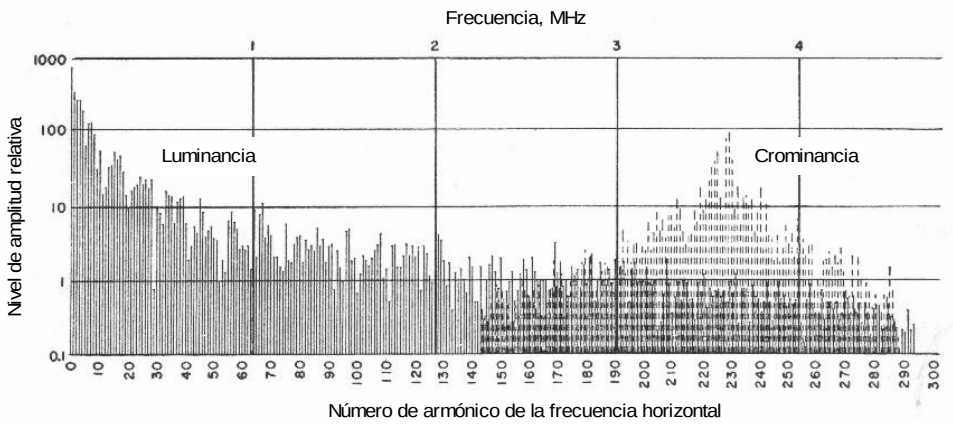

Fig. 1.8 Simulación del espectro de una señal analógica de vídeo en banda base.

1.6 Tipo de modulación en los sistemas analógicos

Vídeo.

La señal de vídeo (luminancia + crominancia) modula en amplitud a la portadora de vídeo del canal en una forma que se designa como C3F negativa por el CCIR. En este tipo de modulación no se transmiten las dos bandas laterales sino solamente la banda superior completa y una porción o vestigio de la inferior con el propósito de reducir el ancho de banda necesario, ya que si empleara AM completa, se requerirían canales de 10 MHz o más. La transmisión de un vestigio de la banda lateral es necesaria, además, para preservar íntegramente el contenido de la porción de bajas frecuencias del espectro de la señal de vídeo, de ahí que se emplee este tipo de modulación en lugar de la de banda lateral única, en que los requisitos que deberían cumplir los filtros no son fácilmente realizables en la práctica para una señal de esta naturaleza.

Audio.
El audio modula en frecuencia (FM) a una portadora separada de la portadora de vídeo 4.5 MHz (NTSC) o 5.5 MHz (PAL), con una desviación máxima de la frecuencia central de ±25 KHz.

Características de la señal modulada.

La modulación de la portadora de radiofrecuencia por la señal de vídeo es, como se mencionó antes, en amplitud con vestigio de banda lateral. La polaridad de la señal de vídeo puede ser positiva o negativa, dando lugar a lo que se designa como *modulación positiva* y *modulación negativa*. Con modulación positiva la amplitud de la portadora de RF es máxima en las porciones blancas de la imagen, en tanto que con modulación negativa dicha amplitud es mínima cuando la amplitud de la señal de vídeo es máxima. En otras palabras, las regiones negras de la imagen aumentan la amplitud de la portadora y esta es máxima en los picos de sincronismo. Los dos tipos de modulación se ilustran en la figura 1.9.

En los inicios de la televisión en Europa, en la segunda mitad de la década de 1950, se utilizó en algunos países modulación positiva que luego fue reemplazada por la modulación negativa y ésta es la que se utiliza en todos los sistemas analógicos de televisión terrestre y de cable. Hay consideraciones prácticas que imponen el empleo de las señales de sincronismo a niveles inferiores al nivel de negro, por consecuencia, si se utiliza modulación positiva la amplitud de la portadora de RF se reduciría a valores muy pequeños o cero durante los pulsos de sincronismo, lo que no es aconsejable, ya que en esas condiciones cuando la señal recibida es pequeña, los receptores pueden

perder el sincronismo y la imagen recibida sería inestable o inútil. En el caso de la modulación negativa la señal de RF es máxima durante los pulsos de sincronismo con lo que se elimina el problema mencionado. La modulación negativa ofrece ventajas en dos aspectos: por una parte las señales de los picos de sincronismo proporcionan una referencia estable para el control automático de ganancia en los receptores y, por otra, se reduce la exigencia sobre la potencia promedio que debe proporcionar el transmisor, ya que la portadora de vídeo no puede aumentar su amplitud por encima de los picos de sincronismo y alcanza, cuando más, el 75% de la amplitud máxima durante la transmisión de imagen.

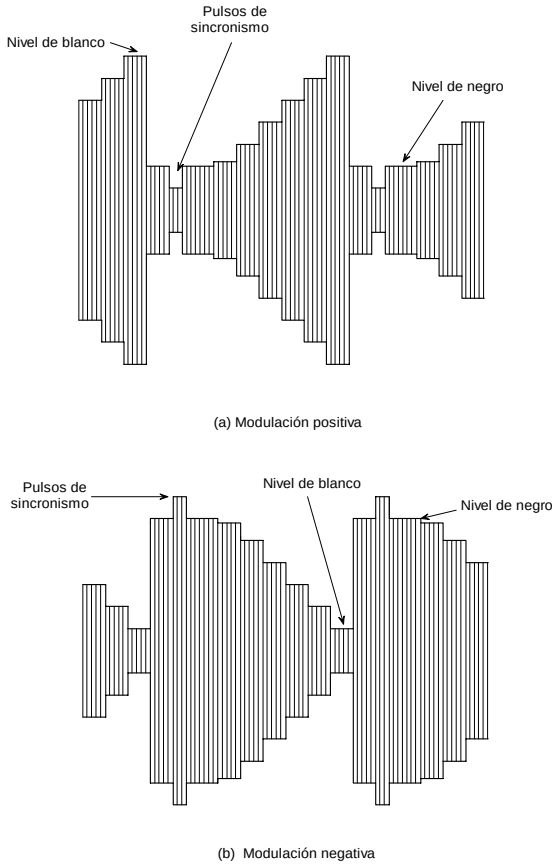

Fig. 1.9. Modulación de la portadora de vídeo por una señal de barras (escalera)

Si, por otra parte, se consideran los efectos de interferencia sobre la señal de RF, la ventaja de la modulación negativa no parece tan clara y es conveniente considerar estos efectos separadamente; sobre el sincronismo por una parte y sobre la imagen por otra. Si la interferencia es suficientemente seria como para destruir completamente la señal de sincronismo, lo más probable es que la imagen recibida quede también destruida y si no, que los generadores de barrido del receptor pierdan el sincronismo horizontal, el vertical, o ambos. Esto ocurre cuando una señal o un pulso interferente llega inmediatamente antes de la señal normal de sincronismo, momento en que los generadores de barrido son más sensibles a cualquier señal externa. Con modulación negativa, la sensibilidad a este tipo de interferencia es mayor que con modulación positiva, ya que para interrumpir el sincronismo en esta última, la señal interferente debe ser de amplitud y fase tales, que cancele la señal entrante. Si la fase de la señal interferente no es exactamente opuesta a la fase de la portadora de RF, no cancelará la señal y, por consecuencia no alterará el barrido. De manera similar, si la fase de la señal interferente es opuesta a la de la portadora, pero su amplitud es mayor que la de la señal de vídeo, habrá

sobremodulación, pero no necesariamente pérdida de señal. La modulación negativa, por otra parte, da lugar a que el sistema sea más susceptible a cualquier señal interferente que ocurra cerca del final de una línea o de un campo y que sea de naturaleza tal, que haga que la amplitud de la portadora sea igual o mayor que su amplitud en los picos de sincronismo. Sin embargo, en la práctica, esta ventaja de la modulación positiva es solo aparente, ya que con la inserción, en el receptor, de circuitos de control automático de frecuencia en los circuitos de barrido horizontal, así como de circuitos limitadores de amplitud antes de los integradores del pulso de sincronismo vertical, el funcionamiento de los generadores de barrido resulta inmunizado adecuadamente contra las interferencias.

En lo que respecta a la imagen, el efecto de las interferencias es menos objetable con modulación negativa que con positiva. Los desvanecimientos momentáneos de señal aparecen como puntos negros con modulación negativa y como destellos blancos, con modulación positiva. Estos destellos son considerablemente más desagradables al espectador que los puntos negros.

Espectro de la señal modulada de televisión.

La mayor parte de la energía espectral de la señal de vídeo en banda base está contenida en la región de bajas frecuencias, como puede apreciarse en la figura 1.8. Las componentes frecuenciales superiores al armónico 130 aproximadamente, es decir, alrededor de 2.1 MHz por encima de la portadora de vídeo en la señal modulada, tienen niveles casi tres órdenes de magnitud inferiores a las de baja frecuencia. Sin embargo, es necesario transmitir estas componentes de luminancia, ya que son las responsables de los detalles finos de la imagen. Las componentes de crominancia, por otra parte, requieren anchos de banda menores, ya que la respuesta visual humana no es la misma para la luminancia (brillo) que para la crominancia (color) y el ojo humano no percibe el color con la misma resolución o definición que el brillo. Como el espectro de la señal de luminancia es discreto, el espectro de crominancia se intercala en el de luminancia sin interferencia, al menos teóricamente, en la porción alta del espectro de luminancia. Los niveles de las componentes espectrales de la señal de crominancia, son inferiores a los de luminancia entre uno y tres órdenes de magnitud, como también se aprecia en la figura 1.8.

La señal de vídeo, como se mencionado, modula en amplitud a la portadora, lo que da lugar a dos bandas laterales, de las que sólo se transmite una porción o vestigio de la banda lateral inferior, lo que da lugar a un espectro en banda de paso o RF como el que se muestra en la figura 1.10, en que se ilustra la señal modulada de vídeo cuyo espectro en banda base corresponde al de la figura 1.8 y en el que se indican las posiciones de la portadora de vídeo (f_v) y de la subportadora de color ($f_v + f_{sc}$) desplazada f_{sc} de la de vídeo y cuyo valor depende del sistema.

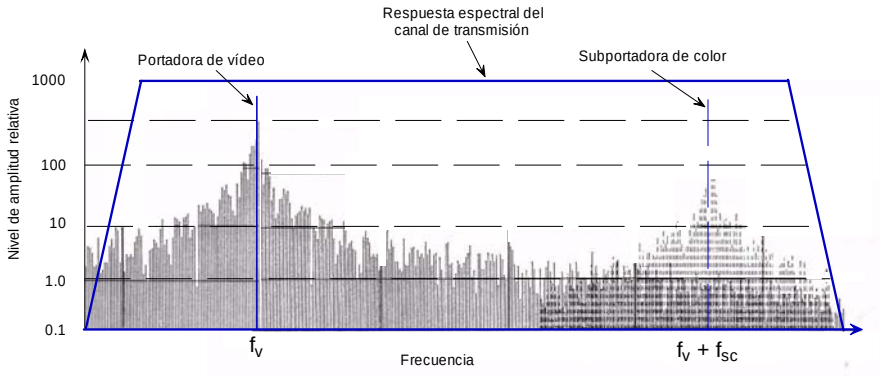

Fig. 1.10. Espectro de la señal analógica modulada de vídeo.

Puesto que la modulación con vestigio de banda lateral da lugar a una señal con mayor energía en la porción de bajas frecuencias que la que se tendría con banda lateral única o con AM completa, es necesario compensar la respuesta en bajas frecuencias en el receptor, por lo que se utiliza un filtro con una característica espectral similar a la que se muestra en la figura 1.11.

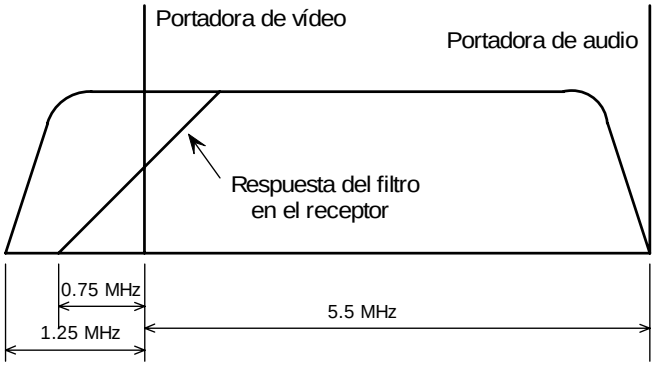

Fig. 1.11. Característica de la respuesta del filtro en el receptor.

1.7 Tipo de modulación en los sistemas digitales de televisión.

En transmisión digital no se tiene el mismo esquema espectral que en la analógica, si bien la respuesta del sistema de transmisión debe ser plana en el ancho de banda del canal. En transmisión digital la información a transmitir está constituida por un caudal o flujo de datos, cuya naturaleza, es decir, vídeo, audio o de otro tipo, no está determinada por la forma de onda, sino por la codificación que permite identificar la naturaleza de la información. El tipo de información a transmitir es uniforme, en el sentido de que el transmisor no "sabe" si trata de vídeo, audio u otra cosa, pues toda la información se le entrega en la misma forma para su transmisión. Por consecuencia, en el caso de transmisión digital no se requieren dos transmisores, o multiplexar en frecuencia las señales (audio + vídeo) para amplificarlas en un esquema común. Así, aunque en el estado actual de la normatividad se mantienen los mismos anchos de banda para transmisión digital que para analógica y se requiere que la respuesta del sistema sea plana en el ancho de banda del canal. En transmisión digital no se puede hablar estrictamente de portadoras de vídeo y audio, sino de una portadora única o de un vestigio de ésta, que permita la sintonía adecuada del canal deseado, para la subsecuente detección y decodificación de la información.

En la transmisión de señales digitales de televisión, igual que en cualquier otro sistema digital de comunicaciones, el caudal binario recibido debe ser, en la medida posible, igual que el transmitido, por lo que la información debe protegerse al máximo contra las degradaciones que inevitablemente introduce el medio de transmisión. Los sistemas de comunicaciones por cable y satélite son menos hostiles que los de radiodifusión terrestre, ya que los primeros utilizan un medio de transmisión muy estable: cable o fibra óptica, en que el principal problema es la atenuación, fácilmente predecible y cuyos efectos pueden compensarse con relativa facilidad. En el caso de comunicaciones por satélite también el comportamiento del medio de propagación, aunque sujeto a variaciones por meteoros atmosféricos en ciertas bandas, es bastante predecible y por consecuencia, sus efectos también pueden compensarse.

Por el contrario, los sistemas de radiodifusión terrestre presentan los problemas más complejos a causa de los diversos mecanismos que intervienen en la propagación y que contribuyen

considerablemente a la degradación de la señal. En los sistemas terrestres los efectos multicamino desempeñan un papel importante en la atenuación y retardo de la señal recibida y los desvanecimientos de la señal causados por la variabilidad del entorno de propagación producen tanto atenuación variable, como dispersión temporal y frecuencial de la señal, que se traduce en destrucción de la información transmitida o en interferencia entre símbolos con el consecuente aumento en la tasa de errores.

La codificación para detección y corrección de errores o codificación de canal, se trata con algo más de amplitud en el Capítulo 3 y forma parte del transmisor, previa a la modulación de RF. Esta codificación de canal es similar en los diferentes estándares adoptados, aunque con algunas variantes en cada uno. Conviene señalar que la codificación de canal no tiene que ver con la codificación de fuente. El codificador de canal tiene como entrada una señal digital procedente del codificador de fuente, en este caso, el codificador MPEG. El codificador de canal no "sabe" si la señal es de audio, vídeo o de otro tipo, para él se trata únicamente de una secuencia de bits cuya integridad debe proteger de alguna manera para que pueda ser reproducida fielmente en el receptor.

En el mundo se han adoptado tres estándares para la transmisión digital terrestre de televisión, estos son:

- **ATSC** (Advanced Television Standards Committee). Este estándard, producido en los Estados Unidos, ha sido adoptado en ese país, Canada, México y Corea del Sur. En su forma original, es básicamente un estándard para transmisión terrestre. El tipo de modulación en el canal de RF se designa como 8VSB, en que se transmite la banda lateral superior completa y un vestigio de la banda lateral inferior, con ocho posibles niveles (cuatro positivos y cuatro negativos) de la portadora. A diferencia del caso analógico, en 8VSB no se transmite íntegramente la portadora del canal, sino un piloto, es decir una señal a la frecuencia y fase de la portadora, pero de menor amplitud.

- **DVB** (Digital Video Broadcasting). Es un conjunto de estándares de transmisión de televisión desarrollado en Europa y adoptado por el ETSI[11] que incluye además, estándares para la transmisión de audio y servicios de datos. Incluye, principalmente, estándares para transmisión terrestre (DVB-T), por cable (DVB-C) y por satélite (DVB-S). Ha sido adoptado en Europa y la mayor parte de los países del mundo. Aunque tiene algunos aspectos comunes con el estándard ATSC, puede decirse que en general, no son compatibles. El esquema de modulación utilizado en DVB-T se designa como COFDM[12] y es completamente diferente al 8VSB. El sistema COFDM se trata con algo más de amplitud en el Capítulo 4.

- **ISDB** (Integrated Services Digital Broadcasting). Es un estándard desarrollado en Japón y adoptado en ese país. Es, en su concepción y algunos aspectos de implementación similar a DVB. Una diferencia importante con DVB es la segmentación de la banda de transmisión, para permitir que determinados anchos de banda se asignen a servicios diversos que incluyen datos, radio, televisión de definición estándard y televisión de alta definición. El sistema está diseñado para transportar información digital entre 3.561 y 30.980 Mbit/s.

El espectro de la señal modulada es muy similar en los tres sistemas y tiene la forma mostrada en la figura 1.12.

[11] European Telecommunications Standards Institute.
[12] Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex.

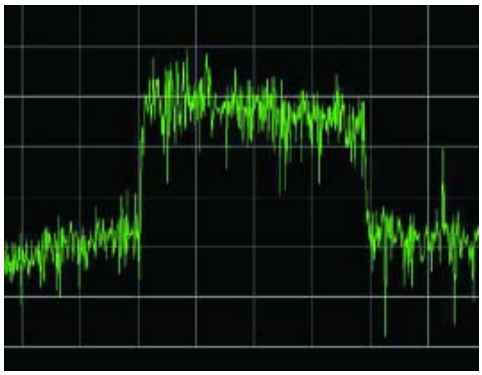

Fig. 1.12. Espectro de RF de una señal modulada digitalmente.

A diferencia del espectro de la señal analógica, los bordes del canal digital están bastante bien definidos, lo que hace posible la transmisión en canales adyacentes prácticamente sin interferencia.

1.8 Diferencias entre los sistemas de transmisión analógicos y digitales

a) En un sistema analógico todo el ancho de banda del canal es ocupado por la señal de un único programa (vídeo + audio asociado). En un sistema digital, el mismo ancho de banda es ocupado por las señales de hasta cuatro a seis programas. La eficiencia espectral es, por tanto de cuatro a seis veces mayor en los sistemas de transmisión digital de televisión.

b) La relación entre la potencia máxima o de pico y la potencia efectiva es del orden de 2 dB en el caso analógico y de unos 10 dB en el digital, lo que impone condiciones más severas de funcionamiento a los amplificadores de potencia de los transmisores digitales.

c) La degradación de la señal en función de la distancia al transmisor es paulatinamente más suave en los sistemas analógicos que en los digitales. En éstos la señal se degrada rápidamente y puede decirse que la señal se recibe bien hasta una cierta distancia a partir de la cual deja de recibirse. Esto no ocurre en los sistemas analógicos, como se ilustra en la figura 1.13.

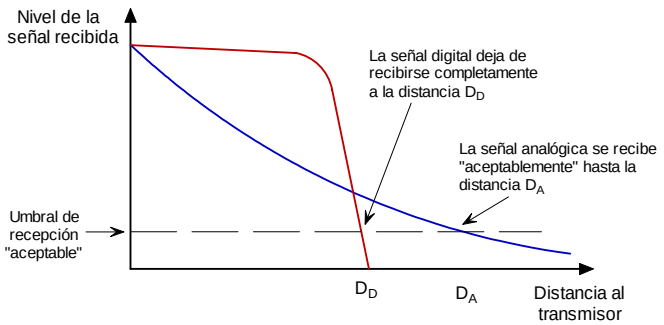

Fig. 1.13. Degradación de la señal en función de la distancia.

d) La naturaleza espectral de la señal analógica hace que no sea posible la asignación de canales adyacentes en una misma zona de cobertura, lo que reduce la posibilidad de utilización del espectro prácticamente en un 50%. Esta situación no se da en el caso

digital, en que sí es posible el funcionamiento en canales adyacentes en la misma zona.

e) El procesado de la señal suministrada al transmisor es considerablemente más complejo en el caso digital que en el analógico. Las ventajas de los sistemas digitales se consiguen a expensas de esta mayor complejidad.

1.9 Consideraciones relativas al funcionamiento de los transmisores de televisión

Cualquier sistema de comunicaciones y, en particular los transmisores, están sujetos a una serie de factores que causan que su funcionamiento no sea ideal. Un transmisor ideal sería aquél que cumpliera la condición de *transmisión sin distorsión*.

Transmisión sin distorsión. Para que se cumpla la condición de *transmisión sin distorsión*[13] la señal a la salida del sistema debe ser una réplica exacta de la señal de entrada, es decir, debe tener *la misma forma*, aunque no necesariamente la misma amplitud; sin embargo, puede estar amplificada o atenuada y retrasada en el tiempo respecto a la señal de entrada. En otras palabras, la configuración espectral de la señal de entrada no debe alterarse.

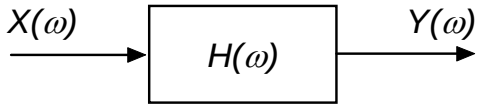

Fig 1.14

En el sistema de la figura 1.12, si la señal de entrada es $x(t)$, con espectro $X(\omega)$, y la de salida $y(t)$, con espectro $Y(\omega)$, la condición de transmisión sin distorsión se cumple si:

$$y(t) = Kx(t-\tau) \tag{1.1}$$

donde K representa la ganancia (o atenuación) y τ el retardo que sufre la señal a su paso por el sistema. En el dominio de frecuencia se tiene que:

$$Y(\omega) = K\,X(\omega)e^{-j\omega\tau} \tag{1.2}$$

donde $H(\omega)$, la función de transferencia del sistema, se identifica fácilmente con:

$$H(\omega) = Ke^{-j\omega\tau} \tag{1.3}$$

La respuesta de amplitud es decir, $|H(\omega)|$ debe ser constante, y la respuesta en fase debe ser lineal y de pendiente negativa:

$$\arg H(\omega) = -\omega\tau \pm \pi \tag{1.4}$$

Las condiciones anteriores deben cumplirse en la banda de paso, aunque no necesariamente fuera de ella. Cuando en un sistema no se cumple la condición de transmisión sin distorsión, es necesario corregir o *predistorsionar* la señal a su entrada para compensar las alteraciones que sufra y reducir o eliminar la distorsión. Este proceso de predistorsión recibe también el nombre de *ecualización* y puede

[13] Véase por ejemplo: Carlson, A.B. *Communication Systems.* 3rd edition. pag. 80. Mc Graw-Hill Book Co. 1986.

realizarse en amplitud, fase, o ambos. Es importante tener en cuenta que aunque las distorsiones pueden corregirse en cierta medida con esta técnica, en general no puede eliminarse el ruido.

En el caso de señales de televisión, tanto analógicas como digitales, hay ciertos parámetros críticos que deben controlarse adecuadamente en el transmisor, entre los más importantes están la modulación incidental de fase, ganacia y fase diferenciales, retardo de envolvente o de grupo, distorsión en cuadratura y, específicamente en transmisores analógicos, desplazamiento relativo entre luminancia y crominancia.

En términos generales las distorsiones pueden clasificarse como *lineales* y *no lineales*. La primeras ocurren en sistemas con una respuesta en frecuencia incorrecta. Las no lineales, principalmente en amplificadores de potencia, ocurren cuando los dispositivos amplificadores funcionan en regiones no lineales de su característica de transferencia, es decir el voltaje o potencia de la señal de salida no son linealmente proporcionales al voltaje o la potencia de la señal de entrada.

Ganancia y fase diferenciales. En los transmisores analógicos, la distorsión por ganancia diferencial se tiene cuando la ganancia de los amplificadores varía con la amplitud de la señal como se ilustra en la figura 1.15.

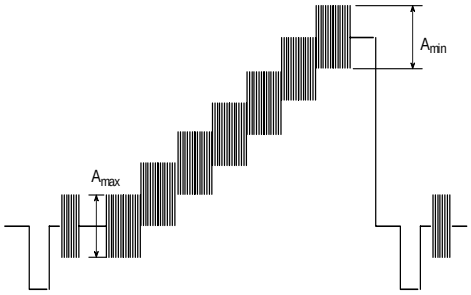

Fig. 1.15. Ganancia diferencial.

La ganancia diferencial suele expresarse en tanto por ciento como:

$$DG = \frac{A_{MAX} - A_{MIN}}{A_{MAX}} \times 100\% \qquad (1.5)$$

Análogamente, se tiene distorsión por fase diferencial cuando la fase de la subportadora de color varía con cambios en la amplitud de la señal de luminancia y también suele expresarse en tanto por ciento.

Retardo de envolvente. Se designa también como *retardo de grupo* y es la distorsión que resulta cuando un grupo de componentes frecuenciales de la señal difieren en el tiempo de llegada después de pasar por un circuito. Este tipo de distorsión ocurre principalmente en los filtros y matemáticamente se expresa como la pendiente de la fase respecto a la frecuencia:

$$retardo\ de\ \ grupo = \frac{d\phi}{df} \qquad (1.6)$$

Según se mencionó al tratar la transmisión sin distorsión, la fase en la banda de paso debe decrecer linealmente con la frecuencia, como se ilustra en la figura 1.16.

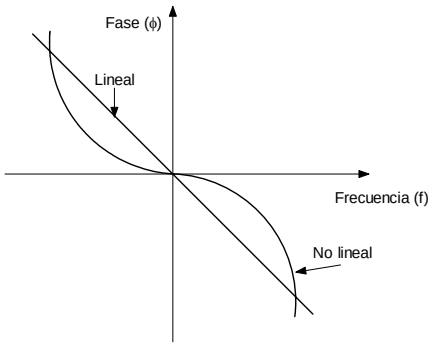

Fig. 1.16. Respuesta no lineal en fase

Una respuesta no lineal de fase respecto a la frecuencia produce ruido y distorsión de las señales de banda ancha en sistemas analógicos y ruido e interferencia entre símbolos en sistemas digitales.

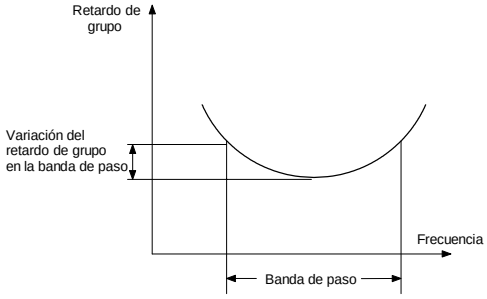

Fig. 1.17. Retardo de grupo en banda de paso.

La característica no lineal de fase de la figura 1.16 da lugar a una gráfica del retardo de grupo como la mostrada en la figura 1.17 y puede deducirse que, en la banda de paso el nivel medio del retardo no es excesivo, sin embargo, la variación de la distorsión es importante y es ésta la que es necesario ecualizar. La ecualización se consigue mediante circuitos con una característica de retardo inversa a la de la figura 1.17.

Modulación incidental de fase y compresión de envolvente. En transmisores analógicos, este tipo de distorsión ocurre como consecuencia de la modulación en banda lateral vestigial, cuando las amplitudes de las componentes de la banda lateral en cuadratura son diferentes.. La diferencia entre las amplitudes de las dos bandas laterales da lugar a que no sólo varíe la amplitud de la portadora, sino también su fase, que puede interpretarse como modulación indeseable en fase tanto de la portadora como de la subportadora de color. Esto da como resultado interferencia sobre la portadora de audio y distorsión del color en la imagen.

En los transmisores digitales, la distorsión no lineal produce modulación incidental de fase y compresión de la amplitud de la envolvente. Estas distorsiones, por lo general reducen la relación señal a ruido y, el método para eliminar o reducir estos efectos es emplear ecualizadores adaptativos no lineales. En términos simples, el ecualizador examina la señal de salida del transmisor y mide la compresión de la envolvente y la modulación incidental de fase tomando varios miles de muestras de amplitud en intervalos cortos y calcula la predistorsión que debe aplicarse a la señal de entrada al amplificador para producir a la salida una señal sin distorsión.

La distorsión no lineal causada por la compresión de envolvente y la modulación incidental de fase no es constante en la mayoría de los amplificadores, ya que las variaciones en la potencia de la señal de entrada, así como la temperatura y el envejecimiento de los componentes contribuyen a la variación

de la distorsión no lineal. Como consecuencia de estos cambios, en los transmisores digitales de alta potencia es muy importante monitorear la magnitud del error vectorial, que se trata en la sección [ ] de manera regular, para lo que también se emplea un ecualizador adaptativo no lineal que, además de monitorear el error, realiza las correcciones necesarias de manera automática y en tiempo real.

En transmisión digital, las distorsiones anteriores pueden dar lugar a dificultades de recepción, en el sentido de que habrá intervalos de recepción satisfactoria y otros de recepción nula a causa de la disminución en la relación señal a ruido y al consiguiente aumento en la tasa de errores.

1.10 Estándares de televisión digital.

Aunque este tema se mencionó someramente en la sección 1.7, en esta sección abundaremos algo más sobre él. Aunque este trabajo se realiza en el contexto europeo, en que se ha adoptado el sistema DVB, es conveniente conocer, aunque sólo sea superficialmente, algo sobre el sistema ATSC. El sistema ISDB, para el contexto de esta obra, es muy similar al DVB.

Hasta ahora, se han adoptado tres diferentes estándares[14] de televisión en el mundo:

- Advanced Television Standards Committee (ATSC) en los Estados Unidos, Canadá, México y Corea del Sur

- DVB (Digital Video Broadcasting), en los países de la Unión Europea, Australia, Nueva Zelanda y varios países de Iberoamérica y Asia.

- ISDB (Integrated Services Digital Broadcasting), en Japón.

Aunque los tres estándares comparten algunas cosas, con pocas diferencias, como la codificación de fuente, el sistema de transporte y la codificación de canal, no son compatibles entre sí.

Los tres sistemas emplean el mismo estándard de codificación de fuente para vídeo (MPEG-2), sin embargo, en el sistema estadounidense, ATSC, la longitud del paquete MPEG es de 187 bytes con 20 bits de redundancia, en tanto que en DVB e ISDB, es de 188 bytes de datos, con 16 bits de redundancia. Para el audio, ATSC utiliza la codificación Dolby AC-3, en tanto que los sistemas DVB y el ISDB utilizan el estándard MPEG para audio. Esto, entre otras cosas, hace que los tres sistemas de televisión digital sean incompatibles. En la codificación de canal, los tres sistemas utilizan un código externo de bloque (Reed-Solomon) y uno interno, convolucional (trellis), pero con diferente relación de código. En transmisión, ATSC utiliza modulación de 8 niveles en banda lateral vestigial, designada como 8VSB, en tanto que DVB e ISDB emplean Modulación Ortogonal por División de Frecuencia Codificada (COFDM[15]). La parte del transmisor que más se ve afectada por la implementación de estos estándares, según se mencionó en la sección 1.2, es el excitador, es decir la parte del transmisor que incluye al modulador.

El excitador puede considerarse como formado por los dos bloques que se muestran en la figura 1.17.

[14] En el contexto de esta sección, el autor emplea indistintamente, como equivalentes, los términos *estándard* y *sistema*.
[15] Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex.

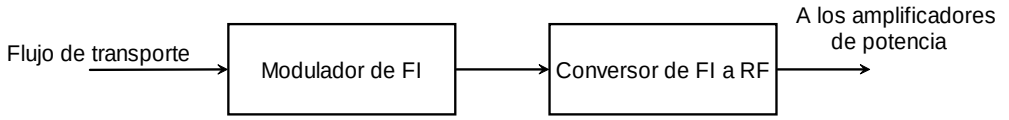

Fig. 1.17. Excitador de un transmisor de televisión

El primer bloque, el modulador, incluye el procesado y modulación en frecuencia intermedia (FI) del audio y del vídeo en el caso de transmisión analógica y, en el caso digital, el procesado digital de los datos y la codificación de canal y modulación en FI. El segundo bloque, el conversor de frecuencia intermedia a radiofrecuencia incluye la conversión ascendente a la frecuencia portadora del canal, la precorrección en FI, ecualización, amplificación y filtrado. En principio, este bloque es igual en los transmisores analógicos que en los digitales en que la finalidad principal es trasladar la señal modulada a la frecuencia intermedia al correspondiente canal de RF.

1.11 Estándard ATSC

Se describen aquí, de forma muy breve y resumida, las características principales del estándard ATSC, que si bien ha sido adoptado por un número muy reducido de países, presenta sin embargo, algunos aspectos interesantes que conviene conocer y que son comunes o similares a los de los otros estándares.

El estándard ATSC, designado también como A53 o DVB constituye el resultado de varios años de investigación, pruebas y evaluación por un grupo de empresas e instituciones de Estados Unidos y Canadá, fusionadas en los que se llamó *Gran Alianza* en 1994. El estándard describe las características del sistema de televisión adoptado en los Estados Unidos y, posteriormente, en Canadá, México y Corea del Sur y trata de una amplia variedad de subsistemas requeridos para originar, codificar, transportar, transmitir y recibir audio, vídeo y datos digitales por los sistemas de radiodifusión terrestre de televisión, sobre canales de 6 MHz de ancho de banda. Está concebido para transmitir información digital a una tasa de 19.39 Mbits/s.

La señal digital de entrada al sistema ATSC es un caudal o flujo de transporte en serie con codificación de fuente para vídeo en MPEG2 y para audio en Dolby AC-3, que puede incluir datos adicionales, bien sean complementarios al servicio de televisión, o de otra índole. El flujo de datos en serie se compone de paquetes de información de 187 bytes de longitud, más un byte de sincronismo.

El flujo binario llega al excitador del transmisor a través de un cable coaxial de 75 Ω con conector BNC y la señal de reloj está contenida en la propia carga de datos. La señal de salida del modulador es una señal modulada, con vestigio de banda lateral (VSB), con ocho niveles de amplitud, designada como 8-VSB. Por lo general, esta señal se modula a una frecuencia intermedia y posteriormente, mediante un conversor ascendente, se traslada a banda correspondiente al canal de RF. La frecuencia intermedia, nivel de la señal y otras características, dependen de la elección de los fabricantes.

En el modulador del transmisor se realizan dos funciones: primero, la codificación de canal y luego, la modulación propiamente dicha. Entre otras cosas, la codificación de canal, que no debe confundirse con la codificación de fuente, tiene por objeto agregar información redundante al flujo de transporte a fin de detectar y corregir errores en el receptor, causados por el canal de transmisión. Sin codificación de canal, el receptor sería incapaz de decodificar y mostrar la señal correctamente, excepto en ubicaciones en que la relación señal a ruido fuera muy alta y con un mínimo de efectos multicamino en la trayectoria de propagación.

En la figura 1.18 se muestra un diagrama de bloques de la codificación de canal[16] utilizada en el sistema ATSC, que incluye seis funciones principales: aleatorización de datos, codificación de bloque Reed-Solomon, intercalado (*interleaving*[17]), codificación convolucional (*trellis*), inserción de sincronismo e inserción de piloto.

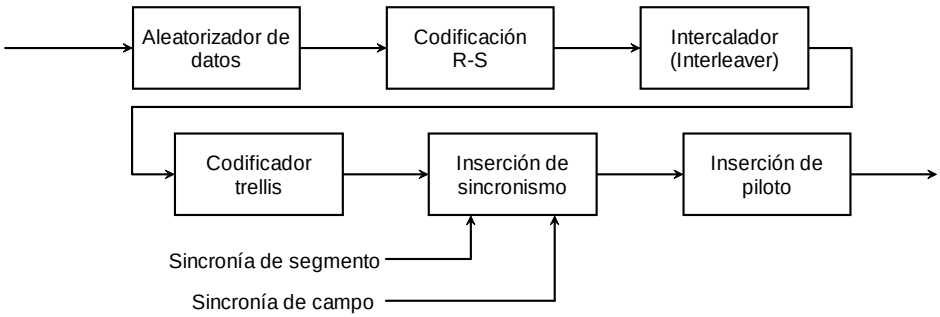

Fig. 1.18. Codificación de canal en el sistema ATSC

La primera acción en el codificador de canal es la aleatorización de los datos mediante una secuencia binaria pseudoaleatoria, cuyo propósito principal es conseguir la dispersión de energía en el espectro, de modo que éste sea uniforme en todo el ancho de banda, además de dispersar los errores en ráfaga de modo que al recibirse no ocurran en símbolos contiguos, una vez que han sido desaleatorizados en el receptor. La aleatorización no se aplica al byte de sincronismo.

La etapa siguiente en el codificador de canal es la codificación de bloque Reed-Solomon (R-S). Este es un código de corrección hacia adelante (FEC[18]) cuya finalidad es la detección y corrección de errores, para lo cual se agregan, en el sistema ATSC, 20 bytes de paridad a cada bloque de datos de 187 bytes. En estas condiciones, el código R-S es capaz de corregir hasta 10 errores en bytes por cada bloque de datos. A causa de estos bytes de paridad adicionales, el flujo de datos y la señal de reloj aumentan de 19.39 Mbits/s a 21.52 Mbits/s. De manera similar a la aleatorización, la codificación R-S no se aplica a los bytes de sincronismo. Los datos codificados mediante el código de bloque R-S son luego barajados o intercalados para alterar su orden y dispersar los errores en ráfaga. Esto proporciona a la codificación de canal una extraordinaria robustez. La aleatorización opera bit a bit, en tanto que el intercalado funciona byte a byte. Este tema se trata en el Capítulo 3.

Después del intercalado, el flujo binario, ya codificado en bloques, es codificado de nuevo mediante un código convolucional o trellis. El primero, de bloques, se designa como *código externo* y el segundo, convolucional, como *código interno.* Esta concatenación de códigos FEC, semejante a la que se emplea en los otros dos estándares, proporciona una gran robustez contra errores, al grado de que si, por ejemplo, la tasa de errores *antesk* de la codificación de canal es de, digamos 10^{-3}, es decir de un error por cada mil símbolos, *después* de la codificación de canal puede reducirse a menos de 10^{-7}. Como puede apreciarse, la concatenación de códigos, además de la aleatorización e intercalado, proporcionan al sistema una gran robustez contra errores.

[16] El tema de Codificación de Canal se trata con más amplitud en el Capítulo 3.
[17] La traducción adecuada para el término interleaving, sería algo equivalente a *barajado*. Aquí hemos preferido utilizar la palabra *intercalado.*
[18] *Forward Error Correction*

1.12 Modulación 8VSB

De manera similar a la modulación analógica, el sistema 8VSB utiliza modulación con vestigio de banda lateral y modulación de amplitud 8QAM, es decir, con ocho niveles de amplitud. Si bien la implementación del modulador puede ser diferente según el fabricante, el principio de este tipo de modulación se resume en el diagrama de bloques de la figura 1.19.

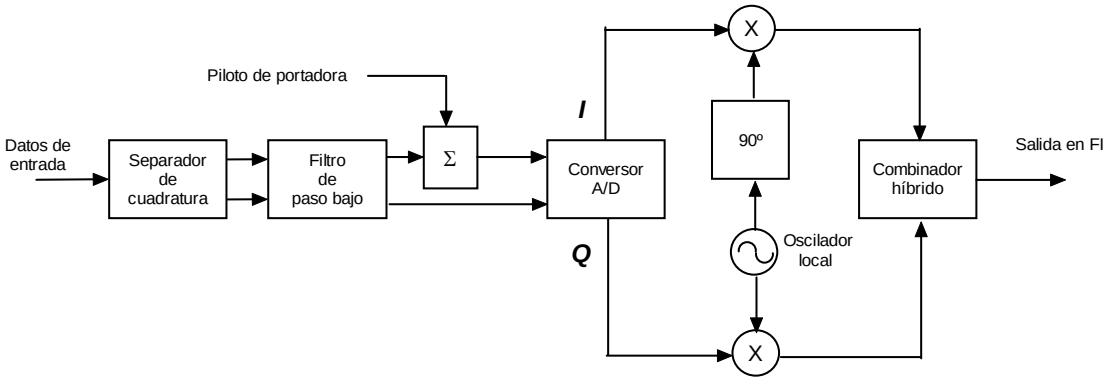

Fig. 1.19. Modulador 8VSB

Los datos de entrada proceden del codificador convolucional y son símbolos de tres bits u 8 niveles, que se dividen para formar las componentes en fase y cuadratura (*Q* e *I*) a la entrada del modulador. Los pulsos se conforman mediante un filtro lineal de Nyquist de paso bajo para minimizar la interferencia entre símbolos. La respuesta del filtro es plana en la banda de paso. El factor de forma del filtro se especifica como de 0.1152 parael sistema ATSC. En una de las salidas del filtro se inserta un piloto de la portadora de FI que servirá de referencia para que el receptor pueda demodular la señal correctamente. A diferencia del caso analógico en que se transmite la portadora completa, en (VSB sólo se transmite una muestra o piloto de ésta.

Las salidas de los canales *I* y *Q* pasan a un conversor digital analógico y se mezclan, a continuación, con la portadora de FI generada por el oscilador local. Un mezclador recibe la señal de este oscilador directamente y el otro, con un defasamiento de 90º para conseguir la modulación en cuadratura. Las dos señales se suman en un combinador híbrido para producir una salida única en frecuencia intermedia que posteriormente se convertirá, mediante un conversor ascendente, a la frecuencia del canal de RF correspondiente. El espectro resultante contiene sólo una de las bandas laterales y el piloto de la portadora.

La señal así generada, está modulada en amplitud con ocho niveles, cada nivel correspondiente a un símbolo de 3 bits. Se tienen cuatro niveles positivos y cuatro negativos. En el sistema 8VSB solamente la componente *I* contiene información. La componente *Q* no transporta información. El ancho de banda de la señal modulada es de 6 MHz y el espectro es plano en la banda de paso, similar al espectro de ruido gaussiano, a causa de la aleatorización previa a la codificación de canal. El ancho de banda a media potencia (-3 dB) es de 5.38 MHz y el piloto de la portadora se localiza a 0.31 MHz del extremo inferior de la banda.

1.13 Estándard DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial)

El Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones (ETSI) adoptó un conjunto de estándares para la radiodifusión de televisión, audio y servicios de datos para transmisión vía satélite (DVB-S), cable (DVB-C) y servicios terrestres (DVB-T). Nos ocuparemos aquí, brevemente, de este último,

designado también como ETS-300-744 o radiodifusión terrestre de vídeo digital, en el que se describen las líneas básicas para este servicio. Este estándard ha sido adoptado por todos los países miembros de la Unión Europea, Australia, Nueva Zelanda y algunos países iberoamericanos. En muchos aspectos, es similar al estándard ATSC (DVB) adoptado en los Estados Unidos, pero hay diferencias importantes en el ancho de banda, codificación de canal y modulación, que los hacen incompatibles.

El estándard DVB-T especifica un sistema diseñado para transmitir vídeo y audio de alta calidad, así como datos, a través de los canales de 7 u 8 MHz utilizados en Europa y otras regiones para radiodifusión terrestre de televisión. El sistema está diseñado para transmitir información digital a flujos binarios desde 4.98 Mbit/s hasta 31.67 Mbit/s. Aunque hay muchas similitudes con el estándard estadounidense ATSC, en la capa de transporte y en la codificación de canal, hay diferencias muy importantes en el tipo de modulación empleada. En tanto que el sistema ATSC utiliza modulación 8-VSB con portadora única, DVB emplea COFDM[19] por dos razones principales: primero, el sistema COFDM ha demostrado ser más robusto contra los efectos de propagación multicamino, que predominan en todos los sistemas terrestres a frecuencias de VHF y superiores. Segunda, a la posibilidad de que con COFDM es posible implementar redes de radiodifusión de frecuencia única (SFN[20]), de especial interés en Europa, en que el espectro radioeléctrico está prácticamente saturado en las bandas de radiodifusión sonora y televisión. La implementación de redes de frecuencia única, se viene ya utilizando en la radiodifusión sonora digital (radio digital).

En una red de frecuencia única, todos los transmisores que emiten un programa particular, lo hacen en la misma frecuencia y cada uno se sincroniza exactamente a la misma señal de referencia mediante una señal común de sincronismo en bada base, de modo que un receptor sintonizado a esa frecuencia puede recibir señales simultáneas de una o más estaciones, cada una con un retardo diferente. En condiciones de propagación multicamino, la intensidad de la señal de cada estación transmisora puede variar con el tiempo. Los intervalos de guarda y el sistema de señalización inherentes al esquema de modulación COFDM facilitan la correcta recepción en tales condiciones.

De manera similar al sistema ATSC, la parte del transmisor que más se ve afectada por la transición de analógico a digital es el excitador, en el que los cambios más importantes son el procesado en banda base y la modulación.

En común con el sistema ATSC, la señal digital de entrada al sistema de transmisión DVB-T es un flujo binario síncrono de transporte que incluye paquetes de datos de 187 bytes más un byte de sincronismo. La carga útil de cada paquete puede ser, bien de vídeo digital codificado en MPEG-2, audio digital MPEG o datos de otra índole. El flujo de transporte, en paralelo, se aplica a la entrada del modulador, mediante un conector hembra, tipo DB25. La línea que conduce la señal de reloj va separada de las líneas de datos. La señal de salida del modulador es una señal modulada del tipo COFDM[21], usualmente generada a alguna frecuencia intermedia, inferior a la frecuencia de la portadora del canal de RF. Tanto la frecuencia intermedia empleada, como el nivel de la señal y otras características, suelen ser elegidas por los diversos fabricantes de equipos y no están estandarizadas.

De manera similar, en el modulador ATSC, el modulador DVB puede considerarse dividido en dos partes: una destinada a la codificación de canal y otra a la modulación propiamente dicha. En el codificador de canal se realiza la dispersión de energía, mediante la aleatorización de los datos, la codificación externa R-S y el intercalado externo, la codificación convolucional o trellis, interna y el

[19] Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex (Multiplexado Ortogonal por División de Frecuencia Codificado)
[20] Single Frequency Networks
[21] La modulación COFDM se trata con más amplitud en el Capítulo 4.

intercalado interno. Las funciones del modulador incluyen el mapeo, adaptación de cuadro e inserción de piloto. De manera similar al sistema estadounidense, la aleatorización no se aplica al byte de sincronismo. Los datos de entrada al sistema de transporte se aleatorizan o dispersan primero y un desaleatorizador en el receptor recupera la secuencia original de datos.

La siguiente etapa en DVB es la codificación exterior de bloque o R-S (Reed-Solomon). El código de bloque usado en el sistema DVB-T difiere del usado en el sistema ATSC, en que el código es capaz de corregir solamente ocho errores en bytes, o errores de símbolo por bloque de datos, a diferencia del ATSC que puede corregir diez errores. En este código se agregan 16 bits de paridad al bloque de datos de 188 bytes. Los datos codificados en bloque (R-S) se intercalan luego para proporcionar capacidad adicional de corrección de errores dispersando los errores en ráfaga. Un procedimiento simple para intercalar la información es intercambiar filas por columnas en la matriz de datos del codificador y realizar la operación inversa en el decodificador.

Al intercalado externo de los datos sigue la codificación interna, convolucional o trellis. El sistema DVB permite un rango de códigos convolucionales picados o puntuados[22] y la selección de la relación de código[23] se basa en el nivel de corrección de errores para un servicio determinado y un flujo binario dado. De un código madre de relación ½, se derivan códigos puntuados de relaciones 2/3, ¾, 5/6 o 7/8. La salida del codificador convolucional se intercala nuevamente, tanto a nivel de bit como de símbolo, con el propósito de "mapear" los bits sobre las portadoras COFDM activas, ya que algunas de éstas se usan para transmitir información de referencia con fines de señalización y ajuste, es decir, para seleccionar los parámetros relativos al modo de transmisión. El número de portadoras disponibles para datos es de 1075 en el modo 2K (2048 portadoras) y de 6187 en el modo 8K (8192 portadoras). La tasa o flujo binario de datos depende del tipo de modulación utilizado para mapear los datos sobre cada portadora. En el Capítulo 4 se describe más ampliamente el esquema de modulación en DVB.

1.14 Objetivos de funcionamiento en transmisión digital

La estimación objetiva de la calidad de señal, es decir, mediante mediciones, es uno de los aspectos en que los sistemas digitales difieren bastante de los analógicos. Con señales analógicas es relativamente fácil medir la potencia máxima transmitida o recibida en el pico del pulso de sincronismo. La potencia promedio o efectiva varía según el contenido de la imagen hasta unos 2 dB por debajo del valor pico. Las distorsiones principales están caracterizadas por la ganancia y fase diferenciales, no linealidad de luminancia y modulación incidental de fase y pueden evaluarse en términos de la respuesta en frecuencia y del retardo de grupo.

En los sistemas digitales, algunos de los parámetros necesarios para determinar la calidad son algo más difíciles de detectar y describir. Entre otras cosas, en la señal digital no se tienen pulsos de sincronismo a intervalos regulares como en la señal analógica, con lo que la medición de la potencia de pico se torna más difícil. Las portadoras de vídeo, color y audio no existen y todas las señales están multiplexadas en un flujo común de datos. Debido a la naturaleza cuasialeatoria de la señal digital en banda base, la potencia promedio en la banda de transmisión es constante, en tanto que la potencia pico puede variar considerablemente más que en los sistemas analógicos. Las mediciones de interés en el caso digital incluyen

- Potencia promedio.

---

[22] Punctured

[23] Se define como *relación de código* a la relación entre el número de bits de entrada al codificador y el número de bits de salida de éste.

- Relación potencia pico a potencia promedio.
- Relación portadora a ruido (C/N)[24].
- Relación entre la energía promedio por bit y densidad espectral de ruido (E_B/N_0).
- Tasa de error de bits (BER).
- Tasas de error de símbolo y segmento (SER).
- Magnitud de error vectorial (EVM).
- Abertura del patrón de ojos.
- Interferencia entre símbolos (ISI).
- Conversión AM-AM.
- Conversión AM-PM.
- Crecimiento espectral.

La caracterización de la distorsión no lineal en términos de la respuesta en frecuencia y del retardo de grupo es común a los sistemas analógicos y digitales.

1.14 Objetivos para planificación

Tanto en el sistema ATSC (DTV) como en el DVB-T se han definido parámetros a tener en cuenta para la planificación de los sistemas de transmisión de televisión digital, desde el punto de vista de recepción. Estos parámetros son los valores mínimos que deben cumplirse para un servicio de calidad aceptable y se resumen en las tablas I y II.

Aunque los valores de los parámetros son similares en los dos sistemas, hay algunas diferencias importantes. El ancho de banda del canal en el sistema ATSC es de 6 MHz, en tanto que en DVB-T, el ancho de banda es de 7 MHz en VHF y de 8 MHz en UHF. Además, los diferentes sistemas de modulación, 8VSB para ATSC y COFDM para DVB-T e ISDB-T dan lugar a diferencias en la relación C/N mínima requerida.

Tabla I. Factores de planificación y potencias de umbral para el sistema ATSC según la banda de frecuencias.

Parte del sistema	VHF Banda I	VHF Banda III	UHF
Ganancia de antena receptora (dB)	4	6	10
Atenuación en la línea (dB)	1	2	4
Figura de ruido NF (dB)	10	10	7
C/N mínima (dB)	15.2	15.2	15.2

[24] En la literatura es frecuente no hacer distinción entre el significado de C/N (portadora/ruido) y S/N (señal/ruido). Aquí se sigue la convención de que C/N se refiere a la relación entre la potencia de señal y la de ruido *antes de la detección* y S/N a esa relación *después de la detección*.

Potencia mínima en la antena (dBm)	-84	-85	-90
Potencia mínima a la entrada del receptor (dBm)	-81	-81	-84

Tabla II. Factores de planificación y potencias mínimas para el sistema DVB-T según la banda de frecuencias.

Parte del sistema	VHF I	VHF III	UHF IV	UHF V
Ganancia de antena receptora (dB)	3	7	10	12
Atenuación en la línea (dB)	1	2	3	5
Figura de ruido NF (dB)	5	5	5	5
C/N mínima (dB)	13.9	13.9	13.9	13.9
Potencia mínima en la antena (dBm)	-88.3	-91.3	-93.3	-93.3
Potencia mínima a la entrada del receptor (dBm)	-96.3	-86.3	-86.3	-86.3

Ruido

Aunque la práctica común es realizar los cálculos con los parámetros de las tablas anteriores, dichos cálculos están basados en la potencia mínima requerida, limitada por el umbral de ruido en el receptor y asumiendo, además, que se trata de ruido blanco. Para obtener el ruido total del sistema deben incluirse los efectos de las temperaturas equivalentes de ruido de la antena y de la línea de transmisión.
La relación entre la temperatura de ruido y el factor de ruido, *F*, está dada por:

$$T_{equiv} = T_0 (F - 1) \tag{1.1}$$

y la figura de ruido, *NF*, es la expresión logarítmica en dB del factor de ruido, es decir,

$$NF = 10 \log (F) \tag{1.2}$$

Ruido externo. En las bandas de frecuencia empleadas en televisión, el ruido externo es producido principalmente por la actividad humana y es considerablemente mayor en los entornos urbanos que en los suburbanos, como se aprecia de la figura 1.20 y suele designarse como *ruido artificial*.

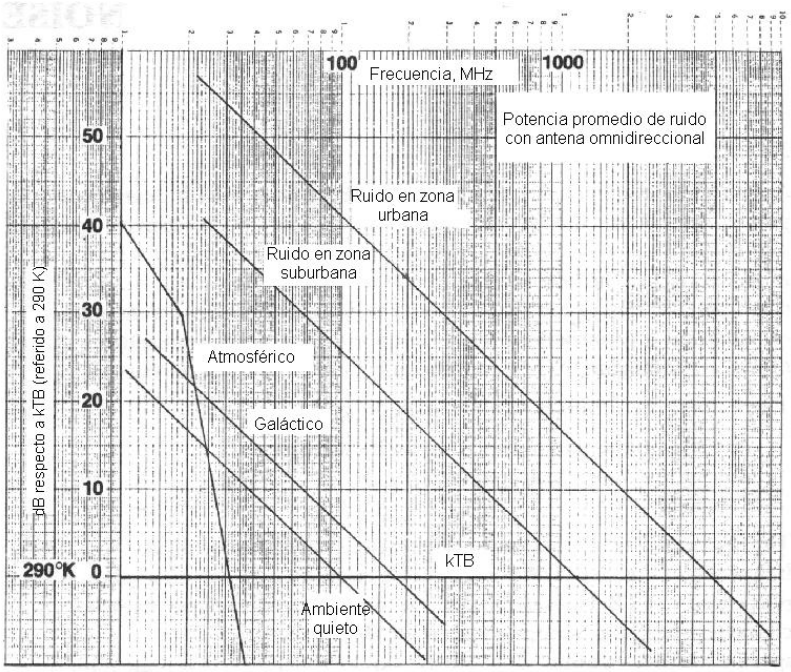

Fig. 1.20. Ruido artificial.

Este ruido externo o artificial es captado por la antena y contribuye al ruido total de ésta. En entornos en que el ruido externo no es significativo y, si el lóbulo principal de la antena receptora abarca parte de la superficie terrestre, la temperatura de ruido de la antena puede considerarse como la temperatura ambiente de 290K.

Temperatura de ruido de la línea de transmisión y del receptor. Conocida la atenuación de la línea de transmisión, la figura de ruido es igual a la atenuación en dB. De la figura de ruido se obtiene el factor de ruido y, mediante (1.1), la correspondiente temperatura equivalente de ruido. De igual manera se procede para calcular la temperatura equivalente de ruido del receptor, conocida su figura de ruido.

Temperatura de ruido del sistema. La temperatura equivalente de ruido del sistema antena-línea-receptor se calcula como la suma de las temperaturas de ruido anteriores:

$$T_S = T_A + T_L + T_R \tag{1.3}$$

y, la potencia de ruido referida a la entrada del receptor se puede calcular como

$$N_0(dBW) = -228.6 + 10\log(B) + 10\log(T_S) \ \text{dBW} \tag{1.4}$$

donde B es el ancho de banda en Hz.

En la práctica, la atenuación de la línea varía dependiendo del tipo de línea, la instalación del receptor, su longitud y la frecuencia. La figura de ruido del receptor varía dependiendo del fabricante, tolerancia en la producción y la frecuencia.

Los parámetros de las tablas I y II, por los valores que asumen para la ganancia de la antena receptora, presuponen que se trata de antenas exteriores. Si se trata de antenas interiores, el valor de

planificación para la potencia mínima de entrada al receptor debe aumentarse por un valor igual a la diferencia entre la ganancia de la antena interior y la dada en las tablas. Las variaciones en la ganancia de las antenas receptoras suele ser considerable, dependiendo del fabricante, las tolerancias de fabricación y la frecuencia. Los valores de las tablas en este sentido, aunque pueden considerarse conservadores, reflejan valores adecuados para fines de planificación. Como consecuencia de lo anterior, los valores de potencia mínima necesaria a la entrada del receptor, deben entenderse como una estimación, cuyo valor en la realidad, depende de numerosas variables no fácilmente cuantificables.

1.15 Errores en la transmisión

En transmisión digital pueden utilizarse tres métodos diferentes para cuantificar los errores de transmisión: tasa de errores de segmentos, de símbolos o de bits. La tasa de error, en cada caso, se define como la probabilidad de que ocurra un error, bien sea en un segmento, símbolo o bit, antes de la corrección de errores e intuitivamente puede expresarse como el número de elementos erróneos en un mensaje, entre el número total de elementos del mensaje. Con una señal fuerte en un medio sin perturbaciones, la tasa de errores es insignificante. Sin embargo, en presencia de ruido y efectos multicamino, la relación señal a ruido disminuye y la tasa de errores aumenta, por lo que ésta suele representarse gráficamente como función de C/N o S/N. El parámetro más utilizado suele ser la tasa de errores en bits y su relación con C/N, en dB, está dada por:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} + 10\log\left(\frac{B}{R_b}\right) \tag{1.5}$$

Donde E_b es la energía por bit, N_0 la densidad espectral de ruido en watt/Hz, B el ancho de banda en Hz y R_b la tasa binaria en bits/s.

Otro factor que influye en la tasa de errores es debido a los errores de cuantificación causados por la reconstrucción incorrecta de la señal digital. Estos errores son, principalmente, función de la precisión de las conversiones analógica/digital y digital/analógica y están directamente relacionadas con el número de bits utilizados en la cuantificación. La tasa de error de bits puede definirse también en términos de la probabilidad de error (POE) como:

$$POE = \frac{1}{2} erfc \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \tag{1.6}$$

donde *erfc* es la función complementaria de error[25]

La función de error es diferente para los diferentes métodos de modulación. Lo que es importante aquí, es que la probabilidad de error es proporcional a E_b/N_0, que es una forma alternativa de expresar de la relación señal a ruido. La energía de bit puede calcularse dividiendo la potencia de la portadora por la tasa binaria y, como medida de energía, las unidades de E_b son joules, en tanto que N_0, la densidad espectral de potencia tiene unidades de watt (joules×seg)/Hz (seg^{-1}), de modo que la relación E_b/N_0 es adimensional.

Para reducir la tasa de errores es necesario aumentar la energía por bit transmitido, lo que equivale a aumentar la relación C/N. Una forma de reducir la densidad espectral de ruido es reducir el ancho de

[25] Véase por ejemplo, Taub, H. and Schilling, D.H. *Principles of Communication Systems*. McGraw-Hill, 1971

banda, con la consiguiente reducción de capacidad, o bien aumentar la energía por bit aumentando la potencia de transmisión, lo que conlleva, por una parte, el aumento del costo y, por otra, el riesgo de interferir a otros sistemas de comunicaciones. Una forma de reducir la tasa de errores sin aumentar necesariamente la energía por bit, es la de emplear codificación de canal, como se puede apreciar en la figura 1.21.

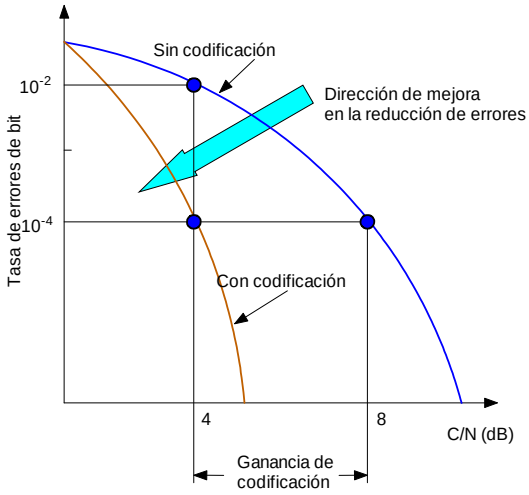

Fig. 1.21. Mejora de la tasa de error con codificación de canal.

La recepción satisfactoria puede definirse en términos del valor de la relación C/N en el *umbral de visibilidad* (TOV[26]) que, para el sistema ATSC se establece en un valor de 15.2 dB. Para el sistema DVB-T el umbral teórico de C/N para transmisión no jerárquica sobre un canal gaussiano varía entre 3.1 y 29.6 dB[27], dependiendo del esquema de codificación empleado y del intervalo de guarda. Asumiendo una tasa de código interno de 7/8, intervalo de guarda de 1/8 y modulación 16QAM, se establece como necesario un valor de 13.9 dB para conseguir una BER de 2×10^{-4} antes de la decodificación de bloque (R-S). En el sistema japonés, ISDB-T, el valor teórico de C/N para conseguir esa misma BER, se fija en 16.2 dB, lo que hace a este sistema algo más robusto que el DVB-T en igualdad de condiciones.

Los valores anteriores son de referencia para propósitos de planificación y están basados en los parámetros de las tablas I y II. En éstas, hay que notar que en el caso de DVB-T, la figura de ruido del receptor puede considerarse optimista, en el sentido de que es muy baja y es muy posible que, en la realidad, los receptores comerciales tengan figuras de ruido superiores, hasta del orden de 5 dB.

1.16 Magnitud del error vectorial

En la modulación en cuadratura de fase, como es el caso de las modulaciones digitales en televisión, la señal modulada tiene dos componentes: I (en fase) y Q (en cuadratura) y puede representarse mediante un vector en una constelación dada, por ejemplo QPSK, como se ilustra en la figura 1.22.

[26] Threshold of visibility.
[27] *ETS 300 744*, March 1996.

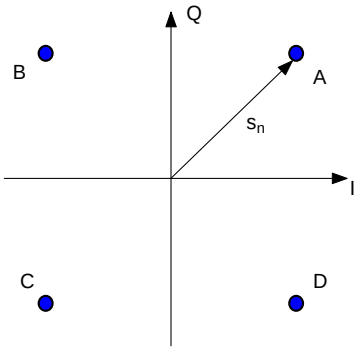

Fig. 1.22. Constelación ideal

En el caso ideal, sin ruido, interferencia u otros efectos adversos, cada punto A, B, C, D de la constelación ocupa un lugar preciso, definido por un vector s_n. En condiciones reales, los efectos adversos actúan de manera que los puntos de la consteleación "bailotean" alrededor de su posición ideal, ocupando ahora las zonas A, B, C y D que se ilustran en la figura 1.23. Estas zonas en general son irregulares y desiguales y, si los efectos adversos son considerables, llegan a solaparse, de modo que en esta situación el receptor no puede determinar a que punto de la constelación ideal corresponde el vector de la señal recibida, s_r. En la figura 1.23 se asume que las zonas no se solapan y que el vector de error es cuantificable como se muestra en la figura 1.24.

.

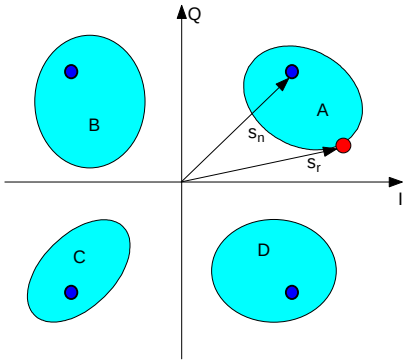

Fig. 1.23. Constelación no ideal.

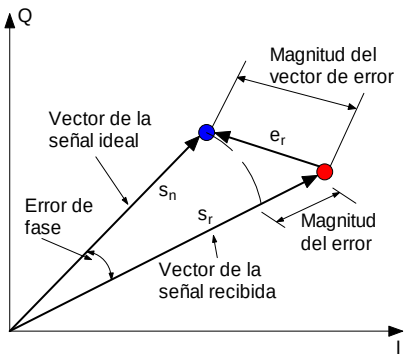

Fig. 1.24. Error vectorial

El error vectorial instantáneo se obtiene restando el vector de la señal ideal de referencia, s_n, del vector de la señal real recibida, s_r.

$$\overrightarrow{e_r} = \overrightarrow{s_r} - \overrightarrow{s_n} \tag{1.7}$$

y el valor raíz cuadrático medio de la magnitud del error vectorial (EVM se define como:

$$EVM = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{r=1}^{N}\left|\overrightarrow{e_i}\right|^2} \tag{1.8}$$

El error vectorial constituye una forma de ruido, de modo que guarda una relación directa con la relación C/N. Cuanto más aumente la magnitud del error vectorial, más se reducirá la relación C/N y, por consecuencia, más aumentará la tasa de errores. La magnitud del EVM suele expresarse en porcentaje, multiplicando (1.8) por 100.

En general, puede considerarse que la magnitud del error vectorial proporciona la mejor medida objetiva de la calidad de la señal, ya que implícitamente, tiene en cuenta todos los efectos que contribuyen al deterioro de la señal causando principalmente interferencia entre símbolos.

Relación de error de modulación (MER[28]). Esta relación constituye una forma alternativa de expresar la magnitud del error vectorial y es la relación entre la potencia de la señal y la potencia de los errores vectoriales.

Diagrama de ojos. El diagrama de ojos ofrece un método conveniente de verificar visualmente, de forma cualitativa la interferencia entre símbolos y la relación C/N de los sistemas de transmisión digital. La señal se muestra en un osciloscopio sincronizado al período de los símbolos, con lo que en la pantalla se produce una señal compuesta por todas las formas de onda que tiene la forma de un ojo. El grado de abertura del ojo es una medida de la interferencia entre símbolos y, por consecuencia, de la calidad de la señal. La abertura del ojo debe ser máxima en los puntos de muestreo.

Bibliografía

1. *Engineering Handbook*, 8th Ed. National Association of Broadcasters. Washington, D.C., 1992.
2. Blair Benson, K. *Television Engineering Handbook*. McGraw-Hill Book Co. 1986.
3. G.W. Collins: *Fundamentals of Digital Television Transmission*. John Wiley & Sons, Inc. 2001.
4. Blair, R. *Digital Techniques in Broadcasting Transmission*. Focal Press, 1999.
5. Lathi, B.P. *Modern Digital and Analog Communication Systems*. 3rd Ed. Oxford University Press, New York, 1998.
6. Whitaker, J. C. *The RF Transmission Systems Handbook*. CRC Press. 2002.

[28] Modulation Error Ratio