

Televisión Digital

al alcance de Todos



Luis Loyola obtuvo su grado de ingeniero eléctrico de la Universidad de Chile, y más tarde su grado de maestro en ciencias y doctorado en Sistemas de Información y Telecomunicaciones en la Universidad de Electro-comunicaciones en Tokio, Japón. Desde entonces ha trabajado en Asia y Europa en diversos proyectos de investigación y desarrollo sobre nuevas tecnologías de enruteamiento en Internet, sistemas inalámbricos, transmisión de video digital, sistemas distribuidos para transcoding de videos, algoritmos de fingerprinting de datos, sistemas de recomendación, entre otros. Actualmente se desempeña como jefe del área de investigación y desarrollo de la empresa SkillupJapan.

El estándar de televisión digital japonés ISDB-T y su variante brasileña SBTVD han sido adoptados en gran parte de Sudamérica. Este texto busca explicar en palabras simples a personas sin formación de ingeniería los conceptos técnicos en que se fundamenta la televisión digital resaltando a la vez sus diferencias con la televisión analógica. En base a los compo-

nentes del sistema ISDB-T el texto abarca también los fundamentos tecnológicos de muchos de los sistemas de telecomunicaciones modernos, especialmente de los inalámbricos. El objetivo principal del texto es ofrecer una visión general y simplificada de las nuevas tecnologías del área de telecomunicaciones que hacen posible la televisión digital.

Televisión Digital al alcance de Todos Luis A. Loyola Arroyo



011 011 011

110 011 100

Una introducción simple al estándar japonés ISDB-T y a las telecomunicaciones modernas

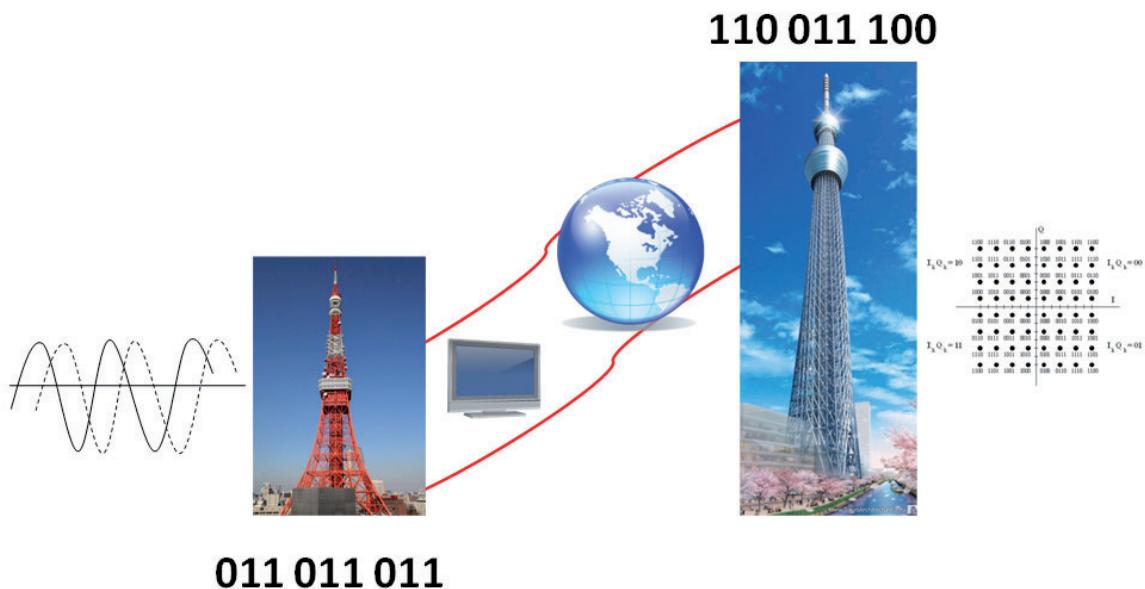
Luis A. Loyola Arroyo

Ph.D., M.Sc. en Sistemas de Información



Televisión Digital Al Alcance de Todos

Una introducción simple al estándar japonés
ISDB-T y a las telecomunicaciones modernas



Luis A. Loyola Arroyo
Ph.D., M.Sc. en Sistemas de Información

© Bubok Publishing S.L., 2011

1^a Edición

ISBN: 978-84-9009-117-3

DL: M-33622-2011

Impreso en España / Printed in Spain

Impreso por Bubok

Dedicado a las víctimas del terremoto y tsunami de marzo de 2011 en Japón y a mi querida nani Juana Jaramillo (Q.E.P.D.)

日本はもう一度立ち直れる！世界は応援しています

Índice

Motivación	9
¿A quién está dirigido este texto?	11
1. ¿Quién dijo “bit”?	13
2. Principios de la Transmisión Digital	17
2.1 Qué es la tecnología digital y cuál es su diferencia con la analógica	17
2.1.1 Transmisión de una señal analógica.....	17
2.1.2 Los dos grandes problemas de una transmisión analógica	18
2.1.3 Definición de Ancho de Banda.....	19
2.1.4 Modulación para Transporte a Alta Frecuencia	23
2.1.5 Modulación en banda base de una señal analógica	25
2.1.6 Conversión analógica digital	26
2.1.7 Modulación Digital	28
2.1.8 Cómo la tecnología digital soluciona los problemas de las transmisiones analógicas	31
2.1.9 La tecnología digital a nuestro alrededor	33
2.2 La Televisión Analógica	34
2.3 Qué ventajas tiene la televisión digital por sobre la analógica.....	36
3. Tecnologías de Transmisión y Recepción	39
3.1 Cambios en el uso del espectro radioeléctrico	39
3.2 Flexibilidad en el uso del ancho de banda	40
3.2.1 Subdivisión en segmentos del ancho de banda asignado	40
3.2.2 Códec de video	41
3.3 Transmisión de sonido y datos	44
3.4 Sistema de Modulación	44
3.4.1 OFDM (multiplexación por división de frecuencias ortogonales): modulación basada en el concepto de “Dividir para Reinar”	44
3.4.2 Modulación Digital en ISDB-T: la compensación entre potencia de recepción y la tasa de transmisión de datos	46
3.4.3 Intervalo de guarda en OFDM: haciendo frente al problema de multitrayectorias debidas a reflexiones	50
3.4.4 ¿Qué tiene que ver OFDM con un tren de carga?.....	54
3.5 Sistema de corrección de errores	56
3.6 Interleaving	58
3.6.1 Interleaving en el tiempo	59

3.6.2 Interleaving en la frecuencia	60
3.7 Diagrama en bloque del transmisor	61
3.8 Distribución de Frecuencias.....	62
3.8.1 Red de una sola Frecuencia (SFN)	62
3.8.2 Red de Frecuencias Múltiples.....	63
4. Codificación de Audio y Video	65
4.1 Codificación de video	65
4.1.1 Formatos de Transmisión en ISDB-T y Transporte de Datos	67
4.1.2 H.264/MPEG4 AVC	68
4.1.3 Codificacion de audio	68
4.1.4 Canal de datos vía Internet hacia la estación televisiva	70
5. Sistema OneSeg	73
6. Sistema de recepción	77
6.1 Relación entre la potencia de recepción y la tasa de transferencia de datos	77
6.2 El canal inalámbrico	79
6.3 Recepción de los datos	
6.3.1 Broadcast Markup Language	80
6.3.2 Ginga	83
6.3.3 Guía de Programación Electrónica (EPG por su sigla en inglés)	83
6.4 DRM y protección de los contenidos	85
6.5 Diagrama de bloques del receptor	86
6.6 Sistema de Selección de Canales	88
6.7 Sistema de Alarma y Prevención de Desastres Naturales	89
6.8 Actualización del Firmware	91
6.9 Instalacion de equipos y antenas	91
6.10 Tecnología de Pantallas	92
7. Comparación de ISDB-T con los estándares americano y europeo	95
8. La televisión del futuro.....	97
8.1 Televisión tridimensional	97
8.2 La influencia de Internet y el Video on Demand	98
8.3 La digitalización y la interconectividad carecen de límites	100
Bibliografía	105

Motivación

La elección de la norma japonesa (modificada por Brasil) de televisión digital por parte de países como Argentina, Brasil, Bolivia, Chile, Costa Rica, Ecuador, Paraguay, Perú y Venezuela abre enormes oportunidades para la creación de nuevos negocios internacionales así como para la colaboración tecnológica triangular entre Japón, Brasil y el resto de los países sudamericanos. Las técnicas de compresión de video modernas así como las nuevas y variadas tecnologías de transmisión de video en formato digital ya sea mediante radiodifusión, satélite, televisión por cable o Internet están revolucionando el mercado de distribución de contenidos audiovisuales a un paso vertiginoso dejando atrás décadas de televisión analógica. El entendimiento básico de las tecnologías que se utilizan tanto en la televisión digital como en sus aplicaciones ofrece un conocimiento que abarca mucho más allá de un sistema de televisión en particular. De hecho, entrega los fundamentos de gran parte de los sistemas de telecomunicaciones modernos, incluídos la telefonía móvil, las comunicaciones satelitales, las comunicaciones por fibra óptica, Internet, etc. Es justamente por esta razón que el conocimiento básico de estas tecnologías no debería estar restringido a unos pocos círculos técnicos o académicos sino que idealmente ser manejado, al menos en un nivel básico, por toda persona que tenga interés en el tema. Ésta es la principal motivación del presente texto: difundir los principios básicos de la televisión digital entre las personas interesadas en el tema que no poseen conocimientos técnicos especializados.

Uno de los cambios más significativos que nos trae la televisión digital con respecto a su antecesora analógica es la posibilidad de recibir la señal televisiva en dispositivos móviles como teléfonos celulares o consolas de juego portátiles. Por esta razón se ha dedicado una parte del texto a la revisión de la tecnología OneSeg, parte integral del estándar japonés ISDB-T que hace esto posible. La norma japonesa ofrece además una tecnología llamada Red de Frecuencia Única (Single Frequency Network o SFN) que permite un uso mucho más eficiente del espectro radioeléctrico por parte de la red de estaciones de transmisión de origen y sus estaciones repetidoras. El estándar ofrece además un canal de datos especial para la difusión de mensajes de emergencia a teléfonos móviles cuya misión principal es informar a la población ante la eventualidad de catástrofes naturales como terremotos o tsunamis. Esta herramienta puede ayudar a salvar muchas vidas en la eventualidad de una catástrofe natural como los grandes terremotos ocurridos el 27 de febrero de 2010 en Chile y el 11 de marzo de 2011 en el mismo Japón. Todas estas tecnologías se encuentran en uso desde el año 2006 en Japón y han sido con certeza un factor relevante detrás de la elección de la norma japonesa por sobre la estadounidense y la europea en buena parte de los países sudamericanos. Luego del gran terremoto de marzo de 2011 en el noreste de Japón, el sistema de alarma avisaba con una antelación superior a los 10 segundos sobre

las réplicas a los residentes de Tokio y otras grandes ciudades lo que daba tiempo suficiente para refugiarse en un lugar seguro.

El estándar japonés de televisión modificado por Brasil brinda una enorme flexibilidad en el uso del canal de 6 MHz a cada estación televisora para poder ofrecer su programación ya que permite, entre otras opciones, transmitir simultáneamente seis programas en definición estándar (de una calidad similar a la televisión analógica) o dos programas en súper alta definición (Full HD). Personalmente, una opción que siempre me ha parecido interesante es el que con esta nueva tecnología las cadenas televisivas puedan rentar o ceder parte de su banda a otro canal diferente, por ejemplo a un canal de educación a distancia de una universidad o un canal de educación público. En Japón entiendo que existen muchas restricciones para poder llevar esto a la práctica y desconozco las trabas legales que puedan existir en los países latinoamericanos pero sería razonable que los ministerios de telecomunicaciones latinoamericanos comenzaran a analizar esta idea y propusieran soluciones que apunten en esta dirección para darle espacio especialmente a canales educativos o informativos.

Habiendo vivido durante varios años en Tokio, quisiera además aprovechar la oportunidad para expresar mis condolencias a todo el pueblo de Japón por la enorme tragedia humana que produjo el terremoto y posterior tsunami ocurrido en Tohoku el 11 de marzo de 2011. Japón es un pueblo muy fuerte que se ha levantado muchas veces en el pasado y no me cabe ninguna duda de que lo hará nuevamente. Junto con ello deseo expresar mi deseo de que el estándar de televisión digital ISDB-T ayude a estrechar los vínculos entre Japón y los países latinoamericanos. Espero que este texto contribuya con un grano de arena en ese sentido.

Quisiera por último expresar mis agradecimientos a mi compañía SkillupJapan por su constante apoyo profesional. Así mismo quisiera agradecer profundamente a los profesores Luciano Ahumada y Roberto Konow de la Universidad Diego Portales de Chile, así como al ingeniero Luis Barraza de Skillup Chile por sus valiosos comentarios para mejorar el contenido de este texto.

Luis Loyola Arroyo

¿A quién está dirigido este texto?

A fines de febrero de 2010 tuve la oportunidad de participar en un curso que se impartió en Tokio a ingenieros latinoamericanos sobre las bases del sistema digital japonés (modificado por Brasil) que se acababa de adoptar oficialmente en nuestros países. En aquella ocasión me dí cuenta sobre la escasa información que existía en Castellano sobre el estándar japonés de televisión digital a pesar de que gran parte de los países que lo han adaptado fuera de Japón son de habla hispana. Fue entonces cuando me dispuse a escribir un pequeño texto que sirviera al menos de referencia en nuestro idioma.

Este texto ha sido elaborado para servir como guía básica del sistema de televisión digital japonés ISDB-T, su modificación brasileña y los conceptos de telecomunicaciones en los que ambos estándares se fundamentan. En ningún caso persigue el objetivo de transformarse en un manual técnico preciso y detallado sobre los complejos sistemas y tecnologías que se usan en ISDB-T. El objetivo principal es que cualquier persona sin formación de ingeniero sea capaz de entender qué es lo nuevo que trae la televisión digital en comparación con su antecesora analógica y en qué forma cambiará en el futuro la forma en que vemos e interactuamos con ella. Al mismo tiempo se busca informar respecto a conceptos básicos de sistemas de telecomunicaciones utilizando como motivación los mismos módulos y componentes que se utilizan ISDB-T.

Dicho lo anterior quisiera hacer otra aclaración importante. **Los primeros cuatro capítulos del libro se hacen bastante densos para una persona que no tiene mayor interés en temas técnicos o científicos** tales como las bases de los sistemas de modulación, técnicas de corrección de errores, tecnologías de antenas, conceptos básicos de radiopropagación así como la base para la codificación de audio y video. **Si el interés del lector es informarse sólo sobre los conceptos generales del sistema japonés de televisión digital ISDB-T y sus principales diferencias con la televisión analógica le invito gentilmente a comenzar desde el capítulo 5 dedicado al sistema OneSeg para la transmisión a dispositivos móviles, o bien directamente desde el capítulo 6 sobre los conceptos básicos del sistema de recepción.** Si dentro de los últimos capítulos no encuentra la información que busca, le invito a revisar el índice para ver si puede encontrarla dentro de los primeros cuatro capítulos. Por otro lado, si el lector sí posee interés en aprender sobre conceptos básicos de transmisión digital, propagación de señales en canales inalámbricos, modulación analógica y digital, corrección de errores y otros temas fundamentales de sistemas de telecomunicaciones le invito a comenzar desde el principio. Si ya entiende qué son los bits y qué se entiende por *digital* lo invito gentilmente a saltarse el primer capítulo.

Aunque he tratado de dar suficientes ejemplos que faciliten el entendimiento de los temas que se abordan en los primeros cuatro capítulos, su lectura debiera hacerse mucho menos densa para alguien con conocimientos matemáticos básicos como funciones trigonométricas y logarítmicas. Pero si no conoce estos conceptos, no se desanime porque no forman una parte medular de las explicaciones.

1. ¿Quién dijo “bit”?

Antes de abordar el tema de las transmisiones digitales y de la televisión digital hace falta aclarar qué se entiende por “digital”. A comienzos del siglo XXI vivimos rodeados por todo tipo de sistemas electrónicos que abarcan desde computadoras, consolas de juegos o Tablet PCs hasta teléfonos inteligentes como los iPhone, Blackberries, o Androids. Todos estos dispositivos operan en base a programas computacionales que dictan o controlan su comportamiento y también el de sus aplicaciones. Con casi toda certeza quien se encuentre leyendo este texto ha oído en muchas ocasiones la palabra “bit” y muy probablemente lo asocia de una u otra forma al concepto de “digital”.

El término “digital” está íntimamente relacionado con un número finito de estados discretos tal como, por ejemplo, el piso del edificio en que nos encontramos. Nadie se refiere al piso 9,4 de un edificio cuando se encuentra entre dos pisos sino al piso 9 o al 10 ni tampoco un edificio posee un número infinito de pisos. ¿Qué tiene que ver el número de pisos de un edificio con cómo funcionan las computadoras?. La verdad es que no mucho pero nos sirve como objeto de referencia ya que una computadora o un teléfono inteligente también funcionan en base a un número finito de estados discretos que controla la unidad central de procesamiento (CPU por sus siglas en inglés). La CPU es un circuito integrado compuesto por cientos de millones de transistores, elementos que no sólo conforman sino también representan el corazón mismo de la electrónica moderna y de todo lo que llamamos “digital”. No debiera llamar la atención entonces que los transistores funcionen también en base a un número finito de estados. La “digitalización”, desde un punto de vista práctico, comenzó así con el uso de los primeros transistores en la década de 1950.

El Transistor

Un transistor como el que se muestra en la Figura 1-1 es un dispositivo semiconductor utilizado en la amplificación de señales y también como interruptor. Su gran utilidad radica en la posibilidad de aplicar una pequeña corriente en un par de sus terminales para controlar una corriente mucho mayor en otro par de sus entradas. El transistor puede entonces usarse como un interruptor con dos estados posibles: abierto o cerrado, siendo dicho estado controlado por un voltaje o corriente externa aplicado en un par de sus terminales. El par de estados, *abierto* y *cerrado*, puede representarse con una variable a la que llamaremos *bit*, la cual toma dos valores: 0 y 1. ¿Comienza a sonar como algo conocido?. Toda la lógica digital de la electrónica moderna que opera en nuestras computadoras y teléfonos inteligentes funciona en base a “bits” que no son más que valores binarios, generalmente representados con ceros y unos, con los que podemos expresar toda la información o datos que deseemos.

La Figura 1-1 muestra la forma típica de un transistor que se utiliza como componente en circuitos electrónicos. Estos dispositivos usualmente tienen dimensiones de algunos milímetros o incluso centímetros pero obviamente éste no es el caso de los transistores que se incluyen en los microprocesadores. Las dimensiones de estos últimos alcanzan tan solo las decenas de nanómetros, siendo un nanómetro la millonésima parte de un milímetro. Este nivel impresionante de miniaturización tanto de transistores como de otros componentes electrónicos se ha logrado gracias a técnicas muy sofisticadas de empaquetamiento y fabricación de circuitos electrónicos. Entre ellas tenemos la ya antigua Large Scale Integration (LSI), capaz de integrar miles de elementos en un microprocesador, y la más moderna Very Large Scale Integration (VLSI), con la que pueden empaquetarse hoy en día cientos de millones de elementos electrónicos dentro de un solo microprocesador. La dramática reducción de los costos asociados a dichas técnicas de miniaturización e integración ha sido, sin duda, uno de los factores más importantes detrás de la masificación de los microprocesadores y del mundo “digital” en el que vivimos. Ello ha permitido la fabricación de aparatos electrónicos cada vez más poderosos a precios relativamente asequibles para la gran mayoría de la población. Me permito en este punto hacer una pequeña pausa para solicitarle que la próxima vez que vaya a la tienda de PCs o electrónica más cercana busque un conector USB con tecnología inalámbrica WiFi. Con mucha seguridad podrá encontrar un conector de dimensiones pequeñísimas que dirá 802.11n. El proceso de desarrollo y estandarización de esta compleja tecnología inalámbrica contrasta con el pequeño conector que encontramos en la tienda por 20 o 30 dólares. Ése poder de masificación en el mercado es justamente la mayor fuerza impulsora de la “digitalización”.



Figura 1-1. Típica forma de un transistor

En el caso de la televisión digital existen 3 tipos básicos de información digital: video, audio y datos en forma de texto o imágenes. En el extremo receptor el decodificador sólo podrá interpretar qué significa un grupo de bits una vez que haya identificado el tipo de medio al que éstos se encuentran asociados leyendo las *cabeceras* de los *paquetes* de datos recibidos. Los *paquetes* corresponden a pequeños fragmentos de información transmitidos sobre una red de comunicaciones como Internet o, en el caso que atañe a este texto, una red de radiodifusión. La cabecera, por otra parte, corresponde a un campo que se encuentra al principio de cada paquete y que indica qué tipo de información es transportada por éste.

¿Cómo es posible que seamos capaces de expresar toda la información que deseemos con tan solo un par de valores?

Aunque la respuesta a esta pregunta puede complicarse bastante por ahora será suficiente con señalar que cualquier número entero o letra puede expresarse con un valor binario o un número en base dos. La tabla 1-1 muestra una serie de números expresados en sus valores binarios usando cuatro bits de información. Estos cuatro bits de información nos permiten representar un máximo de 2^4 (dos elevado a cuatro) o 16 estados discretos. Pensemos ahora en algo que nos gustaría medir y que puede representarse con dieciseis estados. Retornemos por ejemplo al caso del edificio e imaginemos que tiene dieciseis pisos. Podriamos entonces asociar cada valor binario que se muestra en la Tabla 1-1 a un piso de este edificio y almacenarlo usando 4 bits. Pero qué pasa si ahora queremos representar el siguiente conjunto de dieciseis caracteres: {0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,A,B,C,D,E,F}. En este caso la letra A podría ser representada por el valor 11 en decimal o su equivalente 1011 en binario, la letra B por su valor 12 en decimal o 1100 en binario, la letra C por 13 en decimal o 1101 en binario, etc. Se observa entonces que los mismos 4 bits pueden ser utilizados para representar valores u objetos totalmente diferentes.

¿Qué representa entonces un cierto grupo de bits almacenados dentro de un disco duro o en la memoria de una computadora personal?

Todo depende del tipo de archivo o datos con los que estén asociados ya que el mismo conjunto de bits puede representar una letra como la “A” o la “C” en un archivo de texto, un determinado color en un archivo asociado a una fotografía, un vector de movimiento en un archivo de video, un valor de amplitud o volumen en una señal de audio, etc. Se desprende de todo esto que los bits por sí solos no tienen sentido alguno sino que lo adquieren cuando los asociamos a un determinado tipo de datos o de información. En otras palabras, los bits son sólo números representados en base 2 y, tal como los números que usamos diariamente, carecen de sentido si no se encuentran asociados a algo que estemos midiendo o contando.

Tabla 1-1 Ejemplo de conversion entre valores decimales y binarios

Valor Decimal	Valor binario	Valor decimal	Valor binario
0	0000	8	1000
1	0001	9	1001
2	0010	10	1010
3	0011	11	1011
4	0100	12	1100
5	0101	13	1101
6	0110	14	1110
7	0111	15	1111



Los bits nacieron con los transistores y la electrónica digital en la década de 1950. Cada bit posee sólo un par de valores posibles representados generalmente por 1 y 0. Una agrupación de n bits nos permite representar 2^n estados o valores de información. Un byte se asocia generalmente a un grupo de 8 bits (denominado octeto) que nos permite representar 256 posibles valores.



Los paquetes son los fragmentos básicos de transporte de información en cualquier red de telecomunicaciones, incluida Internet. Un paquete consta en términos generales de una cabecera en la que se especifica el nodo emisor y el destinatario así como el tipo de información que se transporta. En términos generales un paquete en Internet tiene un tamaño máximo de 1500 bytes u octetos.

2. Principios de la Transmisión Digital

La tecnología digital aplicada a sistemas de telecomunicaciones no es nueva sino que ya lleva con nosotros aproximadamente 6 décadas, prácticamente el mismo tiempo que la televisión analógica.

¿Por qué nos tardamos tanto en llegar a tener la televisión digital?

La respuesta a esa pregunta se encuentra en los enormes avances que han experimentado, especialmente durante las últimas tres décadas, los sistemas de transmisión, recepción y corrección de errores así como la codificación de audio y video. Transmitir video de alta definición en formato comprimido y ser capaz de descomprimirlo a tiempo para ser visto sin pérdida de calidad en el extremo receptor no es tarea fácil; al contrario, es una maravilla tecnológica que ha tomado décadas de arduo trabajo de muchas mentes brillantes de la ingeniería. En este capítulo daremos un breve vistazo a las tecnologías básicas que permiten que esto sea posible.

2.1 Qué es la tecnología digital y cuál es su diferencia con la analógica

2.1.1 Transmisión de una señal analógica

Un buen ejemplo de señal analógica es el sonido. Las diferencias de presión que produce una fuente sonora se propagan a través del aire formando ondas de presión que llegan hasta nuestros oídos. Si graficamos la amplitud o volumen de estas ondas como función del tiempo notaremos que tendrán un nivel máximo y un nivel mínimo y que absolutamente todos los valores que están entre un par de valores definidos aparecen en el gráfico también. En una jerga más técnica diríamos que se trata de una “señal continua en el tiempo”, vale decir una señal que no experimenta saltos abruptos en el transcurso del tiempo.

Lo mismo ocurre si graficamos en función del tiempo la luminosidad al interior de una habitación, el nivel de agua de un lago o el largo de nuestro cabello. Todas estas medidas no experimentan saltos abruptos en el tiempo. En realidad, dejando de lado por un momento los principios cuánticos de la física moderna, podemos afirmar que todas las propiedades físicas medibles en la naturaleza pueden considerarse señales continuas en el tiempo.

Una señal electromagnética es también una señal continua. Su importancia en el área de telecomunicaciones radica en que conforma una excelente herramienta para transportar información entre puntos remotos. Digamos, por ejemplo, que queremos

transmitir una conversación telefónica usando una señal electromagnética. Para lograrlo debemos representar los valores de amplitud o volumen de la señal de audio en forma de parámetros físicos de una señal electromagnética como, por ejemplo, la amplitud, la fase o la frecuencia de una señal sinusoidal o cíclica en el tiempo (daremos ejemplos de señales sinusoidales en la sección 2.1.3). A este mapeo de valores físicos de algo que deseamos medir a un conjunto de parámetros de una señal electromagnética se le conoce como “modulación”, concepto que estudiaremos con más detalle en la sección 3.4. Existen muchas técnicas de modulación pero entre las más conocidas podemos mencionar la modulación por amplitud (AM), por frecuencia (FM) y por fase (PM) [R.E.Ziemer, 2001]. Por último, la señal modulada que es transmitida debe ser demodulada y reconvertida a sonido en el extremo receptor.

2.1.2 Los dos grandes problemas de una transmisión analógica

Lo anterior resume cómo se realiza la transmisión analógica de una señal electromagnética de un punto a otro pero no hemos abordado la pregunta de qué problemas presenta la transmisión de señales analógicas. Fundamentalmente son dos: i) su gran susceptibilidad al ruido e interferencia, y ii) su ineficiencia en el uso del *ancho de banda* o *espectro de frecuencia* en el caso de radiocomunicaciones. Veamos con un poco más de detalles en qué consisten estos dos problemas.

Analicemos el primer problema: todo medio de propagación de señales eléctricas está expuesto a *ruido* y a *interferencia*. La primera se origina en señales electromagnéticas producidas por toda clase de aparatos electrónicos, la atmósfera, el sol, etc. La segunda se origina en comunicaciones que utilizan canales físicamente cercanos. Si el nivel de *ruido* es alto en el lado receptor oíríamos un molesto sonido de fondo en caso de que se trate de una comunicación telefónica. Si el nivel de interferencia es alto podríamos, por ejemplo, ser capaces de escuchar otra conversación de un canal contiguo.

El segundo problema tiene relación con lo que se conoce como *entropía*, un concepto definido en *teoría de la información* como “el nivel de incertidumbre asociado a una señal” [J.R.Pierce, 1980]. Entre más aleatoria o impredecible es una señal mayor entropía tiene. En teoría, toda información que no es aleatoria posee un nivel de entropía que nos permite comprimirla. Esto quiere decir que entre menos aleatoria sea una señal se podrá utilizar una menor cantidad de bits para representarla sin perder información.

Pongamos un ejemplo muy simple: supongamos que en la misma conversación telefónica uno de los interlocutores repite tres veces la misma palabra al comienzo de la conversación. Teóricamente no necesitamos enviar esa palabra tres veces sino que bastaría con transmitirla una vez y hacer saber de alguna forma al aparato receptor que se repite dos veces más. ¿Qué beneficio tiene eso?. El beneficio principal es el ahorro de ancho de banda (o de espectro radioeléctrico en el caso que sea una comunicación que se transmite a través del aire). En este caso, por ejemplo, el mismo canal que ha sido liberado durante el tiempo que le toma al locutor repetir dos veces la misma palabra, puede durante ese lapso de tiempo ser utilizado por otra conversación telefónica permitiendo así el compartimiento del canal entre varios usuarios. Esta última técnica, ampliamente utilizada en la operación de sistemas de telecomunicaciones, se denomina “multiplexación” de un canal. El ejemplo expuesto más arriba corresponde a una multiplexación temporal del canal de información.



La multiplexación nos permite transmitir varias comunicaciones separadas a través de un medio o canal compartido. Existen cuatro tipos principales de multiplexación dependiendo del canal físico donde se efectúa, a saber: 1. Multiplexación en el tiempo, 2. Multiplexación en la frecuencia, 3. Multiplexación en el espacio, 4. Multiplexación por códigos ortogonales (CDMA). Éste último tipo de multiplexación se denomina comúnmente CDMA por sus siglas en inglés y es la base de los sistemas 3G o de tercera generación de comunicaciones móviles que utilizamos en la actualidad.

2.1.3 Definición de Ancho de Banda

Cualquier señal continua y periódica en el tiempo que se transmite a través de un medio físico como un cable, fibra óptica o el aire puede ser representada como la suma de señales *sinusoidales*. Una señal sinusoidal es una señal que se repite en el tiempo de forma cíclica y que está caracterizada por una frecuencia, una amplitud y una fase. Ejemplos de señales sinusoidales en el tiempo son la señal de corriente o de voltaje que llega a nuestros hogares a través de la red de distribución eléctrica, la altura a la que se encuentra una persona que gira a una velocidad constante sentada en una rueda de la fortuna, una onda de sonido pura emitida por un instrumento musical a cierta frecuencia específica, etcétera.

La Figura 2-1 y la Figura 2-2 muestran casos muy simples de señales y sus componentes sinusoidales. En el ejemplo de la Figura 2-1 la señal de la parte inferior está representada como la suma de las tres señales sinusoidales que se encuentran sobre ella. La suma de esas componentes sinusoidales nos da como resultado la señal original. Pero, ¿será posible que cualquier señal continua y periódica, cualquiera sea su forma, pueda representarse como la suma de simples componentes sinusoidales con diferentes frecuencias, amplitudes y fases? Aunque parezca increíble ése es justamente el caso. Cualquier señal de estas características, ya sean las ondas sísmicas producidas por un terremoto, las ondas de sonido emitidas en un concierto o las señales inalámbricas que genera una antena de televisión, pueden ser representadas como la simple suma de componentes sinusoidales. Este útil análisis matemático fue derivado por el gran matemático y físico francés Joseph Fourier quién creó esta herramienta mientras estudiaba la propagación del calor. El análisis de Fourier y en particular la transformación de Fourier se han transformado en herramientas matemáticas fundamentales en todas las especialidades de la ingeniería. En el caso de una señal electromagnética cualquiera, su *ancho de banda* queda determinado por el rango de frecuencias donde se encuentran sus componentes más significativas. Por ejemplo, en el caso de la voz humana las componentes de frecuencia más significativas se encuentran entre los 300 y los 3400 Hertz, mientras que en los canales de audio hasta los 15000 Hertz.

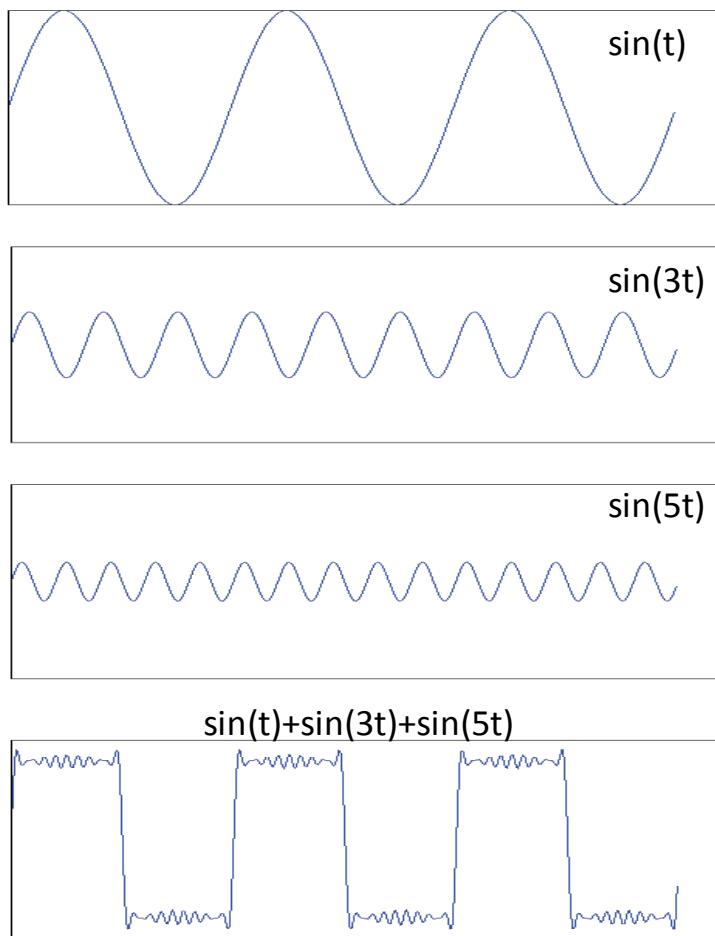


Figura 2-1. Señal continua y sus componentes sinusoidales

La Figura 2-2 nos muestra como lucen representadas en el dominio de la frecuencia diferentes señales continuas, representadas como la suma de componentes sinusoidales. La representación en el dominio de la frecuencia es lo que nos ofrece a simple vista el llamado ancho de banda. Así por ejemplo en la misma Figura 2-2 vemos que la señal compuesta de la parte inferior utiliza un ancho de banda en el dominio de la frecuencia mucho mayor a la simple señal sinusoidal graficada en la parte superior. La razón del mayor ancho de banda de la señal de la parte inferior está asociada a sus mayores componentes de frecuencia en el dominio del tiempo, vale decir, sus variaciones más rápidas en el tiempo.

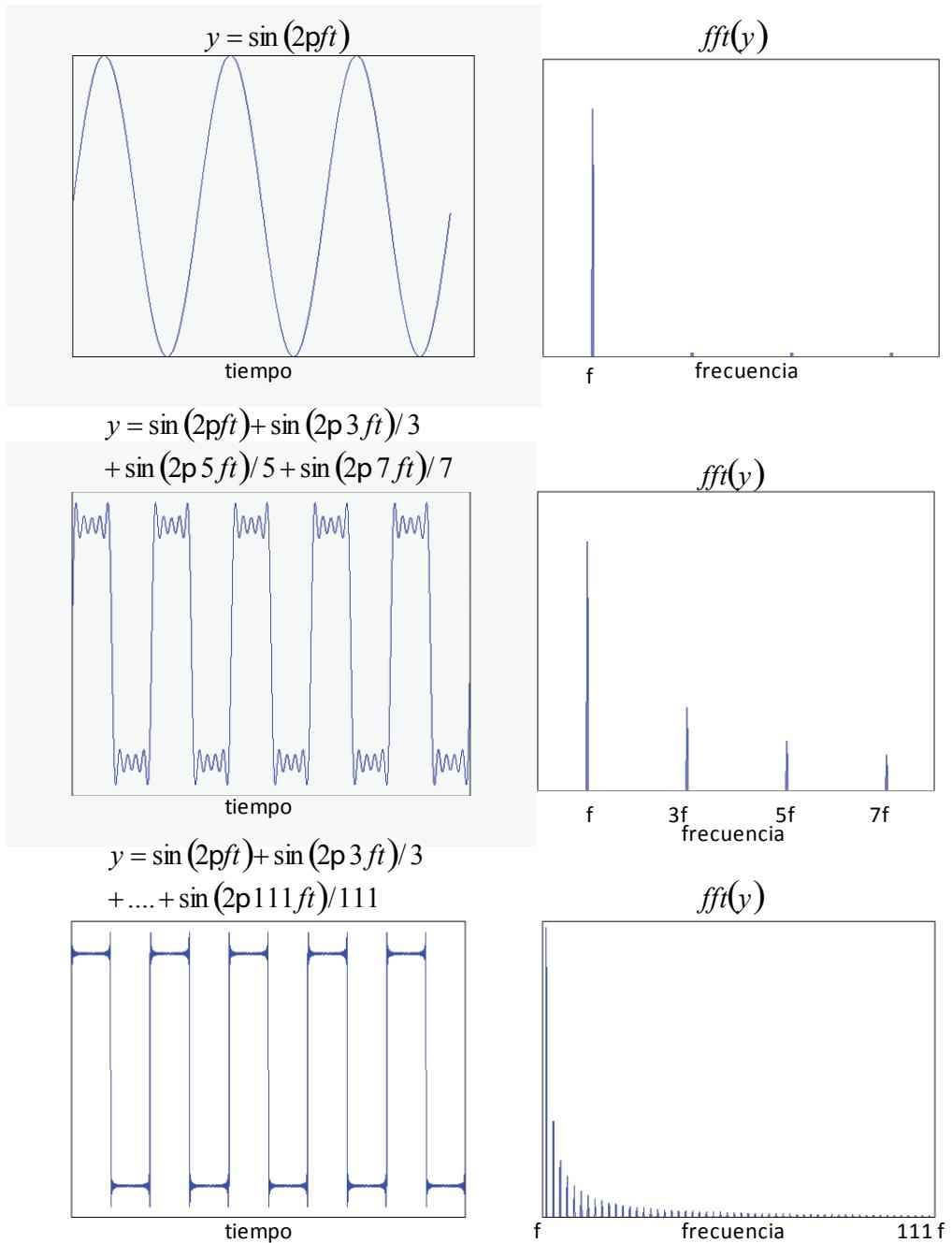


Figura 2-2. Ejemplo de descomposición de una señal cualquiera en sus armónicas de Fourier

El concepto general de modulación se refiere a la modificación de uno o más parámetros de una señal auxiliar (también conocida como portadora o modulada) en función de las variaciones de la señal de información que se desea transmitir (también conocida como moduladora o modulante).

La Figura 2-3 ejemplifica de forma muy simple cuál es el proceso de modulación de una señal. En la parte superior de la Figura 2-3 podemos ver un una señal en el tiempo que transporta datos o información. Su máxima componente de frecuencia es f_1 y su ancho de banda es f_1 . La señal sinusoidal de frecuencia F es modulada por la señal con información. Como resultado, la señal con información es transportada a una frecuencia mucho más alta (en este caso F) antes de ser transmitida tal como lo

muestra el diagrama inferior de la Figura 2-3. El ancho de banda de la señal modulada es $2 f_1$.

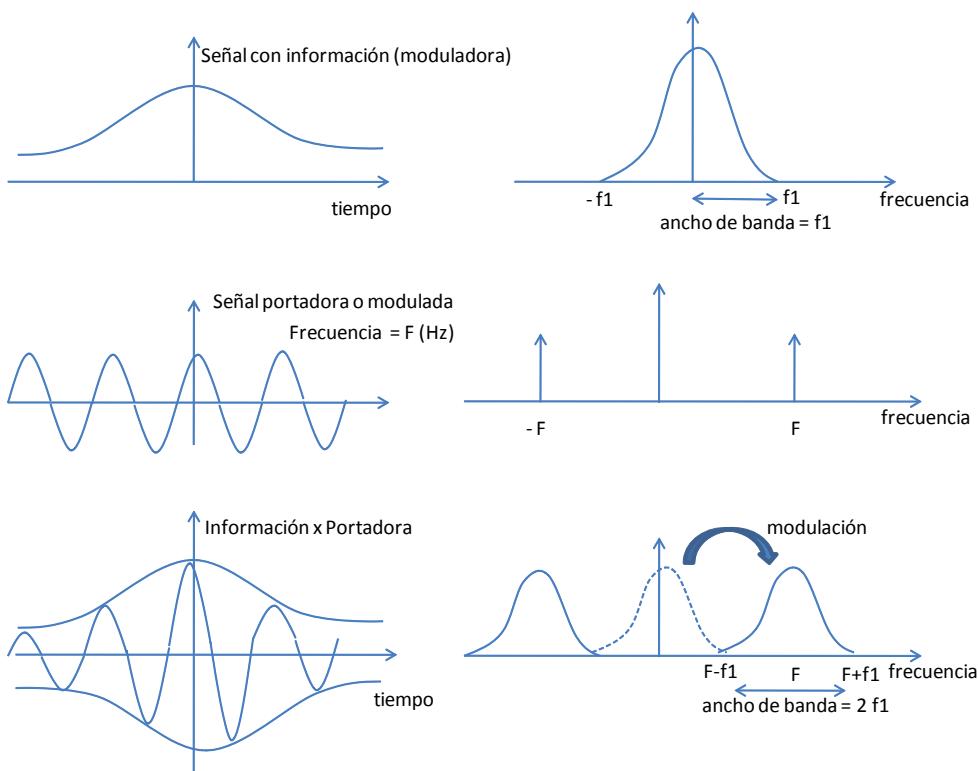


Figura 2-3. Representación en el tiempo y la frecuencia de la modulación analógica de una señal

De lo anterior se desprende que una señal con información posee una representación en el dominio de la frecuencia y que por lo tanto si tenemos diferentes señales con información que deseamos transmitir debemos modularlas con frecuencias diferentes de manera que no se interfieran mutuamente. La asignación y regulación de las frecuencias de modulación y su respectivo ancho de banda a diferentes canales de televisión, estaciones de radio, operadores de telefonía móvil, etc. es una de las tareas principales de un ministerio o subsecretaría de telecomunicaciones en toda nación. Un ejemplo claro de multiplexación de la frecuencias es la televisión analógica o digital terrestre, o las radioemisoras. En estos casos, la señal viaja por el aire (medio inalámbrico) y al cambiar el dial o sintonizador el usuario simplemente cambia la señal portadora (de frecuencia F en el ejemplo anterior) a ser demodulada.

Vale la pena destacar que una señal que no experimenta variaciones rápidas en el tiempo tiene componentes bajas de frecuencias y ocupa por lo tanto un escaso ancho de banda. Por el contrario, una señal que experimenta rápidas variaciones en el tiempo tiene componentes altas de frecuencia y ocupa un gran ancho de banda. En el caso de una señal digital, una tasa de transmisión de datos baja como 128 Kbps (128 mil bits por segundo) está asociada a una baja tasa de transmisión de símbolos (aproximadamente 32 mil símbolos por segundo usando modulación QPSK [T.Oeberg, 2002] en la que se transmite 4 bits por símbolo) y por lo tanto ocupa un escaso ancho de banda (similar a 32 Khz siguiendo el mismo ejemplo). Por el contrario una tasa de transmisión de datos alta como 128 Mbps está asociada a una tasa de transmisión de símbolos también alta (aproximadamente 32 millones de símbolos por

segundo usando modulación QPSK) y por lo tanto ocupa un gran ancho de banda (32 MHz aproximadamente). Los esquemas de modulación digital, incluído QPSK, serán abordados en la sección 2.1.7 sobre Modulación Digital.



*El gran físico y matemático francés Joseph Fourier nos dejó como gran legado el análisis que lleva su nombre y que nos permite representar cualquier señal continua en el tiempo como la suma de señales sinusoidales. Una señal continua que varía muy rápidamente posee componentes de alta frecuencia en sus componentes sinusoidales mientras que una señal que varía lentamente posee componentes de baja frecuencia. La máxima frecuencia de estas componentes sinusoidales es lo que finalmente determina lo que se conoce como **ancho de banda** de una señal determinada. Si una señal tiene un ancho de banda de 6 MHz como en el caso de la señal de televisión en el estándar analógico de televisión NTSC, el organismo regulador del país respectivo es el encargado de asignar la banda de frecuencia de 6 MHz a cada estación televisora.*

2.1.4 Modulación para Transporte a Alta Frecuencia

En el caso de las transmisiones inalámbricas (sean éstas terrestres o satelitales) necesitamos transportar la señal electromagnética a una frecuencia mucho más alta que su frecuencia original tal como lo exemplifica la Figura 2-3. Este proceso es conocido como *traslación de frecuencia* desde banda base a radiofrecuencia (o RF).

La razón principal de la traslación de frecuencias es que el tamaño de las antenas necesario para una adecuada transmisión es inversamente proporcional a la frecuencia de transporte de la señal. Así, si la señal inalámbrica no fuera transportada a una frecuencia mucho mayor que la original requeriríamos de antenas de enormes dimensiones para su adecuada transmisión y recepción, lo cual es absolutamente impracticable debido a los altísimos costos implicados y al espacio que se requeriría para instalarlas. La utilización de frecuencias altas para transportar la señal con información nos permite utilizar antenas de un tamaño razonable como las que se utilizan en los receptores de televisión.

Además la legislación de cada nación asigna bandas de frecuencia o zonas espectrales para transmitir diferentes servicios. Por ejemplo, el marco regulatorio de Chile estipula la transmisión de las radios FM entre los 88 y los 108 MHz, donde cada canal puede ocupar hasta 200 KHz de ancho de banda. De esta manera la información (voz y audio) de cada radioemisora debe ser trasladada a la frecuencia licitada para su operación.

La señal analógica o digital que lleva a información modula una señal con frecuencia mucho mayor para su transporte a través del canal y debe ser demodulada - efectuando el proceso inverso - en el extremo receptor. En el caso del estándar estadounidense de televisión analógica NTSC o del estándar japonés de televisión digital ISDB-T, cada estación televisora emite una señal que ocupa un ancho de banda de 6 Megahertz (6 millones de ciclos por segundo). La frecuencia central de modulación con que se transporta la señal de 6 MHz de cada estación televisora debe ser única para cada

una de ellas y es, por regla general, asignada en cada nación por una institución gubernamental a cargo de la regulación del espectro radioeléctrico. A modo de ejemplo la Tabla 2-1 muestra las asignaciones de canales en la banda VHF para el caso de los Estados Unidos.

Tabla 2-1. Asignación de Frecuencias de Modulación para Canales NTSC de 6 MHz en la banda de frecuencias VHF estadounidense

BANDA	Número de Canal	Frecuencia Central de Modulación
VHF	02	54-60 MHz
VHF	03	60-66 MHz
VHF	04	66-72 MHz
VHF	05	76-82 MHz
VHF	06	82-88 MHz
VHF HIGH	07	174-180 MHz
VHF HIGH	08	180-186 MHz
VHF HIGH	09	186-192 MHz
VHF HIGH	10	192-198 MHz
VHF HIGH	11	198-204 MHz
VHF HIGH	12	204-210 MHz
VHF HIGH	13	216 MHz

El diseño y construcción de las antenas es un tema bastante complejo dentro de la disciplina de ingeniería eléctrica que escapa a lo que desea cubrirse en este texto. Sin embargo, existe una regla aplicable a toda antena para que ésta pueda recibir y transmitir la señal adecuadamente. Sus dimensiones físicas deben ser “comparables” a la mitad de la longitud de onda de la señal que se desea transmitir. La longitud de onda corresponde a la distancia física (en metros o kilómetros por ejemplo) en que se repite un ciclo de la señal y se calcula en forma aproximada como

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

*donde f es la frecuencia en Hertz de la señal y c es la velocidad de la luz (aproximadamente 298.000 Km/s). A modo de ejemplo tomemos una señal de televisión original de 6 MHz (lo que se conoce como **banda base**) que deseamos transmitir sin trasladarla a una frecuencia mayor. Las dimensiones de la antena de un aparato de televisión para una adecuada recepción de esta señal deberían ser del orden de la mitad de la longitud de onda de la señal, unos 25 metros en este ejemplo. ¿Se imagina una antena de 25 metros de largo conectada a su aparato de televisión?. Esta es la razón de por qué la señal debe trasladarse a una frecuencia mucho más alta antes de transmitirla. Esto permite que las antenas de recepción tengan dimensiones razonables (de unos centímetros) y sean, por lo tanto, mucho más fáciles de fabricar.*



2.1.5 Modulación en banda base de una señal analógica

El transporte de la señal a una frecuencia más alta resuelve el problema de las antenas de transmisión pero no nos brinda mayor información sobre cómo representar la señal a transmitir (por ejemplo la amplitud de la voz) antes de ser traladada a una frecuencia mucho más alta. A la señal con información que aún no ha sido modulada se le denomina señal de *banda base*. En la modulación de banda base representamos la información que acarrea una señal analógica mediante variaciones de los tres diferentes parámetros que tiene la señal sinusoidal que actúa como portadora: amplitud, fase y frecuencia. Si el concepto de señal sinusoidal no está claro se invita al lector a buscar en Internet la amplísima información existente sobre “funciones trigonométricas básicas” o “funciones seno y coseno”.

Los dos esquemas de modulación analógica más populares son modulación por frecuencia y por amplitud llamados FM y AM, respectivamente. En el primero la información que transporta la señal es representada a través de variaciones de la frecuencia de la señal portadora conservando constante su amplitud, mientras que en el segundo la información que transporta la señal es representada mediante variaciones de la amplitud de la señal portadora pero conservando constante su frecuencia. El ejemplo más popular y conocido de las modulaciones por frecuencia y por amplitud está dado por la señal que transmiten las estaciones de radio FM y AM, respectivamente. La Figura 2-4 ilustra ambos sistemas.

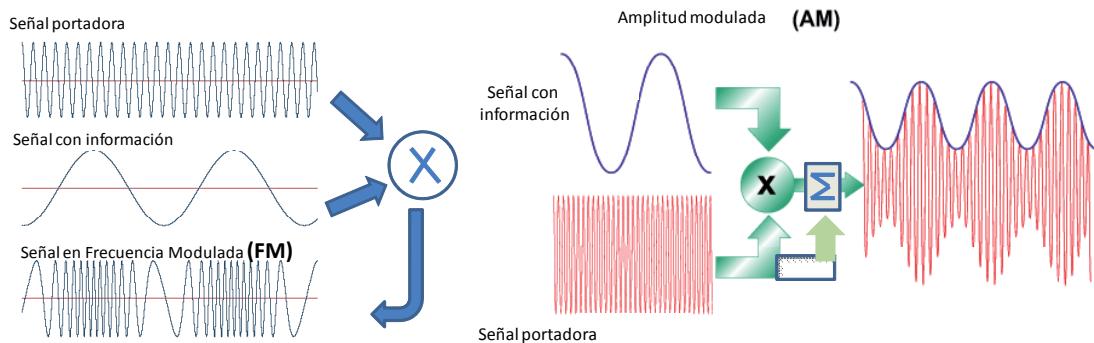


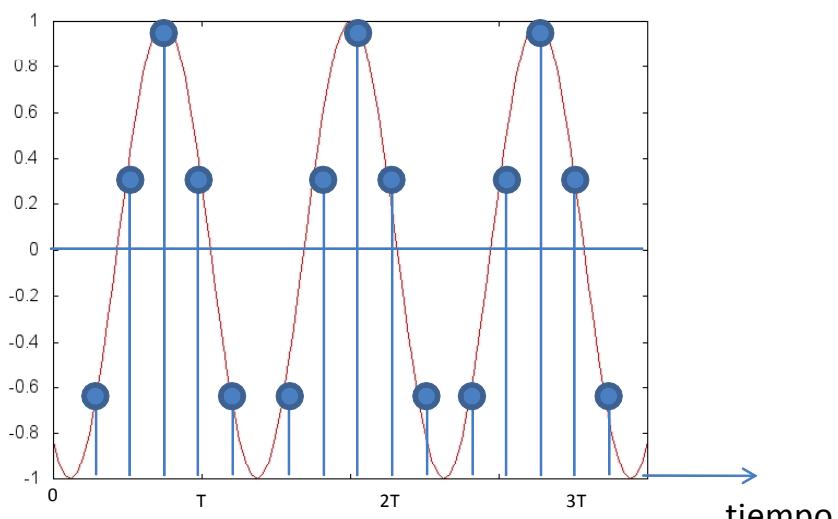
Figura 2-4. Modulaciones FM y AM

2.1.6 Conversión analógica digital

Lamentablemente los dos problemas asociados a una transmisión analógica (descritos en la sección 2.1.2) son extremadamente difíciles de solucionar. Los ingenieros saben de estas dificultades desde hace más de 80 años pero como es usual la teoría surgió muchos años antes que la práctica y tendrían que pasar aproximadamente sesenta años entre la primera transmisión radioeléctrica transatlántica de Marconi en 1902 y las primeras transmisiones digitales, llevadas a cabo luego de la aparición de los primeros chips electrónicos a fines de la década de 1950.

¿Cómo transformamos una señal analógica en una digital?

Eso se realiza desde hace ya tres décadas con unos chips especiales llamados conversores analógico-digital. Su funcionamiento es muy simple: la señal analógica ingresa por un par de pines y la señal digital de N bits por cada muestra tomada sale por otros N pines en forma paralela o alternativamente por un par de pines en forma serial. Las muestras son tomadas a una frecuencia que puede ser regulada. Para clarificar un poco más el concepto, volvamos al ejemplo de la señal de voz en una conversación telefónica. La señal de voz es convertida a un formato digital en base a una determinada *cuantización*, definida por una amplitud máxima, una mínima y cierto número de valores intermedios. Digamos a modo de ejemplo que en nuestra cuantización usamos 256 valores equiespaciados, es decir, la distancia entre valores consecutivos es siempre la misma tal como los centímetros en una regla de medir. Cada cierto período de tiempo constante tomaremos una muestra de la señal de voz y aproximaremos el valor de su amplitud al nivel más cercano dentro de los 256 valores definidos por nuestra cuantización. Supongamos por simplicidad que los 256 valores corresponden a $\{0, 1, 2, 3, \dots, 255\}$ donde cero quiere decir ausencia total de sonido y 255 representa la intensidad máxima que podemos medir. En este caso, por ejemplo, un valor medido de 103,58 sería aproximado a 104. Dado que tenemos 256 valores posibles podemos representar cada muestra con 8 bits de información ($2^8 = 256$) lo que se conoce como un “octeto” o byte. Supongamos que tomamos 8000 muestras por segundo de la señal de voz. Tendremos entonces una tasa de transmisión de información de 8000 muestras/segundo multiplicado por 8 bits/muestra, lo que equivale a 64000 bits por segundo o 64 Kbps. Ésta es la forma básica en la que funciona un sistema de audio PCM (pulse coded modulation) [Ahmad, 2003], presente en los primeros sistemas digitales de telefonía y utilizado incluso hasta el día de hoy. La Figura 2-5 representa el proceso de muestreo para la digitalización de una señal continua.



Intervalo entre muestras = 1/ Frecuencia de Muestreo

Figura 2-5. Digitalización de una señal continua

Una conversión de analógico a digital consiste entonces en mapear una señal de valores continuos a una de valores discretos utilizando para ello una cuantización y bits que nos ayuden a representar los valores medidos cada cierto lapso de tiempo. El número mínimo de muestras por segundo con que se puede muestrear una señal está dado concretamente por el “teorema de Nyquist”. Este teorema fue creado por Harry Nyquist en 1928 y demostrado formalmente en 1949 por Claude Shannon. En palabras simples Nyquist nos dice que la recuperación de una señal de frecuencia máxima F en banda base sólo será posible si se muestrea a una tasa igual o mayor a $2F$.

El mismo principio es válido también para el sistema de modulación utilizado para transmitir una señal eléctrica. Si mapeamos los valores continuos de amplitud y fase de una señal eléctrica a un conjunto de valores discretos de amplitud y fase obtendremos un sistema de modulación digital como QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) o QAM (Quadrature Amplitude Modulation), utilizados en la mayoría de los sistemas de radiocomunicaciones modernos, incluidos 3G, WiMax, WiFi y por supuesto Long Term Evolution (LTE). De estos sistemas de modulación hablaremos en la próxima sección.

La conversión de una señal analógica a una digital se basa en la toma de muestras de la señal analógica lo suficientemente rápido para poder extraer toda la información que nos interese. Cada una de las muestras pertenece a un conjunto finito de valores posibles y se representa utilizando bits, vale decir unos y ceros. Cada vez que usted habla por teléfono desde su celular o por Skype su voz analógica es convertida a una señal digital. Ahora bien, existe un mito bastante difundido que asevera que una señal digital siempre ofrece mejor calidad que una analógica y eso no es cierto. Todo depende de que tan rápido y eficiente sea el proceso de muestreo, cuantos bits se utilizan por muestra, como se comprime la información, etc. El hecho de que los datos estén formato digital no garantiza de forma alguna que presenten mejor calidad que en un formato analógico. Por esta razón incluso hoy en día muchos fotógrafos profesionales prefieren continuar utilizando cámaras analógicas que digitales.



Tal como se explicó en la sección 2.1.1 cualquier parámetro o propiedad física como el volumen de una señal de audio puede ser representado como una señal continua en el tiempo. La señal continua puede ser almacenada en un dispositivo magnético pero estará sujeta al ruido e interferencia y tampoco podremos comprimir sus datos. Uno de los problemas de las antiguas películas en formato VHS o de álbumes musicales en cintas magnéticas era justamente que iban perdiendo calidad a medida que se reproducían debido al ruido introducido por los imanes del dispositivo reproductor. Una señal digital no está sujeta a ninguno de esos problemas. Es muy robusta ante el ruido y además nos permite comprimir sus datos. Por supuesto que el CD, DVD o cualquiera sea el dispositivo de almacenamiento físico donde se guardan sí que está sujeto a deterioro o corrosión por el paso del tiempo pero la señal digital no se verá degradada por ruido externo insertado al momento de reproducir el contenido como en el caso de una señal analógica. ¿Se ha preguntado alguna vez como es que se almacenan digitalmente los video clips y canciones en Google o iTunes sin que se pierda un ápice de calidad?. Las grandes compañías utilizan sofisticadas técnicas de almacenamiento de tipo distribuido a gran escala donde se crean réplicas de los archivos en muchas localizaciones físicas diferentes – típicamente en centros de datos o data centers- de modo que la falla de algunos dispositivos de almacenamiento o discos duros no pone en riesgo alguno la confiabilidad del sistema o la integridad de la información almacenada.



2.1.7 Modulación Digital

En el caso de una modulación analógica en banda base tal como vimos en la sección 2.1.5 la idea es representar una señal con información mediante variaciones de la amplitud, la frecuencia o la fase de una señal a transmitir. En el caso de la modulación digital el objetivo es exactamente el mismo sólo que ahora debemos representar la información medida mediante valores discretos de al menos uno de los tres parámetros asociados a la señal sinusoidal de acuerdo a una determinada cuantización. Esta cuantización es la que define el tipo de modulación digital.

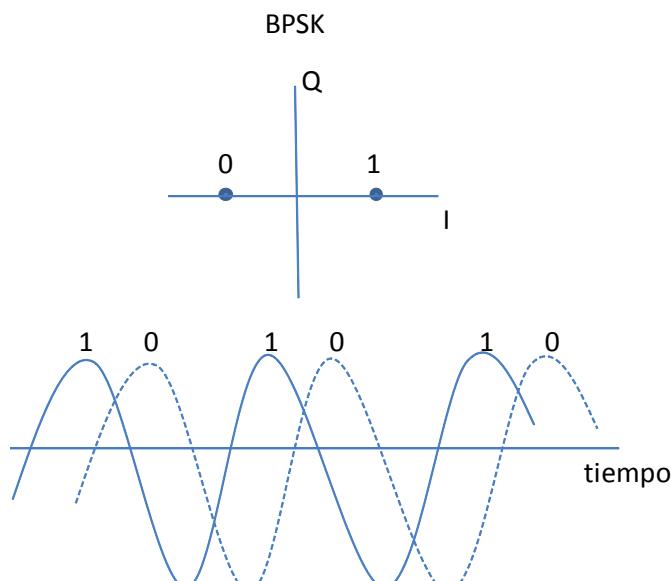
Los sistemas basados en la cuantización de frecuencias son llamados Frequency Shift Keying (FSK) pero prácticamente no se utilizan debido a la gran interferencia que generan los saltos abruptos de frecuencia en el espectro fuera de la banda asignada. Los dos parámetros con los que más se trabaja en la práctica en modulación digital son la amplitud y la fase de la señal. Ambos parámetros se cuantizan originando símbolos y a cada símbolo se le asigna un valor en bits. Así por ejemplo, en la modulación de fase llamada en inglés Phase Shift Keying (PSK) se representa una determinada combinación de bits con un símbolo único representado por una señal sinusoidal con cierto desfase de tiempo medido en grados con respecto al ciclo de la señal (un ciclo son 360 grados). Además está el sistema de Quadrature Amplitude Modulation o QAM en el que cada símbolo puede representarse en un plano con dos componentes: una señal con desfase cero llamada I y otra con desfase de medio ciclo o 90 grados llamada Q. Ambas se conocen como componentes *en fase* y *en cuadratura*, respectivamente.

En PSK se tienen dos esquemas básicos: BPSK y QPSK. En BPSK sólo pueden transmitirse dos símbolos con la misma amplitud, separados por 180 grados (lo que equivale a la mitad del ciclo de la señal en el dominio del tiempo), los cuales adquieren los valores 1 y 0, vale decir un bit. En QPSK se transmiten 4 símbolos con la misma

amplitud, separados entre sí por 90 grados (o un cuarto de ciclo de la señal), los cuales adquieren los valores 00, 01, 10 y 11. Eso quiere decir que en QPSK cada símbolo transmitido contiene dos bits de información. Estos dos tipos de modulación pueden apreciarse en la Figura 2-6.

Podríamos seguir utilizando símbolos con modulación PSK con la misma amplitud y cada vez más cercanos entre sí, como por ejemplo en 8PSK donde se transmiten 8 símbolos, representando 3 bits cada uno y separados entre sí 45 grados (un octavo del ciclo de la señal) pero el problema es que entre más cerca estén los símbolos unos de otros, más susceptible se torna el sistema al ruido y a la interferencia. Por esta razón el sistema 8PSK prácticamente no se utiliza en sistemas de comunicaciones inalámbricas. Para representar 4 bits por símbolo generalmente se utiliza el sistema 16QAM (quadrature amplitude modulation) en el que 16 símbolos se colocan en una grilla cuadricular de forma de maximizar la distancia entre símbolos vecinos. En este caso no es sólo la fase de la señal la que se cuantiza sino también su amplitud tal como puede observarse en la figura 2.6 donde también se muestra la modulación 64QAM.

El sistema 16QAM lógicamente presenta una menor resistencia ante el ruido y la interferencia que el QPSK debido a que los símbolos se encuentran más cerca unos de otros (asumiendo la misma potencia de transmisión). Otras modulaciones de la familia QAM bastante utilizadas que siguen el mismo principio del 16QAM son el 64QAM y el 256 QAM. En 64QAM se envían 6 bits por símbolo mientras que en 256QAM 8 bits por símbolo. La resistencia frente al ruido y la interferencia lógicamente disminuyen a medida que aumentamos el número de bits que transmitimos en cada símbolo ya que disminuye la distancia entre los símbolos vecinos. El sistema de transmisión de televisión digital ISDB-T utiliza en Japón la modulación 64 QAM, aunque también ofrece como alternativas las modulaciones 16QAM y QPSK.



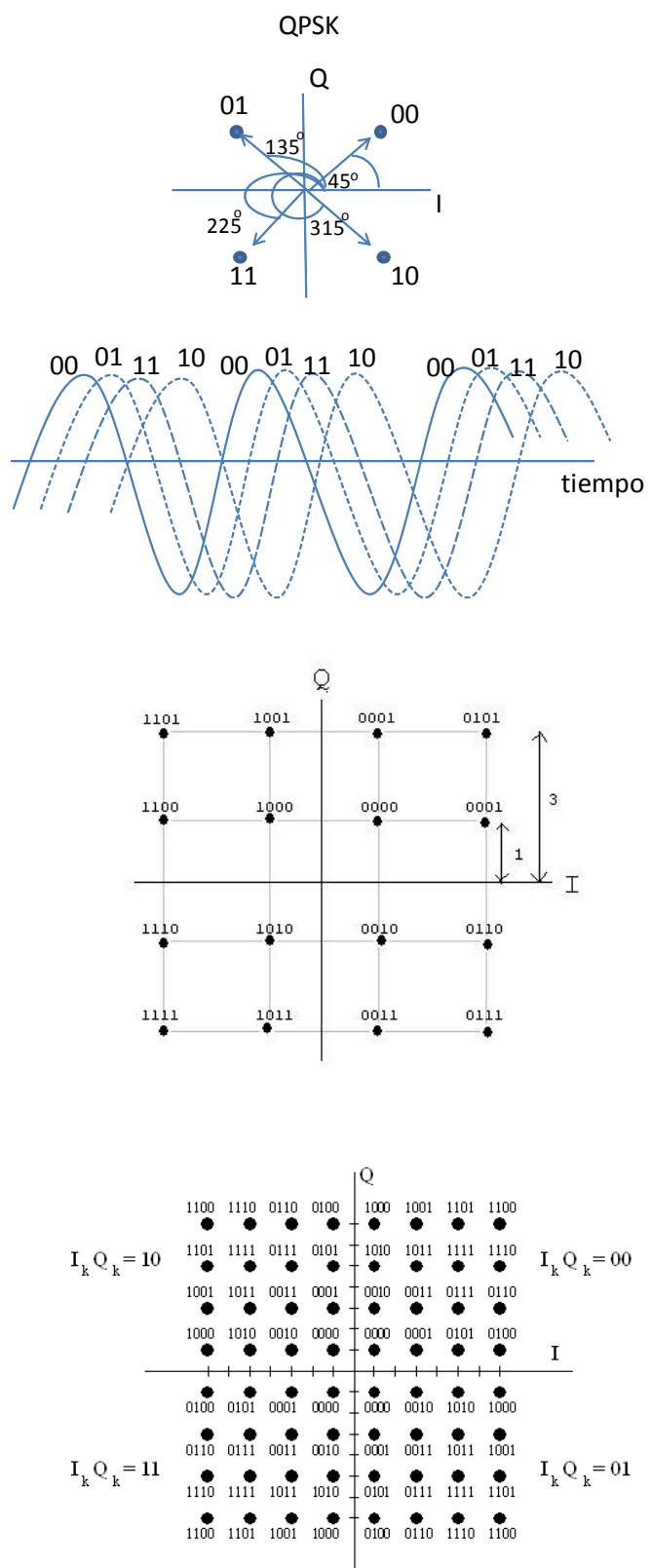


Figura 2-6. Representación de modulaciones BPSK, QPSK, 16QAM y 64QAM



La modulación digital nos permite representar una señal digital utilizando una señal sinusoidal en la que sólo modificamos los parámetros de frecuencia, amplitud y fase. En general, entre más bits tratemos de poner dentro de un símbolo transmitido peor será la resistencia del sistema frente al ruido y la interferencia por lo mismo el sistema de modulación es un parámetro que debe escogerse cuidadosamente al momento de diseñar un sistema de comunicaciones., especialmente uno inalámbrico. El sistema ISDB-T utiliza en Japón la modulación 64AQAM en la que se transmiten seis bits por símbolo.

2.1.8 Cómo la tecnología digital soluciona los problemas de las transmisiones analógicas

En primer lugar veamos como la tecnología digital puede ayudarnos a resolver el problema del uso ineficiente de ancho de banda. En primer lugar el manejo de un archivo en formato digital nos permite comprimirlo explotando los datos interrelacionados o redundantes gracias a lo discutido en la sección 2.1.2. Un códec moderno de video como MPEG-2 o H.264 [Beach, 20008], [I.E.Richardson, 2010] explota la correlación temporal y espacial de una secuencia de imágenes que conforman el video de forma de no transmitir información redundante. Cada una de estas imágenes (o cuadros) es capturada a una determinada frecuencia por una cámara de video.

Imaginemos a modo de ejemplo la escena de un video de 10 segundos de duración donde se observan variaciones muy leves, por ejemplo un pequeño insecto volando sobre un fondo que permanece fijo. En este caso no se requiere enviar la información del fondo durante los diez segundos sino que basta con enviar el primer cuadro como referencia y luego enviar sólo “la diferencia” entre los cuadros siguientes y el de referencia.

La situación es lógicamente más compleja que esto ya que se utilizan técnicas de procesamiento de macrobloques (grupos rectangulares de píxeles), vectores de movimiento que representan el movimiento de los objetos de un cuadro al siguiente, etc. pero el principio sigue siendo siempre el mismo: para transmitir un video no necesitamos enviar todos los cuadros uno por uno como si se tratara de imágenes totalmente independientes entre sí sino que enviar cuadros de referencia, colocados estratégicamente al comienzo de abruptos cambios de escena y en los cuadros siguientes enviar sólo las diferencias con respecto a aquellos cuadros de referencia.

En la sección 4.1.2 veremos con más detalle cómo funcionan los códec de video MPEG2 y H.264 utilizados por el sistema japonés ISDB-T [F.P.Miller, Digital Terrestrial Television, 2009], [Digital Broadcasting Experts Group of Japan] y por su adaptación brasileña Sistema Brasileño de Televisión Digital (SBTVD) [Forum SBTVD], respectivamente.

El manejo de un archivo en forma digital nos permite también enviar la misma información sobre Internet u otras redes de conmutación de paquetes (el paquete es la unidad básica de información) donde todas las conexiones comparten los mismos recursos, sin la necesidad de utilizar costosos enlaces dedicados. Las redes de conmutación de paquetes nos proveen además de mecanismos de retransmisión y

de corrección de errores que no se encuentran en sus pares analógicas y que nos permiten enfrentar el segundo gran problema de los sistemas analógicos: el ruido y la interferencia. Haciendo uso de estas tecnologías podemos por ejemplo recibir a tiempo para su *playout* (despliegue en pantalla) un paquete de video de Youtube que se había perdido en el camino (por ejemplo después de ser descartado de una de las colas de procesamiento en alguno de los ruteadores presentes en el trayecto desde uno de los servidores de Youtube hasta nuestro PC) sin que notemos absolutamente nada. Las técnicas de retransmisión son ampliamente utilizadas en Internet por el protocolo de transporte TCP (Transmission Control Protocol) [C.M.Kozierok, 2005] para conexiones punto a punto entre un cliente y un servidor. El protocolo TCP provee también otra herramienta vital en Internet conocida como *control de congestión* que no es más que una disminución de la tasa de transmisión de datos luego de que se detectan paquetes no recibidos, lo que se deduce por la ausencia de paquetes ACK o de reconocimiento que debe enviar el nodo receptor cada vez que le llega un paquete con información. El protocolo TCP fue tan bien diseñado que aunque parezca increíble no ha experimentado muchas variaciones con respecto a su primera especificación publicada en 1974, hace 37 años, cuando aún nadie podía predecir el fenómeno en el que se transformaría Internet.

En el caso de la televisión digital o de cualquier comunicación del tipo *broadcasting* (radiodifusión) las retransmisiones que hace TCP resultan imposibles debido a que la conexión ya no es punto a punto sino punto a multipunto, vale decir, un servidor transmitiendo exactamente la misma información a muchos clientes al mismo tiempo. Debido a que la pérdida de paquetes es un fenómeno estadísticamente aleatorio y completamente independiente en cada dispositivo cliente o receptor, resulta terriblemente ineficiente (y en la mayoría de los casos impracticable) que el servidor de broadcasting retransmita paquetes que se han perdido a cada uno de los clientes. ¿Se imagina a la estación televisora que cubre la mitad de Tokio preguntándole a cada uno de los millones de receptores móviles y televisores cuáles son los paquetes de información que no recibieron para poder retransmitírselos?. Es por esto que las tecnologías de broadcasting no usan TCP: están diseñadas para evitar a toda costa las retransmisiones. Las tecnologías de broadcasting utilizan el protocolo User Datagram Protocol o UDP [C.M.Kozierok, 2005], el cual brilla por su simpleza pero que carece de las funciones de retransmisiones y de control de congestión que nos ofrece TCP. En broadcasting un transmisor no tiene forma de saber si un paquete transmitido por UDP llegó o no, ni tampoco puede ajustar su tasa de transmisión en caso de congestión. Es por eso que para aplicaciones de transmisión de video en Internet el protocolo UDP generalmente se utiliza en conjunto con un protocolo llamado Real Time Protocol o RTP [C.Perkins, 2003] , el cual fue diseñado para la sincronización de canales como audio, video y datos. Aunque el protocolo RTP no se utiliza en el estándar ISDB-T sí es ampliamente utilizado en el streaming de video en Internet.

Si en radiodifusión (broadcasting) no podemos retransmitir los paquetes perdidos ¿cómo los recuperamos entonces?. Lo que se utiliza son técnicas de *corrección de errores por anticipado (forward error correction)* [T.K.Moon, Error Correction Coding, 2005] basadas en la transmisión de información redundante en conjunto con la información original. Ello nos permite recuperar la información perdida en caso de que se produzcan errores en el canal. Existen muchos códigos que nos permiten hacer esto. Entre los más famosos se encuentran los Reed-Solomon [T.K.Moon, Error Correction Coding, 2005], ampliamente utilizados en comunicaciones satelitales,

espaciales y también en televisión digital, y recientemente los códigos Raptor [B.Furht, 2008] utilizados en los sistemas de *broadcasting* y *multicasting* de comunicación móvil de última generación LTE (Long term evolution [S.Sesia, 2009]).



Al ser un sistema de radiodifusión la televisión digital no es bidireccional por defecto. La estación transmisora envía la señal a todos los receptores que se encuentren encendidos dentro de una cierta área de cobertura y la conexión de retorno del usuario final a la emisora (solicitando información adicional a la que recibe o enviando información requerida) debe ser provista por cada cliente mediante una conexión a Internet por medio del cable telefónico, TV cable, fibra óptica, o medios inalámbricos como WiFi, 3G, WiMax, etc.



Cuando usted establece una conexión con un servidor de video de un servicio como Youtube en Internet lo hace mediante una conexión llamada punto a punto. Este tipo de conexiones se basan en la comunicación entre sólo un par de nodos en la que el servidor establece una conexión única con cada cliente. En el caso de la radiodifusión analógica o digital el equipo transmisor conectado a la antena de transmisión no tiene como saber qué aparatos de televisión están encendidos o apagados o cuál de ellos está recibiendo correctamente la información transmitida. En este caso existe una conexión llamada punto a multipunto, es decir, de un nodo transmitiendo a múltiples nodos. Por esta razón no se efectúa la retransmisión de paquetes por cada conexión como sucede por lo general en Internet sino que junto con la información se envían códigos de corrección de errores que permiten al nodo receptor recuperar por sí mismo la información en caso de que haya errores en la transmisión. Entre los códigos de corrección de errores más famosos se encuentran los Reed-Solomon utilizados en misiones espaciales, comunicaciones satelitales, telefonía celular, televisión digital (incluido ISDB-T) e incluso en DVDs, discos duros y otros dispositivos de almacenamiento.

2.1.9 La tecnología digital a nuestro alrededor

Por último vale la pena preguntarse qué aplicaciones prácticas posee la tecnología digital. La respuesta es simple: se aplica en la inmensa mayoría, sino en todos, los aparatos electrónicos que vemos a nuestro alrededor diariamente. En estos días la tecnología digital está presente hacia donde quiera que miremos. Lo está en todas las transmisiones a través de Internet, en todos los formatos de video o sonido de las películas que vemos en DVD, BlueRay o Youtube, así como en el funcionamiento interno de los PCs, cámaras digitales de fotografía y video, consolas de juego, teléfonos celulares, lavadoras y todo tipo de electrodomésticos, etc. Además de todo ello la tecnología digital es hoy parte fundamental de los automóviles, aviones, trenes y toda clase de medios de transporte. Todos estos dispositivos y aparatos utilizan la tecnología digital para almacenar, transferir y recibir información, utilizando como principio básico la conversión analógico-digital de la que hablamos anteriormente.



Las transmisiones digitales nos ayudan a resolver dos problemas fundamentales asociados a los sistemas analógicos: (1) nos ofrecen métodos de retransmisión y de corrección de errores que proveen resiliencia frente al ruido y la interferencia dentro del canal de comunicaciones, y (2) nos otorgan la posibilidad de comprimir los datos que deseamos transmitir explotando la redundancia intrínseca que existe dentro de la información. Ambas propiedades se traducen en una utilización más eficiente del ancho de banda, un factor especialmente importante en el caso de las comunicaciones inalámbricas.

2.2 La Televisión Analógica

Aunque el tema principal de este texto es la televisión digital no podríamos hablar sólo de ella sin mencionar siquiera a su antecesora: la televisión analógica. Existe muchísima literatura relacionada con los tres estándares analógicos por lo que nos detendremos sólo a darle un breve vistazo a sus aspectos fundamentales.

La televisión fue sin duda uno de los grandes inventos del siglo XX y significó el fruto del esfuerzo durante décadas de muchos ingenieros y científicos en el mundo. Los primeros televisores en blanco y negro aparecieron en la década de 1930 con el invento de los tubos de rayos catódicos en los que un rayo de electrones barre una pantalla de fósforo de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo para luego regresar a la línea superior. El rayo de electrones es modulado por el brillo o luminosidad de la imagen, lo que produce el efecto de diferentes tonalidades de gris.

En la década de 1950 ingenieros en diversos lugares del mundo diseñaron formas alternativas de agregar la información de color a la señal, pero manteniéndola siempre compatible con los receptores de blanco y negro. Fue así como se crearon tres diferentes estándares mundiales para transmitir la señal de color: el estadounidense NTSC (National Television System Committee), el europeo PAL (Phase Alternation Line Rate) y el sistema francés-soviético SECAM (Séquentiel Couleur Avec Mémoire) (F.P.Miller, Broadcast Television Systems, 2009).

Los tres estándares especifican un cierto número de líneas horizontales barridas de izquierda a derecha además de una tasa de refresco que corresponde a la frecuencia con que cambian los cuadros o imágenes consecutivas. En el caso del estándar estadounidense NTSC éste consta de 525 líneas horizontales de las cuales sólo 486 son visibles mientras que las líneas restantes son usadas para sincronización. El barrido de la pantalla se hace primero en las líneas pares y luego en las impares a una tasa de refresco de 59,94 cuadros por segundo por lo que la tasa de refresco resultante de un cuadro completo es la mitad de este valor, es decir 29,97 cuadros por segundo. Este peculiar número para la tasa de refresco se debe a que en un principio ésta fue fijada a la frecuencia de la red eléctrica en Estados Unidos de 60 ciclos por segundo a fin de disminuir el fenómeno de intermodulación que produce molestas rayas horizontales que se mueven verticalmente a través de la pantalla. Luego de incluir la señal de color hubo que bajar la tasa levemente de 60 a 59,94 cuadros por segundo de manera de evitar la formación de puntos sobre la pantalla producida por la leve diferencia de frecuencia entre la señal de color y la de audio.

La adición de la señal de color en NTSC se hizo de forma de mantener la compatibilidad con los receptores blanco y negro. Para ello se utilizó un sistema de codificación basado en una señal de luminancia y dos señales cromáticas que fue inventado en 1938 por el ingeniero de telecomunicaciones francés Georges Valensi. Este sistema para separar el brillo y los colores fue el pilar de la compatibilidad con la señal en blanco y negro de los tres estándares de televisión NTSC, PAL y SECAM. La luminancia y los dos cromas pueden ser calculados directamente a partir de los tres colores básicos rojo, azul y verde. Que éstos sean los colores básicos quiere decir que cualquier color visible puede ser representado como una combinación de ellos con diferentes intensidades para cada uno. Por ejemplo, cuando la intensidad de los tres es nula el color resultante es negro y cuando la intensidad de los tres es la máxima posible (255 en el caso que su intensidad se represente con 8 bits o 1 byte en formato digital) el color resultante es blanco. En medio del blanco y el negro está toda la gama posible de colores visibles para el ser humano. El sistema de Valensi (L.M.Surhone, 2010) tradujo la combinación de los tres colores básicos y sus respectivas intensidades conocido como RGB (Red, Green and Blue) a una señal de brillo y dos señales con la información sobre el color. El mismo principio dió origen más tarde al formato digital YUV, el más utilizado en la digitalización y edición de videos. En YUV el canal Y corresponde a la luminancia mientras que los canales U y V llevan la información cromática.

La ventaja del método de Valensi fue que la luminancia coincidía exactamente con la señal en blanco y negro ya que representa la intensidad o brillo de la imagen pero carece de información cromática (de colores). Al ya estar presente la luminancia en la señal de blanco y negro sólo faltaba con agregar las dos señales cromáticas definidas en el modelo. En el caso del estándar estadounidense NTSC estas dos señales son moduladas en amplitud para luego ser enviadas “en fase” y “cuadratura”, lo que en palabras simples quiere decir que las dos señales son agregadas con cierto tiempo de desfase (equivalente a la mitad de un ciclo de la señal) de forma que puedan ser fácilmente reconocidas y extraídas por el demodulador en el receptor. La suma de las dos señales sinusoidales de croma da origen a una señal sinusoidal única de croma con fase variable en donde la fase corresponde al color asociado y la amplitud a la intensidad de dicho color. Además al final de cada línea horizontal se envía una señal en forma de ráfaga de al menos ocho ciclos que sirve para sincronizar las señales de croma de la línea siguiente y así poder medir su fase sin errores. La mezcla de luminancia o brillo con los dos cromas que llevan la información de color es lo que permite al aparato receptor calcular exactamente el color de cada punto. Es necesario mencionar que la televisión analógica es discreta en la dirección vertical ya que hay siempre un número bien definido de líneas pero cada línea horizontal se trata de una señal continua sin puntos de tamaño definido o pixeles como sí ocurre en el caso de la televisión digital o de los monitores de computadoras personales.

Hoy en día existen más de cuatro mil millones de televisores en el mundo, siendo la mayoría de ellos analógicos. Eso quiere decir que hay dos televisores por cada tres personas en el planeta y eso es tanto o más que la cifra de teléfonos móviles. La televisión analógica - primero con las imágenes en blanco y negro y luego con los tres estándares mundiales de imágenes a color - nos ha acompañado durante aproximadamente siete décadas pero en un mundo donde la fuerza de Internet impulsa la digitalización de toda la información y los medios que existen era sólo cosa de tiempo para que a la televisión también le llegara su turno.



Cualquier color visto por un ser humano puede ser descompuesto en tres colores básicos: azul, rojo y verde. El ingeniero francés Georges Valensi descubrió en 1938 una forma alternativa de representar un color en función de su luminancia o brillo y dos componentes cromáticos. Su invención permitió en la década de 1950 el nacimiento de la televisión a color, completamente compatible con su antecesora en blanco y negro, y permitió más tarde la creación del formato digital YUV, el más utilizado hoy en día en la grabación y edición de video digital descomprimido.

2.3 Qué ventajas tiene la televisión digital por sobre la analógica

En la sección anterior describimos cómo la tecnología digital nos ayuda a enfrentar los problemas de ruido y de uso ineficiente del ancho de banda pero ¿cómo se refleja esto en concreto en el caso de la televisión digital con respecto a su par analógica?. Las ventajas que ofrece la televisión digital sobre la analógica se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. Adiós a los fantasmas y al molesto ruido blanco

Con la tecnología digital no se ve interferencia del tipo ruido blanco (puntos pequeños que se distribuyen homogéneamente dentro de la pantalla del televisor) ni tampoco la del tipo “fantasma” producida por las reflexiones de la señal en construcciones, árboles y todo tipo de objetos sobre el terreno donde la señal se propaga. En general, puede afirmarse que la televisión digital ofrece una excelente calidad de imagen en comparación con la televisión analógica. Sin embargo, en caso de una pésima recepción (originada por una tormenta por ejemplo) se podrá observar que la imagen se detiene o que algunos macrobloques (grupos de pixeles de forma cuadricular) no son desplegados correctamente en pantalla. Esto dependerá del sistema de corrección de errores y la sensibilidad al nivel de señal sobre ruido que posee el decodificador que se esté utilizando.

2. Estabilidad de la imagen

La excelente calidad y estabilidad de las imágenes pueden ser apreciadas incluso en receptores ubicados en vehículos en movimiento y en teléfonos móviles. Esto era algo impensable en el caso de la televisión analógica. La forma en que esto se logra en el sistema ISDB-T es con la tecnología OneSeg que será explicada en la sección 5.

3. Diferentes alternativas para el uso del espectro radioeléctrico

El sistema estadounidense de televisión analógica NTSC utiliza canales de 6 MHz de ancho de banda. El sistema japonés de ISDB-T subdivide el canal analógico de 6 MHz de NTSC en 14 subcanales de 429 KHz. Uno de esos canales está reservado para la transmisión a dispositivos móviles usando la tecnología OneSeg, que quiere decir *Un Segmento*, mientras que otro ha quedado como un ancho de banda de “guarda” para evitar interferencias con los canales contiguos. Los 12 subcanales restantes son para transmisiones de video de alta calidad a dispositivos fijos y pueden ser asignados de

forma de optar a un sólo canal en calidad de Súper Alta Definición (Full High Definition con una resolución de 1920x1080 pixeles) o a dos o tres canales de menor definición transmitidos en forma simultánea. Esta flexibilidad que se le brinda a la estación televisiva para usar su espectro radioeléctrico de 6 MHz es también algo impensable en el caso de la televisión analógica. Más detalles sobre las diferentes opciones para utilizar los 12 canales disponibles se entregan en la sección 3.2.1.

4. Transmisión de datos

El estándar ISDB-T permite también la transmisión de datos por un canal separado. De esta forma junto al contenido de video puede mostrarse información del clima, del nivel de congestionamiento de las carreteras y otros datos en tiempo real, horario e información de los programas, etc. Los datos disponibles aparecen por lo general presionando un botón especial en el control remoto del dispositivo receptor o televisor. Usando el canal de datos se puede transmitir también información casi instantánea sobre terremotos, tsunamis, tifones u otros desastres naturales. Al recibir uno de esos mensajes un televisor puede encenderse automáticamente para mostrar la alerta mientras que los teléfonos móviles despliegan la información al instante.

3. Tecnologías de Transmisión y Recepción

3.1 Cambios en el uso del espectro radioeléctrico

El espectro radioeléctrico es un bien escaso y, en la mayoría de los países, extremadamente costoso también. En el caso de Japón, fuera de los servicios de televisión y radio existen más de 80 millones de teléfonos celulares de segunda y tercera generación los que sumados a las comunicaciones satelitales y transmisiones de otras tecnologías inalámbricas de carácter masivo como WiFi [M.Gast, 2005] y WiMax [J.G.Andrews, 2007] continúan sobreponiendo el ya congestionado espectro radioeléctrico. Teniéndose en cuenta esta situación el sistema ISDB-T fue cuidadosamente diseñado para que el ancho de banda utilizado pudiera ser ajustado a las necesidades de cada televisora e incluso dejar el espectro VHF y parte del UHF libres para otros servicios.

En Japón la televisión analógica basada en el sistema estadounidense NTSC fue oficialmente abandonada el 24 de julio de 2011. El sistema de televisión analógico nipón que cuenta con 12 canales analógicos en la banda VHF y 50 canales en la banda UHF dió paso definitivamente en julio de 2011 al sistema digital (en uso desde el 1 de Diciembre de 2003), el cual utiliza sólo 40 canales en la banda UHF. Por esta razón 20 canales han quedado libres: 12 en la banda VHF y 8 en la de UHF. Por orden del ministerio de Asuntos Internos y Comunicaciones de Japón estos 20 canales liberados deben ser utilizados desde julio del 2011 en servicios digitales ajenos a la radiodifusión televisiva (por ejemplo en servicios de descarga de contenidos audiovisuales a la carta u on demand para telefonía móvil) o en otros servicios de comunicaciones. Los gobiernos sudamericanos que han adoptado la norma japonesa de televisión digital también tendrán que comenzar a evaluar alternativas similares para el uso del espectro radioeléctrico que podría quedar libre en la banda VHF una vez que se haga la transferencia definitiva al sistema digital en unos años. En el caso de Japón se determinó un período total de transición entre la era de televisión analógica a la digital de ocho años (entre 2003 y 2011). Éste es un lapso de tiempo bastante razonable para que toda la ciudadanía pueda adquirir un receptor digital considerando que Japón es un país de 128 millones de habitantes.

Con el objetivo primordial de informar debidamente a la población el gobierno japonés ha puesto en marcha sendas campañas comerciales cuya frecuencia ha ido *in crescendo* con el paso de los años a medida que se acerca la fecha del apagón analógico definitivo. En dichas campañas han tomado parte todos los medios de comunicación incluídos los canales privados de televisión. Éstos últimos han sido los más motivados en promover una transición del sistema analógico al digital lo más rápida posible debido al alto costo que involucra el mantener ambos sistemas (analógico y digital) operativos. En el caso de los países sudamericanos que han elegido la norma

japonesa es muy probable que el período de transición tenga una duración similar a los ocho años planeados en Japón.

En Japón el paso de la televisión analógica a la digital ha sido un proyecto gubernamental de ocho años que culminará el 24 de julio de 2011. Durante estos ocho años el gobierno ha lanzado campañas publicitarias dirigidas a la población para que adquieran antes de la fecha límite ya sea un televisor con receptor digital incorporado o un set top box (caja externa) con receptor digital para conectar a su televisor analógico. Vale la pena recalcar en este punto que las pantallas planas y los receptores digitales son dos tecnologías que no guardan relación entre sí. De hecho hay muchos televisores con pantalla plana de más de 30 pulgadas que vienen sólo con el receptor analógico. En Japón se obligó a los comerciantes de aparatos electrónicos a pegar adhesivos de tamaño lo suficientemente visible en las cajas de los televisores nuevos que no tenían receptor digital advirtiendo sobre el fin de las transmisiones analógicas en julio del 2011. De esa forma se evitaron muchas compras de usuarios desinformados que pensaban que estaban adquiriendo un televisor con receptor digital sólo porque el aparato tenía una pantalla plana.



3.2 Flexibilidad en el uso del ancho de banda

Una de las mayores ventajas que ofrece el estándar japonés de televisión digital es la flexibilidad en el uso del ancho de banda asignado a una estación televisiva. La estación televisiva puede utilizar toda su banda de frecuencia en la transmisión de programación en súper alta definición (1920x1080i) o bien subdividir su banda de frecuencia para transmitir varios programas en menor calidad. Dependiendo de la normativa de cada país estos canales pueden ser gratuitos o de pago.

El uso del códec H.264 por parte del estándar brasileño aumenta aún más el número de posibilidades para subdividir la banda. En la práctica esto permite a un canal crear programación segmentada o potencialmente arrendar parte de su banda asignada de 6 MHz. Además, ISDB-T ofrece un canal dedicado a dispositivos móviles a través de la tecnología OneSeg de la que hablaremos más en el capítulo 5, el cual también puede subdividirse en dos de manera que es capaz de soportar dos canales simultáneos dedicados a aparatos móviles. En esta sección revisaremos algunos de los aspectos técnicos que permiten esta gran flexibilidad en el uso del espectro de frecuencia asignado.

3.2.1 Subdivisión en segmentos del ancho de banda asignado

El sistema ISDB-T permite utilizar el mismo canal de 6 MHz que emplean actualmente las televisoras para transmitir su señal analógica. Pero esa no es la única ventaja. Su mayor distintivo es que ofrece una gran flexibilidad en el uso de este canal de 6 MHz en cuanto permite la transmisión de tres diferentes definiciones o grados de calidad de la imagen. A continuación explicamos qué tipo de tecnología hace esto posible.

El canal de 6 MHz está sudividido en 14 segmentos de 429 KHz. De ellos 13 son de datos y uno vacío se utiliza como espacio de guardia para disminuir la interferencia entre canales contiguos. El canal de datos que se ubica justo en el centro de la banda de 6 MHz está destinado al sistema OneSeg que permite la transmisión de contenidos audiovisuales hacia teléfonos o dispositivos móviles. Por su parte, los 12 segmentos de datos restantes se utilizan en la transmisión de imágenes de mayor calidad o resolución a receptores fijos. Su uso otorga una gran flexibilidad al sistema ya que pueden ser empleados de acuerdo a una de las siguientes tres opciones: i) transmisión simultánea de tres programas en definición estándar (equivalente a la calidad o resolución de la televisión analógica) donde cada uno utiliza sólo 4 segmentos; ii) transmisión simultánea de un programa en súper definición que utiliza 8 segmentos y otro en definición estándar con 4 segmentos; iii) transmisión de un solo programa en alta definición que utiliza los 12 segmentos.

La flexibilidad del sistema puede ser apreciada en el siguiente ejemplo: un canal de televisión determinado puede optar por transmitir simultáneamente entre 6 pm y 8 pm tres programas en definición estándar, luego transmitir simultáneamente entre 8 pm y 9 pm una teleserie en súper definición y otra en definición estándar para, por último, ofrecer una película en alta definición desde las 9 pm. Todo esto dentro de su espectro de 6 MHz. Esto es algo técnicamente imposible con la televisión analógica. La Figura 3-1 ilustra la flexibilidad con que pueden distribuirse los segmentos para proveer diferentes niveles de resolución o calidad de imagen.

En Japón la cadena de televisión nacional NHK, principal precursora y creadora del sistema ISDB-T, divide su banda asignada de 6 MHz en dos canales simultáneos llamados: Canal General y Canal Educacional. Éste último es particularmente conocido por los excelentes programas educativos que produce para gente de todas las edades. De manera similar el canal educacional Hosoo Daigaku (broadcasting university) imparte cursos para adultos utilizando tres canales en definición estándar dentro de su banda de 6 MHz. Los canales privados, por su parte, han optado por utilizar toda su banda asignada transmitiendo un solo canal de alta definición. El por qué de esta situación se encuentra no en el plano técnico que como hemos visto ya está resuelto sino en el de negocios. Producir contenidos atractivos en dos o tres canales de forma simultánea buscando auspiciadores para todos ellos es una tarea que es difícil de llevar a la práctica como un negocio que resulte más rentable que seguir emitiendo sólo un canal. Ello considerando que la torta de inversión de los auspiciadores no necesariamente crece por el hecho de haber más canales disponibles (de hecho la práctica en Japón ha demostrado que no es así) sino que tan sólo se subdivide en segmentos más específicos de la audiencia. Ésta es la gran razón de por qué las cadenas de televisión privadas han optado por mantenerse fiel a una sola línea editorial y continuar transmitiendo tan sólo un canal abierto en alta definición haciendo pleno uso de su banda de 6 MHz.

3.2.2 Códex de video

Con la adaptación brasileña del sistema japonés ISDB-Tb o SBTVD (sistema brasileño de televisión digital) es posible transmitir el doble de canales en todas las combinaciones anteriores ya que se utiliza el códec H.264 que es aproximadamente dos veces más eficiente que el MPEG2 usado en ISDB-T. Así en el sistema brasileño

es posible transmitir simultáneamente 6 canales en definición estándar, 4 canales en súper definición y 2 canales en alta definición dentro de los mismos 6 MHz de ancho de banda. Tal abundancia de canales en el mismo espectro de 6 MHz en el que hoy en día se transmite un solo canal analógico abre enormes posibilidades para que canales regionales o con contenidos de audiencia más específica puedan subarrendar parte del canal de 6 MHz a las televisoras más grandes tal como se mencionó al final de la sección anterior.

Una buena pregunta es por qué Japón siempre a la vanguardia tecnológica no ha cambiado el formato de codificación de video MPEG2 por el H.264 como sí lo hizo Brasil siendo que este último ofrece el doble de eficiencia. La respuesta está en que cuando comenzaron las transmisiones digitales vía satélite en Japón en el año 2000, el formato H.264 estaba aún en proceso de estandarización y en ese momento el estándar de compresión de video más eficiente era el MPEG2. Por este motivo, todos los receptores digitales en Japón comenzaron a ser fabricados según este estándar. El formato H.264 fue aprobado en mayo de 2003, poco antes que comenzaran en diciembre del mismo año las transmisiones de ISDB-T en Japón pero para ese entonces los grandes fabricantes japoneses ya se encontraban produciendo receptores digitales en masa a bajo costo utilizando el formato MPEG2. Dos o tres años más tarde ya había millones de receptores digitales funcionando con el códec MPEG2 y de por sí esto impedía que se hiciera cualquier cambio al códec utilizado ya que esto inhabilitaría automáticamente la recepción en todos los receptores antiguos. Así, el formato MPEG2 quedó como un legado o herencia de los primeros receptores digitales que se produjeron en masa en Japón. En Brasil el estándar Japonés se adoptó el 2006, año en el que ya era bastante claro que el códec H.264 constitúa una alternativa técnicamente mucho más eficiente que el MPEG2. Brasil no tenía el problema del legado de receptores con MPEG2 de Japón y decidió por lo tanto cambiar el códec original de MPEG2 por el H.264, una decisión estratégica muy inteligente. Lo más probable es que el resto de los países sudamericanos considere el códec H.264 como una de las razones fundamentales para optar por el SBTVD.

Vale la pena mencionar aquí que el sistema OneSeg para transmisiones a dispositivos móviles sí utiliza el códec H.264 debido a que éstas comenzaron tres años más tarde (en 2006).

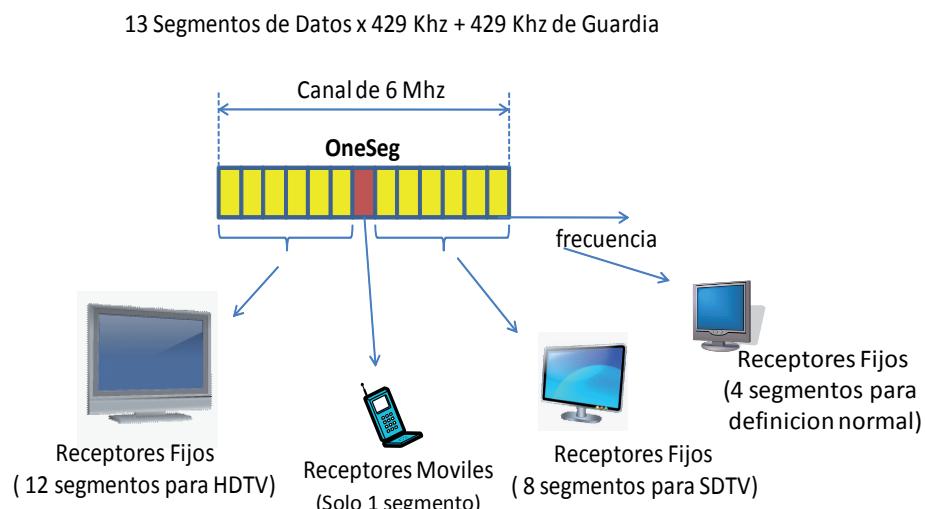


Figura 3-1. Flexibilidad en el uso de los 13 segmentos de 429 KHz



Un códec de video es una tecnología que nos permite comprimir los datos de video explotando su redundancia espacial y temporal entre cuadros o imágenes consecutivas. El códec utilizado desde el 2003 por las transmisiones a receptores fijos del estándar japonés es el MPEG-2. Al optar por el estándar japonés, Brasil decidió cambiar el códec MPEG2 por el H.264 debido a que éste último es dos veces más eficiente. Eso quiere decir que un video puede ser transmitido con la misma calidad en H.264 con aproximadamente la mitad del ancho de banda requerido por el MPEG-2. Es por este motivo que el estándar SBTVD es capaz de colocar el doble de canales en el mismo espacio de ancho de banda. En el caso de Japón se mantuvo el MPEG-2 debido a que al momento en que se estandarizó el H.264 las transmisiones digitales de TV ya habían comenzado. Sin embargo, se optó en Japón por el H.264 para las transmisiones a teléfonos móviles en el sistema OneSeg, las cuales comenzaron el 2006.

3.3 Transmisión de sonido y datos

El sistema ISDB-T permite la transmisión de sonido de 5.1 canales en cualquiera de las configuraciones permitidas para la calidad del video. El sonido de 5.1 canales consiste en tres canales frontales, dos posteriores y uno de *bajo*. Además todos los programas pueden ser transmitidos en dos idiomas de modo que el usuario pueda elegir el de su preferencia. En Japón gran parte de la programación es ofrecida en los idiomas inglés y japonés, especialmente las películas extranjeras, y algunos noticieros de la NHK son traducidos simultáneamente al inglés para los residentes extranjeros.

ISDB-T permite también la transmisión de datos en servicios como:

- Información en tiempo real sobre catástrofes como terremotos o alertas de tsunami.
- Guía electrónica de programación: permite ver la programación de todos los días y horas además de leer el contenido específico asociado a cada programa.
- Subtítulos: los programas tienen la posibilidad de llevar subtítulos que pueden o no mostrarse en pantalla a gusto del usuario.
- Actualización de software: la lógica de los equipos de recepción funciona en base a software que puede ser actualizado sin que el usuario siquiera lo note. Las nuevas versiones de firmware del sistema pueden ser bajadas e instaladas de forma automática.
- Conexión a la línea telefónica: muchos televisores o equipos de recepción pueden conectarse a la línea telefónica del hogar permitiendo al usuario votar en programas de concursos, responder preguntas en programas de trivia, etc. con el simple uso de su control remoto. Aunque esta característica no forma parte del estándar, sí se encuentra presente en muchos de los aparatos receptores.



El sistema ISDB-T utiliza un formato estándar para el transporte de datos llamado MPEG-TS (Transport Stream) el cual permite dividir la información en canales de video, audio y datos. En el canal de datos se puede transmitir la programación por canal para la semana, datos sobre el programa que se está viendo actualmente, información del clima de la zona donde residimos, noticias en tiempo real, etc.

3.4 Sistema de Modulación

En este capítulo daremos un vistazo a las tecnologías de transmisión y codificación que sirven de fundamento para la televisión digital. Las tecnologías que revisaremos están presentes en casi todos los sistemas modernos de radiocomunicaciones como la telefonía móvil de tercera generación y cuarta generación (la próxima generación de celulares), las redes WiFi, los sistemas WiMax, las comunicaciones satelitales, etc. e incluso en sistemas de comunicaciones por cable como el ADSL [W.J.Goralski, 2001], ampliamente utilizado para el acceso a Internet a través de la línea telefónica desde los hogares.

3.4.1 OFDM (multiplexación por división de frecuencias ortogonales): modulación basada en el concepto de “Dividir para Reinar”

El sistema de transmisión OFDM [R.Prasad, 2004], [Nee, 1999] está presente en la capa física de casi todas las tecnologías de comunicación que utilizamos hoy en día para conectarnos a la Internet. Es el caso de la popular tecnología ADSL para conexión de datos a través de la línea telefónica o de televisión por cable, también el de la tecnología inalámbrica WiFi, la tecnología WiMax, etc. además de ser la base de los sistemas de telefonía móvil de cuarta generación, la próxima generación de tecnología móvil.

OFDM tiene su origen en la década de 1960 en los laboratorios de Bell Labs, hoy AT&T Bell Laboratories en los Estados Unidos. Se basa en varias señales moduladas a frecuencias ligeramente diferentes y transmitidas simultáneamente a través de una conexión física como un cable o un canal inalámbrico. La tecnología OFDM divide el flujo de datos en varios subcanales tal como un río que se ramifica en varios riachuelos en su trayecto hacia el mar.

¿Qué ventajas ofrece el dividir los mismos datos para transmitirlos en paralelo a través de un conjunto de canales diferentes?

En primer lugar OFDM permite utilizar en una forma más eficiente el espectro debido al traslape que existe entre subcanales contiguos tal como se muestra en la Figura 3-2a. Otorga además una mayor robustez frente a interferencia en el canal y por último ofrece un desempeño excelente frente al problema de multitrayectorias generado por la reflexión, difracción y dispersión de las señales radioeléctricas en el terreno.

Este último fenómeno se origina en las reflexiones, difracciones y la dispersión que experimenta la señal radioeléctrica al rebotar y refractarse en su camino con edificios, estructuras, árboles y todo tipo de objetos en el terreno antes de llegar al receptor. Tales perturbaciones en el medio de propagación pueden producir interferencias entre símbolos de información diferentes que han sido transmitidos consecutivamente. El problema se agrava a medida que la tasa de transmisión aumenta, o equivalentemente, a medida que el espacio de tiempo entre símbolos consecutivos disminuye.

Utilizando OFDM el espacio de tiempo entre símbolos consecutivos en cada subcanal se torna decenas o cientos de veces mayor que en un canal normal – equivalente a decir que la tasa de transmisión de datos en cada subcanal se torna mucho menor. Esto permite solucionar o al menos mitigar drásticamente el problema de interferencia entre símbolos consecutivos.

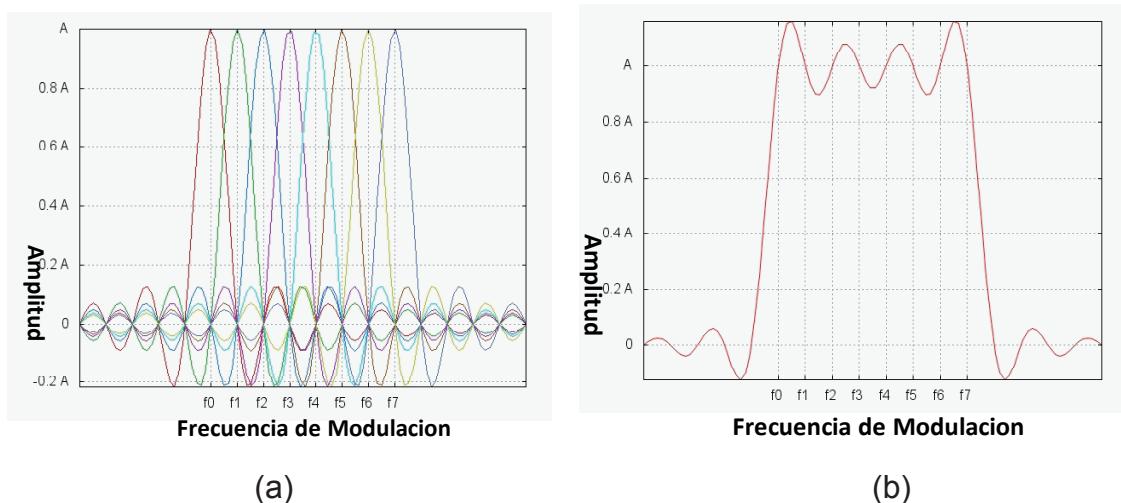


Figura 3-2. a) Ejemplo de señal de OFDM con 8 subportadoras en el dominio de la frecuencia; b) la señal total o resultante

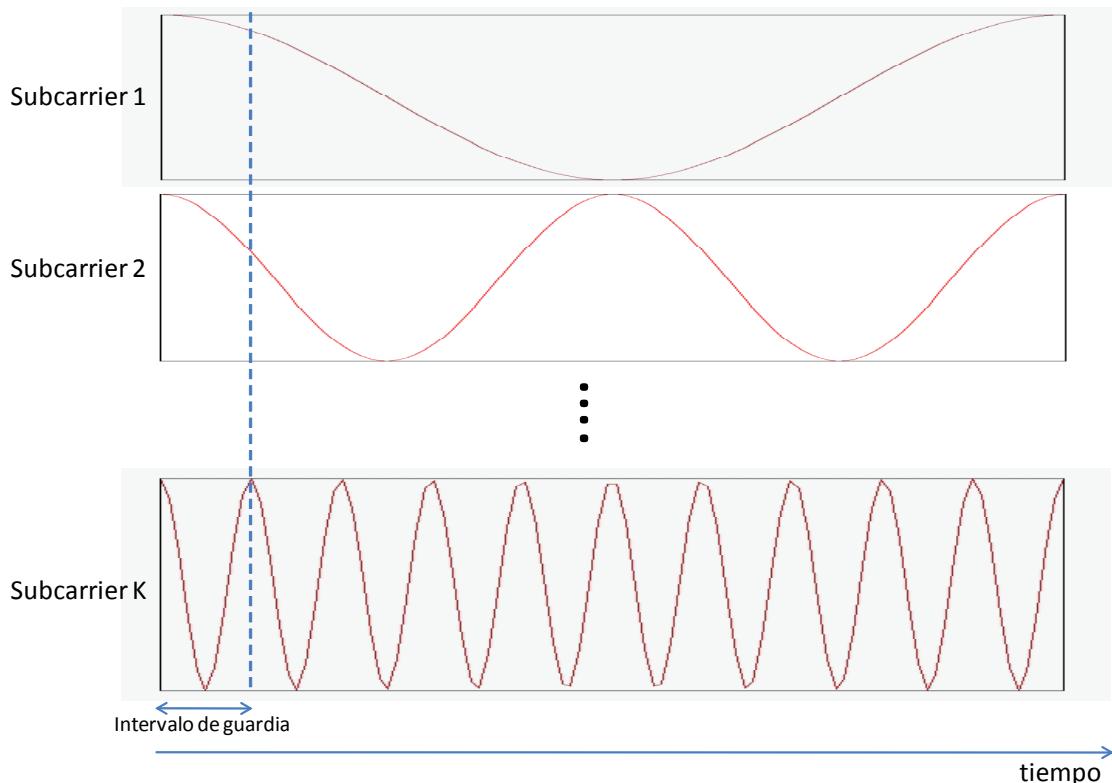


Figura 3-3. Subportadoras de OFDM en el dominio del tiempo

La Figura 3-3 muestra la forma típica de subportadoras de OFDM en el dominio del tiempo. Tal como puede apreciarse en la figura, la frecuencia (número de ciclos) aumenta proporcionalmente con el número de la subportadora. De esta forma si la primera subportadora tiene una frecuencia F, la segunda tendrá una frecuencia 2F, la tercera 3F, etc.

La Figura 3-11 muestra la forma en que un flujo de datos es dividido para modular los subcanales de una señal OFDM. La demodulación y la modulación de OFDM son extremadamente rápidas y eficientes gracias al uso de la transformada rápida de Fourier FFT [E.B Brigham, 1988], [J.F.James, 2003] y su inversa IFFT, respectivamente. Ambas son técnicas matemáticas ampliamente utilizadas en el procesamiento de señales digitales y que pueden calcularse de forma rapidísima gracias al uso de procesadores especializados.



OFDM es un sistema de modulación de multiportadora que nos permite alcanzar una enorme eficiencia en el uso de espectro radioeléctrico en las transmisiones inalámbricas. Se ha transformado en el sistema de modulación de facto en gran parte de los sistemas modernos de comunicaciones inalámbricas, incluidas tecnologías como 3G, 4G, WiFi o WiMax. Es utilizado incluso en los sistemas de ADSL (Asynchronous Digital Subscriber Line) comúnmente utilizados en la actualidad para conectar los hogares a Internet a través de la línea telefónica.

3.4.2 Modulación Digital en ISDB-T: la compensación entre potencia de recepción y la tasa de transmisión de datos

La modulación es una técnica que nos permite representar la información transmitida de un punto a otro mediante la variación de la forma de una señal. Si lo que estamos transmitiendo es información digital, ésta vendrá en forma de bits, vale decir de unos y ceros. La modulación nos permite mapear esos bits de información a señales sinusoidales en el tiempo. Una señal sinusoidal como la que se aprecia en la Figura 3-4, con período T y amplitud A, está representada por una función cíclica en el tiempo con frecuencia, amplitud y fase, y debemos por lo tanto mapear los bits de información a una combinación de estos tres parámetros. La frecuencia corresponde al número de ciclos por unidad de tiempo de la señal, ésta generalmente se mide en Hertz, equivalente a ciclos por segundo. La mayoría de los sistemas modernos de comunicación, sin embargo, no utilizan la frecuencia como parámetro de modulación (como se hacía en FM) sino la amplitud y la fase.

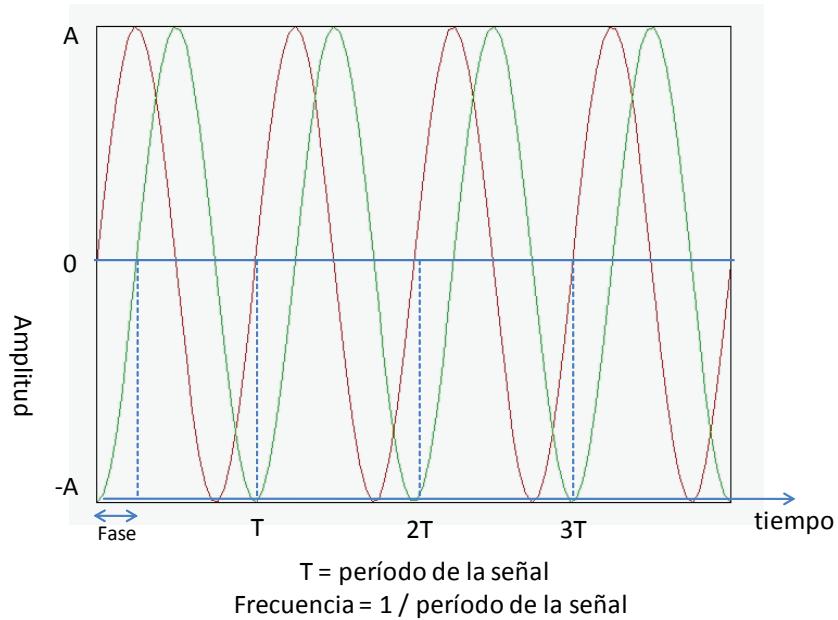
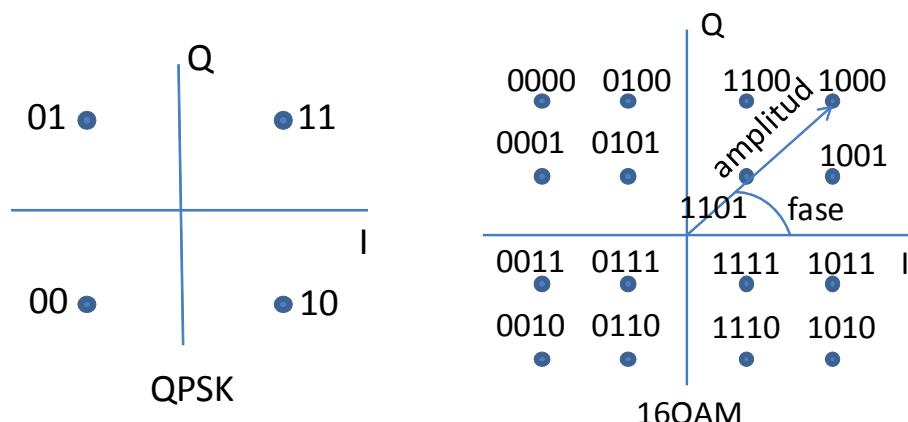


Figura 3-4. Señal sinusoidal de ejemplo

El sistema ISDB-T incluye tres técnicas de modulación: QPSK (quadrature phase-shift keying), 16 QAM (quadrature amplitude modulation) y 64 QAM [T.Oeberg, 2002]. Los tres esquemas de modulación aparecen representados en la Figura 3-5. El sistema QPSK permite transmitir dos bits de información en cada símbolo usando sólo la fase como parámetro de la señal sinusoidal. Al ser dos bits sólo existen cuatro combinaciones posibles que corresponden a los 4 símbolos que se transmiten en QPSK: la combinación (0,0) corresponde a una fase de 45 grados, (1,0) a 135 grados, (1,1) a 225 grados y (0,1) a 315 grados. Este desfase en grados representa en realidad un desfase temporal en donde 360 grados corresponden al período de la señal, vale decir, cuánto demora un ciclo de la señal. En el sistema 16 QAM no se modula sólo la fase sino también la amplitud de la señal sinusoidal según la combinación que se grafica en la Figura 3-5. El sistema 16 QAM consta de 16 símbolos donde cada símbolo representa 4 bits de información. El caso de 64 QAM es similar al de 16 QAM sólo que éste consiste de 64 símbolos donde cada uno representa 6 bits de información como se observa en la Figura 3-5. Debido a problemas de espacio en el caso de 64QAM sólo se han incluido los valores numéricos de 6 bits en la linea superior de la figura.



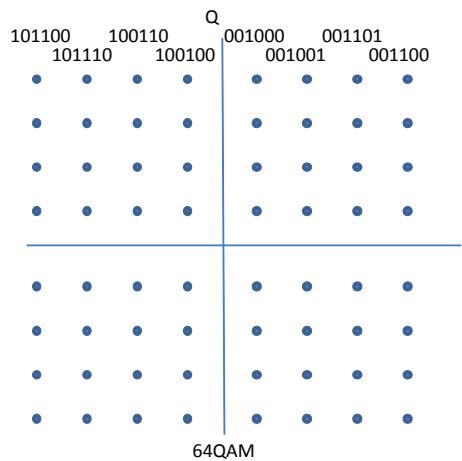


Figura 3-5. Modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM

¿Qué ventajas ofrece cualquiera de estos sistemas de modulación sobre el otro?

La respuesta es simple: lógicamente si fuera posible usaríamos siempre la modulación 64 QAM ya que nos permite enviar 3 y 1,5 veces más información que QPSK y 16QAM por símbolo transmitido, respectivamente. Sin embargo, la mejor modulación dependerá finalmente de cuánto sea el nivel de potencia con que podemos recibir la señal por sobre la potencia de ruido e interferencia. La Figura 3-6 muestra la tasa de transmisión que puede alcanzarse en función de la potencia o calidad de recepción en cualquiera de estos 3 sistemas de modulación. Como puede observarse en la Figura 3-6 existe un balance o *trade-off* entre la potencia de recepción de la señal y la tasa de transferencia de datos. Así por ejemplo, si la potencia de recepción es baja (menos de 10 decibeles por sobre la potencia de ruido e interferencia) conviene transmitir sólo 2 bits por símbolo usando QPSK ya que esta modulación es más robusta frente al ruido y la interferencia. Si la potencia de recepción sobre interferencia y ruido es de un nivel medio (entre 10 y 18 dB) el sistema debería utilizar 16 QAM y transmitir 4 bits por símbolo. Si la potencia de recepción es buena (más de 18 dB por sobre el ruido e interferencia) conviene aumentar la tasa de transferencia de información a 6 bits por símbolo utilizando la modulación 64 QAM. Vale la pena mencionar que la potencia de la señal en decibeles por sobre la de ruido e interferencia denominada SNIR por sus siglas en inglés (Signal to Noise and Interference Ratio) se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$SNIR_{db} = 10 \log \left(\frac{Potencia\ Señal}{Potencia\ Ruido + Potencia\ Interferencia} \right)$$

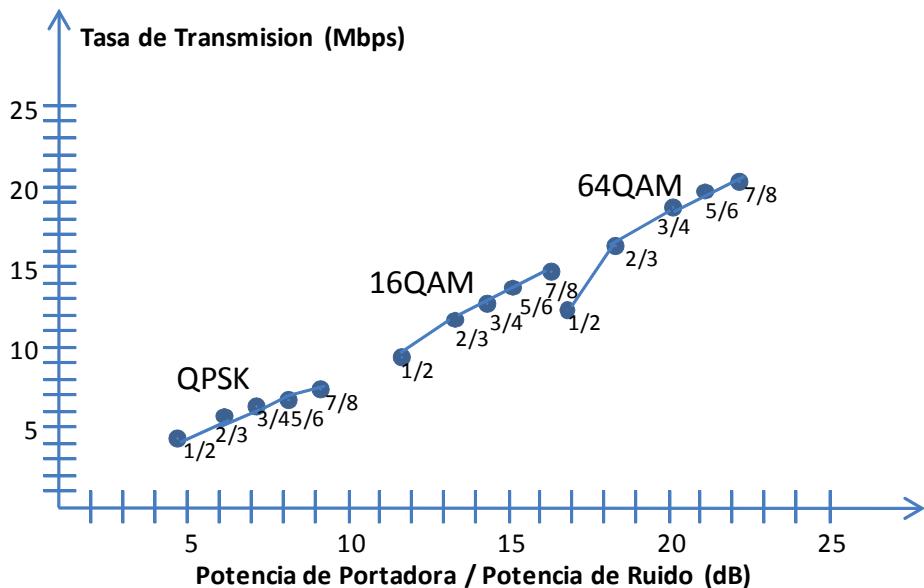


Figura 3-6. Tasa de transmisión en función de la razón de potencia de portadora a ruido

¿Por qué QPSK presenta una mayor fortaleza al ruido y a la interferencia que 16 QAM y a su vez esta última que 64 QAM?

Imaginémonos que estamos en un salón completamente oscuro donde hay una persona emitiendo sonidos que debemos descifrar. Pero eso no es todo ya que no mucho más allá hay un aparato de radio tocando canciones en un idioma extraño (esto es el ruido) y también una sala cercana donde se organiza una fiesta con mucha gente conversando en nuestro propio idioma (esto equivale a la interferencia). Lógicamente a medida que el volumen del ruido y la interferencia se incrementa, la tarea de distinguir un alfabeto de sólo cuatro sonidos diferentes (equivalente a decodificar QPSK) se torna mucho más simple para la persona que oye que hacerlo para uno de 16 sonidos diferentes (equivalente a 16 QAM) o, peor aún, de 64 sonidos diferentes (equivalente a 64 QAM) conservando en todos los casos la misma potencia de emisión del sonido. En la Figura 3-6 se muestra la tasa de transmisión que se alcanza con diferentes esquemas de modulación y tasas de codificación convolucional (bits de datos/ bits en total) en función de la potencia medida en la antena del receptor.

Supongamos por ejemplo que en un sistema de comunicación digital deseamos transmitir el vocablo “OLE” que consta de 3 caracteres. Cada carácter puede representarse en código ASCII (American Standard Code for Information Interchange) con 8 bits de información y así el vocablo puede representarse con un total de 24 bits. Este vocablo puede ser transmitido en 64 QAM, 16 QAM y QPSK con 4, 6 y 12 símbolos, respectivamente. Debido a que la tasa de transmisión de símbolos es constante, el ancho de banda utilizado por QPSK es aproximadamente el doble del utilizado por 16 QAM y el triple del utilizado por 64 QAM. Dado que el ancho de banda es un recurso escaso 64 QAM es siempre la mejor opción desde el punto de vista del uso de recursos de ancho de banda y por ello lo utilizaremos siempre que la potencia de recepción sea la suficiente. Si no lo es, el sistema de modulación deberá ajustarse a 16 QAM como segunda alternativa y si es aún más baja a QPSK. En el caso del

sistema ISDB-T, sin embargo, lo que se hace es realizar estudios de cobertura de las antenas transmisoras y posteriormente seleccionar un sistema de modulación que se mantiene fijo en todas las zonas de cobertura. **Es así como en Japón se decidió utilizar en todo el territorio nacional la modulación de 64 QAM con la tasa de codificación convolucional para corrección de errores de 3/4 donde por cada tres bits de información se agrega un cuarto con información redundante para corregir posibles errores en la transmisión.**

Valga mencionar que aún cuando la modulación de menor grado utilizada en ISDB-T es QPSK, existe una modulación aún más resistente al ruido y la interferencia llamada BPSK (binary phase shift keying). En la modulación BPSK cada símbolo representa un solo bit de información (0 o 1). Las modulaciones BPSK, QPSK y 16 QAM son ampliamente utilizadas en el área de telefonía móvil y en redes WiFi donde incluso se realiza adaptación automática de la modulación de acuerdo a la potencia de recepción. En inglés esta última técnica es conocida como *Adaptive Modulation*.

Existen varios esquemas de modulación de bits o símbolos de información. Los sistemas más utilizados son el BPSK, QPSK, 16QAM and 64QAM que nos permiten incluir en un solo símbolo transmitido 1, 2, 4 y 6 bits, respectivamente. Transmitir una mayor cantidad de bits por símbolo es siempre lo mejor ya que significa una utilización más eficiente del espectro radioeléctrico, sin embargo, la “regla de oro” es que entre más bits ponemos dentro de un solo símbolo mayor es la probabilidad de que se produzcan errores durante la transmisión. Esto es debido a que ante una misma potencia de transmisión la “distancia” entre símbolos disminuye a medida que aumentamos la cantidad de bits por símbolo. Esto queda más claro comparando los mapas de símbolos de QPSK y 64 QAM en la Figura 35. Idealmente la modulación debiera cambiar en forma adaptativa en cada receptor dependiendo de su potencia de recepción. Si el receptor está cerca de la antena transmisora podría perfectamente recibir símbolos enviados con 64QAM mientras que otro receptor lejos de la antena podría recibir datos enviados con modulación QPSK. Esto se hace por ejemplo en el caso de las redes de transmisión unicast (punto a punto) como WiFi con un esquema llamado “modulación adaptiva”. Sin embargo, no es posible hacerlo en caso de un sistema de radiodifusión (punto a multipunto) como ISDB-T donde un solo transmisor transmite a miles o millones de receptores a la vez. En el caso del estándar de TV digital de Japón lo que se ha hecho es fijar el sistema de modulación 64QAM para todo el territorio nacional y colocar antenas o repetidoras en los sitios donde se requiera luego de hacer estudios de cobertura en todas las regiones del país.



3.4.3 Intervalo de guarda en OFDM: haciendo frente al problema de multirayectorias debidas a reflexiones

En la sección 3.4.1 mencionamos las ventajas que ofrece OFDM frente al problema de multirayectorias producido por las reflexiones (o “rebotes”) y refracciones de una señal electromagnética que viaja por el aire en obstáculos como edificios, árboles, postes de alumbrado, etc. Para graficar un poco mejor en qué consiste este problema consideremos la Figura 3-7 en que un receptor recibe tres rayos de una señal: uno en

línea directa desde el transmisor y otros dos que provienen de la misma señal reflejada en obstáculos. Lo primero que debemos considerar es que los tres rayos llegarán en tiempos diferentes al receptor. El rayo que llega más rápido es lógicamente aquel que llega en línea directa desde el transmisor mientras que los rayos reflejados llegarán con cierto retraso que dependerá básicamente de la distancia que hayan recorrido en total incluyendo sus reflexiones o rebotes. El tiempo que se demora un rayo desde el transmisor al receptor puede ser calculado como la distancia total recorrida por el mismo dividida por la velocidad de propagación en la atmósfera, la cual en la práctica resulta ser un poco menor que la velocidad de la luz (de aproximadamente 298 mil kilómetros por segundo). En la práctica estas diferencias de tiempo entre diferentes rayos de emisión son del orden de decenas o centenas de microsegundos dependiendo del canal de propagación, especialmente si éste es urbano, rural, o si la propagación se realiza dentro de alguna edificación. El problema principal radica en que esos escasos (y aparentemente inofensivos) microsegundos son suficientes para producir interferencia entre símbolos enviados consecutivamente por el transmisor. A modo de ejemplo supongamos que un transmisor usa QPSK y envía datos a 4 Mbps. Eso equivale a una tasa de transmisión aproximada de 2 millones de símbolos por segundo. El espacio de tiempo entre dos símbolos consecutivos será en este caso la mitad de un microsegundo. Si el segundo y tercer rayo incidente en el receptor (ambos con una menor amplitud que el primero debido a la atenuación producida por su mayor camino recorrido) arriban tan sólo 1 y 2 microsegundos más tarde que el primero se producirá un traslape de símbolos diferentes con amplitudes disímiles (como se muestra en la Figura 3-8) que hacen más difícil al receptor la tarea de decodificar correctamente la información transmitida. La herramienta que se utiliza para corregir esta interferencia que produce el traslape parcial de diferentes símbolos con amplitudes disímiles se llama *ecualizador* y es una parte importantísima de todo sistema de recepción de portadora única. Es sin duda la parte más compleja de un receptor en una comunicación inalámbrica y también la más costosa. Usualmente un ecualizador tendrá N registros de memoria para contrarrestar la interferencia producida por los N-1 símbolos previos.

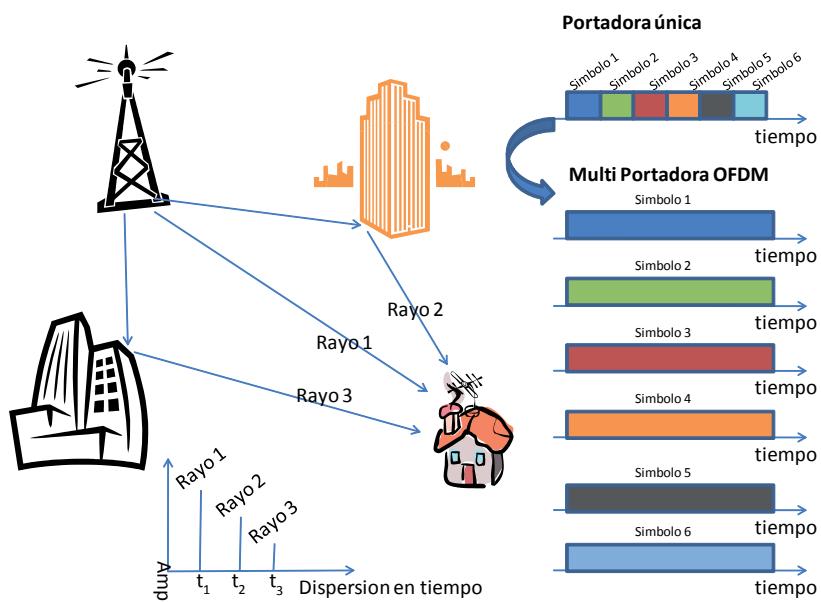


Figura 3-7. Multitrayectorias, dispersión en el tiempo y OFDM

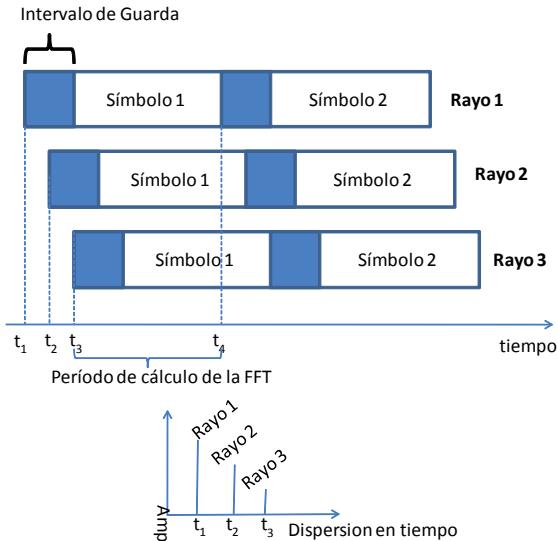


Figura 3-8. Multitrayectorias e intervalo de guarda

Utilizando OFDM en uno de los 3 modos de transmisión de ISDB-T (ver Tabla 3-1) se puede dividir el flujo de símbolos de información en 432 subcarriers o subportadoras. Dentro de cada una de estas subportadoras los símbolos tendrán una duración de 432 veces la original. Esto permite que frente a los mismos dos rayos con retrasos de 1 y 2 microsegundos del ejemplo anterior el receptor esté en mejores condiciones de decodificar con éxito la información. El traslape de símbolos consecutivos aún ocurre pero su duración representa proporcionalmente sólo una pequeña parte de la duración de un símbolo y no produce el traslape de símbolos completos como en el caso anterior. Esto puede observarse en los ejemplos de las Figura 3-7 y Figura 3-8 donde se muestra el caso de tres rayos incidentes con amplitudes disímiles que llegan al receptor en diferentes tiempos y cómo se extiende la duración de símbolos en OFDM con respecto al sistema tradicional de una portadora. Pero el sistema OFDM ofrece aún más: dado que este pequeño traslape aún puede ocasionar problemas en la decodificación, se define en OFDM lo que se llama el “intervalo de guarda” que equivale a una extensión temporal del mismo símbolo transmitido. Su duración debe ser idealmente mayor al máximo retardo asociado a los rayos incidentes observado por el receptor en el canal de transmisión. Si no hay rayos incidentes que lleguen al receptor con un retardo mayor a la duración del intervalo de guarda como ocurre en el ejemplo de la Figura 3-8, OFDM garantiza la ortogonalidad o independencia de los diferentes subcanales ya que la distorsión ocasionada por el traslape de símbolos consecutivos puede ser suprimida por completo. En el caso de OFDM si el intervalo de guarda es mayor al máximo retardo experimentado en el canal cada símbolo sólo interferirá consigo mismo y por lo tanto en el receptor se requiere sólo un ecualizador de una etapa o registro, lo que hace que el algoritmo de recepción sea muchísimo más simple y efectivo. Esto también abarata muchísimo el costo del ecualizador requerido.

OFDM ofrece enormes ventajas con respecto a un sistema convencional de transmisión que utiliza una portadora única como el caso del sistema estadounidense de televisión ATSC [R.S.Chernek, 2001]. Tal como se muestra en la Figura 3-8 si la máxima dispersión en el tiempo de la señal debido a las multitrayectorias no es

mayor al intervalo de guarda entonces seremos capaces de decodificar perfectamente el símbolo usando el período de cálculo de FFT que se observa en la figura y un ecualizador de tan sólo una etapa.

En el sistema ISDB-T existen los tres modos de transmisión que se muestran en la Tabla 3-1. La duración de cada símbolo difiere en cada modo y puede tomar uno de los siguientes tres valores: i) 252 microsegundos, ii) 504 microsegundos o iii) 1008 microsegundos. Dependiendo de la potencia de transmisión, las condiciones de propagación y de las frecuencias que se estén utilizando en antenas colindantes la duración del intervalo de guarda de OFDM puede fijarse en uno de los siguiente cuatro valores con respecto a la duración de un símbolo: i) 1/4 de símbolo, ii) 1/8 de símbolo, iii) 1/16 de símbolo, y iv) 1/32 de símbolo.

Tabla 3-1. Modos de transmission de ISDB-T

ISDB-T	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Número total de subportadoras	1249	2497	5617
Número de subportadoras con datos por segmento	96	192	384
Separación entre subportadoras (KHz)	3,968	1,984	0,922
Duración de un símbolo (microsegundos)	252	504	1008
Número de símbolos	204	204	204
Intervalo de guarda (microsegundos)	-	-	126
Máximo intervalo de guarda (microsegundos)	63	126	252
Radio de recepción (Km)	18.9	37.8	75.6

Los 3 modos de transmisión a nivel de OFDM se complementan con la modulación que se utiliza para los símbolos transmitidos. En Japón se utilizan dos esquemas básicos denominados simplemente como A y B. El esquema B es utilizado para las transmisiones a receptores fijos a través de 12 de los 13 segmentos en que se divide el canal de 6 MHz. El esquema A es utilizado para las transmisiones a receptores móviles del tipo OneSeg, descrito en el capítulo 6. Un resumen de los parámetros asociados a los esquemas A y B puede verse en la Tabla 3-2.

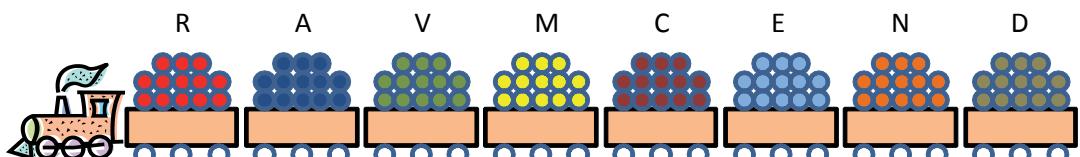
Tabla 3-2. Esquemas de transmisión a nivel de símbolos dentro de OFDM

Esque- ma	Tipo de Receptores	Modulación	Tasa de codificación convolucional	Número de Segmentos
A	Móviles	QPSK	2/3	1
B	Fijos	64QAM	3/4	12

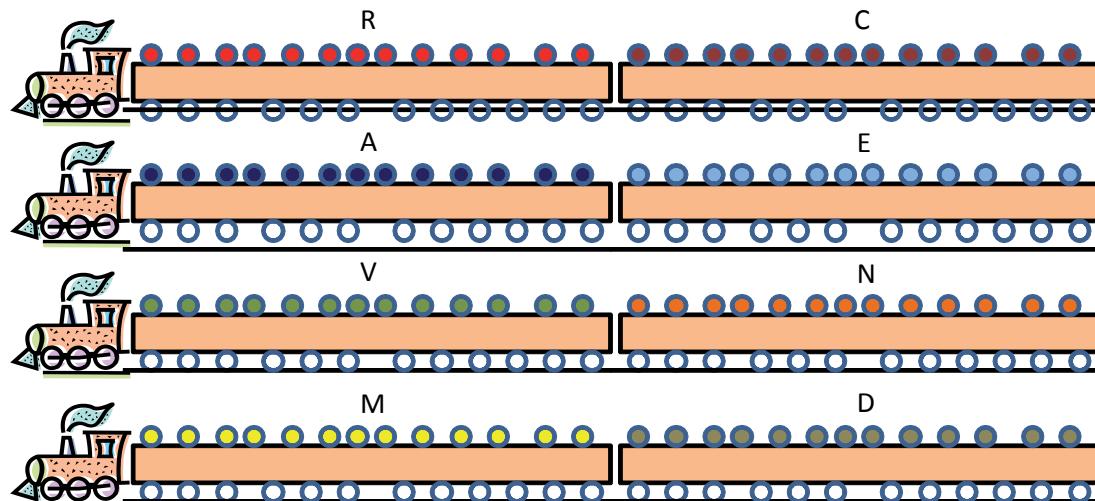
3.4.4 ¿Qué tiene que ver OFDM con un tren de carga?

Modulación digital y OFDM son de por sí temas de alta complejidad técnica que requieren de conocimientos básicos de telecomunicaciones para comprenderlos a cabalidad. Tratemos de imaginar en qué consiste OFDM con un ejemplo simple. Imaginemos un tren de carga con varios carros que se traslada entre dos ciudades distantes, en el que cada carro lleva balones de un color diferente. En esta analogía cada carro representa un símbolo con información. El ruido e interferencia en el canal están representados por baches en la vía que hacen saltar a los carros del tren junto con los balones que transportan. Si un bache es muy grande es muy probable que parte de los balones de un carro salten a uno de los carros contiguos haciendo que balones de diferentes colores se mezclen.

Una señal de portadora única está representada por un solo tren con muchos carros cortos mientras que una señal de multiportadora como OFDM aparece representada por varios trenes con pocos carros muy largos tal como se muestra en la Figura 3-9. En ambos casos la cantidad de pelotas de cada color es exactamente igual y el largo de todos los trenes es el mismo también. En el ejemplo de la Figura 3-9(a) el tren que representa la portadora única arrastra ocho carros, cada uno representando un símbolo diferente mientras que cada uno de los cuatro trenes de la Figura 3-9(b) arrastra dos carros. Los trenes de la Figura 3-9(b) tienen además otra característica: todos juntos ocupan un espacio equivalente al carril que usa el tren de la Figura 3-9(a) aunque viajan por carriles diferentes. Si los cinco trenes de la Figura 3-9 (a) y Figura 3-9 (b) corren a la misma velocidad simultáneamente entre dos ciudades encontrando los mismos baches (equivalente a interferencia) en el camino es claro que todos llegarán a destino con la misma cantidad de pelotas o símbolos pero ¿en cuál de los dos sistemas se producirá una menor mezcla de balones de diferentes colores?. Por supuesto que entre mayor es la mezcla de colores más difícil se hace para el receptor decodificar cada uno de los símbolos del mensaje enviado. La menor mezcla de balones de colores diferentes se producirá lógicamente en el caso de los cuatro trenes de la Figura 3-9 (b). Bajo un principio muy similar es que las múltiples portadoras juntas de OFDM resultan mucho más resistentes al ruido que un sistema de portadora única.



(a) Analogía de sistema de portadora única



(b) Analogía de sistema de multiportadoras

Figura 3-9. Analogía entre un tren de carga y OFDM

Una de las mayores ventajas técnicas proporcionadas por OFDM es su resiliencia frente al fenómeno de multirayos experimentado por cualquier señal inalámbrica. Dicho fenómeno se produce por los fenómenos de reflexión, difracción y dispersión que experimenta la señal en obstáculos físicos que encuentra en su propagación a través del aire o del espacio. El fenómeno de trayectorias múltiples se resuelve en un sistema tradicional de portadora única con un componente llamado ecualizador que atenúa el efecto que produce el traslape de símbolos consecutivos. Una señal OFDM divide el flujo de datos en múltiples portadoras que se transmiten simultáneamente. Como resultado la duración de un símbolo dentro de cada portadora es muchas veces mayor a la de un símbolo en un sistema equivalente de portadora única. Al extender la duración de cada símbolo el traslape de símbolos consecutivos se atenúa de forma significativa. Pero eso no es todo, OFDM también agrega a cada símbolo un período llamado "intervalo de guarda" que no es nada más que una extensión del tiempo o duración de cada símbolo. Si este intervalo de guarda es mayor al máximo retardo producido en el canal entonces está garantizado de que no se producirá ningún traslape de símbolos consecutivos y por lo tanto la señal transmitida podrá recibirse sin problemas de interferencia entre símbolos ISI (inter-symbol interference). Esta característica ha puesto a OFDM como la tecnología favorita en los sistemas de comunicaciones inalámbricos desde comienzos del siglo XXI, entre los que se cuentan 3G, Long Term Evolution (LTE), 4G, WiFi, WiMax, etc. ya que permite reducir de forma sustancial la tasa de errores asociada a una cierta potencia de transmisión. Además, debido a que los ecualizadores que requiere OFDM son mucho menos complejos que sus pares de portadora única, el costo de producción de receptores basados en esta tecnología ha logrado reducirse significativamente.



3.5 Sistema de corrección de errores

Toda transmisión sobre un canal inalámbrico está sometida a interferencia y ruido. A medida que la potencia de la interferencia y del ruido con respecto a la de la señal que deseamos recibir se incrementa aumentan también los errores en la transmisión, los que se manifiestan en forma de símbolos que son decodificados erróneamente en el receptor o que simplemente no pueden decodificarse. Para hacer frente a este problema existen técnicas de corrección de errores que en ISDB-T pueden dividirse en dos grandes grupos: *códigos de bloque* y *códigos convolucionales*. Ambas técnicas son ampliamente utilizadas en prácticamente todos los sistemas modernos de transmisión digital inalámbrica: WiFi, WiMax, telefonía móvil (2G y 3G), comunicaciones satelitales, etc.

Desde luego que la televisión digital tampoco escapa a los errores que se producen en el canal y nos vemos obligados a hacer lo que esté en nuestra manos para detectarlos y/o corregirlos. El sistema de corrección de errores de los tres grandes estándares de televisión digital (ATSC, DVB y ISDB-T) utiliza una clase de códigos de bloque llamados códigos Reed-Solomon, inventados en 1960 en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) por los científicos Irvin Reed y Gustave Solomon. Éstos han sido utilizados ampliamente durante casi 3 décadas no tan sólo en sistemas de comunicaciones sino también para la protección de la información almacenada en CDs, DVDs, discos BlueRay y en sistemas de almacenamiento de nivel empresarial basados en la tecnología RAID [R.Barker, 2001].

Los códigos Reed-Solomon agregan bits redundantes o de paridad a los bits de información que deseamos transmitir. En el caso del sistema japonés de televisión digital en cada paquete de información se envían 188 bytes (1 byte = 8 bits) de información y se agregan 16 bytes de paridad formando así un paquete de información de tamaño constante de 204 bytes. El paquete de información de 188 bytes de tamaño fijo proviene del formato contenedor de video, audio y datos que se utiliza en ISDB-T: el MPEG2-TS o TS [W.Fischer, 2008], descrito en la sección 5. Los 16 bytes de paridad son calculados en base a los 188 bytes de información original usando el álgebra de campos finitos (o de Galois), inventada por el brillante matemático francés Evaristo Galois (ver recuadro al final de la sección para saber un poco más sobre su vida)

Los códigos Reed-Solomon en general se describen con la dupla (N,K) siendo N el número total de símbolos enviados y K el número de símbolos de información. El máximo número de símbolos con errores que pueden ser corregidos es $(N-K)/2$ y el máximo número de símbolos que pueden ser completamente recuperados si sabemos su posición dentro de la secuencia de transmisión es $(N-K)$. En el caso de ISDB-T se utilizan códigos Reed-Solomon (204,188) por lo tanto en un paquete con 204 bytes podemos corregir hasta 8 bytes erróneos y recuperar 16 bytes si se sabe la posición de los errores. Los códigos Reed-Solomon tienen un excelente desempeño en canales de comunicación donde se producen errores en forma de ráfaga (muchos errores producidos en forma consecutiva), un problema típico que aqueja a los canales inalámbricos, especialmente cuando el transmisor o receptor se hayan en movimiento.

Otro mecanismo de corrección de errores que se utiliza en el sistema ISDB-T es basado en los *códigos convolucionales* [A.Dholakia, 1994]. En un código convolucional

una secuencia de m bits de información es transformada en una secuencia de n bits donde $n \geq m$ y la proporción n/m es llamada la *tasa del código*. La transformación es función de los últimos k bits de información, siendo k la longitud del código. Se dice por lo tanto que k equivale a la memoria del código. En el sistema ISDB-T se puede optar por una tasa de código de 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 o 7/8. Por ejemplo, en el caso de una tasa de código de 3/4 por cada 3 bits de información se transmiten 4 bits codificados. En el lado del receptor se utiliza un algoritmo conocido como decodificación de Viterbi [T.K.Moon, 1999], inventado en 1967 por el genial Andrew Viterbi, científico (y más tarde empresario) italiano nacionalizado estadounidense. El algoritmo de decodificación de Viterbi se ocupa hoy en día en comunicaciones militares, satelitales y espaciales e incluso en muchos de nuestros teléfonos celulares. Consiste básicamente en alinear a los bits recibidos (incluidos los bits erróneos) y extraer la secuencia de bits transmitida más probable en base a un seguimiento de los estados (los que dependen de los bits de información anteriores) en el decodificador.

En el lado del receptor el código convolucional es utilizado antes que el código Reed-Solomon para decodificar la información. Los errores que no pueden ser corregidos por el decodificador de Viterbi pasan en una etapa siguiente al decodificador de Reed-Solomon donde idealmente serán corregidos.

Los códigos de corrección de errores forman parte de una de las áreas de las telecomunicaciones donde el uso de las matemáticas duras y la invención de algoritmos de procesamiento más potentes confluyen en un solo propósito: reparar el mayor número de errores posible de la forma más rápida y eficiente. ¿Pero dónde parar?, ¿existe un límite?. La respuesta es afirmativa: existe un límite teórico que dicta el mejor desempeño que un sistema de comunicaciones puede alcanzar. Se trata del límite teórico de Shannon [J.R.Pierce, 1980], para muchos el padre de lo que hoy conocemos en el área de informática y telecomunicaciones como *teoría de la información* [J.R.Pierce, 1980]. El límite de capacidad del canal de Shannon muestra en forma matemática la máxima tasa de transmisión que puede alcanzarse en un canal de comunicaciones dadas la potencia de la señal recibida y la potencia del ruido en el canal. El límite de capacidad del canal de Shannon se muestra en la siguiente expresión:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

En la fórmula de arriba C es la capacidad del canal en bits por segundo, B es el ancho de banda del canal (en Hertz), S es la potencia de la señal recibida en Watt o mili Watt, y N es la potencia de ruido recibido en la misma unidad que S (Watt o mili Watt). Nótese que a medida que se reduce el ruido la capacidad del canal aumenta logarítmicamente con la potencia de la señal recibida. En el caso extremo en que la potencia de ruido es nula (cosa que nunca ocurre en la realidad) la capacidad del canal es infinita sin importar el ancho de banda disponible del canal ni la potencia de recepción de la señal útil. El límite de Shannon considera un canal con ruido gaussiano o blanco que posee una potencia espectral constante en todo el dominio de la frecuencia. Este tipo de ruido es un caso idealizado de la interferencia que, por ejemplo, no considera los fenómenos de desvanecimiento que se producen en un canal inalámbrico real. Sin embargo, técnicas eficientes de Interleaving (que veremos

en la sección 3.6) pueden contribuir a hacer que el canal tenga un comportamiento más similar al de un canal gaussiano ideal.

Los códigos que se han acercado más al límite de Shannon son los códigos Turbo y los LDPC (low density parity check) [S.J.Johnson, 2009]. Los primeros fueron inventados en 1993 por el ingeniero electrónico francés Claude Berrou y son utilizados ampliamente en sistemas de telefonía móvil. Su funcionamiento se basa en sistemas de códigos convolucionales que trabajan en forma paralela e independiente. Los segundos funcionan en base a *matrices binarias dispersas* y presentan un desempeño excelente que supera en muchos escenarios a los códigos Turbo, y es por esto que forman parte de cada vez más estándares de radiocomunicaciones. Fueron inventados en 1962 por Robert Gallager en el MIT [Massachusetts Institute of Technology] en el marco de su trabajo doctoral. Por lo mismo muchas veces son llamados códigos de Gallager. La genial investigación doctoral de Gallager pasó décadas sin que nadie la notara hasta hace aproximadamente una década cuando se encontró que este tipo de códigos podía proveer de un desempeño excelente en la corrección de errores.

El gran matemático Evaristo Galois murió en un duelo de honor tan sólo a los 20 años de edad. Dice la historia que Galois, sabiendo que muy probablemente moriría al día siguiente dada la capacidad muy superior de su adversario pasó su última noche transcribiendo lo más rápido posible sus últimos teoremas matemáticos. Su esfuerzo valió la pena: Galois murió sin saber que mucho de lo que alcanzó a escribir en esa última noche se transformaría 150 años más tarde en el fundamento teórico de los sistemas de corrección de errores y de criptografía utilizados en las comunicaciones digitales del siglo XX y XXI. Muchos dicen que de haber vivido una vida normal de 60 o 70 años Galois se hubiera convertido en el mayor genio matemático de la historia pero eso lamentablemente es algo que nunca podremos saber.

Sería injusto sin embargo no dedicar parte de este recuadro a otros grandes científicos que han proporcionado los fundamentos de los sistemas de telecomunicaciones modernos: el estadounidense Claude Shannon es considerado “el padre de la teoría de la información” por sus grandes aportes a las bases teóricas de los sistemas de comunicaciones, los estadounidenses Irvin Reed y Gustave Solomon son más que conocidos por sus códigos de corrección de errores utilizados desde 1970 en todo tipo de dispositivos de almacenamiento y en la mayoría de las misiones espaciales, el italiano Andrew Viterbi se ha ganado un merecido reconocimiento por su eficiente algoritmo de decodificación de códigos convolucionales, ampliamente utilizado en sistemas militares, de telefonía celular y de comunicaciones espaciales. Por último vale la pena destacar a dos personas que han creado recientemente códigos de corrección de errores con una eficiencia que se aproxima al límite establecido por Shannon: el francés Claude Berrou con sus códigos de corrección de errores Turbo y el estadounidense Robert Gallager con sus códigos de corrección de errores basados en matrices dispersas.



3.6 Interleaving

La técnica de Interleaving [D.Tse, 2005] o *entrelazado de datos* se basa en un principio básico de telecomunicaciones: tratar de corregir errores distribuidos es mucho más fácil que corregir errores producidos en forma consecutiva o en ráfaga. Esto está directamente relacionado con el límite de capacidad de Shannon descrito en la sección anterior ya que una distribución más homogénea de los errores en el tiempo y la frecuencia hace que el canal se asimile a uno de ruido blanco o “gaussiano”, el canal idealizado para modelar el ruido y la interferencia. Lamentablemente el comportamiento de los canales inalámbricos dista mucho de este canal idealizado, especialmente cuando existe movimiento relativo entre el transmisor y el receptor o cuando hay fenómenos de sombra u ocultamiento del receptor por causa de un objeto mucho mayor como un cerro o una torre.

El objetivo del Interleaving es ayudar tanto al código Reed-Solomon como al código convolucional a hacer bien su trabajo de corregir los errores producidos durante la transmisión. La técnica de Interleaving consiste en simplemente reordenar o alterar el orden de los símbolos de información transmitidos en el dominio del tiempo o la frecuencia. La razón del por qué el Interleaving temporal puede ayudar a decodificar correctamente la información transmitida en el lado receptor puede apreciarse gráficamente en la Figura 3-10.

3.6.1 Interleaving en el tiempo

Tal como se muestra en la Figura 3-10 la técnica de Interleaving en el tiempo consiste en alterar el orden temporal de transmisión de los paquetes de información después de que éstos han sido codificados con los códigos de corrección de errores de Reed Solomon y convolucionales. Si en el canal de transmisión se produce una ráfaga de errores como la que se aprecia en la Figura 3-10 la técnica de Interleaving nos ayudará a distribuir homogéneamente los errores en el tiempo para facilitar la tarea del decodificador en el equipo receptor. El período de tiempo en el que se reordenan los paquetes de información es el factor más importante del Interleaving ya que define la latencia o tardanza con que llegarán los paquetes antes de poder reconstruir el orden de transmisión original. Lógicamente, entre mayor es el período de Interleaving mayor resistencia se tiene frente a los errores en ráfaga debido a que la información queda mejor distribuida temporalmente, pero al mismo tiempo existe la desventaja de una mayor latencia o tardanza antes de poder reconstruir el orden de transmisión original y lógicamente un mayor procesamiento en el receptor para hacer este reordenamiento a tiempo. En ISDB-T la técnica de Interleaving se usa en cada uno de los 13 segmentos de información y el período del Interleaving se ajusta al modo de transmisión de manera de proveer el mejor nivel de recepción posible.

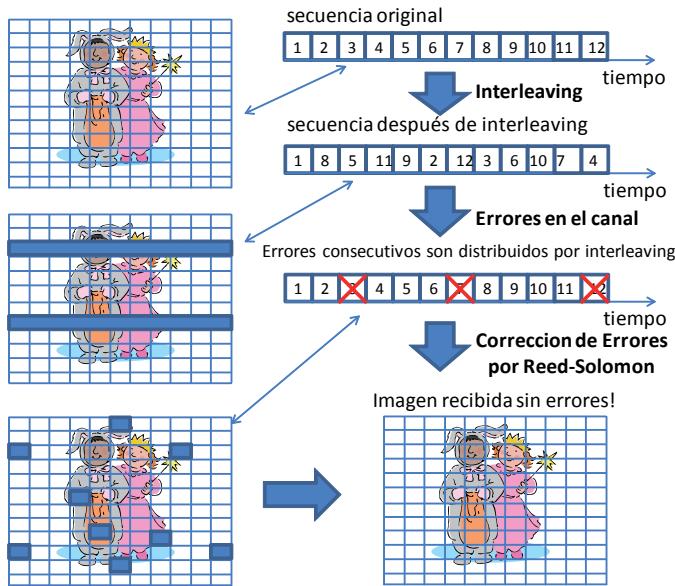


Figura 3-10. Interleaving en el dominio del tiempo

3.6.2 Interleaving en la frecuencia

La técnica de Interleaving también puede ser utilizada en el dominio de la frecuencia. Debido a los problemas de trayectorias múltiples y de desvanecimiento producidos en el canal inalámbrico la ganancia en algunos canales de frecuencia puede caer muchísimo por momentos, ocasionando una ráfaga de errores en todos los símbolos transmitidos en esa banda de frecuencia y durante ese lapso de tiempo. Si reordenamos los paquetes de información de manera de redistribuirlos en el dominio de la frecuencia podemos proveer una mayor resistencia a esta clase de errores. En ISDB-T esta técnica se utiliza dentro de cada uno de los 13 segmentos de datos.

Tal como se mencionó anteriormente una de las técnicas más utilizadas para hacer frente a los errores en ráfaga que afectan particularmente a las comunicaciones inalámbricas es el Interleaving o entrelazado de datos. El principio de esta técnica es el mismo que el de barajar las cartas para comenzar una nueva partida. Barajamos las cartas para que éstas adquieran un orden aleatorio y no aparezca ningún conjunto de cartas consecutivas que muestren o permitan hacer alguna jugada de la partida anterior. Con el Interleaving “barajamos” o reordenamos los símbolos de información transmitidos de manera que si se producen errores en ráfaga que afectan a una cadena de símbolos consecutivos en el tiempo, se vean afectados diferentes bloques de información (o “jugadas” siguiendo con la analogía de las cartas) en los que uno o dos símbolos menos no es un problema que no puedan manejar los mecanismos de corrección de errores de Reed Solomon o los códigos convolucionales. De esta forma, al producirse errores en diferentes bloques de información resulta mucho más fácil para el receptor corregir los errores y decodificar correctamente la información. Si no se utiliza Interleaving los errores en ráfaga pueden producir errores en símbolos consecutivos que hagan imposible la corrección y posterior decodificación en el receptor. La técnica de Interleaving es una de las más utilizadas en los sistemas de comunicaciones inalámbricos modernos, incluidos los sistemas de telefonía celular.



3.7 Diagrama en bloque del transmisor

Ahora que ya hemos revisado todos los componentes más significativos del sistema de transmisión, podemos dibujar un diagrama de bloques simplificado del equipo transmisor como el que muestra la Figura 3-11.

En el estándar ISDB-T original los bits de vídeo, audio y datos son almacenados en el formato contenedor MPEG2-TS que permite el almacenamiento de diferentes tipos de media en el mismo archivo. Cada paquete de MPEG2-TS tiene 188 bytes. A estos se agregan los 16 bytes de paridad para la corrección de errores del codificador Reed-Solomon con lo que cada paquete queda compuesto de 204 bytes. En la etapa siguiente el flujo de paquetes es dividido en un conjunto de flujos de datos de una menor tasa de transmisión; en cada uno de éstos se codifican los datos con un código convolucional de corrección de errores que alimentará cada uno de las subportadoras de OFDM. Las diferentes subportadoras de OFDM se mezclan en un flujo de datos sometido a Interleaving en el dominio del tiempo y luego de la frecuencia dentro de cada uno de los 13 canales de datos. Posteriormente se forma el símbolo OFDM a partir de los símbolos provenientes de cada uno de los flujos de datos codificados de la etapa anterior. A ellos se agregan también subportadoras llamadas “piloto”, utilizadas para evaluar periódicamente las características del canal en ciertas bandas de frecuencia y en ciertas *ranuras* de tiempo. El símbolo OFDM es transformado al dominio de la frecuencia calculando la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT) de los símbolos que arriban después de la etapa de Interleaving. Posteriormente, al símbolo OFDM se le agrega el intervalo de guarda que corresponda al modo de transmisión (uno de los descritos en la Tabla 3-1). Por último el símbolo OFDM es modulado por una señal portadora en la banda UHF y transmitido.

Los parámetros de transmisión asociados a cada uno de los 3 modos de transmisión en ISDB-T pueden ser observados en la Tabla 3-1. El modo 1 se utiliza en la tecnología OneSeg para dispositivos móviles debido a su gran resistencia al corrimiento de la frecuencia de transmisión ocasionado por el efecto Doppler (ver recuadro al final de la página). Los modos de transmisión 2 y 3 con su mayor intervalo de guarda de OFDM, se utilizan en redes de una sola frecuencia (single frequency network) para contrarrestar el problema de multirayectorias originado por antenas colindantes que utilizan la misma frecuencia de transmisión. Esta mayor resistencia se debe al mayor espacio entre subportadoras vecinas en el dominio de la frecuencia.

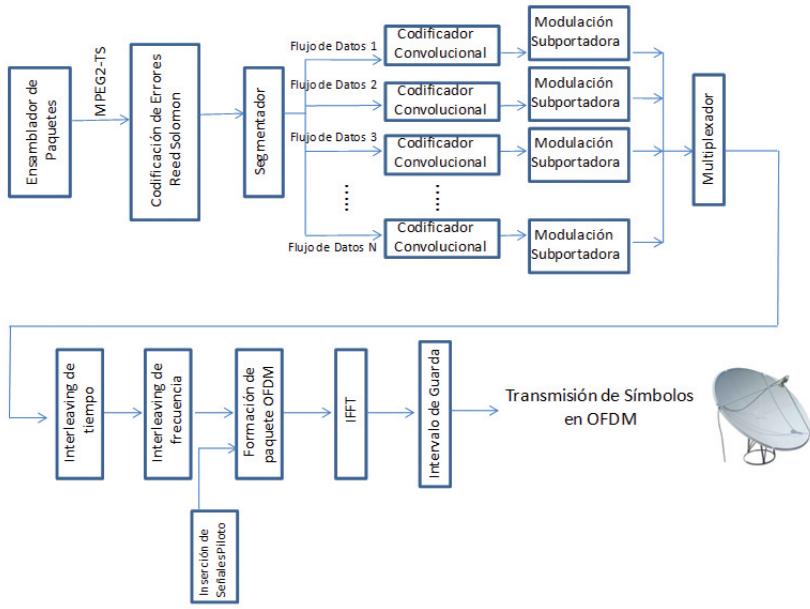


Figura 3-11. Diagrama en bloques del sistema de transmisión

El efecto Doppler es un corrimiento de la frecuencia de emisión percibida en el receptor, producida por el movimiento relativo entre el transmisor y el receptor. En el caso del sonido, este fenómeno puede ser observado fácilmente con el sonido de la sirena de una ambulancia que se aproxima hacia nosotros, lo que origina un corrimiento hacia una frecuencia más alta en el receptor, y que luego se aleja, generando un corrimiento a una menor frecuencia en el receptor. El mismo fenómeno puede observarse en señales electromagnéticas como las de una transmisión móvil e incluso en la luz. Los astrónomos saben si una galaxia se aleja o se acerca a nosotros gracias al corrimiento hacia el rojo o hacia el azul que experimenta la luz visible proveniente de ella.

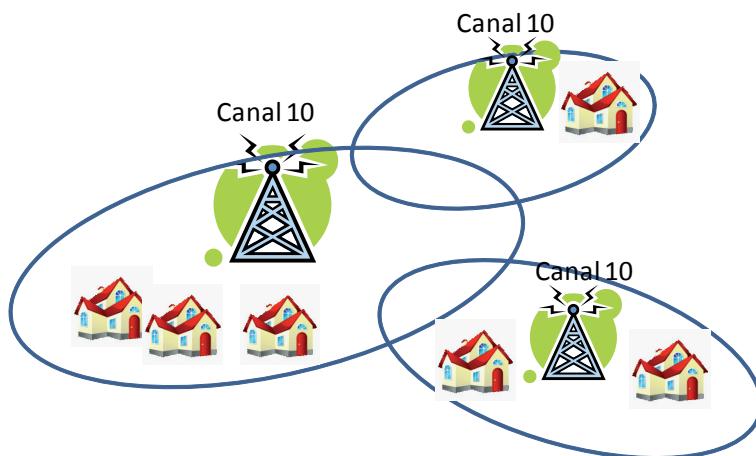
Por otro lado, vale la pena mencionar que la transformada rápida de Fourier y su inversa son herramientas ampliamente utilizadas en el procesamiento digital de señales. Joseph Fourier, su creador, fue un matemático francés, sin duda uno de los grandes genios de la historia. A Fourier le debemos todas las herramientas básicas de análisis espectral utilizadas en el procesamiento de señales e incluso fue el primer científico que advirtió sobre el problema del calentamiento global por efecto de los gases de invernadero en 1824.



3.8 Distribución de Frecuencias

3.8.1 Red de una sola Frecuencia (SFN)

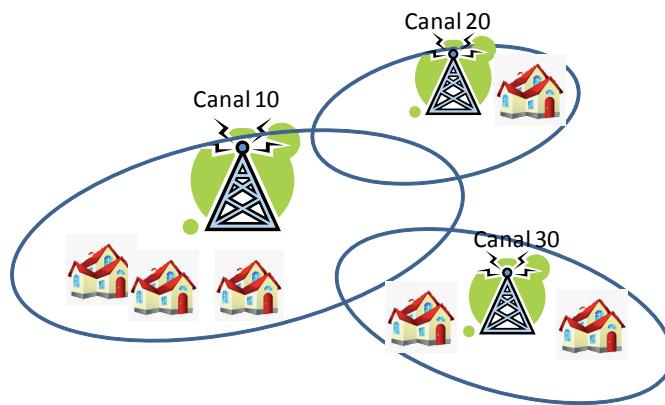
En un espectro radioeléctrico cada vez más congestionado, el uso de varias frecuencias para alcanzar todo el área de cobertura puede transformarse en un gran problema. Por esa razón, el sistema ISDT-B ha contemplado el uso de un sistema con una única frecuencia por canal televisivo [Anexo AA de ISDB-T] en el que una estación base de origen transmite la señal con alta potencia y otras estaciones la amplifican y retransmiten a una menor potencia utilizando exactamente la misma frecuencia original. El mayor problema asociado a este tipo de redes dice relación con la interferencia entre símbolos producida en el receptor por causa de múltiples antenas transmitiendo en la misma frecuencia. Este problema es drásticamente reducido en ISDB-T gracias al intervalo de guarda que utiliza OFDM. Lógicamente, entre mayor es el intervalo de guarda mayor es la protección contra la interferencia procedente de otras antenas y por esa razón los modos de transmisión 2 y 3 de la Tabla 3-1 son los elegidos en este tipo de situaciones. La Figura 3-12 muestra un diagrama del sistema.



3-12. Sistema de una sola frecuencia

3.8.2 Red de Frecuencias Múltiples

Aunque su uso no está muy difundido en Japón, la red de frecuencias múltiples también existe en el estándar ISDB-T. En este modo de transmisión la frecuencia original difiere de la de retransmisiones utilizadas en las estaciones base locales. Su gran desventaja es el uso ineficiente del espectro radioeléctrico. En términos de costo de equipamiento, sin embargo, resulta una solución tradicional mucho más barata que su par de frecuencia única descrito anteriormente.



3-3-13. Sistema de Frecuencias Múltiples



Una de las características técnicas más atractivas del sistema ISDB-T es la posibilidad de que múltiples estaciones transmisoras utilicen una sola frecuencia. Esto es posible gracias al ajuste del intervalo de guarda utilizado en el sistema OFDM. Esto supone una gran ventaja frente a los sistemas tradicionales en que las antenas colindantes deben transmitir en frecuencias diferentes a fin de evitar interferencia mutua.

4. Codificación de Audio y Video

4.1 Codificación de video

En la sección 3.5 revisamos brevemente los códigos convolucionales y los Reed-Solomon. Alguien podrá preguntarse con justa razón: ¿qué es esto de la codificación de video?, ¿para qué necesitamos aún más códigos?. Los códigos convolucionales y los Reed-Solomon son *códigos de corrección de errores* que por definición son independientes del tipo de datos que deseamos enviar (texto, video, imágenes, etc). Eso quiere decir que brindan el mismo nivel de protección a un grupo de bits de audio que de video o mensajes de texto. La codificación para *comprimir* datos de video o de audio corresponde a otro tipo de codificación llamada *codificación de fuente*. Su objetivo no es proteger la información de los posibles errores en el canal sino comprimirla hasta un nivel en que resulte más eficiente transportarla. En términos generales podemos afirmar que entre mayor es la tasa de compresión, menor es el ancho de banda requerido para transmitir la misma cantidad de información. Como contraparte, sin embargo, generalmente los algoritmos que ofrecen altas tasas de compresión requieren de un alto poder de procesamiento en el receptor así como de eficientes mecanismos de corrección de errores.

Así, podemos comprimir la información explotando sus correlaciones internas a fin de agruparla en valores que usen una menor cantidad de bits de información. ¿Para qué tenemos que darnos este trabajo?. ¿No bastaría con enviar la información original sin comprimirla?. La respuesta es simple: si nadie se hubiera dado este trabajo aún hoy en el año 2011 no seríamos capaces de ver video a través de Internet. A modo de ejemplo, consideremos una señal de televisión analógica. La tasa de transmisión de datos que necesitamos para ofrecerla en formato digital sin compresión es de más de 100 Megabits por segundo (Mbps). Para el caso de televisión de alta definición (1920x1080) la tasa de datos se incrementa a 1,2 Gigabits por segundo (Gbps), equivalente a 1200 veces 1 Mbps. Vale la pena mencionar que una conexión a Internet por ADSL desde nuestros hogares ofrece típicamente hoy en 2011 un ancho de banda promedio de 8 Mbps. La máxima tasa de transferencia de datos en ISDB-T [Estructura del Sistema ISDB-T] ocurre con la transmisión en alta definición con modulación de 64 QAM, código convolucional (4,3) e intervalo de guarda de 1/8 de símbolo en OFDM y equivale a 18 Mbps. La increíble reducción de 1,2 Gbps a 18 Mbps para transmitir un video en alta definición se debe a la compresión que ofrece el códec de video MPEG2. El códec H.264, dos veces más eficiente que el MPEG2, nos brinda esa increíble calidad de video en aproximadamente 10 Mbps.

El Moving Picture Coding Experts Group (Grupo de Expertos en Video) [Moving Picture Coding Experts Group] es un grupo internacional de expertos en procesamiento de imágenes y algoritmos de compresión de audio y video digital que fue fundado

en 1988. Su misión es el desarrollo de estándares para formatos de compresión de audio y video digital. Los estándares MPEG, MPEG2, MPEG3 y MPEG4, ampliamente utilizados por la industria musical y cinematográfica, fueron creados por este grupo de expertos.

El estándar de compresión de video MPEG2 se utiliza en casi todas las transmisiones digitales modernas y también en los DVDs. El funcionamiento del códec MPEG2 se basa en tres tipos de cuadro o imagen: I, P y B. Los cuadros I sirven de referencia para los P y los B, y por lo tanto no dependen de ningún otro. La secuencia de un cuadro I de referencia seguido de cuadros P y B que dependen de él se denomina Grupo de Imágenes (Group of Pictures) y tiene usualmente una forma como la siguiente: IPPPBPPBPPBP (en este ejemplo un grupo de imágenes de tamaño 15). Los cuadros P dependen del cuadro I y cuadros P anteriores mientras que los cuadros B dependen del cuadro I y cuadros P anteriores y posteriores. Para exemplificar un poco de qué estamos hablando supongamos que codificamos una secuencia de imágenes donde el cielo azul del fondo se repite durante todos los cuadros o imágenes mientras un pequeño objeto se mueve, vale decir cambia su posición, dentro de la misma secuencia. El cuadro I será siempre una especie de fotografía tipo GIF o JPEG donde sólo se ha comprimido la imagen en función de sus patrones o variaciones cromáticas y de luminancia luego de seleccionar un nivel de cuantización que determina la calidad de la imagen. El cuadro I se divide en pequeños bloques de píxeles (de generalmente un tamaño de 16 x 16) llamados macrobloques que se comparan con los de los cuadros P y B siguientes dentro del grupo de imágenes.

Continuando con el ejemplo, supongamos que en el cuadro P siguiente todos los bloques donde aparece el cielo azul son iguales a los del cuadro de referencia. En tal caso, el codificador puede comprimir la información y transmitir muy pocos datos asociados a esos macrobloques con datos redundantes. Para el caso del objeto en movimiento los macrobloques que éste ocupa en el cuadro I son detectados en el cuadro P pero en una posición diferente. La diferencia de posición se transmite en forma de vectores de movimiento que llevan información del tipo "cuatro píxeles hacia la derecha y 2 píxeles hacia arriba". Como sólo se debe transmitir el vector de movimiento del objeto y no el objeto en sí, nuevamente el códec puede efectuar una muy buena compresión de la información a ser transmitida. Para el caso de los cuadros B la situación es muy similar a la de los cuadros P, sólo que al haber una dependencia no sólo de cuadros pasados sino de futuros también, la información puede comprimirse aún más. Como resultado los cuadros I son los más escasos en número pero los más pesados en términos de tamaño de la información contenida, los P son más pequeños que los I pero más numerosos. Por último, los B son extremadamente pequeños y muy numerosos.

Si durante la transmisión se pierde o daña un cuadro I y el receptor no es capaz de recuperarlo o repararlo entonces la totalidad del grupo de imágenes se perderá ya que todos los cuadros en el grupo de imágenes hacen referencia directa o indirecta a él. La pérdida de un cuadro P es menos grave pero igualmente impedirá la decodificación de todos los cuadros P y B que dependan de él. Por último la pérdida de cuadros B es la menos nociva para la calidad del video recibido ya que no hay cuadros que dependan de ellos.

El sistema japonés ISDB-T utiliza el códec de video MPEG2 y para su transporte el contenedor llamado MPEG2-TS que incluye 16 bytes del código de corrección de errores Reed-Solomon, tal como se describió en la sección 3.5.



Códecs de video como MPEG2 o H.264 explotan las correlaciones espaciales y temporales internas dentro de un video de manera de comprimir lo más posible la información que se transmite. Gracias a esto podemos disfrutar hoy en día del video online en Internet desde nuestros hogares.

El MPEG2 y H.264 definen diferentes tipos de cuadro: I, P y B. Los cuadros I sirven de fotografía de referencia para todos los cuadros de una serie o grupo. Son por la misma razón los cuadros más pesados dentro cualquier video. Los cuadros P dependen del cuadro I inicial de su serie y de otros cuadros P anteriores. Los cuadros B dependen del cuadro I inicial así como de cuadros P anteriores y posteriores.

4.1.1 Formatos de Transmisión en ISDB-T y Transporte de Datos

El estándar ISDB-T incluye los cuatro formatos de transmisión que se muestran en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Formatos de transmisión en ISDB-T

Formato	Tamaño	Aspecto	Barrido	Cuadros/segundo
525i	720x480	16:9, 4:3	Entrelazado	29,97
525p	720x480	16:9	Progresivo	59,94
750p	1280x720	16:9	Progresivo	59,94
1125i	1920x1080	16:9	Entrelazado	29,97

Tal como se explicó anteriormente, los datos son transportados usando el contenedor MPEG2 Transport Stream, conocido como MPEG2-TS o simplemente como TS. Este formato permite multiplexar y sincronizar diferentes canales de audio, video y datos, ofreciendo además mecanismos de corrección de errores para medios de comunicación propensos al ruido e interferencia como el canal inalámbrico. La corrección de errores es su diferencia fundamental con el MPEG2 Program Stream o MPEG2-PS ampliamente utilizado en los DVDs.

En TS, la unidad básica de información es un paquete. Este paquete consiste en un byte de sincronización con valor hexadecimal 0x47, tres bits con banderas de información básica y un identificador de paquetes PID de 13 bits. El PID sirve para detectar programas, los cuales son listados junto a sus canales de video, audio y datos respectivos en una tabla llamada Program Map Table (PMT). Por ejemplo, supongamos que se están transmitiendo tres programas en definición estándar en el canal de 6 MHz donde cada uno está compuesto de un canal de video, 2 canales de audio y un canal de datos. Los tres programas con sus respectivos canales de audio, video y datos aparecerán en la tabla PMT. Si en el lado receptor nos interesa extraer sólo uno de estos programas – lo que es usualmente el caso – bastará entonces con filtrar todos los paquetes con el PID asociado a la tabla de este programa e ignorar todos los demás.

El protocolo TS es el que permite a ISDB-T realizar la transmisión simultánea de diferentes programas en el mismo canal de 6 MHz. En el caso del estándar brasileño

SBTVD, se cambió el formato de compresión de video MPEG2 utilizado en ISDB-T por el doblemente eficiente formato H.264. Sin embargo, el transporte sigue realizándose con TS. La diferencia es que en ISDB-T el canal de video vendrá comprimido con MPEG2 y en el estándar brasileño viene comprimido con el doblemente eficiente códec H.264. Esto permite al SBTVD transmitir el doble de programas que ISDB-T en el mismo canal de 6 MHz sin necesidad de cambiar la tecnología base de ISDB-T ni su transporte usando TS. En el caso del middleware Ginga propuesto por Brasil para reemplazar el lenguaje de markup Broadcast Markup Language (BML) del ISDB-T, la historia es muy similar. Dejando intacta la tecnología base de ISDB-T podemos cambiar a nivel de TS el canal de datos que usa BML por Ginga. Como podrá apreciarse, el protocolo de transporte TS ofrece una enorme flexibilidad para el uso de diferentes estándares de video, audio y datos sin necesidad de cambiar la tecnología base de ISDB-T. Por esta misma razón también es utilizado por el estándar americano ATSC y el europeo DVB-T [M.Massel, 2008].

4.1.2 H.264/MPEG4 AVC

El códec H.264 es una generación posterior al MPEG2 y corresponde al más avanzado estándar de compresión de video del momento. En general, ofrece la misma calidad de imagen de MPEG2 pero usa tan sólo la mitad de la tasa de datos de éste último. Así la misma calidad de video Full HD que se transmite con 18 Mbps en MPEG2 requiere menos de 10 Mbps en H.264. Eso ofrece una enorme ventaja desde el punto de vista de ahorro de ancho de banda.

Al igual que el MPEG2, el H.264 utiliza cuadros de tipo I, P y B (siguiendo su mismo concepto de compresión) pero presenta un desempeño mucho mejor. La razón de esto se encuentra en varias funcionalidades nuevas que se le agregaron como: macrobloques de tamaño variable de 8x8, 8x16, 16x8, 16x16 pixeles; incremento del número de cuadros de referencia a 16; predicción espacial en base a macrobloques vecinos, precisión de un cuarto de pixel para la codificación de vectores de movimiento, etc.

El códec H.264 es utilizado en el sistema OneSeg cuya finalidad es la recepción en aparatos móviles y también corresponde al códec utilizado en la adaptación brasileña del sistema japonés denominada SBTVD (Sistema Brasileño de Televisión Digital). El sistema brasileño ofrece así la posibilidad de transmitir hasta 8 canales en definición estándar así como dos canales de súper alta definición (full HD) en la misma banda analógica de 6 MHz.

4.1.3 Codificación de audio

Así como podemos explotar la correlación temporal y deshacernos de la información perceptual menos relevante en un video podemos hacer lo mismo con el audio. El códec de audio utilizado en el estándar ISDB-T es el Advanced Audio Coding (AAC) [M.Bosi, 2002], el cual generalmente ofrece una mejor calidad que su predecesor MP3 [M.Bosi, 2002] para la misma tasa de transmisión de datos. El códec de AAC permite la transmisión de sonido estéreo (dos canales) a tan sólo 96 Kbps. Sin embargo, para cumplir con el altísimo estándar de calidad de *transparencia de sonido* definido por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) [International Telecommunications

Union], los dos canales de sonido estéreo se transmiten a 128 Kbps. La tasa de transferencia requerida para cumplir con el mismo estándar de *transparencia de sonido* en el caso de 5.1 canales es 320 Kbps.

El funcionamiento de esta maravilla tecnológica se basa en el uso de una herramienta matemática conocida como la Transformada Discreta del Coseno Modificada [V.Britanak, 2006], con la que se pasa la señal del dominio del tiempo al de la frecuencia. Una vez que la señal se encuentra representada en la frecuencia se muestrea de acuerdo a un cierto nivel de cuantización pasándola a un formato digital. En el proceso de cuantización se sigue un modelo físico-acústico que elimina los sonidos que resultan imperceptibles para un ser humano. Luego de agregar códigos de corrección de error la señal puede ser almacenada localmente como un archivo o transmitida en tiempo real.

Vale la pena hacer aquí una breve pausa para mostrar uno de los teoremas más importantes para la digitalización de una señal: el teorema de Nyquist-Shannon o *teorema del muestreo* [J.R.Pierce, 1980]. Nyquist y Shannon son dos de los científicos más relevantes en el área de las telecomunicaciones y su trabajo, especialmente el de éste último (de quien ya hemos hablado en el capítulo anterior), ha conformado la base de lo que hoy se conoce como *teoría de la información*.

El enunciado del teorema puesto en palabras simples nos dice: “cualquier señal cuya máxima componente de frecuencia sea B Hertz puede ser representada perfectamente por una señal digital cuyas muestras han sido tomadas en intervalos de tiempo de $1/(2B)$ segundos”. ¿Qué quiere decir esto?. Tomemos el ejemplo del sonido. El oído humano puede percibir sonidos sólo entre frecuencias de 400 y 22 mil Hertz. Así, para representar perfectamente un sonido perceptible por un ser humano en formato digital necesitamos tomar muestras del sonido al doble de 22 mil Hertz, vale decir 44 mil Hertz, lo que equivale a tomar 44 mil muestras por segundo. Esa frecuencia de muestreo nos asegura que la señal digital resultante será una perfecta representación de la señal analógica original, al menos para el oído humano.

El formato AAC permite frecuencias de muestreo de entre 8 kHz y 96 kHz. La máxima frecuencia de muestreo de 96 kHz nos permite en teoría representar sonidos con frecuencias de hasta 48 kHz, lo que sin duda asegura una calidad mayor a la que cualquier ser humano es capaz de percibir. Por otra parte la frecuencia de muestreo de 8 kHz nos permite escuchar sonidos con frecuencias de hasta 4 kHz, cuya calidad equivale aproximadamente a la de una conversación telefónica. El enorme rango de frecuencias de muestreo ofrecido por AAC nos asegura la disponibilidad de cualquier calidad que deseemos para nuestra aplicación.

El estándar AAC es sin duda uno de los más difundidos hoy en día. Podemos oírlo en dispositivos tan populares como el iPhone, el iPod, el Playstation 3, Sony Walkman, o el Nintendo Wii y por supuesto también en los estándares de televisión digital, incluido el ISDB-T.

5.1 Canales de audio

El estándar ISDB-T incluye también la transmisión de sonido envolvente de 5.1 canales, sistema que incluye una configuración de dos canales separados para los parlantes frontales (derecho e izquierdo), dos canales separados para los parlantes

traseros (derecho e izquierdo), un canal para un parlante frontal y un canal separado para efectos de baja frecuencia. En ISDB-T el sonido envolvente de 5.1 canales se transmite a una tasa de 320 Kbps.

Una de las características del sistema ISDB-T es la transmisión de audio "surround" o envolvente de 5.1 canales utilizando el formato de codificación de audio AAC. Además a través de un canal de datos puede transmitirse todo tipo de información asociada a un programa, el pronóstico del clima en la zona donde residimos, la tabla de programación de la semana, etc. En el caso de que se produzca un terremoto el canal de datos también transmite información sobre el localización del epicentro, intensidad y profundidad, si existe o no peligro de tsunami, etc. a los pocos segundos de ocurrido un sismo. De hecho, La primera reacción de los japoneses después de un sismo es encender el televisor para ver la información relacionada con el terremoto. Esperemos que tal servicio sea posible dentro de poco en los países latinoamericanos que adoptaron la norma japonesa modificada y que también sufren terremotos. El sistema debe contar lógicamente con el respaldo de una red eficiente de sismógrafos distribuidos estratégicamente dentro del país.



4.1.4 Canal de datos vía Internet hacia la estación televisiva

Uno de los atractivos más interesantes de la televisión digital es la posibilidad de conectar el aparato receptor - ya sea el televisor o el set top box - a la Internet (usando nuestra conexión ADSL por ejemplo) y poder de esta forma enviar datos en tiempo real a la estación televisiva con el solo uso del control remoto. ¿Para qué sirve esto?. Se utiliza por ejemplo en concursos de trivia o de concursos donde todo el mundo puede participar respondiendo a una pregunta o seleccionando una de las opciones (hoy en día muchos programas televisivos en Latinoamérica utilizan el servicio de mensajería corta de las compañías celulares para este fin).

En el estándar ISDB-T, los datos son enviados en formato Broadcast Markup Language (BML) [ARIB, Data Coding And Transmission Specification For Digital Broadcasting (Version 5.0) (2006)] sobre un protocolo seguro llamado SSL (secure socket layer) [S.A.Thomas, 2000], el cual protege mediante encriptación todos los datos transmitidos sobre el canal. De esta forma, los datos del usuario (que por ejemplo participa en un concurso televisivo) no pueden ser interceptados o decodificados por otro servidor que no sea el de la televisora. El protocolo SSL funciona sobre el protocolo de transporte TCP y el protocolo de ruteo IP. Valga mencionar que los protocolos TCP e IP [C.M.Kozierok, 2005] son el corazón del funcionamiento de la Internet.

La Figura 4-1 muestra la organización de los protocolos sobre la que se realiza el envío de datos a la estación televisiva. Luego de adoptada la norma japonesa en los países sudamericanos, se espera que en los años venideros los proveedores de Internet faciliten las conexiones por ADSL desde los receptores de televisión digital en los hogares, ya sean estos televisores o set top box.

Una posible área de negocios interesante en el futuro estará justamente en el desarrollo de servicios de datos y aplicaciones para la televisión digital que faciliten una comunicación bidireccional a través de la cual el usuario pueda tener una experiencia

más interactiva con sus programas. Ése es justamente uno de los temas en los que Brasil ha estado trabajando activamente mediante su protocolo de comunicación de datos Ginga.

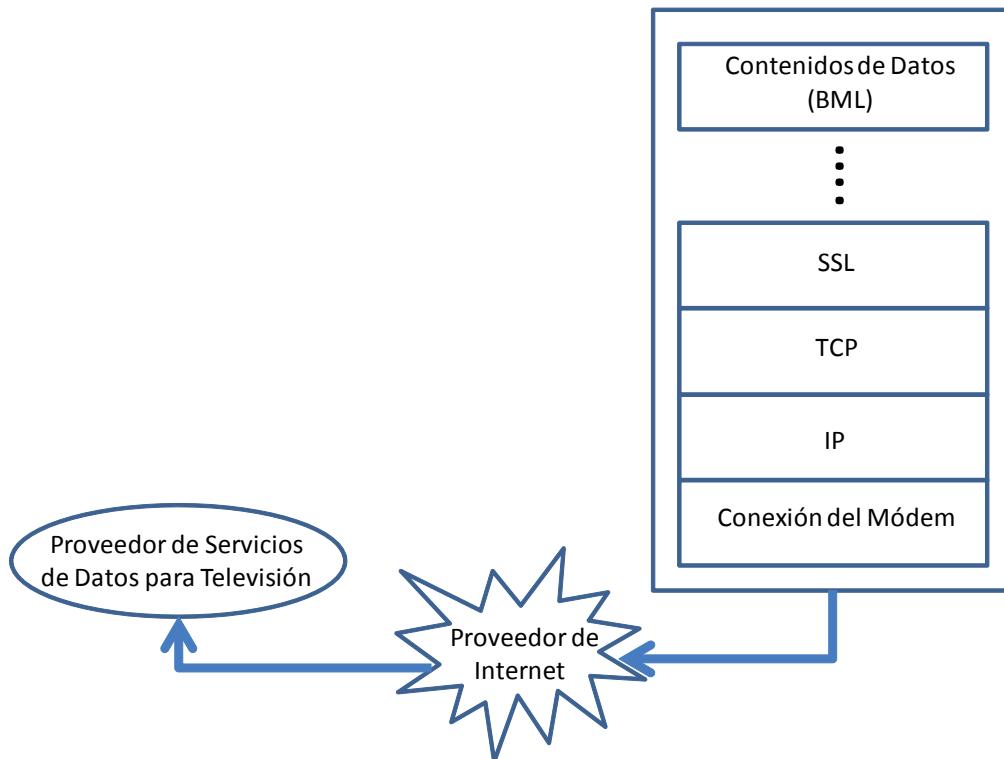


Figura 4-1. Comunicación encriptada de datos en enlace de subida

5. Sistema OneSeg

Tal como se explicó en la sección 3.2.1, en ISDB-T cada televisora dispone de una banda de 6 MHz compuesta por 13 segmentos de datos, cada uno con 429 KHz de ancho de banda. El segmento que se encuentra justo en la mitad de la banda de 6 MHz se conoce como OneSeg [OneSeg Description] y se utiliza para transmitir a dispositivos móviles. Las transmisiones de OneSeg comenzaron el 1 de abril de 2006 en las ciudades japonesas de Tokio, Osaka y Nagoya, las más grandes del país. Fue el primer sistema de televisión digital para receptores móviles desplegado en el mundo. El contenido transmitido en el segmento OneSeg fue durante los primeros dos años – hasta mayo de 2008 - el mismo que el transmitido en los restantes 12 segmentos de datos. Sin embargo, desde junio de 2008 comenzó a funcionar el OneSeg2 que permite la transmisión simultánea de dos programas en el mismo segmento de OneSeg. Esto fue posible gracias a la introducción del códec de video H.264 revisado en la sección 4.1.2, el cual es dos veces más eficiente que su antecesor el MPEG2.

La resolución de imagen transmitida en los sistemas OneSeg y OneSeg2 es de 320x240 y de 320x180 pixeles para pantallas del tipo 4:3 y 16:9, respectivamente. Esta resolución resulta suficiente para las pequeñas pantallas de celulares y otros receptores portátiles. OneSeg transmite los contenidos a 15 cuadros por segundo, valor que resulta bajo con respecto a las transmisiones en definiciones estándar, SD y HD que se realizan en los demás segmentos y que alcanzan 60 cuadros por segundo con barrido entrelazado o 30 cuadros por segundo con barrido progresivo. Pese a que la tasa de 15 cuadros por segundo es suficiente para la mayoría de los contenidos audiovisuales, la falta de rapidez en el cambio de una imagen puede apreciarse especialmente en videos con movimientos rápidos como una carrera de caballos o de vehículos. La diferencia entre barrido entrelazado y progresivo puede verse en la Figura 5-1. Sólo 2 canales de sonido (estéreo) pueden ser transmitidos en OneSeg en contraste con los 6 canales del sistema de audio envolvente que pueden transmitirse en el resto de los 12 segmentos para los receptores fijos. La transmisión simultánea de dos idiomas es posible también. Los principales parámetros de transmisión de OneSeg se muestran en la Tabla 5-1.

A nivel de capa física, los parámetros de transmisión utilizados en OneSeg equivalen al modo 3 de la Tabla 3-1 y al esquema B de la Tabla 3-2. Esta combinación de parámetros, especialmente la mayor tasa de codificación convolucional junto a la robusta modulación QPSK, hacen posible una buena calidad de recepción incluso cuando el receptor se encuentra en movimiento.

La señal de OneSeg puede recibirse no sólo en teléfonos móviles sino también en televisores portátiles, consolas de juego portátiles y computadoras personales. La Figura 5-2 muestra ejemplos de dispositivos portátiles con la tecnología OneSeg como un teléfono móvil y la consola portátil de juegos Play Station Portable (PSP).

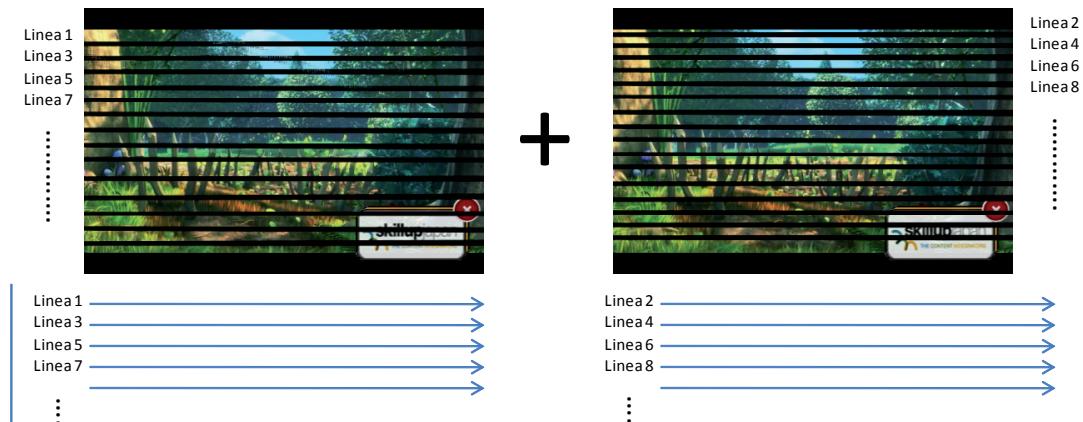


El sistema OneSeg creado dentro del estándar japonés de televisión digital ISDB-T significó la primera revolución móvil de la televisión y del códec H.264 en un sistema de radiodifusión televisiva. Puesto en servicio en el año 2006 sólo requería que los teléfonos móviles contaran con un pequeño receptor OneSeg. La fabricación en masa de los receptores para una gran cantidad de teléfonos móviles de diferentes fabricantes permitió que rápidamente bajaran los costos de producción y así que millones de personas pudieran disfrutar sus programas favoritos de televisión en su teléfono celular.

Tabla 5-1. Parámetros de transmission de OneSeg

Sistema de Modulación	OFDM
Códec de Video	H.264/AVC
Resolución	320x180 320x240
Razón de aspecto	16:9 4:3
Tasa de cuadros	15 cuadros/seg
Formato contenedor / códec de audio	Mpeg2 / AAC
Tasa de transmisión total	312 Kbit/seg
Transmisión de video	128 ~ 180 Kbit/seg
Transmisión de audio	48 ~ 64 Kbit/seg
Transmisión de datos	50 ~ 60 Kbit/seg

Barrido Entrelazado en TV analógica con 59.94 cuadros/seg



Barrido Progresivo en TV digital con 29.97 cuadros/seg

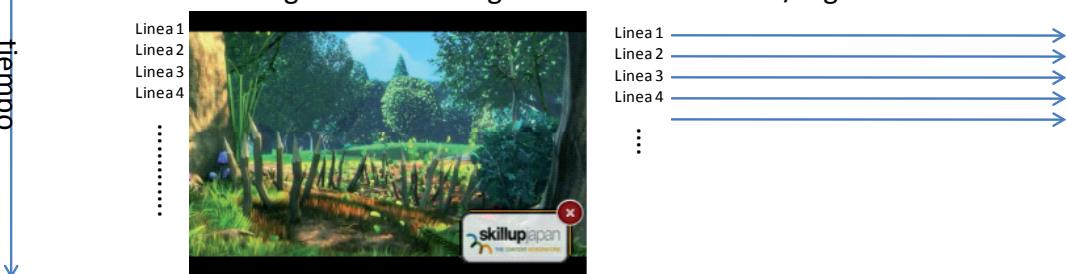


Figura 5-1. Comparacion de barridos entrelazado y progresivo



(a) Teléfono móvil (modelo 2008)

(b) Playstation Portátil (PSP)

Figura 5-2. Dispositivos portátiles con receptor OneSeg

6. Sistema de recepción

6.1 Relación entre la potencia de recepción y la tasa de transferencia de datos

Cualquier onda electromagnética que se propaga por el espacio o el aire está caracterizada por un campo eléctrico y un campo magnético. Es un hecho que entre más lejos nos encontremos de la antena de transmisión, menor será la potencia de recepción.

La potencia puede ser calculada en función del campo eléctrico que se mide en la antena de recepción. A su vez, el campo eléctrico E se mide en voltaje por unidad de espacio, generalmente en volts por metro (V/m). La medida más utilizada para el campo eléctrico E se expresa en decibeles por sobre un microvolt por metro (denominado dB *u u*) y está dada por la siguiente fórmula:

$$E \text{ [dbu]} = 20 \log \left(\frac{E \left[\frac{\mu V}{m} \right]}{1 \left[\frac{\mu V}{m} \right]} \right)$$

La medida en el denominador equivale a una millonésima de volt por metro. En esta unidad de medida, la intensidad de campo eléctrico de 1 milivoltmetro se traduce a mil veces o 10^3 veces el denominador y por lo tanto a 60 decibeles o dB. La Tabla 6-1 muestra ejemplos de conversión de unidades para representar la intensidad de campo eléctrico. La medida de decibel se utiliza no sólo en telecomunicaciones sino que en muchísimas áreas, un ejemplo es el de la intensidad del sonido.

Para recibir una señal analógica de televisión necesitamos recibir por lo menos un campo eléctrico de 70 dB con respecto a 1 microvoltmetro. En el caso de la televisión digital, gracias a su mayor resistencia a la interferencia y al ruido el mínimo campo eléctrico que puede recibirse es de 60 dB con respecto a 1 microvoltiometro. Además, se ha contemplado un margen de guarda de 9 dB para contrarrestar las variaciones del canal causadas por desvanecimiento por *canales selectivos en frecuencia*, fenómeno propio de los enlaces inalámbricos asociado al problema de multirayectorias. El fenómeno de desvanecimiento es analizado en la sección 6.2 donde se describe con mayor detalle el canal inalámbrico.

Por regla general, la calidad de una señal de televisión analógica empeora en forma gradual a medida que nos alejamos de la estación transmisora. Con un campo eléctrico recibido de menos de 60 dB sólo podremos ver una imagen de muy mala calidad en el receptor acompañada probablemente por un molesto ruido auditivo. En contraste, en el caso de la televisión digital la imagen no se degrada gradualmente sino que abruptamente cuando el receptor deja de recibir la potencia suficiente. Ello debido a los poderosos mecanismos de corrección de errores (códigos convolucionales y de Reed-Solomon) y a las técnicas de Interleaving que estudiamos brevemente en las

secciones 3.5 y 3.6. Todos estos mecanismos garantizan una excelente calidad de imagen aún cuando la potencia de recepción se reduzca significativamente.

De esta forma, en el caso de la televisión digital, podemos decir que en general se ve muy bien o no se ve absolutamente nada. Esta abrupta caída en la percepción visual de la señal digital se denomina *efecto arrecife* por su empinada caída en función de la distancia y puede ser apreciado en el ejemplo de la Figura 6-1. Es por lo tanto extremadamente importante que al momento de instalar el sistema, especialmente en localidades pequeñas o más aisladas, se tenga presente este efecto (que no se observa con la televisión analógica) en la cual se produce una degradación gradual en la calidad de la imagen a medida que nos alejamos de la estación transmisora.

Tabla 6-1. Conversión entre decibeles y milivolts por metro

E [dB <u>b</u> <u>a</u>] (dB sobre 1 microvolt por metro (uV))	E [mV/m] (intensidad de campo eléctrico en milivolts por metro)
100 dBu	100 mV/m
80 dBu	10 mV/m
70 dBu	3.16 mV/m
60 dBu	1.0 mV/m
54 dBu	0.5 mV/m
40 dBu	0.1 mV/m
34 dBu	0.05 mV/m
28 dBu	0.025 mV/m

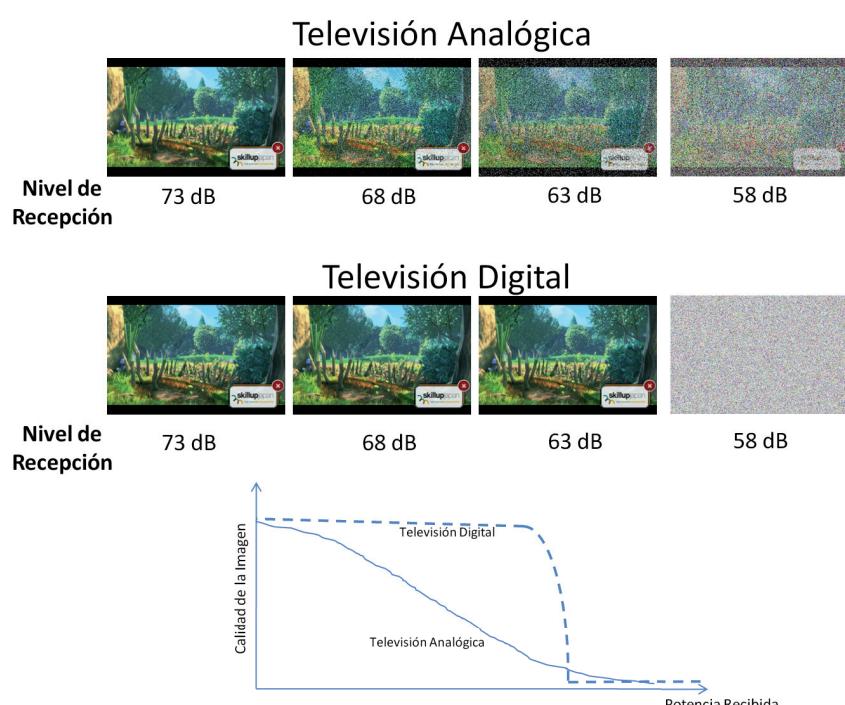


Figura 6-1. Comparación de la calidad de imagen en función de la potencia recibida entre televisión analógica y digital



La degradación gradual de la calidad de la imagen a medida que nos alejamos de la antena transmisora es algo común en un sistema analógico pero diferente a lo que observamos en un sistema digital. La excelente corrección de errores y cancelación de ruido proporcionada por este último permiten obtener excelentes calidades de imagen en lugares donde la televisión analógica se vería muy mal o no se vería (considerando las mismas condiciones de propagación y la misma potencia de transmisión). Así, la degradación de la calidad de imagen en un sistema digital es mucho más abrupta o repentina que en el caso de su par analógico. Este efecto graficado en la figura 6.1 se conoce como "efecto arrecife".

6.2 El canal inalámbrico

A continuación se revisará uno de los temas más problemáticos para los ingenieros de telecomunicaciones: el canal inalámbrico, vale decir, el asociado a las transmisiones por el aire o el espacio. Este canal se caracteriza por sus fluctuaciones, desvanecimientos y múltiples trayectorias recorridas por la señal.

Hizo falta más de ochenta años desde que Marconi realizara las primeras transmisiones inalámbricas de telegrafía por sobre el Atlántico para que viéramos los primeros teléfonos celulares en nuestras manos y aunque para ese entonces la tecnología digital se entendía bastante no se comprendía así de bien qué efecto tiene el canal inalámbrico sobre las transmisiones digitales.

La señal recibida en un canal inalámbrico llega al receptor a través de múltiples trayectorias después de rebotar, difractarse y dispersarse en los obstáculos que encuentra en el medio de propagación. Estas múltiples trayectorias fluctúan en el tiempo debido a los cambios en las condiciones del terreno tales como el movimiento de los objetos reflectantes, el movimiento de receptor o transmisor (efecto Doppler) e incluso por las variaciones en las condiciones climáticas (lluvia, humedad, etc.). Las fluctuaciones producidas por multirayos recorridos por la señal así como el movimiento físico de un terminal se conocen como *desvanecimientos de la señal recibida* y pueden llegar a ser bastante considerables. Por ejemplo, en un vehículo en movimiento es común observar fluctuaciones del orden de 20 decibeles – equivalentes a disminuciones en proporciones de 10 a 1 - en el nivel de potencia recibida.

Debido a que para decodificar la señal requerimos observar una potencia mayor a la de mínima recepción, lo que se hace comúnmente al diseñar un enlace inalámbrico es hacer un *cálculo del enlace* [R.Beutler, 2004]. Éste corresponde al cálculo de cuánta potencia llega al receptor después de considerar todas las pérdidas en el canal y en los cables de conexión así como las ganancias por concepto de repetidores y antenas. Se incluye además un margen de guarda u holgura para tomar en consideración fluctuaciones aleatorias producidas por fenómenos climáticos como la lluvia o la nieve.

El problema de multirayos puede solucionarse con el uso de la tecnología de transmisión OFDM, descrita en la sección 3.4.3. Pero, ¿cómo enfrentamos las variaciones del canal por movimiento del receptor?. Debido a la pequeña banda de frecuencias que separa a las subportadoras adyacentes, la tecnología OFDM es especialmente sensible a corrimientos en la frecuencia producidos por el movimiento

del receptor (revisar efecto Doppler en sección 3.7). Por eso es que en el canal OneSeg asignado a receptores móviles se han tomado consideraciones especiales que estudiaremos en el capítulo 5.

Tal como se muestra en la Figura 6-2 en ISDB-T se solicita para un receptor fijo que el 50% del tiempo la potencia de señal recibida sea mayor a 70 dB con respecto a 1 microvoltio. Esto debiera garantizar que más del 99% del tiempo la señal recibida estará sobre los 60 dB en el caso de una antena transmisora ubicada a 150 metros de altura y a una distancia de 70 Km del receptor, según las pruebas en terreno realizadas en Japón. Las pruebas consideraron propagación sin grandes obstáculos en el camino como cerros o montañas.

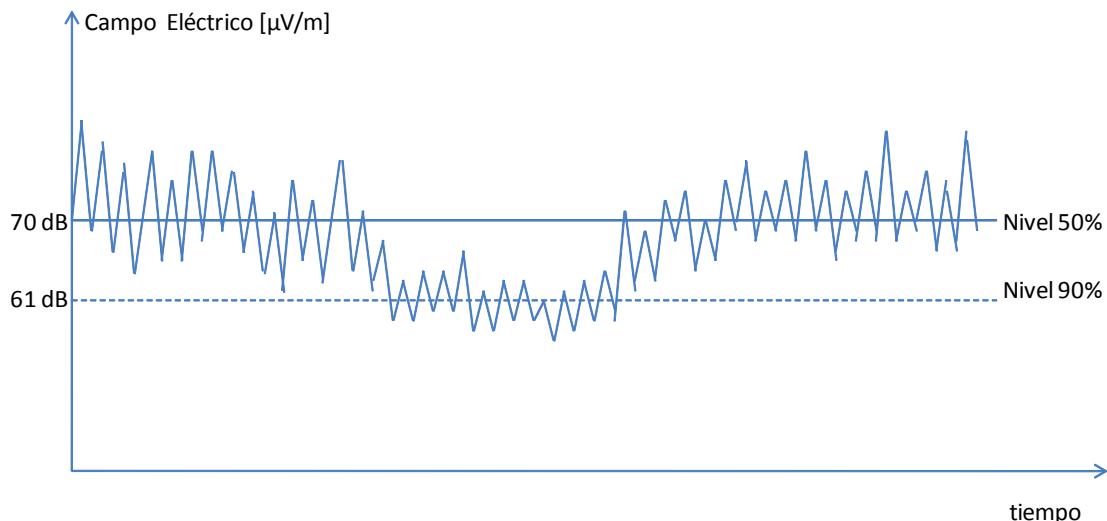


Figura 6-2. Campo eléctrico requerido para garantizar buena recepción



En la instalación de antenas de cualquier sistema de radiodifusión o de radiocomunicaciones se realiza un estudio del canal de propagación que involucra visitas a terreno para medir potencias de recepción bajo diversas condiciones climáticas, además de simulaciones con programas computacionales que utilizan modelos matemáticos de propagación. Tales estudios se denominan cálculos de enlace y buscan determinar cuál es el área de recepción o alcance de una antena de transmisión que transmite con cierta potencia desde una posición y altura determinada.

6.3 Recepción de los datos

6.3.1 Broadcast Markup Language

En ISDB-T fuera de la transmisión de los canales de video y de audio existe también un canal de datos en el que se puede transmitir imágenes y texto; por ejemplo la receta del menú que se está preparando en un programa de cocina, información actualizada sobre el clima o el tráfico, datos sobre los actores del programa que se está viendo, e incluso información de advertencia sobre catástrofes naturales como terremotos,

tifones y alertas de tsunami. La selección de uno u otro tipo de información se hace generalmente con botones especiales del control remoto del aparato televisivo.

¿Cómo podemos organizar dentro de la pantalla el envío de esta información que puede incluir hasta imágenes?

El lenguaje HTML (Hyper Text Markup Language) [P.Haine, 2006] que usamos diariamente para ver páginas web en la Internet ofrece una buena respuesta a este problema. HTML se utiliza para crear archivos de texto que organizan la forma en que se despliega en una página web el contenido como imágenes, videos y texto. El sistema japonés ISDB-T utiliza un lenguaje basado en el HTML pero diseñado especialmente para televisión digital: el BML (Broadcast Markup Language). Al igual que el HTML el BML utiliza etiquetas del tipo “<mensaje> HOLA</mensaje>” donde los paréntesis < > y < / > marcan el principio y el fin de un nodo (en este caso un mensaje) dentro de la página, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 6-3.

Para recibir, por ejemplo, la información en tiempo real de un partido de fútbol el receptor requiere de un sistema que permita la constante actualización de la información antes de desplegarla. Para ello lo primero que hace es buscar la información requerida en la memoria del aparato. En el caso de no encontrarse ahí tendrá que esperar hasta la próxima vez que la estación televisiva la transmita. Para evitar que el televíidente tenga que esperar un largo tiempo por el dato que requiere, el sistema transmite los datos en forma de “carrusel” [Anexo AA de ISDB-T], vale decir, secuencialmente y luego repitiendo el ciclo desde el principio, dando vueltas tal como el carrusel que se muestra en la Figura 6-4 en el que se ejemplifica el *servicio de ingeniería*. Dicho servicio consiste en la actualización del software de los aparatos receptores mediante la bajada automática de programas de acuerdo a un horario anunciado previamente en una tabla denominada Software Download Trigger Table (SDTT) [ARIB, Operational Guidelines for Digital Satellite Broadcasting]. De esta forma, en la práctica sólo se esperará un par de segundos en el peor de los casos antes de recibir la información solicitada. Una vez que la información ha sido encontrada, se guarda en la memoria del receptor y se renueva automáticamente para posteriores consultas. El manejo específico de los datos y la frecuencia con que estos se actualizan dependen del fabricante del aparato receptor.

```

<object data = "bottles.jpg"
    type = "image/jpeg"
    style = "left:150; height:240;"></object>
<p style = "left:150; top:250;
    width:240; height:64;
    color: red; font: arial> Two Bottles </p>

```



Figura 6-3. Ejemplo de BML

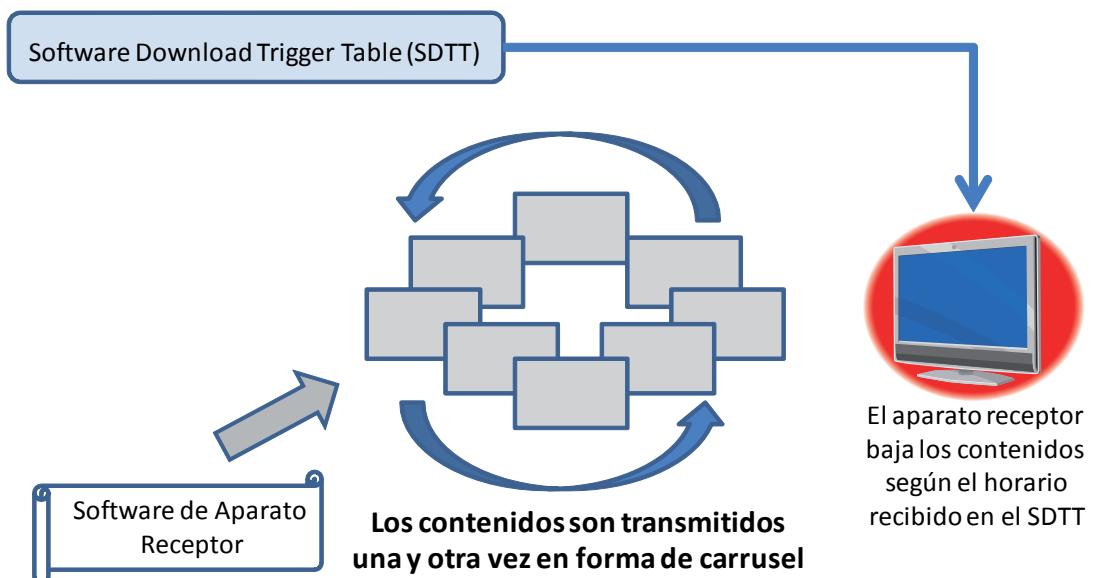


Figura 6-4. Servicio de ingeniería para actualización de software en receptores

6.3.2 Ginga

En el Sistema Brasileño de Televisión Digital (SBTVD) basado en el sistema japonés ISDB-T se decidió reemplazar el canal de datos basado en BML por un programa o software de *middleware* desarrollado en Brasil llamado Ginga, el que a su vez ha sido subdividido en dos sistemas: i) Ginga-J [Ginga-J], basado en la librería de aplicaciones y funciones para televisión digital del lenguaje de programación Java, desarrollado por Sun Microsystems (adquirida por Oracle corporation), y ii) Ginga-NCL [Ginga NCL], basado en el formato XML (extended markup language) y diseñado para la creación de aplicaciones interactivas. Ginga fue desarrollado por un grupo de estudio del Ministerio de Telecomunicaciones de Brasil, en el que participaron varias universidades brasileñas, liderado por la Agencia de Telecomunicaciones de Brasil.

Ginga es un software abierto que permite el desarrollo de aplicaciones interactivas para la televisión digital. Esta clase de aplicaciones permite al usuario interactuar con el video que se está viendo, por ejemplo, seleccionando dentro de un menú que se despliega en la pantalla a algún personaje del programa para ver su resumen biográfico. Se invita al lector a buscar videos en sitios como Youtube sobre “Ginga SBTVD” para ver ejemplos audiovisuales de aplicaciones que utilizan esta tecnología.

Brasil ha promocionado con fuerza Ginga tanto dentro como fuera de Brasil y es así como incluso ha logrado estandarizar su tecnología de *middleware* en la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), un logro ejemplar para un país latinoamericano. La plataforma de desarrollo completamente abierta ofrecerá sin duda una buena oportunidad para compañías de software que deseen desarrollar aplicaciones interactivas para la televisión digital en el resto de los países sudamericanos que han elegido la norma japonesa ISDB-T.



El lenguaje de transmisión de datos de ISDB-T se llama BML y está basado en el estándar HTML con que se escriben las páginas web en Internet. Brasil decidió cambiar el BML por un middleware propio llamado Ginga, un software de código abierto que tiene dos componentes principales: una basada en la librería de Java sobre aplicaciones para TV Digital de Sun Microsystems y la otra basada en el famoso estándar XML. En Brasil ya se han comenzado a comercializar televisores que funcionan con el middleware de Ginga. Por instructivo gubernamental, al menos el 5% de la producción de aparatos que recibe incentivos fiscales de la ley de Informática o del Polo Industrial de Manaus en el país debe tener el estándar Ginga-NCL.

6.3.3 Guía de Programación Electrónica (EPG por su sigla en inglés)

La guía de programación electrónica es un resumen gráfico - en forma de matriz - desplegado en pantalla con la programación de hasta 8 días de todas las estaciones televisivas divididas por día y por hora. Una imagen típica del EPG [DiBeg] puede verse en la Figura 6-5.

El control remoto viene generalmente con un botón especial para desplegar EPG y otro también para utilizar el canal de datos de la estación sintonizada. Una fotografía de un típico control remoto en Japón puede verse en la Figura 6-6. En tanto, la Figura 6-7 muestra algunas funciones clásicas como comercio electrónico, información de las carreteras, pronóstico del clima, información del programa en el aire, etc. que aparecen tras presionar el botón de *datos*.

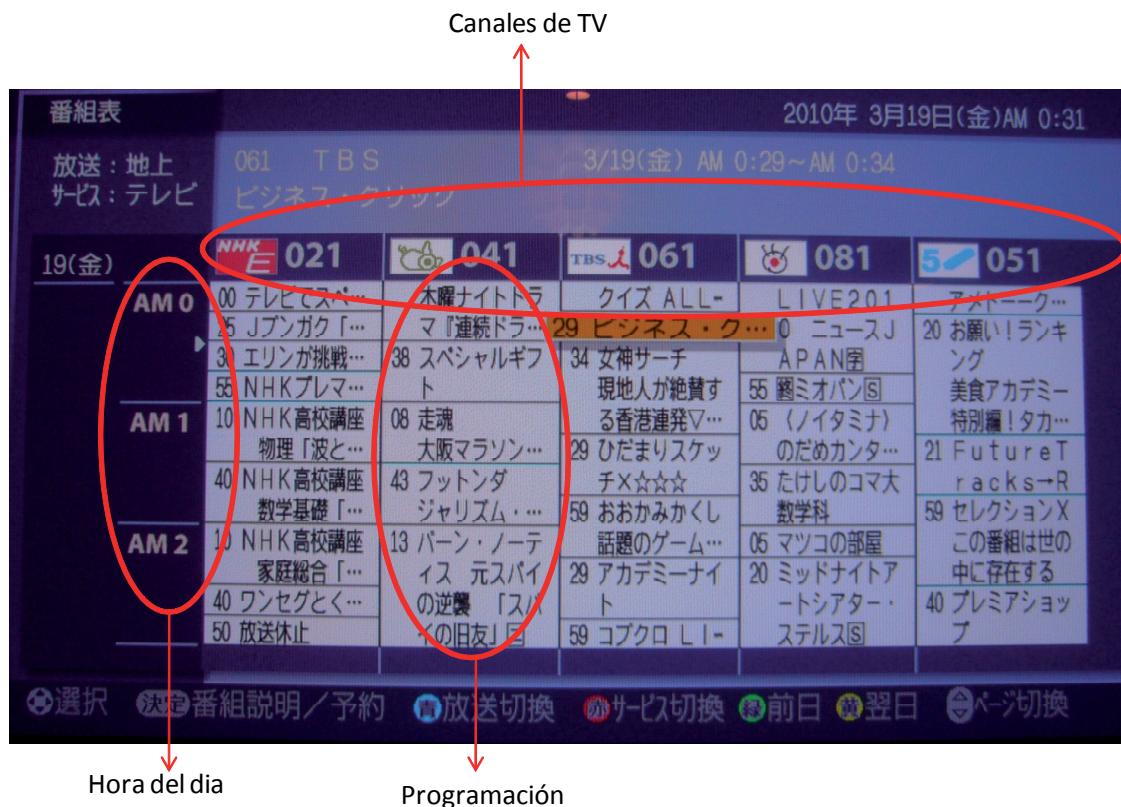


Figura 6-5. Ejemplo de una guía de programación electrónica o EPG



Figura 6-6. Fotografía de un control remoto típico



Figura 6-7. Ejemplo de pantalla luego de presionar el botón de DATOS en el control remoto

Al igual como se selecciona una estación de radio, en el EPG se puede seleccionar un programa para verlo al instante, o bien reservar un programa por anticipado para verlo o grabarlo con el simple uso de un botón en el control remoto. El EPG se distribuye en tres formatos diferentes para: i) televisores fijos, ii) televisores móviles y iii) teléfonos móviles. Los tres formatos difieren básicamente en la cantidad de caracteres que se puede colocar en cada celda de canal y hora en la matriz del EPG. El primero acepta hasta 40 caracteres mientras que el segundo y tercero aceptan 20 y 10 caracteres, respectivamente (aunque 10 o 20 caracteres suene a muy poco ello no es efectivo en el caso del idioma Japonés donde con 10 kanjis o ideogramas se puede escribir mucha información).

6.4 DRM y protección de los contenidos

La protección de contenidos y la piratería han sido siempre temas extremadamente relevantes para las industrias de contenidos audiovisuales como la cinematográfica, la televisiva y la musical. En el estándar ISDB-T un programa transmitido en alta definición puede ser grabado por cualquier usuario sin perder un ápice de calidad pero en Japón su grabación y el número de copias que puede hacerse hacia otros dispositivos está controlada por la propia estación televisiva. Cada programa se transmite con una cabecera donde dos bits indican una de las siguientes tres posibilidades: i) autorización ilimitada para copiar o grabar, ii) autorización para grabar sólo una vez, y iii) sin autorización para grabar o copiar. El sistema funciona tanto con salidas digitales como analógicas de los equipos de grabación y se denomina *Rights Management and Protection* (RPM), cuya traducción al Castellano es sistema de *protección y administración de derechos*.

En el caso específico de los contenidos digitales, el sistema de protección de copias hacia otros dispositivos se denomina Copy Control Information (CCI) [Copy Control Infomation], o Información sobre Control de Copias. Supongamos por ejemplo que grabamos en nuestro video grabador digital un programa transmitido en formato digital cuyos dos bits de protección especifican “permitido grabar sólo una vez”. Al grabar el programa el equipo DVR (Digital Video Recorder) cambia los dos bits de protección a “no permitido hacer copias” y de esta forma impide que podamos copiarlo a un PC, DVD ROM o disco duro externo. Los programas cuyos dos bits de protección indican “permitida una copia” o “sin autorización de copia” son encriptados antes de transmitir por lo que resultan imposibles de decodificar para un receptor normal. Para poder desencriptarlos se utiliza en Japón una tarjeta especial llamada B-CAS (broadcast conditional access system) que viene con todo receptor digital que se encuentra en el comercio. Cada tarjeta B-CAS tiene un identificador único que permite también el acceso selectivo a contenidos pagados aunque este sistema aún no se ha puesto en marcha en Japón.

El sistema de protección de contenidos descrito es utilizado sólo en Japón y no es obligatorio dentro de la norma ISDB-T. No sabemos aún cuál será la política de protección de contenidos en los países sudamericanos que han adoptado la norma japonesa y, aunque sería deseable que todos adoptaran un sistema único, no hay duda de que este tema irá adquiriendo mayor relevancia a medida que las cadenas de televisión se acostumbran a convivir con la nueva tecnología.

La piratería de contenidos audiovisuales con derechos de autor ha sido y muy probablemente continuará siendo un tema de gran relevancia para las cadenas de televisión, estudios cinematográficos y sellos musicales. El sistema de protección de contenidos en televisión digital requiere una fuerte coordinación entre los fabricantes de los aparatos de televisión y los creadores de los contenidos. Como en Japón la inmensa mayoría de los productos electrónicos que se consumen son producidos en el mismo país esto no representa mucho problema ya que quienes deben ponerse de acuerdo son empresas de la industria local. Sin embargo, en el caso de los países sudamericanos, la situación es bastante diferente. Lo ideal sería que en el futuro todos los países que han elegido la norma se pusieran de acuerdo respecto a un formato de protección único pero dado que los aparatos de televisión y de grabación que se venden en el mercado latinoamericano son de orígenes y fabricantes muy diversos (la mayoría asiáticos) muy probablemente este tema no tenga una fácil solución.



6.5 Diagrama de bloques del receptor

La Figura 6-8 muestra el diagrama del receptor con sus principales componentes. En el caso de una señal analógica basta con demodular la señal para extraer la información pero en el caso de una señal digital ése es sólo el primer paso. Luego de demodular y extraer los bits de la señal transmitida con OFDM se realiza la corrección de errores basada en códigos convolucionales. Después de este paso recién pueden identificarse los paquetes con información enviados en el formato MPEG2-TS, el cual también incluye varios paquetes de control. De los paquetes con información podemos por vez primera vez reconocer y extraer los paquetes de video, audio y datos.

El proceso simplificado puede dividirse en los cuatro pasos que se describen a continuación:

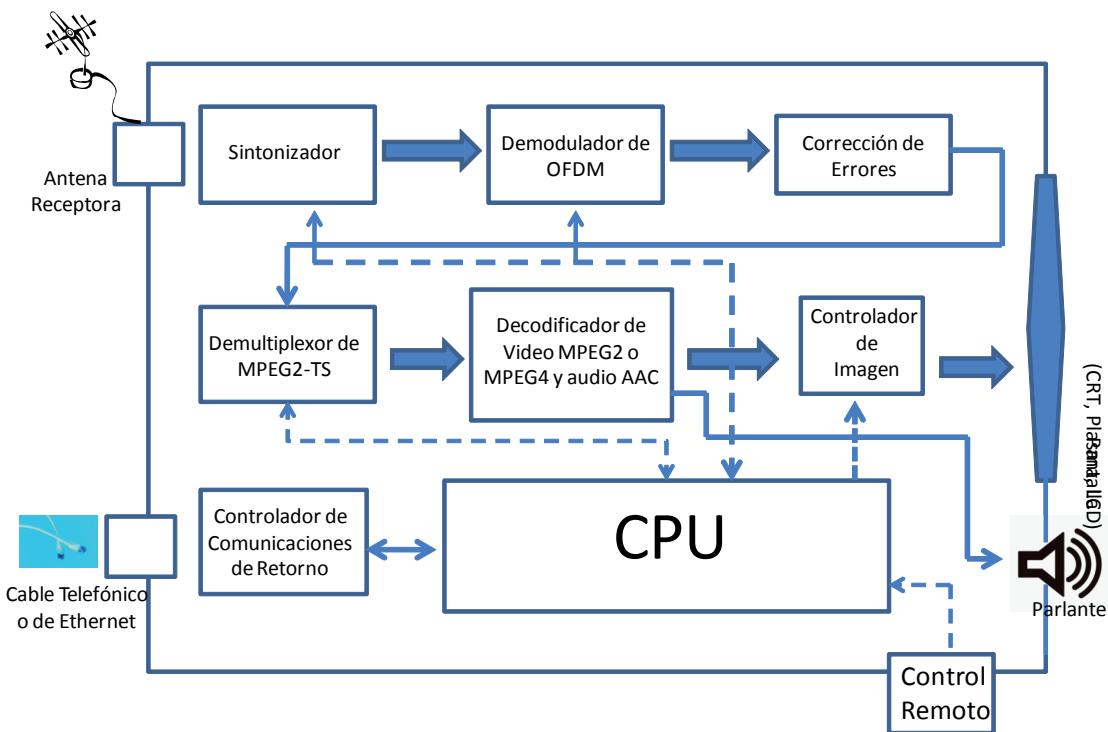


Figura 6-8. Modulos del receptor

1. Con el selector de canales se elige el canal deseado. La señal modulada con OFDM es demodulada extrayéndose los bits (unos y ceros) de información.
2. Los posibles errores en los bits de información son corregidos con los códigos convolucionales y luego los paquetes de información son extraídos en formato MPEG2-TS.
3. Los paquetes en formato MPEG2-TS contienen los datos de video, audio, la programación electrónica y todos los diferentes tipos de *medios* que han sido enviados por el transmisor. Recordemos que en el caso del estándar ISDB-T es posible que dentro del canal de 6 MHz seleccionado estén siendo transmitidos 2 o 3 programas simultáneamente. Los diferentes programas pueden ser distinguidos por la información de control del formato MPEG2-TS. La información correspondiente a cada programa es demultiplexada en: video de formato MPEG2, audio en formato AAC y datos (incluyendo aquellos transmitidos en formato BML). El audio y el video son enviados al decodificador de MPEG2/AAC mientras que los datos son enviados al CPU o procesador central del equipo.
4. En el decodificador de MPEG2/AAC los paquetes de video son extraídos y enviados al *controlador de superposición de imágenes* junto a los datos de texto (o imágenes) en formato BML que han sido procesados por el CPU. El audio extraído del mismo decodificador AAC es enviado (ya en formato analógico) directamente a los parlantes del equipo.
5. El controlador de superposición de imágenes toma la imagen proveniente de los datos (en BML) y la superpone a la imagen con los pixeles de video MPEG2 decodificados para mostrar una combinación de ambas o sólo una de ellas (dependiendo

de la selección del usuario y de las funciones del equipo receptor). El controlador envía la imagen superpuesta resultante al controlador de la pantalla que puede ser de plasma, de cristal líquido, o de tubo de rayos catódicos, etc.

El procesador central no sólo se encarga de procesar los datos en BML sino que también las órdenes provenientes del control remoto del aparato, además de controlar los componentes mencionados anteriormente así como la unidad de comunicaciones. Esta unidad está encargada de los servicios de transmisión de datos por Internet hacia la estación televisora.

6.6 Sistema de Selección de Canales

En el caso de la televisión analógica del formato estadounidense NTSC un número del control remoto está estrechamente ligado a una determinada banda de frecuencia de 6 MHz asignada a una televisora. En el caso de ISDB-T debido a que el canal de 6 MHz puede estar subdividido en dos o tres subcanales simultáneos se ha creado una etiqueta de identificación para cada subcanal llamada *identificador de servicio* o *Service ID* [ARIB STD-B32 Part 3]. En Japón el *Service ID* tiene cuatro dígitos y es único para cada subcanal. Su asignación está a cargo del Ministerio de Asuntos Internos y Comunicaciones de Japón. El televíidente elige como siempre el número de la estación televisiva en el control remoto y el decodificador la traduce automáticamente al *Service ID* de la estación deseada.

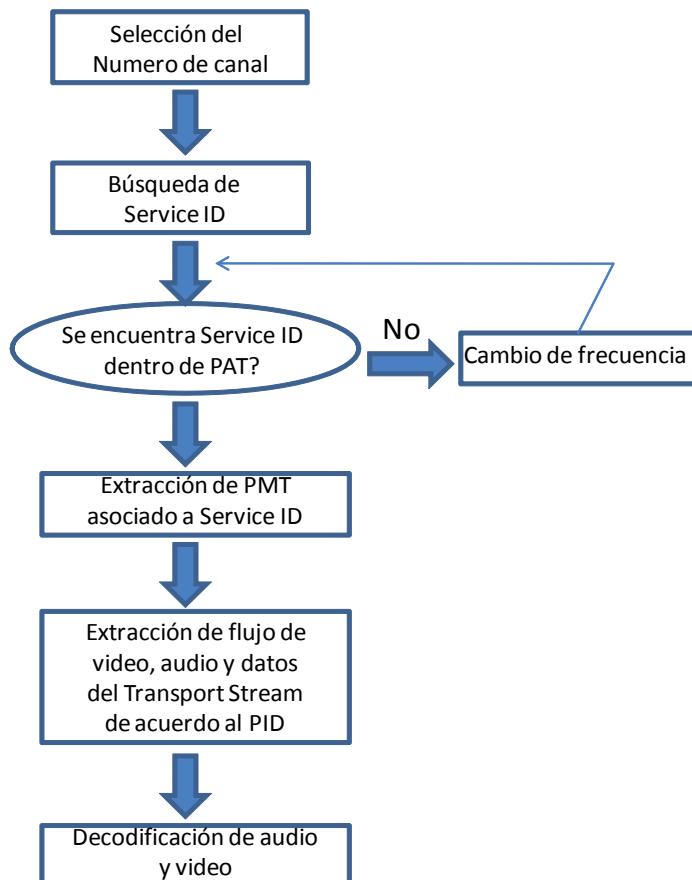


Figura 6-9. Lógica del proceso de decodificación

Dentro de la información transmitida en formato MPEG2-TS se incluye la llamada Tabla de Información de Red (Network Information Table) que asocia las diferentes bandas de frecuencia con sus respectivos Service IDs. Tal como puede verse en la Network Information Table (NIT) [ARIB STD-B32 Part 3] en la Tabla 6-2 es posible que dos o tres Service IDs diferentes compartan una sola banda de frecuencia. La Tabla de Asociación de Programas (Program Association Table) [ARIB STD-B32 Part 3], representada en el ejemplo de la Tabla 6-3, relaciona cada Service ID dentro de una banda de frecuencia con un Mapa de Programación (Program Map Table) [ARIB STD-B32 Part 3] en el que se incluyen los subcanales de la estación (en el caso de que existan). Un Mapa de Programación a su vez relaciona cada tipo de media que se transmite en cualquiera de estos subcanales - video, audio y datos - con un identificador único del tipo de datos transmitidos denominado Packet ID (PID). La Tabla 6-4 muestra el ejemplo de un mapa de programación (PMT).

La lógica general del proceso de decodificación puede verse en la Figura 6-9.

Tabla 6-2. Network Information Table (NIT)

Service ID	Frecuencia
2001	473.14 MHz
2002	473.14 MHz
2003	473.14 MHz
2100	503.14 MHz
2101	503.14 MHz

Tabla 6-3. Program Association Table (PAT)

Service ID	PID de PMT
2001	201
2002	202
2003	203
PID de NIT	310

Tabla 6-4. Program Map Table (PMT)

Service ID = 2001	
PID del video	500
PID del audio	600
PID de los subtítulos	700

6.7 Sistema de Alarma y Prevención de Desastres Naturales

El estándar ISDB-T incluye una funcionalidad llamada EWB (Emergency Warning Broadcasting) [ARIB TR-B14] que puede salvar muchas vidas en caso de desastres naturales como tsunamis o terremotos tales como el ocurrido en Chile el 27 de febrero de 2010 o en el mismo Japón el 11 de marzo de 2011. Este último se transformó en el quinto peor terremoto registrado hasta el momento en el mundo y produjo el

peor tsunami del que se tenga registro en Japón. Luego del fuerte terremoto hubo muchísimas réplicas de magnitud superior a 6.0 que podrían haber cobrado aún más vidas sin el sistema de advertencia que alimenta con información en tiempo real a ISDB-T. Gracias al sistema de advertencia EWB, los residentes de Tokio y áreas aledañas recibían información sobre las nuevas réplicas con unos 20 o 30 segundos de anticipación, tiempo suficiente para salir a la calle o refugiarse debajo de un escritorio en caso de encontrarse en un edificio de altura.

El Departamento de Meteorología de Japón emite desde 1985 (por medio de radiodifusión) señales de alerta o prevención en caso de desastres naturales como terremotos, tsunamis o tifones. El sistema también puede ser activado a petición de los gobiernos regionales. Japón cuenta con una excelente red de sismógrafos distribuidos a lo largo de todo su territorio que proporcionan información en tiempo real al sistema EWB.

En caso de una emergencia, la señal de EWB se transmite en la subportadora de OneSeg utilizando un tipo especial de medio definido a través de un descriptor especial en la cabecera del paquete MPEG2-TS y un PID equivalente a “1111” dentro del Mapa de Programación (PMT) (descrito en la sección anterior). La señal de emergencia con tipo de datos “111” y PID “1111” se envía en el byte número 27 del paquete MPEG2-TS y para recibirla el receptor sólo tiene que demodular cuatro subportadoras transmitidas con modulación DBPSK (mucho más robusta frente al ruido y la interferencia que QPSK, 16QAM y 64QAM) lo que incrementa en forma significativa su probabilidad de recepción. Además la misma información se envía en forma reiterada de modo de asegurarse que todos los dispositivos la reciban.

A fin de ahorrar batería en los dispositivos receptores de OneSeg que no están siendo utilizados, el sistema permite a éstos escuchar sólo los primeros 27 bytes de los paquetes MPEG2-TS y desactivarse en caso de que no haya una señal de alerta EWB por algunos milisegundos para luego repetir el mismo ciclo. En caso de que sí haya una señal de alarma EWB el dispositivo debe encenderse automáticamente y desplegar la información de advertencia incluida dentro del campo de datos del paquete MPEG2-TS. El sistema opera actualmente sólo en teléfonos celulares pero los fabricantes de televisores lo están incorporando también en sus productos de modo que éstos se enciendan de forma automática en caso de una emergencia.

En Japón cada vez que hay un temblor de magnitud perceptible a los pocos segundos todos los canales de televisión informan en la parte superior de la pantalla sobre la localización del epicentro, la magnitud y si existe o no peligro de Tsunami. Los teléfonos celulares cuentan además con un canal de datos dedicado especialmente a la transmisión de mensajes de advertencia que controla la oficina de emergencias del gobierno y también los gobiernos regionales. Es de esperar que los países que han adoptado el sistema ISDB-T y donde se producen sismos de gran magnitud y tsunamis como es el caso de Chile, Perú y Bolivia pongan cuanto antes en funcionamiento este sistema de emergencia u otro similar. El gobierno japonés a través de su Ministerio de Asuntos Internos y Comunicaciones ya ha ofrecido toda la ayuda que resulte necesaria para montar este tipo de sistemas.



6.8 Actualización del Firmware

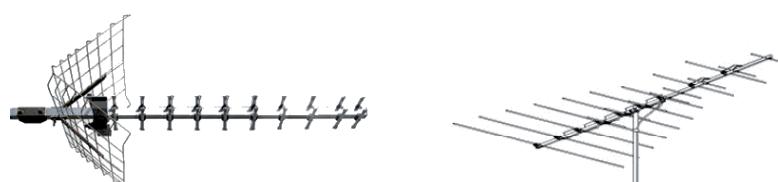
Vimos en la sección 6.3 que a través del canal de transmisión de datos en MPEG2-TS se realiza la actualización o creación de la guía de programación electrónica EPG así como se envía la clasificación de género de los programas y de todos los demás datos que se transmiten en forma de texto. Pero además el canal de datos cumple otro rol muy relevante: a través de él se puede realizar la actualización del software del sistema receptor. Para ello cada estación televisiva envía en su señal una tabla con el Calendario de Actualización de Software (Software Download Trigger Table) [ARIB TR-B15] donde se indica el día y hora en que se realizará el *download* (la bajada) de la próxima actualización de software así como las actualizaciones de la información relacionada con la EPG y los posibles cambios de frecuencia o bandas que pueda haber experimentado la televisora. Toda esta información es enviada por el transmisor usando el *sistema de carrusel* descrito en la sección 6.3.

6.9 Instalacion de equipos y antenas

La instalación de equipos para recibir televisión digital es simple si se tienen en cuenta dos cosas: i) la banda del espectro radioeléctrico que se utiliza en el país donde se reside (VHF o UHF) y ii) en el caso en que se use un Set Top Box (caja receptora que se conecta al televisor analógico) se debe confirmar que los formatos de entrada y salida de audio y video sean compatibles con los del televisor con receptor de televisión analógica. Analicemos ambos aspectos con un poco más de detalle.

Banda de frecuencia utilizada. Japón optó por abandonar la banda VHF para la transmisión de televisión digital y así dejarla abierta para otros servicios como el de programación a la carta (*video on demand*). De esta forma, el estándar ISDB-T utiliza en Japón sólo la banda de UHF. Brasil optó por seguir el mismo camino de Japón y hoy su sistema de televisión digital SBTVD funciona también sólo en la banda UHF. Si se utiliza la banda VHF o UHF no pasa tanto por una cuestión técnica sino que más bien constituye una decisión regulatoria conforme al sistema de asignación del espectro radioeléctrico en cada país. Desde el punto de vista de la instalación por parte del usuario final la única diferencia está en las antenas de recepción que debe utilizarse ya que son diferentes para las bandas VHF y UHF. Últimamente, sin embargo, puede encontrarse en el mercado receptores y antenas que operan en ambas bandas.

La Figura 6-10 muestra la forma típica de las tradicionales antenas tipo Yagi para las bandas UHF y VHF que se puede ver comúnmente instaladas en las azoteas de edificios y casas en Japón.



(a) Antena UHF

(b) Antena VHF

Figura 6-10. Antenas VHF y UHF

Formatos de entrada y salida de audio y video. En primer lugar se debe señalar que para evitar todo tipo de problemas de conexión lo mejor es adquirir un aparato de televisión con el receptor de televisión digital incorporado. Si ése es el caso, entonces sólo nos queda preocuparnos de que la antena de recepción sea la correcta (banda VHF o UHF) como se señaló en el punto anterior.

En el caso de que se decida adquirir una cajita *set top box* para conectarla al aparato de televisión, se debe tomar en cuenta que probablemente la salida de la cajita será analógica y que por lo tanto la calidad de alta definición no será posible debido a que el aparato de televisión no las soporta. El receptor de ISDB-T dentro de la cajita hará la corrección de errores, la decodificación del Interleaving en tiempo y frecuencia, etc. y por lo tanto la imagen analógica de salida que se enviará al aparato televisor se verá sin problemas de ruido o imágenes fantasma pero la mejor definición de imagen que podrá obtenerse será la *definición estándar* analógica de 525 líneas a menos que el aparato de televisión soporte entradas digitales y ofrezca mejores calidades de imagen.

Dos conectores digitales muy utilizados hoy en día corresponden al Digital Video Interactive o DVI [Digital Video Interactive] y al High-definition Multimedia Interface o HDMI [High Definition Multimedia Interface]. En pocas palabras el DVI sólo soporta la transferencia de video de alta definición (1920x1080) pero no soporta la transmisión de audio, la que debe realizarse con los clásicos conectores analógicos de estéreo con los que cuentan casi todos los aparatos de televisión. El HDMI es una tecnología más avanzada que DVI. Soporta la transferencia de todo tipo de datos multimedia incluyendo el audio digital (de hasta 5.1 o 7.1 canales) y el video de alta definición (1920x1080 pixeles). Si su aparato de televisión soporta HDMI o DVI es absolutamente recomendable que adquiera un *set top box* cuyas salidas tengan estos conectores también ya que de esa forma podrá obtener calidades de imágenes de *super definición* y *alta definición*.

En Japón, un 7% por ciento de la gente que adquirió televisores recientemente pensó equivocadamente que los aparatos que compraron tenían el receptor de TV digital incorporado sólo porque el aparato era de pantalla plana. El gobierno tomó cartas en el asunto y decidió pegar una etiqueta adhesiva de gran tamaño en todos los televisores con receptores analógicos en venta en las tiendas advirtiendo que se trataba de un televisor analógico que no funcionaría más allá del 24 de julio del 2011, fecha en que se realizará el apagón analógico definitivo. Es muy probable que la situación se repita en los países sudamericanos por lo que es necesario aclarar que un asunto es la tecnología de pantalla con que cuenta el aparato - *plasma* o *cristal líquido* - y otro muy diferente es si el aparato tiene o no el receptor de TV digital incorporado. Es por lo tanto necesario que los gobiernos de cada país tomen las medidas pertinentes para que los distribuidores y tiendas informen debidamente a la población a medida que se acerque la fecha del apagón analógico.

6.10 Tecnología de Pantallas

La magnífica definición de imagen que se logra con la televisión digital no es posible de apreciar sin una buena pantalla. Existen hoy en día básicamente tres tecnologías para la fabricación de pantallas: i) el clásico tubo de rayos catódicos, ii) pantallas de plasma [W.Cranton, 2010], y iii) pantallas LCD (Liquid Crystal Display) o de cristal líquido [W.Cranton, 2010]. No nos referiremos aquí a la tecnología de rayos catódicos ya que hay muchísima literatura relacionada con esta tecnología que ha acompañado a la televisión analógica desde sus inicios y que está en vías de extinción. En este momento algún lector podría estarse preguntando qué ocurre con la tecnología de pantallas LED (Light Emitting Diodes). Ocurre que esta tecnología es exactamente la misma que la que se usa en las pantallas de cristal líquido y por eso no ha sido incluida en otra categoría.

Tecnología de plasma. La tecnología de plasma es sin duda la más popular para pantallas planas de más de 50 pulgadas. Su gran popularidad se basa en su capacidad de otorgar vivacidad a los colores incluso en escenas oscuras mediante la saturación de los mismos. Además, las pantallas de plasma son hechas de cristal, el cual refleja más luz que el material utilizado en las pantallas de cristal líquido. Internamente, se utiliza electricidad para excitar los átomos de gas encerrados en las diminutas celdas que forman la pantalla. Éstos a su vez liberan luz ultravioleta que al impactar el fósforo que reside en la capa interna de las celdas emite energía en forma de luz visible. Cada una de las celdas es subdividida en tres subceldas con fósforo para cada uno de los tres colores primarios (azul, rojo y verde) con los que puede formarse cualquier color requerido ajustando sus respectivas intensidades.

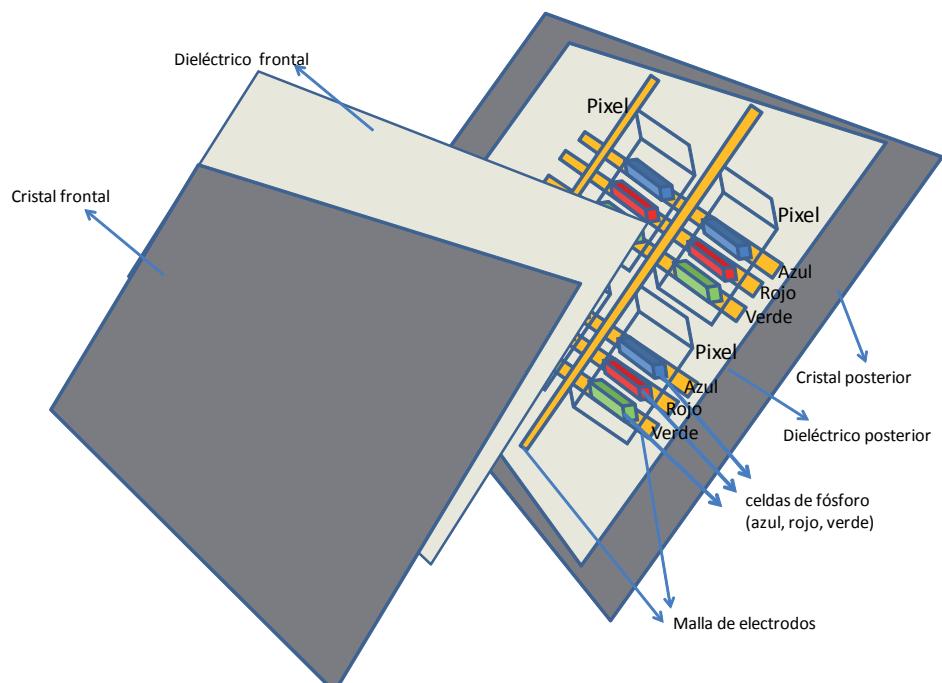


Figura 6-11. Pequeña sección de una pantalla de plasma con cuatro píxeles y sus respectivas celdas de fósforo

Tecnología de cristal líquido. La tecnología de cristal líquido o LCD se basa en una matriz de píxeles rellenos con cristales líquidos que son posicionados frente a una fuente de luz fluorescente o reflector para producir imágenes en color o blanco y negro. Cada pixel de un LCD consiste generalmente en una capa de moléculas alineadas entre dos electrodos transparentes y dos filtros polarizadores cuyos ejes de transmisión son generalmente perpendiculares. La aplicación de un voltaje regulado sobre las moléculas de cristal líquido permite rotar la luz incidente en una dirección determinada de manera de controlar la intensidad de la luz que emana hacia el exterior. Si el voltaje aplicado es lo suficientemente grande las moléculas de cristal líquido se alinean en una cierta dirección sin permitir que la luz incidente rote y en consecuencia la luz que pasa a través del primer filtro es bloqueada por el segundo con lo que no se emite luz hacia el exterior.

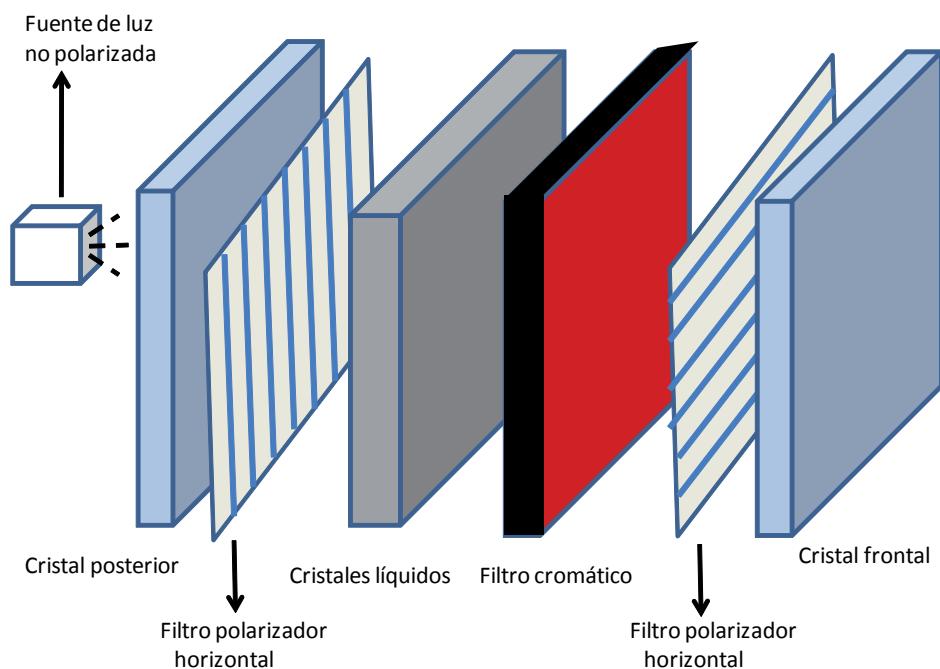


Figura 6-12. Estructura interna de una pantalla de cristal líquido

En las pantallas de LCD capaces de mostrar colores cada pixel es subdividido en tres subpixeles pigmentados con los colores básicos rojo, azul y verde. Cada subpixel es controlado de manera independiente y así pueden extraerse millones de combinaciones de colores de cada pixel. La opacidad de cada subpixel es ajustada mediante la regulación de la intensidad de la luz que lo atraviesa. En 2008, las ventas globales de pantallas de LCD superaron por primera vez las de pantallas de rayos catódicos (CRT). La tecnología de pantallas LED (diodos emisores de luz) es exactamente la misma que la utilizada en LCD con la salvedad de que la emisión de luz se realiza a través de una matriz de LEDs en lugar de luces fluorescentes. Los LEDs consumen mucho menos energía que las luces fluorescentes comúnmente utilizadas en las pantallas LCD y no hacen perder calidad a la imagen, razón por la cual este tipo de tecnología se ha tornado extremadamente popular desde 2007 especialmente promovida por el fabricante coreano Samsung. Por motivos de marketing se les ha denominado pantallas LED dando la impresión errónea de que se trata de una tecnología de pantallas absolutamente nueva aún cuando se trate de la misma tecnología que la de las pantallas LCD con la única salvedad de que la luz

que se utiliza en la parte posterior de la pantalla es emitida por LEDs en vez de luz fluorescente.

7. Comparación de ISDB-T con los estándares americano y europeo

En Europa el servicio de televisión digital que sigue el estándar Digital Video Broadcasting-Terrestrial (DVB-T) comenzó en países como Suecia y España en septiembre de 1998. Poco después, en noviembre del mismo año Estados Unidos inició las transmisiones de televisión digital usando su propio estándar Advanced Television System Committee (ATSC). En Asia los primeros países en comenzar el servicio fueron Australia con el estándar ATSC y Corea del Sur con el DVB-T en enero y octubre de 2001, respectivamente. Japón en esos años se encontraba trabajando en los últimos detalles de su propio estándar ISDB-T cuyo servicio daría partida en diciembre de 2003.

Las principales diferencias técnicas entre los estándares pueden observarse en la Tabla 6-1. Como puede apreciarse en la Tabla 6-1 el estándar estadounidense ATSC funciona en base a una única portadora lo que lo hace muy susceptible a la interferencia por multi-trayectoria y al así llamado “efecto fantasma” en que la imagen aparece duplicada. Los estándares japonés y europeo, por su parte, utilizan la modulación OFDM lo que los hace mucho más resistentes a este tipo de interferencia.

La otra gran diferencia es que el estándar nipón fue concebido con un canal llamado OneSeg dedicado especialmente a la transmisión hacia teléfonos móviles y otros dispositivos portátiles, característica que no poseen los otros dos estándares. En Europa, el estándar DVB-H [B.Furht, 2008] enfocado en la transmisión hacia teléfonos móviles conforma un superconjunto del sistema de televisión digital terrestre DVB-T. Fue aprobado en 2004 y en marzo de 2008 la Unión Europea la adoptó oficialmente como la “tecnología preferida” para transmitir a dispositivos móviles. La implementación de servicios comerciales usando DVB-H, sin embargo, ha sido más bien lenta debido principalmente a problemas de regulación de frecuencias en cada país de la UE así como a continuos cuestionamientos por parte de los diferentes operadores móviles acerca de los posibles modelos de negocios en torno al uso de esta tecnología. En Japón, por otra parte, las transmisiones hacia los teléfonos móviles que comenzaron el primero de abril de 2006 son completamente gratuitas para los usuarios. En 2008 más del 60% de los teléfonos vendidos incluían un receptor de televisión digital.

Tabla 7-1. Comparación de los tres principales estándares de televisión digital

Propiedad / Estándar	ISDB-T	DVB-T	ATSC
Máxima tasa de transferencia	23 Mbps	32 Mbps	19 Mbps
Super Alta Definición (Full HD)	Soportada	Soportada	Soportada
Resistencia a interferencia por multi-trayectorias	Altamente Resistente	Altamente Resistente	Poco resistente
Red de una sola frecuencia	Possible	Possible	Imposible
Recepción en dispositivos móviles	Excelente	Possible	Imposible
Transmisión a teléfonos móviles y dispositivos portátiles	Incorporada dentro del mismo sistema (Servicio OneSeg)	No incorporada dentro del sistema	No incorporada dentro del sistema
Sistema de modulación	OFDM con subcanal especialmente dedicado a la transmisión hacia teléfonos móviles (Servicio OneSeg)	OFDM con canales sólo para recepción en dispositivos fijos de alta resolución	Sistema de portadora única con modulación 8 VSB (8-level vestigial Side band modulation)

8. La televisión del futuro

8.1 Televisión tridimensional

Los laboratorios de la televisora nacional japonesa Nippon Hosoo Kyoukai (NHK) [NHK], lugar donde fue diseñado el sistema ISDB-T, se encuentran trabajando en un sistema llamado Super High Vision con una resolución cuatro veces mayor a la Super Alta Definición. Eso quiere decir una increíble resolución de 7680x4320 píxeles. Pero aunque esto parezca grandioso (y lo es), el traer más resolución que ésta a la pantalla de un hogar no tiene un mayor efecto en la experiencia del televidente. En otras palabras, hemos llegado a un límite de resolución sobre el cual la calidad de imagen percibida por un ser humano no varía. Los investigadores de la NHK saben esto muy bien desde hace muchos años y es por eso que se encuentran enfocados a lo que pudiera ser el próximo salto tecnológico audiovisual: la televisión tridimensional. Empresas japonesas como Sony y Panasonic han lanzado en 2010 sus televisores 3D justo a tiempo para la Copa Mundial de Fútbol. El éxito mundial logrado por la película Avatar de los estudios de Hollywood a fines de 2009 ha proporcionado aparentemente un empuje bastante fuerte en el mercado a los aparatos de televisión tridimensionales. Sin embargo, lo cierto es que esta tecnología ha existido ya por más de un siglo y nunca ha logrado salir de las salas de cine. Si esta vez logrará o no masificarse entre pantallas de televisores y computadoras o lo responderá el mercado.

Existen 5 formas básicas de crear imágenes tridimensionales en televisión:

- Imágenes esteroscópicas: corresponden a imágenes de video tomadas simultáneamente utilizando dos cámaras separadas aproximadamente por la distancia normal entre los dos ojos. Uno de los videos se cubre en pantalla con un manto de color rojo y el otro video con uno de color azul (cián). Luego, ambos videos se montan un sobre otro. El efecto tridimensional se obtiene al utilizar anteojos donde uno de los lentes es de color rojo y el otro de color azul. A través de cada uno de los lentes sólo puede verse el video cubierto por el color primario opuesto lo que otorga una visión esteroscópica o tridimensional. Este es sin duda el sistema más utilizado para generar una experiencia visual tridimensional frente a una pantalla.
- Polarización: el principio es muy parecido al anterior con la diferencia de que en lugar de cubrir cada video con un manto de color primario se polariza la imagen de cada video con un filtro diferente. En los anteojos cada filtro deja pasar la luz de sólo uno de los videos con lo que cada ojo percibe una imagen diferente logrando así una visión esteroroscópica.
- Muestra alternada de imágenes esteroscópicas: el fundamento de esta técnica se basa en mostrar las imágenes al doble de la frecuencia original y alternar las imágenes dirigidas a cada ojo. Así por ejemplo, una película grabada a 30 cuadros por segundo en formato tradicional es reemplazada por una secuencia de imágenes

alternadas mostradas a 60 cuadros por segundo provenientes de dos cámaras con perspectivas diferentes. Esta técnica no requiere que el televíidente use anteojos pero requiere de un sistema que funcione a un mínimo de 50 cuadros por segundo lo que lógicamente incrementa su costo.

- Pantallas con cristales lenticulares: los cristales lenticulares corresponden a formaciones de lentes con aumento ordenados de forma que se ofrece una imagen diferente dependiendo del ángulo o perspectiva con que se les observe. Esto sirve para dar la sensación de profundidad en las imágenes. Esta técnica tampoco requiere que el televíidente use anteojos pero la fabricación de este tipo de pantallas es caracterizada por su alto costo.
- Detección automática de la posición del televíidente: este sistema utiliza un detector de posición del rostro del televíidente. Al precisar la perspectiva o el ángulo con que la persona observa la pantalla el sistema cambia en forma automática la imagen desplegada en la pantalla ofreciendo así una experiencia tridimensional. Una ventaja de este sistema es que no requiere de anteojos ni tampoco de costosas pantallas sino que funciona utilizando una pantalla bidimensional común y corriente. Una gran desventaja del sistema es que lógicamente funciona sólo cuando hay una sola persona en frente de la pantalla.

De todas las tecnologías mencionadas anteriormente la más utilizada es la de imágenes estereoscópicas. Una de sus desventajas es que se requiere de anteojos especiales aunque estos pueden ser construidos a muy bajo costo usando materiales como cartón y celofán. La principal desventaja no sólo de esta técnica sino de todas las que se mencionan (menos la última) es que un porcentaje no menor de televíidentes sufre mareos al permanecer un tiempo prolongado frente a un programa en formato tridimensional ya sea con o sin anteojos. Estará por verse entonces cómo será la reacción de los televíidentes frente a las nuevas pantallas tridimensionales con soporte de Súper Alta Definición y sonido de 7.1 canales que están siendo lanzadas al mercado en 2010 por empresas japonesas como Sony y Panasonic. Lo interesante de estos aparatos es que pueden cambiar libremente entre el formato bidimensional tradicional y el tridimensional con tan sólo presionar un botón del control remoto y también proveen acceso a sitios en Internet como Hulu y YouTube o incluso a aplicaciones Web como Skype, Twitter o Picasa. La integración de aplicaciones populares en Internet dentro de la pantalla del televisor es algo que está ocurriendo hoy y que no se detendrá. Con respecto a este punto nos referiremos con mayor profundidad en la siguiente sección.

8.2 La influencia de Internet y el Video on Demand

La televisión siempre ha girado en torno a una gran fuente de contenidos audiovisuales administrada por cadenas televisivas que generalmente se financian ya sea en base a espacios de tiempo que venden para publicidad o mediante contribuciones financieras directas por parte de la ciudadanía - como es el caso de la NHK en Japón o de la BBC [BBC] en el Reino Unido. Los programas que se pasan en la televisión salen al aire en un día y hora determinados y aunque pueden ser grabados la naturaleza intrínseca de este medio está restringido al espacio de tiempo de la emisión y a la banda de

frecuencia del canal. En otras palabras, si deseamos ver un programa en particular necesitamos estar sintonizado a un canal determinado a la hora programada por esa estación televisora. Por supuesto que una alternativa es programar su grabación en el DVR - un ejemplo interesante de DVR moderno es el de TiVO - para verlo más tarde, pero este sistema no es parte del televisor sino que requiere un dispositivo accesorio.

El modelo tradicional de televisión descrito en el párrafo anterior comenzó a cambiar abruptamente con el comienzo del video en Internet y en particular en 2005 con la aparición y posterior masificación de Youtube. Los contenidos en Youtube no están restringidos por tiempo ni por banda de frecuencia. Sólo hace falta introducir el tópico, actor o programa que nos interesa para dar con él en pocos segundos. Youtube incluye hoy videos en alta definición, la posibilidad de crear canales propios donde se puede recibir información sobre el tipo de audiencia, el lugar donde los videos son vistos, etc. Se trata de una plataforma de búsqueda de contenido audiovisual formidable pero tiene un solo problema: al ser un sitio donde cualquier persona puede subir el video que desee es muy difícil evitar que se ingresen videos que tienen derechos de autor, atentan contra la moral, etc. Esta situación le ha traído muchos dolores de cabeza a Google (quien adquirió Youtube a fines de 2006), pero utilizando técnicas de detección automática basadas en la extracción de *huellas digitales perceptuales* de los contenidos (conocidas como audio fingerprinting y video fingerprinting) el gigante de las búsquedas en Internet ha logrado reducir en forma significativa este problema, atrayendo de esta forma un mayor interés por parte de las televisoras o creadoras de contenido. Además con el fin de rentabilizar Youtube, Google ha montado una plataforma de publicidad para los videos en la que utiliza su famoso servicio de AdSense que despliega publicidad relacionada con el contenido. Pese a lo anterior el servicio está intrínsecamente ligado a la pantalla de una computadora que en palabras simples no es "la mejor pantalla del hogar" de comienzos del siglo XXI. La mejor pantalla en la mayoría de los hogares es proporcionada lógicamente por el viejo y conocido aparato de televisión.

Para la gran mayoría de la gente el concepto de televisión está hoy en día asociado a un mar de contenido (como el del TV Cable) donde se tiene un enorme número de canales disponibles para disfrutar el hacer zapping (navegación visual entre diferentes canales) pero donde es complicado buscar un programa en particular si no se sabe la hora y el día en que lo pasarán. Con su proyecto Google TV [Google TV], la compañía estadounidense ha decidido evolucionar el concepto de televisión llevando al hogar una experiencia similar a Youtube donde se puede encontrar cualquier contenido que uno desee pero para verlo en la mejor pantalla del hogar. Si bien es un concepto interesante, ha resultado poco popular entre los propietarios de contenido debido al acceso gratuito al mismo ofrecido por Google TV. Por este motivo muchos proveedores de contenido en los EEUU han comenzado a bloquear a las Google TV, pero el gigante de las búsquedas online no ha perdido el tiempo y ha comenzado a negociar con grandes cadenas de televisión. Apple tampoco se ha quedado atrás, y ha lanzado al mercado el Apple TV [Apple TV], un dispositivo que se conecta al televisor y ofrece una gran cantidad de contenidos en alta definición de películas y shows de televisión. Apple TV partió desde un principio ofreciendo contenidos por los que ha negociado con grandes cadenas de televisión. Este dispositivo permite además la interconexión con otros *gadgets* de Apple como el iPhone, el iPad o el iPod permitiendo por ejemplo ver una película grabada en el iPad o iPod en el televisor conectado a la Apple TV. El siguiente paso de Google TV y Apple TV será muy probablemente la tienda de

aplicaciones online a la *iPhone* o *Android* en la que se podrá no sólo adquirir películas o series de televisión sino también juegos y todo tipo de aplicaciones educativas y de esparcimiento.

Así, todo parece indicar que el futuro de la televisión apunta hacia la convergencia de la computadora y del televisor, o mejor dicho la absorción de la televisión por parte de la Internet como un simple dispositivo de recepción más. En otras palabras la televisión del futuro no sólo se limitará a desplegar los canales locales asociados a cierta banda de frecuencia de recepción y cuyos contenidos son distribuidos mediante radiodifusión a una hora determinada, sino que estará conectada a Internet todo el tiempo y en ella será posible buscar los programas que deseemos en cosa de segundos para, por ejemplo, ver videos de sitios como Youtube o nuestras series de televisión favoritas en forma gratuita o en sitios pagados sin ninguna restricción temporal de día u hora específica. Pero no sólo eso, también será posible usar Skype para conectarnos mediante una video conferencia con nuestros familiares o amigos en el otro lado del mundo, bajar y correr una aplicación de astronomía para hacer la tarea de ciencias, bajar la última versión de un juego en línea o ver los descuentos que ofrecen distintas tiendas comerciales.

Existe también otro concepto dando vueltas en estos días llamado *TV Everywhere*, y que consiste básicamente en ser capaz de ver contenidos de la televisión en cualquier dispositivo, ya sea este fijo o portátil. Todo parece indicar que en los próximos años veremos más y más televisores capaces de conectarse a Internet para acceder a Video on Demand y veremos también un cada vez mayor número de dispositivos móviles capaces de recibir televisión radiodifundida a través de receptores de TV Digital como los de OneSeg o bien a través de una simple conexión 3G o WiFi a sitios de transmisiones en vivo como Ustream o Youtube.

8.3 La digitalización y la interconectividad carecen de límites

Antes de finalizar este texto deseo hacer por último una reflexión que no tiene relación con la televisión digital sino más bien con la digitalización de todo aspecto de nuestra vida. Con ello se invita al lector a reflexionar sobre las posibles consecuencias que el proceso de digitalización podría tener en las generaciones posteriores. Como botón de muestra consideremos el caso hipotético descrito a continuación.

“Hoy en día gracias a las técnicas de compresión del códec H.264 se puede ver un video de súper alta definición con tan sólo 6 Mbps. Pero la tecnología de compresión de video no para allí sino que la estandarización del futuro códec H.265 [H.265] ya nos habla de una eficiencia 4 veces mayor a la alcanzada por el H.264. Eso quiere decir que en unos años podremos apreciar la misma calidad de imagen que nos ofrece actualmente un video en formato H.264 de 6 Mbps con un video en formato H.265 de tan sólo 1.5 o 2 Mbps. Imaginemos que nuestros ojos fueran una cámara de video que graba continuamente cada segundo de nuestras vidas desde que nacemos hasta que morimos. ¿Cuánto espacio en disco duro ocuparía el video de la vida entera de una persona que vive 75 años por ejemplo?. Antes de continuar leyendo lo invito a pensar un momento para ver si su intuición anda bien.

Pongámonos en el caso pesimista y hagamos los cálculos basados en H.264. Se requeriría de aproximadamente 1,774 Petabytes para grabar la vida entera de una

persona a 6 Mbps. En agosto de 2010 el CEO de Google Eric Schmidt aseveró en la conferencia tecno-económica Techonomy celebrada en Lago Taohe, California, que la humanidad crea hoy cada dos días la misma cantidad de información que se tomó en crear desde sus inicios hasta el año 2003. A este paso, se estima que a fines de 2012 habrá aproximadamente 1.774 Exabytes de información almacenada en el mundo entero – un Exabyte corresponde a 1.000 Petabytes o 1.000.000 de Terabytes. Continuando con el cálculo anterior, con esos 1.774 Exabytes de información podríamos almacenar los videos de grabados en súper alta definición a 6 Mbps de la vida completa de mil millones de personas. Digamos ahora que en vez de super alta definición nos conformamos con un video de mediana calidad de tan sólo 600 Kbps en H.264 por cada persona. En ese caso, la capacidad de 1.774 Exabytes que tendremos en 2012 nos alcanzaría para almacenar los videos de toda la vida de cada una de las 6 mil 900 millones de personas que habitamos actualmente el planeta y aún nos sobraría capacidad para 3 mil millones de personas más. Con justa razón podemos preguntarnos: bueno pero ¿para qué podría servirnos almacenar cada segundo de la vida de toda la gente del mundo?. Respuestas hay tantas como dé la imaginación pero transportémonos por ejemplo a una clase de historia en el año 2250 donde los estudiantes revisan algunos pasajes de la vida de un famoso científico nacido el año 2071. Supongamos que la vida entera de ese personaje ha sido grabada así como también han sido grabadas las vidas de todas las personas que interactuaron con él. De ser así podríamos en teoría saber con el grado de detalle que deseáramos cualquier pasaje de su existencia (guardando su privacidad por supuesto). Probablemente ni siquiera haga falta ver ningún video en detalle porque seguramente todos los pensamientos y las sensaciones que esa persona experimentó durante su vida también podrían estar grabados en una enorme base de datos. Tal base de datos podría ser capaz de responder de forma inteligente cualquier pregunta sobre la vida de dicho personaje.”

El escenario descrito en el párrafo anterior puede sonar a un ejemplo un tanto simplista o ridículo ya que, entre otras cosas, lo más probable es que el concepto tradicional de sala de clases desaparezca antes del 2250 pero lo rescatable de este relato es que hoy en 2011 estamos a pocos años del punto en que guardar la información percibida por los cinco sentidos durante la vida de todas y cada una de las personas que habitamos este mundo sea técnicamente posible y eso sí es muy poderoso.

Probablemente en este punto al lector que ha visto la película Matrix ya se le ha venido a la mente. Pero acaso ¿no le gustaría ver quiénes fueron, cómo vivieron y qué pensaban sus bisabuelos o tatarabuelos, o personajes famosos del pasado a los que siempre ha admirado?. Quizás nosotros no podamos hacerlo pero sí podrán nuestros bisnietos. Por lo demás, todo esto por supuesto que está relacionado con el espinoso tema de la privacidad en Internet y la cantidad de información que existe en la red sobre todos y cada uno de nosotros. Sobre esta nueva era de interconectividad social me temo que en estos días estamos viendo sólo los primeros atisbos o lo que podría llamarse “la prehistoria” de la mano del nacimiento y popularización de redes y aplicaciones sociales como Facebook y Twitter. Vendrá mucho más de eso en el futuro, en un mundo cada vez más global e interconectado. El siguiente paso esperado, de hecho, es la comunicación entre dispositivos sin que exista ninguna intervención humana, lo que se conoce como machine-to-machine o “m2m” communications. Muy probablemente al cabo de unos años habrá una infinidad de redes de sensores de

medición de parámetros físicos útiles para el clima, la agricultura, la salud, el consumo eléctrico, entre muchísimas otras aplicaciones, los cuales estarán interconectados entre sí y también conectados con poderosos servidores encargados del procesamiento de los datos obtenidos y la extracción de información que resulte útil, utilizando sofisticadas técnicas de lo que se conoce como minería de datos (data mining). De eso aún ni siquiera vemos los primeros atisbos, al menos no en forma masiva.

En la actualidad nos movemos en medio de un mundo de información que gira en torno a los pensamientos y acciones diarias de cada una de las 6 mil 900 millones de personas que habitamos este planeta. Internet nos ha proporcionado el mayor cerebro que hemos tenido hasta ahora de eso que en la jerga especializada de la informática se conoce como *inteligencia colectiva* y con ello nos ha puesto en el sitio más cercano al concepto de Inteligencia Universal que hemos tenido como especie. Para graficar este concepto imagine su cerebro conectado a Google en forma constante para responder a cualquier pregunta que se le venga a la mente. Participar en un programa de trivia sería cosa de niños. Imagine todo el conocimiento al que tendría acceso con su cerebro conectado con Wikipedia. Para bien (y para mal como ocurre con cualquier avance tecnológico de la humanidad) dudo que estemos a más de doscientos años de llegar a ese punto tampoco. Existen muchísimos estudios científicos que avalan el que un grupo de personas es en la mayoría de los casos más inteligente que el miembro más inteligente del mismo grupo. Algunos de los más acuciosos pueden hallarse en el libro de Scott E. Page titulado “La Diferencia: Como el Poder de la Diversidad Crea Mejores Grupos, Empresas, Escuelas y Sociedades” o en el de James Surowiecki titulado “La Sabiduría de las Masas: Por qué Muchos son más Inteligentes que unos Pocos y cómo la Sabiduría Colectiva construye Negocios, Economías, Sociedades y Naciones”. Vemos muestras de esto a diario en Wikipedia donde a pesar de la diferencia de visiones y opiniones, el contenido o la información converge a un punto medio bastante objetivo, aún cuando miles o cientos de miles de personas lo editen o contribuyan con su propia visión. Ha sido quizás el primer gran ejemplo de plena democracia aplicada directamente a la información en Internet. Muy probablemente usted también visita foros de discusión a menudo para obtener información médica, legal, científica, sobre la crianza de los hijos, sobre computación, etc. Todos estos foros nos muestran la riqueza impresionante de información que pueden proveer cientos o miles de personas en conjunto. Creo que estaré de acuerdo conmigo en que tal cantidad y calidad de la información sería imposible de obtener aún de la persona más inteligente sobre la faz de La Tierra.

La fuerza de Internet y la digitalización de “todo aspecto” de nuestras vidas han llegado para quedarse. Después del libro impreso y antes de la Internet, han sido la radio primero y la televisión más tarde las mayores herramientas de información e inteligencia colectiva que hemos tenido. La digitalización de su contenido audiovisual y la conexión del aparato televisor a la red Internet era sólo una cosa de tiempo. La mejor pantalla del hogar que nos ha ofrecido durante décadas contenido radiodifundido se apronta a ofrecernos nuestros programas favoritos en el día y a la hora que queramos sin necesidad de grabarlos, la posibilidad de realizar búsquedas de contenido específico, conexión a sitios gratuitos como Youtube o bien de contenido prime o pagado como Netflix, entre otros. Por otro lado los servicios de video para todo tipo de dispositivos móviles continuarán diversificándose y masificándose durante los próximos años a medida que bajan los costos de los teléfonos inteligentes y éstos continúan volviéndose técnicamente más poderosos. El estándar ISDB-T junto con los

demás estándares de televisión digital constituye sólo un primer paso de las industrias audiovisual y de radiodifusión hacia un mundo completamente digitalizado de creación y distribución de contenidos basado en la integración de múltiples plataformas de servicios y distribución, destinados a todo tipo de receptores, fijos y móviles.

Le agradezco si ha tenido la paciencia de llegar a este punto del presente texto. Espero que mi intención de que haya aprendido las bases del estándar japonés de televisión digital y de los sistemas de telecomunicaciones modernos se haya cumplido. Es de esperar que los países latinoamericanos que han elegido la norma japonesa establezcan canales de cooperación técnica y de negocios para aprovechar de mejor forma las enormes posibilidades que ofrece esta tecnología.

Bibliografía

- A.Dholakia. (1994). *Introduction to Convolutional Codes with Applications (The Springer International Series in Engineering and Computer Science)*. Springer.
- Ahmad, A. (2003). *Data Communication Principles*. Springer.
- Anexo AA de ISDB-T. (n.d.). Retrieved from Dibeg: <http://www.dibeg.org/techp/feature/ANNEX-AA.pdf>
- Apple TV. (n.d.). Retrieved from Apple TV: http://en.wikipedia.org/wiki/Apple_tv
- ARIB. (n.d.). *Data Coding And Transmission Specification For Digital Broadcasting (Version 5.0) (2006)*. Retrieved from ARIB STD-B24: <http://www.dibeg.org/aribstd/ARIBSTD.htm>
- ARIB. (n.d.). *Operational Guidelines for Digital Satellite Broadcasting*. Retrieved from Operational Guidelines for Digital Satellite Broadcasting: www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/8-TR-B15v4_6-1p4-E1.pdf
- ARIB STD-B32 Part 3. (n.d.). Retrieved from Signal Multiplexing System: http://www.cetuc.puc-rio.br/~amanda.cunha/projeto/ISDBT/ARIB%20STD-B32_Version%201_4.pdf
- ARIB TR-B14. (n.d.). Retrieved from OPERATIONAL GUIDELINES FOR DIGITAL TERRESTRIAL TELEVISION BROADCASTING: http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/8-TR-B14v2_8-1p3-1-E2.pdf
- ARIB TR-B15. (n.d.). Retrieved from OPERATIONAL GUIDELINES FOR DIGITAL SATELLITE BROADCASTING: www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/8-TR-B15v4_6-1p4-E1.pdf
- B.Furht, S. (2008). *Handbook of Mobile Broadcasting*. Auerbach Publications.
- BBC. (n.d.). Retrieved from BBC: <http://en.wikipedia.org/wiki/Bbc>
- Beach, A. (20008). *Real World Video Compression*. Peachpit.
- C.M.Kozierok. (2005). *TCP/IP Guide*. No Starch Press.
- C.Perkins. (2003). *RTP Audio and Video for the Internet*. Addison-Wesley Professional.
- Copy Control Infomation. (n.d.). Retrieved from Copy Control Infomation: http://en.wikipedia.org/wiki/Copy_Control_Information
- D.Tse, P. (2005). *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press.
- DiBeg. (n.d.). *Electronic Program Guide*. Retrieved from Electronic Program Guide: www.dibeg.org/previous_doc/.../DigitalBroadcastingReceiverE.PDF
- Digital Broadcasting Experts Group of Japan. (n.d.). Retrieved from DiBEG: <http://www.dibeg.org/overview/isdb.htm>

- Digital Video Interactive.* (n.d.). Retrieved from Digital Video Interactive: http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_Video_Interactive
- E.Brigham. (1988). *Fast Fourier Transform and Its Applications*. Prentice Hall.
- Estructura del Sistema ISDB-T.* (n.d.). Retrieved from DiBeg: <http://www.dibeg.org/sitemap/techp4.htm>
- F.P.Miller, A. J. (2009). *Broadcast Television Systems*. Alphascripting.
- F.P.Miller, A. J. (2009). *Digital Terrestrial Television*. Alphascripting.
- Forum SBTVD.* (n.d.). Retrieved from <http://www.forumsbtvd.org.br/>
- Ginga NCL.* (n.d.). Retrieved from Ginga NCL: http://www.ginganci.org.br/index_en.html
- Ginga-J.* (n.d.). Retrieved from Ginga-J Overview: www.sbc.org.br/bibliotecadigital/download.php?paper=625
- Google TV.* (n.d.). Retrieved from Google TV: http://en.wikipedia.org/wiki/Google_tv
- H.265.* (n.d.). Retrieved from H.265: <http://www.h265.net/>
- High Definition Multimedia Interface.* (n.d.). Retrieved from High Definition Multimedia Interface: <http://en.wikipedia.org/wiki/HDMI>
- I.E.Richardson. (2010). *The H.264 Advanced Video Compression Standard*. Wiley.
- International Telecommunications Union.* (n.d.). Retrieved from International Telecommunications Union: <http://www.itu.int/en/pages/default.aspx>
- J.F.James. (2003). *A Student's Guide to Fourier Transforms: With Applications in Physics and Engineering*. Cambridge University Press.
- J.G.Andrews, A. R. (2007). *Fundamentals of WiMax: Understanding Broadband Wireless Networking*. Prentice Hall.
- J.R.Pierce. (1980). *An Introduction to Information Theory*. Dover Publications.
- L.M.Surhone, M. S. (2010). *SECAM: Analog Television*. Betascript.
- M.Bosi, R. (2002). *Introduction to Digital Audio Coding and Standards*. Springer.
- M.Gast. (2005). *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide, Second Edition*. O'Reilly Media.
- M.Massel. (2008). *Digital Television: Dvb-T Cofdm And Atsc 8-Vsb*. DigitalTVBooks.com.
- Massachusetts Institute of Technology.* (n.d.). Retrieved from http://web.mit.edu/Moving_Picture_Coding_Experts_Group
- (n.d.). Retrieved from Moving Picture Coding Experts Group: http://mpeg.chiariglione.org/about_mpeg.htm
- Nee, R. (1999). *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Artech House.
- NHK.* (n.d.). Retrieved from NHK: <http://en.wikipedia.org/wiki/NHK>
- OneSeg Description.* (n.d.). Retrieved from <http://www.dibeg.org/service/oneseg/oneseg.htm>
- P.Haine. (2006). *HTML Mastery: Semantics, Standards, and Styling*. Friends of ED.
- R.Barker, P. (2001). *Storage Area Network Essentials: A Complete Guide to Understanding and Implementing SANs*. Wiley.

- R.Beutler. (2004). *Frequency Assignment and Network Planning for Digital Terrestrial Broadcasting Systems*. Springer.
- R.E.Ziemer, W. (2001). *Principles of Communications (5th Edition)*. Wiley.
- R.Prasad. (2004). *OFDM for Wireless Communications Systems*. Artech House Publishers.
- R.S.Chernok, R. M. (2001). *Data Broadcasting: Understanding the ATSC Data Broadcast Standard*. McGraw-Hill.
- S.A.Thomas. (2000). *SSL & TLS Essentials: Securing the Web*. Wiley.
- S.J.Johnson. (2009). *Iterative Error Correction: Turbo, Low-Density Parity-Check and Repeat-Accumulate Codes*. Cambridge University Press.
- S.Sesia, I. M. (2009). *LTE The UMTS Long Term Evolution*. Wiley.
- T.K.Moon. (2005). *Error Correction Coding*. Wiley-Interscience.
- T.K.Moon. (1999). *Mathematical Methods and Algorithms for Signal Processing*. Prentice Hall.
- T.Oeberg. (2002). *Modulation, Detection and Coding*. Wiley.
- V.Britanak, P. K. (2006). *Discrete Cosine and Sine Transforms: General Properties, Fast Algorithms and Integer Approximations*. Academic Press.
- W.Cranton, G. J. (2010). *Handbook of Visual Display Technology*. Springer.
- W.Fischer. (2008). *Digital Video and Audio Broadcasting Technology: A Practical Engineering Guide (Signals and Communication Technology)* . Springer.
- W.J.Goralski. (2001). *ADSL & DSL Technologies*. McGraw-Hill.

