



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN

REVISIÓN TÉCNICA DE LOS ESTÁNDARES DE TELEVISIÓN DIGITAL
TERRESTRE PARA SU EVALUACIÓN EN UN PROCESO DE
ADOPCIÓN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(COMPUTACIÓN)**

P R E S E N T A:

RAFAEL MARCOS MONTANTE LÓPEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. BORIS ESCALANTE RAMÍREZ

México, D.F.

2006.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer instancia, al Dr. Boris Escalante Ramírez por haberme tenido la confianza, por su paciencia y por alentarme a sacar adelante este trabajo.

Agradezco al jurado por ser parte de, por sus comentarios y señalamientos.

Quiero agradecer también al Ing. Daniel Flores de T.V. UNAM, al Ing. Leonardo Ramos Mateos de Telesistema Mexicano y al Ing. Marco Antonio Delgado, por su valiosa aportación y comentarios.

Agradecimientos

Dedicatorias

A Gabriela, por estar en cada momento, T.V.T.B.

A mi padre y mis hermanos, con todo cariño.

Dedicatorias

Índice general

Agradecimientos	I
Dedicatorias	III
Prólogo	V
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Metodología	3
1.3. Problemática de adopción	3
1.4. Televisión Digital	4
1.4.1. Formatos digitales	6
1.4.2. Tasas de datos	7
1.4.3. Compresión de datos	9
1.4.4. Codificación del audio	10
1.4.5. Ancho de banda	12
1.5. Las virtudes de la DTV	13
1.6. Estándares de TV digital	15
1.6.1. ATSC	16
1.6.2. DVB-T	16
1.7. Sistemas de transmisión digital	18
2. Componentes de un sistema de televisión digital	21
2.1. Codificación de video con MPEG	22
2.1.1. Codificación del video MPEG-2	24
2.2. Codificación del audio	28
2.2.1. Capas de audio en el MPEG	30
2.2.2. Capa II	31
2.2.3. Dolby [©] digital	32
2.3. Multiplexaje y transporte	34
2.3.1. Flujos de programa y transporte	36
2.4. Codificación de canal	39
2.4.1. Códigos de bloque	41
2.4.2. Codificación en televisión digital terrestre	47

ÍNDICE GENERAL

2.4.3.	Dispersión de energía	50
2.4.4.	Codificación externa	51
2.4.5.	Codificación interna	52
2.5.	Modulación	56
2.5.1.	Modulación digital	57
2.5.2.	Modulación PSK	59
2.5.3.	Modulación QAM	61
2.5.4.	OFDM	62
2.5.5.	Redes de frecuencia única	68
2.5.6.	Modulación jerárquica	70
2.5.7.	VSB	73
2.6.	Desempeño de sistemas de transmisión	77
3.	Estándares de televisión digital	83
3.1.	DVB-T	83
3.1.1.	Requerimientos para el sistema DVB	84
3.1.2.	Codificación de fuente	86
3.1.3.	Codificación de canal	88
3.1.4.	Modulación	93
3.2.	ATSC	97
3.2.1.	Requerimientos	98
3.2.2.	Codificación de fuente	99
3.2.3.	Codificación de audio	101
3.2.4.	Capa de transporte	101
3.2.5.	Codificación de canal	102
3.2.6.	Modulación	106
3.2.7.	Upconversion	108
4.	Comparación de los estándares ATSC y DVB-T	109
4.1.	Codificación MPEG	109
4.2.	Dispersión de energía	111
4.3.	Codificación externa	112
4.4.	Entrelazado externo	113
4.5.	Codificación interna	114
4.6.	Modulación	115
4.7.	Tasa de bits	117
4.7.1.	Cálculo de la tasa de bit	118
4.7.2.	Comparación	119
4.8.	Parámetros del desempeño de los estándares	121
4.8.1.	Proporción portadora a ruido	122
4.8.2.	Ruido impulsivo	123
4.8.3.	Interferencia co-canal	124
4.8.4.	Interferencia de canales adyacentes	126
4.8.5.	Distorsión por multitrayectoria	126

4.8.6. Eficiencia del espectro	127
4.8.7. Cuadro comparativo	127
4.9. Pruebas de evaluación en México	128
4.10. Características a consecuencia de los parámetros	131
4.10.1. Cobertura	132
4.10.2. Recepción en dispositivos fijos	133
4.10.3. Recepción en receptores móviles	134
4.10.4. Modulación jerárquica	135
4.10.5. Capacidad para HDTV	135
4.10.6. Convivencia con sistemas de TV analógicos	136
4.10.7. Compatibilidad con otros sistemas de televisión	137
4.10.8. Servicios agregados	138
5. Recomendación técnica para la adopción	143
5.1. Experiencias de DTV en diversos países	143
5.1.1. Estados Unidos de América	143
5.1.2. Unión Europea	146
5.1.3. Australia	147
5.1.4. Brasil	150
5.1.5. China	151
5.1.6. Taiwan	152
5.1.7. Singapur	153
5.1.8. Malasia	154
5.1.9. Hong Kong	154
5.1.10. Argentina	156
5.1.11. Canada	157
5.1.12. México	157
5.1.13. Distribución de estándares adoptados en el mundo	159
5.2. Resultados de la comparación	160
5.3. Consejos para la adopción	163
6. Conclusiones	169
6.1. Conclusiones Generales	169
6.2. Trabajo a futuro	171
Glosario	172
Referencias	176

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras

1.1. Relación del tamaño de la imagen en diferentes formatos de video.	7
1.2. Diagrama a bloques de un sistema elemental de transmisión digital.	19
2.1. Diagrama a bloques de los procesos para la transmisión de TV. digital.	22
2.2. Umbral de percepción del sonido en función de la frecuencia.	28
2.3. Enmascaramiento frecuencial.	29
2.4. Enmascaramiento temporal.	29
2.5. Diagrama de distribución de las bocinas en el sistema Dolby [©]	34
2.6. Flujos de datos en el MPEG-2.	36
2.7. Multiplexaje y transporte de paquetes elementales.	38
2.8. Flujo de paquetes de transporte.	38
2.9. Diagrama básico de transmisión entre emisor y receptor en un canal ruidoso.	40
2.10. Diagrama básico de transmisión entre emisor y receptor en un canal ruidoso, con codificador y decodificador.	42
2.11. Curvas típicas de sistemas con y sin codificación.	48
2.12. Diagrama a bloques del proceso de codificación de canal.	49
2.13. Diagrama de comparación entre los códigos de bloque y convolucionales.	50
2.14. Estructura de un entrelazador convolucional.	52
2.15. Representación de un codificador convolucional.	53
2.16. Gráfica de enrejado (Trellis).	54
2.17. Esquema de un modulador.	56
2.18. Formato I-Q.	58
2.19. Diagramas de constelación para BPSK y QPSK.	60
2.20. Modulador QPSK.	60
2.21. Diagrama de constelación del 16 QAM.	61
2.22. Idea básica de la técnica OFDM.	64
2.23. Inserción de la parte final de la señal en el espacio de guardia.	66
2.24. Esquema general de la generación de la señal OFDM.	66
2.25. Espectro de una portadora de la señal OFDM.	67
2.26. Espectro de frecuencias de la señal OFDM.	68
2.27. Modulación jerárquica.	71
2.28. Diagrama de constelación de 64-QAM en modo no jerárquico.	72

ÍNDICE DE FIGURAS

2.29. Espectro de una señal modulada con su DSB, SSB y VSB.	74
2.30. Modulador y demodulador VSB.	75
2.31. Espectro DSB y VSB de una señal de televisión.	75
2.32. Pulsos ortogonales para los símbolos en el 8 VSB.	76
2.33. Diagrama de constelación del 8-VSB.	77
2.34. Gráfica de P_B vs E_b/N_0 para BPSK con demodulación coherente, de varios códigos.	81
3.1. Diagrama a bloques del sistema de codificación del DVB.	85
3.2. Proceso de aleatorización.	89
3.3. Entrelazador externo.	91
3.4. Proceso de codificación interna con tasa 1/2.	91
3.5. Entrelazador interno para 16-QAM.	93
3.6. Diagramas de constelación para QPSK y 16-QAM.	94
3.7. Diagrama a bloques del sistema ATSC.	99
3.8. Aleatorizador de datos del ATSC.	103
3.9. Entrelazador convolucional del ATSC.	104
3.10. Codificador <i>trellis</i> , pre-codificador y mapeador del ATSC.	105
3.11. Estructura del cuadro VSB.	106
4.1. Zonas de conflicto de recepción de NTSC.	129
5.1. Mapa de adopción de estándares digitales.	166
5.2. Mapa de adopción de estándares digitales.	167

Índice de Tablas

1.1. Características principales de los estándares DTV.	18
2.1. Combinaciones de perfiles y niveles.	25
2.2. Niveles y perfiles del MPEG-2	26
2.3. Eficiencia del ancho de banda con respecto al formato de modulación.	62
3.1. Parámetros para codificación del video en el sistema DVB (El modo i se refiere a entrelazado- <i>interlaced</i> y p a progresivo- <i>progressive</i>).	87
3.2. Patrón <i>puncturing</i> de acuerdo a su tasa.	92
3.3. Valores numéricos para el OFDM.	95
3.4. Duración de símbolos de acuerdo al intervalo de guardia.	95
3.5. Formatos de entrada de video estandarizados.	99
3.6. Formatos de compresión de salida.	100
3.7. Tasas de muestreo.	100
3.8. Modos de codificación de audio en AC-3	101
3.9. Mapeo de bits a símbolos VSB	107
4.1. Características generales del proceso de modulación de los estándares.	116
4.2. Tasas de bit del DVB-T (en Mbit/s) para A.B. de 8 MHz.	119
4.3. Tasas de bit del DVB-T (en Mbit/s) para A.B. de 6 MHz.	120
4.4. Umbrales E_b/N_0 para un canal AWGN.	124
4.5. Características del desempeño.	128
4.6. Configuraciones de los transmisores.	129
4.7. Resultados de las pruebas.	130
4.8. Conclusiones sobre las pruebas de evaluación.	132
5.1. Análisis de TV digital terrestre en Malasia.	155

ÍNDICE DE TABLAS

Prólogo

El presente trabajo de investigación hace una revisión técnica de los estándares más usados en la televisión digital terrestre, el ATSC y el DVB-T. Se deriva del interés por conocer su tecnología, funcionalidad y los beneficios que otorga. El propósito, es tener una base de conocimiento que fundamente la decisión de la adopción de uno ellos.

La problemática del proceso de decisión, se basa en identificar aquellos factores que determinen y justifiquen la adopción del estándar. No basta sólo con satisfacer requerimientos iniciales o dejarse llevar por aspectos de mercado, sino hay que considerar el impacto, en muchos sentidos, que tendrá la puesta en marcha del servicio.

El trabajo de investigación no pretende ser una herramienta que determine que estándar se debe adoptar, sino presenta características importantes de ambos, tanto funcionales como de desempeño, además muestra el estado “actual” (2005) del proceso de adopción a nivel mundial.

Hace énfasis en las características de desempeño porque se consideran importantes para la práctica y porque pueden ser un factor primordial que influya en el proceso de adopción. Con base en ellas, una organización puede decidir si satisface sus necesidades y si es viable la convivencia con otros servicios.

El proceso de adopción ha sido un fenómeno en el campo de las telecomunicaciones, que abrió las puertas de la nueva tecnología a una de las áreas de servicio con mayor auge. Para la UNAM, el tema no pudo pasar desapercibido, ya que al ser una institución educativa requiere, además de contar con conocimiento de los avances tecnológicos, poner en marcha el servicio. Un tanto por buscar la vanguardia tecnológica y porque cuenta con un servicio de transmisión de televisión abierta, mismo que tendrá que migrarse al formato digital.

El documento está organizado de la siguiente manera. El capítulo 1 muestra una introducción al tema de la televisión digital. Se presentan las características y la funcionalidad que ofrece. Se introducen los estándares de televisión digital terrestre estudiados. Además se presentan los objetivos y la metodología seguida en la investigación.

El capítulo 2 presenta una introducción a los conceptos y teoría de los elementos que integran la codificación de la señal para su transmisión. Se presentan los temas de codificación de fuente (sólo video y audio), codificación de canal y modulación. Cabe señalar que la investigación no cubre las etapas de captura (video y audio), pre-producción y post-producción, llevados a cabo en un sistema global de televisión. Sólo se enfoca a la parte que tiene que ver con la adecuación de los datos para su transmisión.

En el capítulo 3 se muestran las características de los elementos que forman los estándares. Indica cuales son los parámetros usados desde la codificación con MPEG-2 hasta los usados en la modulación. Este capítulo tiene la finalidad sólo de mostrar las características de interés y que ayudan a describir el desempeño de los mismos. La discusión sobre el uso de ellos y como impactan en la práctica son presentados en el capítulo siguiente.

El capítulo 4 muestra la discusión del desempeño de los estándares. Está dividido en tres partes básicamente. En la primera, se comparan los elementos que forman las etapas de codificación y modulación, indicando ventajas y desventajas de los parámetros usados. La segunda parte presenta los resultados de pruebas de evaluación llevadas a cabo por distintos países u organizaciones que buscaban observar el comportamiento de los sistemas en la realidad. La tercera muestra características generales de funcionalidad, con ellas se puede tener un panorama de lo que se puede hacer con la televisión digital terrestre.

El capítulo 5 muestra el estado actual (2005) de la adopción a nivel mundial. Aquí se percibe la tendencia de adopción de los estándares. Además, presenta a manera de resumen los resultados de la comparación y comentarios enfocados al proceso de adopción. Finalmente las conclusiones de la investigación son presentadas en el capítulo 6.

Capítulo 1

Introducción

La tecnología de la transmisión de una señal abierta o comercial (*broadcasting*) de televisión, ha revolucionado desde los años 1930's. Esa época marcó el comienzo en la era de la transmisión. Afortunadamente para la industria, a partir de la segunda guerra mundial, muchos técnicos e ingenieros empezaron a entrenarse en la tecnología del radar, considerado como el pariente más viejo de la televisión. Esto propició que la televisión fuera evolucionando; incluso en esa época, se llevaron a cabo varias revoluciones en esta industria sólo referente a la calidad de la imagen transmitida, fue mejorando cada vez más con el paso de los años. El proceso de cambio continuó con la aparición de la televisión, cámaras a color (finales de los 1950's) y la grabación en cinta, donde fué necesario aplicar otras técnicas de modulación, como la FM para transmitir video. La grabación en cinta dió lugar a la aparición de casas productoras y originó también que se pensara en generar tecnología propietaria, aunado al hecho de que los equipos sólo podían ser reparados por la gente que los manejaba. De esta forma comenzó la era de los especialistas [53].

Con la aparición del transistor, los equipos fueron más pequeños, más portables y más complejos. El diseño de los equipos fue más difícil de entender, ya que las reparaciones de los aparatos se hacían cambiando tarjetas en lugar de simples componentes. La aparición de éstos y los circuitos integrados dieron lugar a que en los años 1970's fuera posible la conversión de señales analógicas a digitales, introduciendo así la manipulación digital de la imagen, la grabación digital en cinta y la edición electrónica, principalmente [53].

A partir de ese momento y hasta la fecha, el proceso de conversión de televisión analógica (NTSC, PAL, SECAM) a digital (DTV) se ha desarrollado y por supuesto, aún no está concluído. Así, desde hace más de 20 años se ha pasado de una planta completamente analógica a una parcialmente digital. El proceso de migración se ha venido dando, reemplazando parte por parte cada componente del sistema sin poner en riesgo la calidad de la imagen. Desde ese entonces, los fabricantes se han enfrentado y trabajado en una atmósfera crítica, ya que la mayoría de la nueva tecnología

Introducción

debe soportar las versiones anteriores, en parte porque aún siguen funcionando y porque sirven como un respaldo [53].

El periodo de migración o implantación de la televisión digital terrestre ha comenzado en países como Reino Unido (donde incluso, algunas ciudades han dejado de transmitir en analógico), Alemania, Francia, España, Australia, Japón, Estados Unidos, Brasil (desde mediados de 1997) y México (alrededor del año 2001). La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de Estados Unidos ha planteado en los reportes de ese año, una estrategia de transición de ocho años, inicialmente se había pensado de 15 años, pero se redujo porque se pensó que si la televisión digital no estaba disponible en un periodo relativamente corto, otras tecnologías digitales podrían alcanzar logros considerables que pudieran distraer el impacto que produciría la televisión digital. Inicialmente habían fijado completa de transición para el año 2006, pero a consecuencia de las pruebas en campo y ajustes a la tecnología se ha retrasado hasta el 2008 [53]. En México, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), ha planteado la política de transición donde se ha establecido que la cobertura de televisión digital en zonas donde actualmente existe de televisión analógica (NTSC), debe asegurarse para finales del año 2021 (fuente: documento emitido por la SCT titulado “Acuerdo por el que se adopta el Estándar Tecnológico de Televisión Digital Terrestre y se Establece la Política para la transición a la Televisión Digital en México”).

1.1. Objetivos

La DTV es un acontecimiento que tarde o temprano tiene que llegar a implantarse en un país y por consecuencia en las estaciones televisoras. Este trabajo de investigación plantea los siguientes objetivos:

1. Hacer una revisión y presentar las características técnicas de los estándares de televisión digital ATSC 8-VSB y DVB-T COFDM, consultando la documentación técnica publicada por las organizaciones que rigen dichos estándares.
2. Comparar la arquitectura de cada uno, haciendo un análisis de los elementos que conforman el proceso de codificación y transmisión de la señal de televisión digital.
3. Revisar y presentar los aspectos más relevantes de su funcionamiento y desempeño global, basándose en procesos de evaluación realizados por instituciones u organizaciones en diversos países.
4. Exponer los procesos técnicos que se deben llevar a cabo en un proceso de adopción, usando la documentación y experiencias de campo de organizaciones que los desempeñaron.

La metodología para lograr los objetivos se presenta a continuación.

1.2. Metodología

Dado que el tema es relativamente actual, la metodología aplicada está basada en la recopilación de información y datos a través de artículos publicados y disponibles en la Internet o en libros. Los datos relevantes fueron identificados y puestos a discusión dentro del tema correspondiente.

La recopilación de información inicia en los sitios web base (www.atsc.org y www.dvb.org). Identificados éstos, se obtuvieron los archivos con la información de los estándares, complementándolos con información relevante encontrada en diversos sitios web y foros de discusión. Con los documentos de los estándares se estudia la arquitectura y se hace la revisión de las bases teóricas que permiten el entendimiento de los procesos.

Comprendida la teoría, se hace el análisis de los elementos que conforman los procesos de codificación para llevar una señal hacia su transmisión. Se comparan sus características y se mencionan ventajas y desventajas, considerando los parámetros de desempeño mostrados por la teoría y pruebas de laboratorio.

Finalmente, se hace la revisión de los procesos de pruebas de campo realizados en distintos países, sintetizando las tareas llevadas a cabo, indicando su utilidad en un proceso de adopción. Se consideran básicamente los resultados cuantitativos y se comparan con los obtenidos en diversas pruebas, para medir el desempeño global y tener una base de conocimientos que ayuden en futuros procesos de adopción.

Para completar la información actual sobre el tema, se da una reseña breve de los procesos de adopción llevados a cabo por diversos países, mostrando al final un mapa mundial para conocer la distribución de los estándares adoptados.

1.3. Problemática de adopción

A consecuencia de los desarrollos tecnológicos consumados por las potencias mundiales en el tema de la televisión digital. El resto del mundo buscará ponerse a la par en esta tecnología, convirtiéndose en consumidor de los equipos desarrollados para implantarla.

De tal forma que a raíz del surgimiento de los estándares, diversos países realizarán localmente su proceso de adopción. A cada país le tocará definir dicho proceso y poner a consideración todos los factores que pueden determinar la adopción de uno u otro.

Para un proceso de adopción, los factores a evaluar en primer instancia serán técnicos, ya sea considerando características de diseño o de desempeño global. Sin

Introducción

embargo, en algunos casos el factor determinante no sólo será el técnico, puede influir en gran medida el factor económico, el geográfico o el político o posiblemente algún otro, como el mercadotécnico¹.

Por consiguiente, la tarea principal de cada país será estudiar cada uno de los estándares y decidir sobre cual de ellos inclinarse. Acordando así un plan de trabajo a varios años para implantar un sistema de televisión digital terrestre.

1.4. Televisión Digital

La televisión digital, conocida mundialmente por sus siglas en inglés **DTV**, es una propuesta que permite transmitir una señal de televisión en formato digital. La televisión digital comercial existe en forma satelital, por cable y terrestre, pero a lo largo de este documento sólo se hará referencia a la televisión digital terrestre.

La DTV está dividida en dos categorías principalmente, la televisión de definición estándar (SDTV) y la televisión de alta definición (HDTV)². La SDTV ha sido utilizada desde hace más de veinte años y es esencialmente la versión digital de la televisión analógica actual (en cuanto a líneas activas que se muestran en un televisor). La HDTV ha estado en desarrollo desde los años 70's, sólo que ha sido utilizada más en la producción y como formato de transmisión desde mediados de los 90's. Contempla el uso y presentación en pantalla de 720 líneas activas o más con un formato de pantalla de proporciones diferentes a la actual. La proporción actual se dice que es 4:3, mientras que la proporción de la HDTV es 16:9, aunque es más conocido como *wide screen*.

La televisión digital actual va más allá de considerar circuitos integrados en lugar de la electrónica analógica usada y sustituir las técnicas de procesamiento de la señal analógica por las digitales, sólo para mejorar la calidad del video desplegado. Es todo un concepto nuevo, donde además de ver imágenes en movimiento y escuchar audio (que tiende al "realismo"), maneja toda una estructura de recepción y envío de datos para interactuar con la televisión.

Los mecanismos de sustitución fueron desarrollándose paulatinamente desde su adquisición hasta su presentación. La presentación tiene que realizarse primeramente en el sitio donde es procesada (de acuerdo a todas las etapas de producción de contenidos de televisión) y luego compartida ya sea al público en general o un grupo de

¹Existe actualmente la duda de si los países que conforman la Unión Europea, podrán elegir libremente el estándar que cumpla con sus necesidades. La realidad indica que la decisión será unificada y asegurada para su estándar.

²Desde el año 2001 se ha venido manejando otro término denominado EDTV *Enhancement Definition Television*. Esta categoría fue creada como punto intermedio entre la SDTV y la HDTV. Regularmente maneja una resolución de 852×480 , en modo progresivo (480p), permitiendo proporción de aspecto 4:3 y 16:9.

suscriptores, por medio de la transmisión de la señal. Ya sea por medios o canales menos susceptibles a imperfecciones (como el cable) o por los que son muy susceptibles, como el aire.

A pesar de toda la serie de procesos que tiene que pasar una señal de televisión para generar una señal con calidad aceptable, ésta tiene que ser transmitida por el aire. Así, cualquier aparato reproductor, a través de una antena, puede presentarla en una pantalla. Desgraciadamente, durante este proceso de transmisión la señal es afectada por ruido y diversos factores que hacen que la señal se degrade, percibiéndose al observar las imágenes en el aparato receptor.

Independientemente de que una señal de televisión pueda ser trabajada en forma digital antes de su transmisión, no quiere decir que ya se considere como televisión digital (aunque puede ser considerada como parcialmente digital), ya que para su transmisión, la señal debe ser reconvertida a una analógica. De esta forma, la revolución actual de la DTV está muy enfocada en proponer técnicas para la transmisión digital. Esta parte del proceso puede ser considerada como una de las más importantes en el esquema de televisión digital, ya que con las ventajas que presenta el trabajar una señal en forma digital, hacen que sea factible eliminar o disminuir todos esos factores que hacen que la calidad de la imagen observada se degrade. De esta forma es posible observar programas de televisión con una calidad similar a como se observaría dentro de una estación de televisión. Incluso hay personas que al observar una señal NTSC dentro de una estación, creen que están viendo una con formato de alta definición (HD) [43].

En la actualidad, mucha gente piensa que siempre que se habla de televisión digital se hace referencia a la HDTV, lo cual no siempre es cierto. La HDTV es un formato de televisión propuesto por los japoneses desde los años 1970's. En esa época lo que se planeaba era crear un formato de alta definición (sólo que analógico), pero se dedujo que el formato propuesto no era costeable, debido al número de líneas horizontales que se tienen que presentar. Por tanto, se fijaron ciertas bases y quedó pendiente, mientras los avances tecnológicos se incrementaban. El sistema original de *Sony "Hi-Vision"*, fue de 1125 líneas (*scanning lines*) a 30 cuadros por segundo en forma entrelazada, teniendo hasta 1000 líneas de resolución horizontal. A partir de que se estableció esa propuesta, las estaciones de televisión tanto en Europa como en Estados Unidos, empezaron a conformar grupos de investigación que tenían como propósito principal explorar las nuevas tendencias de la tecnología conocida hoy como *Televisión Avanzada* (ATV, *Advanced Television*). De esta forma surge la propuesta del formato de definición estándar (SD).

Para la presentación de televisión digital, se han propuesto una serie de formatos, quedando actualmente la cantidad de 18. Estos formatos varían en cuanto a la cantidad de líneas activas que se presentan, la tasa de los cuadros (*frame rate*) y el

Introducción

modo de exploración, ya sea entrelazado o progresivo. Con respecto a este último, la HDTV establece que el modo de exploración para la televisión digital debería ser progresivo, tal y como lo hacen los monitores de computadoras. Este modo presenta sus complicaciones, ya que se necesita mayor ancho de banda para transmitir imágenes más grandes en un segundo. En la actualidad, los sistemas que manejan el formato NTSC, por ejemplo, presentan imágenes a 30 cuadros por segundo, pero en forma entrelazada, es decir, por medio de dos exploraciones o campos (*field*); entrelazando 2 campos se hace un cuadro. Si ahora se presentaran más cuadros por segundo, se generaría una imagen con más definición, pero doblaría la cantidad de información a transmitir, requiriendo para esto mayor contenido frecuencial o más ancho de banda. De hecho, el entrelazado de las líneas fue propuesto para limitar el ancho banda. Otro de los inconvenientes es que el fósforo de los CRT's no brillaría lo suficiente entre cada exploración, si fueran mandadas todas las líneas horizontales sin incrementar el ancho de banda. Esto quiere decir que un barrido vertical sería en 1/30 de segundo, en lugar de 1/60, dando lugar a un efecto conocido como *flicker*.

Usar DTV implica entonces el manejo de diversos formatos para la resolución del video y formatos para la resolución del audio. Esto provoca que se genere una tasa de datos que debe procesarse por técnicas de compresión y protección de datos para su transmisión en un canal de comunicaciones.

1.4.1. Formatos digitales

Se adoptaron varios estándares como parte de las especificaciones de la DTV. Estos permiten que principalmente 2 tamaños (4:3 y 16:9) de la proporción del aspecto (*aspect ratio*) sean combinados con diferentes resoluciones y diferentes tasas (*frame rates*). Para la SD se manejan regularmente 480 líneas horizontales y para la HD pueden ser 720 o 1080 líneas horizontales de resolución.

En las especificaciones de la DTV, la resolución está dada por el área activa de la pantalla en píxeles para la información horizontal y líneas de exploración (*scanning lines*) para información vertical. Cada uno de los formatos se puede identificar por medio de una notación que indica la resolución espacial, el modo de exploración (progresivo (P) o entrelazado (I)) y la cantidad de cuadros por segundo. De esta forma se tienen,

para HDTV (en ATSC):

- 1920 × 1080 (16:9): P24, P30, I30
- 1280 × 720 (16:9): P24, P30, P60

para SDTV:

- 704 × 480 (16:9): P24, P30, I30, P60
- 704 × 480 (4:3): P24, P30, I30, P60

- 640×480 (4:3): P24, P30, I30, P60

En la figura 1.1 se puede observar la relación de tamaños de los diferentes formatos de video. En ella se presentan no sólo los tamaños de televisión digital, sino también algunos usados por los monitores de computadoras. El término *Kpx* y *Mpx* se refiere a kilopíxeles y megapíxeles, respectivamente.

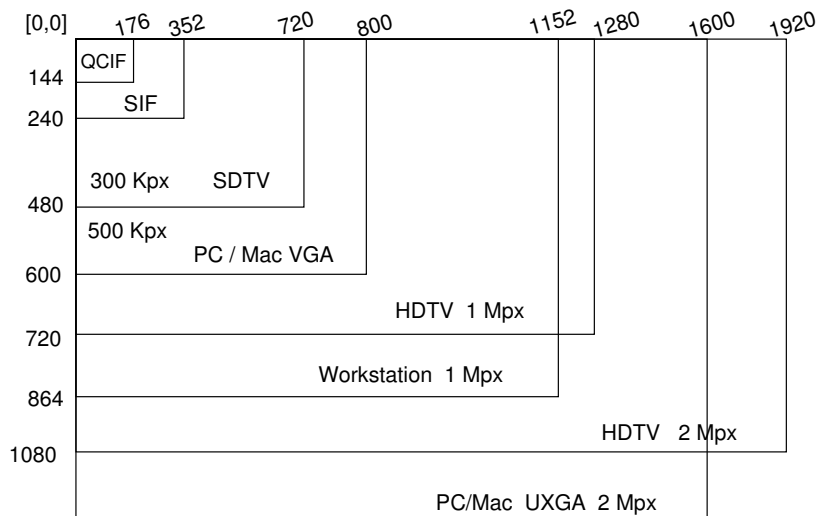


Figura 1.1: Relación del tamaño de la imagen en diferentes formatos de video.

A pesar de tener una gran variedad de formatos digitales, en la actualidad no se ha restringido al uso de uno u otro. Algunas cadenas de televisión proponen que lo mejor para obtener una calidad de HD, es usar la exploración progresiva, aunque una de sus desventajas es que requiere más ancho de banda. El problema es transmitir 1080 líneas a 30 cuadros/s con exploración progresiva.

Dada las dimensiones de las resoluciones consideradas para el despliegue del video, es fácil imaginarse que la cantidad de datos a transmitir se vuelve más demandante con los formatos de alta definición. La cantidad de píxeles requeridos por imagen es un factor que se debe considerar para la transmisión. Dichas cantidades generan diversas tasas de datos.

1.4.2. Tasas de datos

En la etapa de transición de la televisión digital, la señal analógica de televisión tiene que ser digitalizada a una tasa que permita generar imágenes con calidad aceptable. Para digitalizar la señal, es necesario que se pase a través de dos procesos fundamentales, *el muestreo y la cuantización*. Para imágenes de televisión el estándar **ITU-R 601** propone que se tiene que muestrear a una tasa de 13.5 MHz usando 8

Introducción

o 10 bits por muestra, mientras que para el audio propone muestrear a 44.1 KHz o a 48 KHz usando 16 o 20 bits por muestra. La tasa del video es sincronizada a 2, 3 o 4 veces la frecuencia de la portadora de las señales NTSC o PAL ($2f_{sc}$, $3f_{sc}$ y $4f_{sc}$, respectivamente) [53]. De esta forma, usar la proporción 4:2:2 quiere decir que la señal de luminancia se va a muestrear a $4f_{sc}$ y las componentes de color a la mitad o $2f_{sc}$.

Es así que todas estas muestras almacenadas en bits generan una gran cantidad de datos, y resultaría prácticamente imposible pensar en transmitir todos éstos a través de un canal (en banda base). En una componente de video digital en formato estándar (SD), hay 1440 muestras por línea horizontal. Si cada muestra es formada por 10 bits, entonces se tendrían 14 400 bits por línea horizontal. Esto quiere decir que puede llegar a haber hasta 270 millones de bits en un 1 segundo, ya que además de transmitir la información de video, se transmite un tercio más de bits que son usados para audio y sincronización de la señal. Esto quiere decir que se transmite un bit cada 3.7 ns. De esta forma se considera como una regla general que la frecuencia mínima necesaria para mantener los detalles de alta frecuencia (*sharp edges*) en un nivel adecuado es por lo menos 1.5 veces la tasa de bits. Esto significa que para la definición estándar (SD) la frecuencia mínima se encuentra alrededor de los 405 MHz.

La frecuencia mencionada anteriormente es posible manejarla a través de un cable, pero no así a través del aire, de hecho, también sería un tanto costoso trabajarlas en una cinta de video. Por ejemplo, si se quisiera almacenar todas esas muestras en un disco duro, se usarían alrededor de 27 Mbytes cada segundo (suponiendo que un byte son 10 bits). Provocando que un disco duro de 9 GB sea llenado en un periodo de 6 minutos.

Para resolver este problema se hace uso de una de las ventajas que se presentan al trabajar los datos en forma digital, *la compresión*. Este proceso permite que toda la información necesaria para producir datos de alta frecuencia sea representada de una forma diferente, es decir, se usan formas alternas de representar esa información donde no sean consideradas características de la señal que no puede percibir el sistema visual humano. De esta forma se pierden algunos datos originales que provocan que la cantidad de datos para representar esa información disminuya; este proceso es lo que se conoce como *compresión con pérdidas (lossy compression)*. También es posible usar técnicas estadísticas que hacen que no se pierdan datos y que ayudan a disminuir en factores pequeños, la cantidad de datos para representar a la señal. En el siguiente tema se describe con más detalle este proceso.

Con relación a las tasas de datos, se han diferenciado entre las que son para tener una calidad en la producción y otras en la distribución. Las tasas usadas en HDTV regularmente son:

- 1.5 Gbps, usada para la adquisición y producción. Comúnmente sin compresión
- 270 Mbps, se usa a nivel de producción.

- 100-170 Mbps
- 45 Mbps
- 19.4 Mbps, usada para la distribución en televisión comercial abierta (*broadcasting*)

Las tasas usadas para SDTV son:

- 270 Mbps, usadas a nivel de producción sin compresión
- 110 Mbps, usadas a nivel de producción con compresión (resolución completa)
- 45 Mbps
- 25 y 50 Mbps
- 4-10 Mbps, usada para la distribución en televisión comercial abierta

1.4.3. Compresión de datos

La compresión de datos está dividida principalmente en dos partes: la *compresión sin pérdidas* (*lossless compression*) y la *compresión con pérdidas* (*lossy compression*). La diferencia entre una y otra radica básicamente en que en la primera no hay pérdida de datos ni información, los datos que se comprimen son los mismos que se obtienen después de la compresión inversa o *descompresión*. Esto es muy usado cuando se desea que una cantidad de datos ocupe menos espacio (por ejemplo en almacenamiento) y que esa misma cantidad de datos sea recuperada en cualquier otro momento. En cambio la segunda puede perder datos e información. La ventaja entre uno y otro es que en el primer caso se obtienen tasas relativamente bajas de compresión (regularmente menores o iguales a 4:1) y en el otro se pueden obtener tasas mayores a la mencionada anteriormente, llegando a ser hasta 50:1 (o incluso más dependiendo del nivel de tolerancia de la pérdida en los datos).

La compresión de datos para una señal de video digital se basa en un estándar propuesto para comprimir imágenes fijas. Este estándar es conocido como *JPEG*. Por medio de este estándar se podría pensar en comprimir cada cuadro de una señal de televisión como si fuera una imagen fija. De esta forma usando una tasa de compresión de 10:1 la tasa mencionada en el tema anterior (270 Mbits/s), se convertirá ahora de 27 Mbits/s, provocando que los 9 GB alcancen para almacenar hasta 1 hora de video.

El problema con el JPEG es que sólo ejecuta compresión de datos de manera espacial, en este caso dos dimensiones (2D). Una señal de video regularmente manda cuadros que no varían mucho a lo largo de un periodo (tiempo). Esto ocasionó que un grupo conocido como MPEG (Motion Picture Expert Group) desarrollara un algoritmo para ejecutar *compresión temporal* (usando la variable tiempo). En este

Introducción

proceso se almacenan una serie de cuadros para analizarlos y determinar en que difieren. La señal diferente es comprimida con el JPEG y se toma como referencia. A esta se le añade un conjunto de vectores de movimiento que representan la magnitud y dirección de los objetos que se están moviendo dentro de la secuencia. De esta forma se transmiten una serie de cuadros de diferencias junto con sus vectores de movimiento. La técnica del MPEG permite codificar usando tres tipos de cuadros denominados I, P y B; y la forma en que siguen una secuencia permite variar la tasa de compresión. Para más detalles del MPEG consultar la sección 2.1.

Ya que el MPEG usa compresión espacial y temporal, puede alcanzar tasas de hasta 50:1 con una calidad de imagen aceptable. Es así que con el MPEG es posible pensar que una tasa de bits para una señal de HD, pueda ser transportada a una tasa de 19 Mbits/s, además si ésta es acompañada con un esquema de modulación, se puede transmitir en un canal de televisión terrestre de 6 MHz. En cambio, si no se desea tener HDTV, entonces se pueden codificar de 4 a 5 canales de SDTV con calidad aceptable, para ser transmitidos también en un ancho de banda de 6 MHz.

Desafortunadamente, debido a las pérdidas de este esquema de compresión, éstas en algunas ocasiones se ven reflejadas en la imagen observada, degradando en cierta forma la secuencia de video. Aunque algunos de estos factores pueden ser controlados escogiendo una tasa de compresión adecuada, muchas veces el canal de transmisión es el que fija los parámetros y aunque se quisiera manejar una tasa de compresión baja (para no tener muchas pérdidas), no es posible debido al ancho de banda del canal [43].

Así como el video produce una cantidad de datos considerable para su transmisión, también el audio debe procesarse para hacer eficiente su transporte. Cabe resaltar que la televisión digital permite el manejo de más canales de audio, además del estéreo. El número de canales va desde los 2 para estéreo hasta los 5.1 (en realidad 6 canales) que se usan para aplicaciones de lo que es conocido como “teatro casero” (*Home Theater*). Por tal motivo y para eficientar su traslado, también debe procesarse por técnicas de compresión.

1.4.4. Codificación del audio

Como se mencionó anteriormente, existe un espacio dedicado para la codificación del audio dentro del ancho de banda de una señal DTV. Para la codificación del audio no existe una tasa de cuadros por segundo, no hay redundancia temporal que eliminar como en el caso de los cuadros de una secuencia de video. Sin embargo, así como en el video, el contenido espectral de una señal de audio cambia con respecto al tiempo y de esta forma, el contenido de información en cualquier momento. Es así que al igual que las técnicas de compresión de video, los algoritmos para la codificación del audio, empaquetan la información dentro de un canal de transmisión de la manera más eficiente posible.

Los algoritmos de compresión de audio pueden codificar desde 1 hasta 5.1 canales de audio representadas en formato PCM (modulación por codificación de pulsos) en una secuencia de bits a diferentes tasas, variando desde 32 kbps hasta 640 kbps. El canal 0.1 se refiere a un canal con un ancho de banda fraccional, llevando sólo señales de bajas frecuencias (*subwoofer*). El problema con el audio es que las muestras para obtener alta calidad necesitan de 20 o hasta 24 bits para su codificación, a diferencia del video en donde se requieren de 8 a 10 bits. Debido a que el oído es más sensible a la detección de imperfecciones en la señal audible, que el ojo al observarlas en una secuencia de video.

Los codificadores de audio son los responsables de generar secuencias de bits, representaciones codificadas de las señales de audio en banda base. La flexibilidad del sistema de transporte permite que múltiples secuencias de bits que representan audio sean entregadas a un receptor. Estos flujos de bits pueden incluir programas de audio completos o programas de audio separados para música u otro tipo de sonidos que puedan ser mezclados con diálogos en múltiples lenguajes para programas de comentarios o mensajes de emergencia, en donde el receptor es responsable de entregar las secuencias de bits al subsistema de audio y este a su vez, las decodifica para obtener de nuevo una señal de audio en banda base [53].

La codificación del audio se lleva a cabo a nivel del codificador MPEG, es decir, el MPEG es encargado de codificarlo debido a que tendrá que ser multiplexado en los paquetes que genera el MPEG (junto con video y datos auxiliares). Los principales algoritmos de codificación considerados para la DTV son el *Dolby Digital/AC-3* y el *MUSICAM (MPEG 2 Audio Layer II)*.

La compresión de audio que proporciona el AC-3 consiste de tres operaciones básicas. En la primera, la representación de la señal de audio es cambiada del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, ya que al igual que el video, este dominio es más eficiente para ejecutar compresión. Se basa principalmente en eliminar aquellas frecuencias que el oído no puede percibir. Después, estos coeficientes son codificados con base en una proporción de la señal a ruido (SNR) establecida; considerada a partir de un modelo del sistema auditivo humano. Es así, que este algoritmo puede lograr tasas altas y eficientes de compresión, por ejemplo, si un programa de audio con 5.1 canales y sin compresión requiere alrededor de 5 Mbps, éste podrá ser comprimido hasta 384 Kbps, manejando una tasa típica de 13:1 [53].

El algoritmo MUSICAM (*Masking pattern Universal Sub-band Integrated Coding And Multiplexing*) emplea la técnica de codificación que se especifica en el MPEG-2 Audio Layer II. Esta emplea el conocimiento de las propiedades del sistema auditivo humano, en particular, los efectos de enmascaramiento temporal y espectral de oído interno. Básicamente, el sistema codifica sólo las componentes de la señal de audio

Introducción

que el oído escuchará y descarta cualquier información que de acuerdo al modelo psicoacústico, el oído no percibirá. De esta forma sólo se considera lo importante para mantener una calidad alta de audio. Este proceso puede comprimir señales de audio de acuerdo a varias opciones, regularmente desde el rango de 8 kbit/s hasta 384 kbit/s a una tasa de muestreo de 48 kHz o 24 kHz. Es capaz de proporcionar señales de audio de alta calidad que son consideradas a ser “calidad CD” usando una tasa de 192 kbit/s para sonido estéreo. Las opciones de codificación serán establecidas de acuerdo al servicio, música, voz, etc. [17].

La cantidad de datos generados por las etapas de muestreo de la señal y la compresión, deben ser tales que permitan transportarse en el ancho de banda asignado para los servicios de televisión digital.

Las organizaciones que desarrollaron los estándares acordaron usar el mismo ancho de banda que el usado por el servicio de televisión analógica. Es decir, 6 MHz para ATSC y 8 MHz para DVB-T. Sin embargo, cada uno de los estándares puede ajustarse para diferentes

1.4.5. Ancho de banda

Los grupos de televisión digital tanto en Europa como en Estados Unidos, coincidieron en acordar que el ancho de banda usado por la DTV fuera el mismo que el usado por la TV. analógica. En primer instancia para no interferir otras bandas del espectro electromagnético, ya que en las etapas de pruebas tienen que convivir las formas de transmisión. En segunda instancia, determinaron que bajo ese mismo ancho de banda era posible transmitir señales de televisión de alta calidad con formato digital. La clave para esto, son los avances tecnológicos en lo referente a la compresión de video. De esta forma los estándares digitales ocuparán un ancho de banda de 6 (ATSC, principalmente), 7 y 8 MHz (DVB-T, principalmente).

El ancho de banda establecido para la televisión digital, permite que se transmita calidad alta de video y audio, pero además, el nuevo esquema de la DTV permite el transporte de datos (*Datacasting*). Este viene a revolucionar el uso de la televisión, ya que permite establecer lo que se denominan servicios agregados. Servicios de transporte de datos que hacen más atractiva la televisión, donde el usuario ahora puede interactuar con los contenidos de los programas televisivos para su beneficio o diversión. Esta es la característica que abre nuevas opciones de mercado y que no era posible manejarlas con la televisión convencional.

Estos son algunos aspectos importantes a considerar en la televisión digital. La puesta en marcha de este servicio no es un asunto trivial, debe ser analizado con detenimiento y lo más apegado a las necesidades y requerimientos. La nueva era de la televisión tiene sus ventajas, pero también sus desventajas.

1.5. Las virtudes de la DTV

La televisión digital surge como otra nueva tecnología, al igual que en su momento surgió la televisión a color, el disco compacto o últimamente el DVD. Donde en un principio el usuario no las acepta del todo, porque en primer instancia no es tan fácil darse cuenta de las ventajas que trae esa nueva tecnología y en muchas ocasiones la adquisición de ésta es costosa económicamente. El usuario de la DTV tendrá que entender la mayor cantidad de tecnicismos que acarrea su uso, por ejemplo, *resolución, proporción del aspecto, formatos digitales, MPEG 2, servicios agregados* y varios más, para darse cuenta de la cantidad de ventajas que se tienen al trabajar la señal de televisión de esa forma. Los usuarios que tienen acceso a televisión vía satélite habrán experimentado, las ventajas y desventajas que acarrea esta forma de proporcionar la señal de televisión.

La DTV permitirá que la transmisión de la señal sea observada en pantallas anchas (16:9) en formatos de alta resolución (HDTV) o mediana resolución (SDTV), similar a la usada actualmente. También permitirá que las estaciones transmitan varios programas en SDTV simultáneamente o un programa en HDTV, en un sólo canal de televisión. El audio será mejorado y tendrá una calidad similar al disco compacto, con la ventaja de proporcionar 5.1 canales de audio por programa, conectándolos a un dispositivo de “teatro casero”.

La DTV soportará la entrega de servicios de datos simultáneamente con el audio y video de los programas. Estos podrán usarse para enseñar la programación de los canales, mandar publicaciones electrónicas, como artículos de revistas o de periódicos, programas de cómputo (software), compras por televisión, teniendo la ventaja de solicitar información extra de los productos, juegos y varias aplicaciones de televisión interactiva (selección de cámaras en un encuentro deportivo, etc.) e incluso hasta tener la posibilidad de usar la Internet junto con la televisión.

Para usar los beneficios de esta tecnología es necesario que se adquiera un nuevo dispositivo (*set*) que permita decodificar la señal digital. Los televisores actuales (los que reciben señales NTSC o PAL) no cuentan con la tecnología para realizar la decodificación. Para ésto, será necesario adquirir un dispositivo denominado *set-top box*, similar al que se usa en sistemas de televisión por cable o vía satélite. Estos dispositivos son los encargados de hacer la conversión de la señal digital en analógica. La desventaja es que en ese proceso se perderá en parte, la calidad de la imagen y la resolución, ya que, como se mencionó anteriormente, el nuevo formato es 16:9 y esto provocará que se añadan una barra negra en la parte superior de la pantalla y otra en la parte inferior (en inglés este proceso es conocido como *letterboxing*). Lo mejor es adquirir un nuevo aparato reproductor que permita el despliegue de altas resoluciones (1080i@30). Esto es similar a un nuevo monitor de computadora, mientras más alta sea la resolución de ésta, mejor será la calidad de la imagen.

Introducción

En principio, se pretende que no se requiera de alguna antena externa (*outdoor antenna*) para recibir la señal de televisión digital (a diferencia de la analógica). Aunque si se tiene una antena con capacidad para recibir canales en la banda UHF, también podrá ser usada para canales digitales (del 14 al 69). Lo mismo pasa con las antenas internas (*indoor antenna*), que en muchos casos se colocan en el televisor, si es capaz de recibir canales de la banda UHF, también servirá para los digitales. Sin embargo, la recepción de una señal con este tipo de antenas es afectada por diversos factores que varían dependiendo de las condiciones locales. Tal puede ser la problemática, que será necesario facilitar la asistencia de un técnico que ayude a resolver algunos problemas con la recepción [55].

Algunas otras ventajas y desventajas de la DTV se mencionan a continuación:

Ventajas:

- Se podrán realizar aplicaciones de un concepto denominado *Tele-presencia*, dando la sensación de traslado a otro sitio remoto que no sea el lugar físico donde se encuentre el observador. Un ejemplo es una transmisión de un evento deportivo, donde el televidente puede sentir que se traslada al lugar donde se lleva a cabo, ya que podrá tener cierto control de lo que ve, por medio de un cambio de cámaras o del zoom. Este grado de telepresencia se conoce como “*Interactividad de visión*” [45]
- La televisión digital promueve el concepto denominado “*Televisión Interactiva*”, el cual es usado para describir los servicios o contenidos adicionales de la programación. El grado de interactividad puede darse en “*un sentido*” (*One-way*) o en “*dos sentidos*” (*Two-way*). En un sentido se refiere a transmitir contenido adicional, que pueda ser usado por el observador o usuario, sin necesidad de tener conectado algún dispositivo extra para tener la interactividad, el uso de sub-títulos (*closed captioning*) es un ejemplo de este tipo. La interactividad en dos sentidos se refiere a acceder a servicios adicionales con la ayuda de un canal de comunicación extra, como el uso de un módem. Por ejemplo, un programa de televisión puede establecer cierto grado de interacción en donde será necesario consultar alguna página web, entonces la interactividad se da cuando por medio del módem se obtiene una conexión a internet y se accede a dicha página. Otro ejemplo puede ser el uso del llamado “comercio electrónico” o *e-commerce* [34]
- Otra ventaja se percibirá al observar películas o filmes realizados en formato de 35 mm, ya que éstas no tendrán que ser adecuadas a la proporción del aspecto actual (4:3)

Desventajas:

- La falta de energía de la señal originada por el alcance que tiene la potencia de transmisión, provoca que se genere un efecto conocido como “*cliff*”. Este

se produce regularmente en los límites de la cobertura. Cuando el medio de transmisión es por cable, regularmente una señal de SD digital puede viajar aproximadamente 300 m (1000 pies) por un cable coaxial de calidad alta, sin que llegue a haber degradaciones de la señal y que ésta pueda recibirse sin errores. La desventaja radica en que en una señal continua, las degradaciones pueden ser graduales a diferencia de la señal digital, en donde o hay error o no. Las técnicas usadas para corregir errores en los estándares de DTV, pueden llegar a corregir sólo 8 o 10 errores. Este efecto puede observarse en un reproductor, cuando se observa una imagen con cuadros de diversos tamaños que no tienen mucho que ver con la escena mostrada (*efecto de mosaico*)

- A consecuencia de problemas en la recepción de la señal, la DTV varía completamente a la analógica en el sentido que la DTV se ve o no se ve. No es como la analógica cuando a pesar de la mala recepción, se puede percibir la imagen en el televisor.
- Se requiere contar con antenas aéreas, nuevos televisores que permitan decodificar la señal o adquirir un *set-top box*.
- No hay una justificación clara para invertir en HDTV

Para que la DTV haya surgido y sea un hecho, primero se tuvieron que establecer las normas que se deben cumplir y establecer los mecanismos técnicos para suplir a la tecnología actual. Al ser un fenómeno mundial, la televisión digital despertó el interés por diversas agrupaciones e instituciones en diferentes partes del mundo. Esto dió como consecuencia que se tuviera una situación similar a la de los estándares analógicos (NTSC, PAL, SECAM). El resultado es que también para la televisión digital se crearon varias propuestas, principalmente por Estados Unidos de América, la Unión Europea y Japón. Cada uno propuso un estándar y ahora la tarea de algunos países que buscan hacer la transición al mundo digital, es determinar cual de ellos adoptar. A manera de introducción se presenta a continuación una introducción breve de los estándares que estarán en discusión en este trabajo de investigación.

1.6. Estándares de TV digital

Existen principalmente 2 estándares de televisión a nivel mundial: son: **DVB-T COFDM** (Digital Video Broadcasting Terrestrial), principalmente desarrollado en Europa y el **ATSC 8-VSB** (Advanced Television Systems Committee), desarrollado en Estados Unidos. Estos, reemplazarán a los estándares **PAL** y **NTSC**, respectivamente. Existe también otro estándar desarrollado en Japón, conocido como **ISDB-T BST-OFDM** (Integrated Services Digital Broadcasting). Presenta características similares al estándar europeo, pero no se considera como un candidato que pueda suplir a los primeros dos, es por eso que en este trabajo de investigación no lo contempla dentro del análisis. A continuación se presenta una breve explicación de los dos estándares principales.

1.6.1. ATSC

El ATSC fue formado por organizaciones pertenecientes al comité JCIC (*Joint Committee on InterSociety Coordination*) con el propósito de coordinar el desarrollo de la documentación de los sistemas de televisión avanzados [9].

Este sistema fue diseñado para transmitir video y audio de alta calidad (HDTV) e información extra, sobre un canal de 6 MHz. Fue desarrollado principalmente para transmisión de televisión abierta (*broadcasting*) y para televisión por cable. Puede proporcionar datos a una tasa de 19.4 Mbit/s en un canal de 6 MHz terrestre (televisión abierta) o 38.8 Mbit/s para un canal de 6 MHz para cable.

Aunque el sistema fue probado bajo un canal de 6 MHz puede ser escalado a otros anchos de banda, ya sea de 7 MHz u 8 MHz.

El sistema permite generar imágenes de calidad variada de acuerdo con la selección de alguno de los 18 formatos que soporta. Estos permiten manejar *definición estándar* (SD) o *alta definición* (HD), de manera entrelazada o progresiva a diferentes tasas de cuadros (*frame rates*).

El sistema está diseñado para tolerar diversos tipos de interferencia provocados por: servicios de televisión NTSC actuales, ruido blanco, ruido impulsivo, ruido de fase, distorsión por señales en multitrayectoria (*multipath*), así como su recepción a través de una antena aérea o portátil.

Usa un esquema de modulación conocido como **8-VSB**, el cual se refiere a utilizar 8 niveles de voltaje en una modulación en la banda vestigial. Este modo es usado principalmente en la transmisión de la señal abierta, mientras que para televisión por cable se utiliza el modo **16-VSB**. Fue diseñado para usar un sólo transmisor, bajo el esquema de redes de frecuencia múltiple (MFN -*Multi-Frequency Network*) [74].

Algunas de sus características principales se muestran en la tabla 1.1.

1.6.2. DVB-T

En 1992 una organización llamada DVB, (*Digital Video Broadcasting*) se dio a la tarea de investigar y analizar estándares para todas las áreas de aplicación de la televisión digital en Europa. Este grupo fue formado por alrededor de 200 organizaciones voluntarias que publicaron en 1994 las especificaciones para el estándar satelital (DVB-S) y para el estándar de cable (DVB-C). El estándar para transmisión terrestre (DVB-T) fue finalizado a principios del año 1997 [51].

El sistema fue diseñado para operar dentro del espectro asignado a los canales

en la banda UHF, asignado a los canales de televisión analógica de los estándares **PAL** y **SECAM**. Aunque el sistema fue desarrollado para operar en canales de 8 MHz, puede ser escalado para cualquier ancho de banda (8, 7 o 6 MHz). La tasa de datos disponibles para un canal de 8 MHz se encuentra en el rango de 4.98 a 31.67 Mbit/s, la cual depende del tipo de parámetros para la codificación del canal, el tipo de modulación y la duración del intervalo de guardia.

El sistema fue diseñado de manera flexible para adaptarse a todo tipo de canal. Puede tolerar distorsión por trayectorias múltiples de la señal (*multipath*) de grandes retrasos dinámicos o estáticos. Es robusto a interferencias de señales retrasadas, ya sea por ecos resultantes de reflejos de edificios o señales provenientes de transmisores distantes dentro de un esquema de redes de frecuencia única (*SNF*, *Single Frequency Network*).

El sistema permite modificar una serie de parámetros para ajustar diversas medidas y comportamientos de los canales. Permite la recepción fija, móvil, característica que lo distingue del ATSC. Esa serie de parámetros ajustables le permite a la estación transmisora elegir el modo apropiado para la aplicación prevista.

El sistema usa un gran número de portadoras por canal modulado trabajando en paralelo, producidas por una transformada rápida de Fourier (FFT) usando un método denominado **OFDM** (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Este contempla dos modos de operación, ya sea con más de 2000 transformadas de Fourier (modo 2k) o con más de 8000 FFT's (modo 8k). También es posible elegir entre varios niveles de modulación QAM y diferentes tasas de codificación. Además, es posible considerar un intervalo de guardia con amplitud variable que separa a los símbolos transmitidos. Esto hace que el sistema permita la configuración de diferentes redes de transmisores, como una gran área de redes de frecuencia única (SNF's)[74].

Los estándares del DVB-T están basados en el formato de video y audio MPEG-2, también se transmite la guía de programas y una serie de datos que pueden ser ocupados por diversas aplicaciones. Todos los datos que conforman la señal DTV del DVB-T, son organizados de manera que puedan ser protegidos durante el transporte de una estación transmisora a un aparato receptor [37].

Las principales características del sistema DVB-T COFDM son listadas en la tabla 1.1.

Para entrar en materia, se presentan a continuación los procesos que componen un sistema de transmisión digital, que usa etapas de codificación y modulación para transmitir la señal.

Introducción

Fuente	ATSC 8-VSB	DVB-T COFDM
Video	ISO/IEC 13818-2 (MPEG-2 video)	
Audio	Dolby AC-3	ISO/IEC 13818-2 (MPEG-2 Layer II audio) y Dolby AC-3
Paquete de transporte	ISO/IEC 13818-1 (MPEG-2 TS) <i>transport stream</i>	
Sistema de Transporte		
Codificación de canal		
Codificación externa (<i>outer coding</i>)	10 bytes de errores	8 bytes de errores
Codificación interna (<i>inner coding</i>)	Convolución (4 estados)	Convolución (64 estados)
Tasa FEC	2/3	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8
Modulación	8-VSB	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
No. de portadoras	1	1705 o 6817
Codificación jerárquica	No	Si
Tipo de transmisión geográfico	MFN	SFN y MFN

Tabla 1.1: Características principales de los estándares DTV.

1.7. Sistemas de transmisión digital

Para entrar en materia con la descripción de los procesos por los que tiene que pasar una señal de televisión, se presenta en esta sección los componentes generales de un sistema de transmisión de una señal digital.

Los procesos que involucra un sistema elemental de transmisión se muestran en la figura 1.2, donde cada bloque se define como:

Fuente de información: Cada señal proviene de una fuente. Regularmente es analógica, por lo que el primer paso en un sistema digital es convertirla a señal digital.

Codificador de fuente: Al tener una señal digital, conviene que sea procesada para eliminar redundancia en la información. Este proceso reduce la cantidad de datos que se requieren para representar la información.

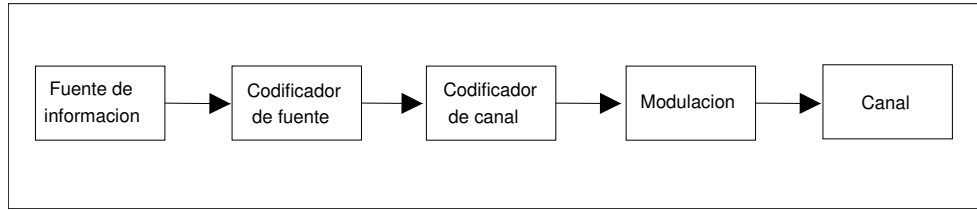


Figura 1.2: Diagrama a bloques de un sistema elemental de transmisión digital.

Codificador de canal: La señal tiene que protegerse para ser transmitida por un canal. En este proceso se consideran factores de ruido que pueden afectar los datos en la transmisión. Regularmente se agregan datos de protección (redundantes) que permiten detectar y corregir errores surgidos durante el transporte. Si el sistema general de comunicaciones lo permite, los datos pueden ser reordenados o distribuidos en un flujo, para contrarrestar los efectos de ráfagas de ruido, que pudieran afectar a un conjunto grande de datos en un flujo y modificar sus valores que impedirían a los códigos correctores de errores, corregir más allá del límite al que están sujetos.

Modulación: Este proceso adecua la señal digital para ser transportado por un canal. Aquí, la señal es adaptada para viajar por el medio, ajustando los parámetros que favorecen al sistema destinando, por ejemplo, transmisión de audio, video, audio, datos o los tres en conjunto.

Canal: Este es el medio donde viaja la señal modulada. Este puede ser un cable o el aire. Cualquier canal de comunicaciones aloja diversas señales que pueden afectar en mayor o menor grado a la señal deseada. En los canales por cable se pueden aislar ciertas señales que pudieran afectar la señal deseada, a diferencia del aire en donde no es posible.

En un sistema de transmisión de televisión digital, la señal también tiene que pasar por cada uno de los módulos descritos.

La estrategia para el análisis de los estándares, parte con la revisión de la teoría de las técnicas usadas en cada uno de los módulos del sistema de transmisión. Por tanto, no se hará énfasis en la fuente de información y sólo se presentarán características importantes de la etapa de codificación de fuente. Ya que lo que tiene mayor impacto con el desempeño de los estándares en la transmisión es la etapa de codificación de canal, modulación y recepción. Aunque ésta última, es mencionada sólo por ser el proceso que completa el ciclo y donde se hacen algunas mediciones de los factores involucrados en la transmisión.

En el siguiente capítulo se presenta una introducción a estos procesos involucrados en la codificación de una señal de televisión digital, para su transmisión y recepción.

Introducción

Capítulo 2

Componentes de un sistema de televisión digital

Los esquemas de transmisión de televisión digital son similares generalmente. De hecho, siguen los mismos procesos que hay que considerar para la transmisión de datos digitales a través de un canal. Estos procesos están enfocados a una serie de tareas que se deben seguir para adecuar los datos para su transmisión. Estos procesos cubren características de conversión a dato digital (si es necesario), eficiencia del ancho de banda (compresión de datos), soporte para reconstrucción de la señal (corrección de errores) y la adecuación de la señal digitalizada para su transmisión (modulación). La secuencia que siguen los datos en los procesos anteriores se muestra en la figura 2.1.

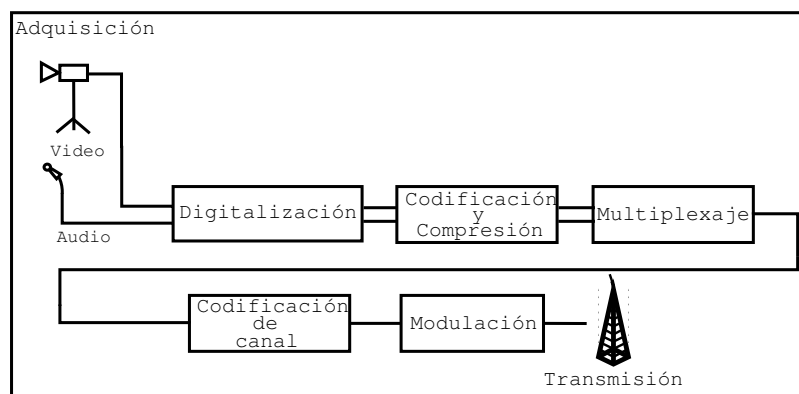


Figura 2.1: Diagrama a bloques de los procesos para la transmisión de TV. digital.

Los estándares de televisión digital usan diversas técnicas o métodos para la transmisión de su señal, básicamente siguiendo el esquema anterior. En algunos casos podrán coincidir en el método usado, pero no necesariamente tendrá que ser la

misma configuración o usar los mismos parámetros, ya que cada uno de ellos tratarán de adecuarse lo mejor posible a los requerimientos establecidos en el estándar.

Una de las características que tienen en común es que usan el mismo esquema de compresión y la capa de transporte para su señal. Este esquema es conocido como MPEG-2. Este estándar presenta mejoras con respecto al MPEG-1, principalmente en la tasa de codificación y en el manejo del modo de video, por ejemplo, MPEG-1 no soporta el entrelazamiento de líneas de video.

A lo largo de este capítulo se especificarán las características más importantes y más relevantes de estándar, mostrando como se codifica el video y el audio y como está formado el flujo de datos o “paquetes MPEG” (*stream*) a nivel de protocolo o sintaxis. Así mismo, se mencionarán el conjunto de herramientas que utilizan el proceso de transmisión para proteger y adecuar una señal para su transmisión.

2.1. Codificación de video con MPEG

El grupo de expertos en imágenes en movimiento (MPEG) fue formado desde principios de los 90's con el propósito de crear un estándar para el manejo de secuencias de imágenes (video) a una tasa de bits baja.

El primer éxito que tuvieron fue permitir el almacenamiento de video y sonido estéreo, implicando una tasa máxima de 1.5 Mbps. Esto se debió principalmente, al desarrollo de la teoría de la información y la codificación, donde lo importante era explotar aquellas características que tiene una imagen, por ejemplo la redundancia.

De la misma manera en que se explotan las características de redundancia de las imágenes fijas en el esquema JPEG, la codificación de las imágenes en movimiento permite explotar de manera importante la redundancia temporal entre cuadros sucesivos. Al reducir ésta, la compresión de los datos de la imagen se vuelve más eficiente.

A pesar de que el término compresión de datos ha sido encasillado en la era digital, la compresión de una señal puede incluso considerarse de forma analógica. Esta fue una de las características que consideró el MPEG para lograr tasas altas de compresión en una señal de video.

De acuerdo al teorema de muestreo y al estudio de los tipos de señales que conforman el video (Luma y crominancia), se estableció que las componentes de crominancia pueden perder detalle. Esto ayuda a que la cantidad de muestras sea menor, implicando que el ancho de banda para transportar los valores de estas muestras, se reduzca. Lo importante es que con el submuestreo de las señales de crominancia, la calidad del video se considera aceptable¹ (como consecuencia de la agudeza

¹Decir que la calidad de video es aceptable implica que su evaluación fue calificada entre regular y

2.1 Codificación de video con MPEG

visual humana). De esta forma se obtienen los esquemas denominados **4:4:4** (sin submuestreo) a **4:2:2** (donde las componentes de crominancia son submuestreadas por un factor de 2 de manera horizontal, con respecto a la componente luma), **4:2:0** (donde el submuestreo es también por un factor de 2 horizontalmente y verticalmente) o incluso **4:1:1** (donde ahora el factor es de 4 sólo en el sentido horizontal)².

El resultado de considerar el submuestreo de las componentes de la señal de video para el MPEG-1, fue la determinación del formato conocido como SIF (*source intermediate format*). Este formato denota la exploración (*scanning*) de manera progresiva con 4:2:0 de submuestreo de crominancia, teniendo 352×288 a 25 cuadros por segundo y 352×240 a 29.97 cuadros por segundo[59].

Por otro lado, desde su publicación en 1992, el estándar MPEG-1 se distingue por tres partes principales que lo conforman.

1. Sistema MPEG-1 (ISO/IEC 11172-1), define la estructura de como se multiplexan los paquetes del flujo de datos (*stream*)
2. Video MPEG-1 (ISO/IEC 11172-2), define la codificación del video
3. Audio MPEG-1 (ISO/IEC 11172-3), define la codificación del audio.

En ese entonces (1992), no se consideró una posible aplicación para transmisión de la señal codificada, de esta forma el MPEG-1 no se usa para esos fines, ya que una desventaja importante es que no es posible codificar cuadros entrelazados, además de no haber considerado otros factores que se requieren en la HDTV, como las resoluciones espaciales que se manejan. De esta forma, el grupo MPEG propuso un estándar optimizado para las aplicaciones de transmisión (*broadcasting*). Este estándar internacional es conocido como MPEG-2 y así como su antecesor, también está formado por tres partes principales (publicadas en noviembre de 1994).

1. Sistema MPEG-2 (ISO/IEC 13818-1), define la forma de empaquetar el flujo de datos (*streams*)
2. Video MPEG-2 (ISO/IEC 13818-2), define la codificación del video
3. Audio MPEG-2 (ISO/IEC 13818-3), define la codificación del audio.

La compresión del audio usado junto con la compresión del video en el MPEG-2, se puede realizar con varios esquemas, ya sea por medio de un algoritmo conocido como *MUSICAM* (MPEG-2 Layer II) o Dolby AC 3. Así como en el video, la

excelente, en una escala de evaluación, ya sea por métodos subjetivos u objetivos. Los métodos subjetivos usan personas que evalúan la calidad de la imagen como “mala”, “pobre”, “regular”, “buena” y “excelente”. Mientras que los objetivos pueden usar dispositivos denominados “Analizadores de Calidad de Video Digital [31].

²Submuestrear de manera horizontal o vertical, se refiere a dejar tantas muestras (de las que había originalmente) por línea (horizontal) o por columna (vertical) de la forma rectangular de una imagen.

compresión del audio también se realiza considerando factores relacionados con información de la señal que el ser humano no puede percibir. En el caso del video este factor es psico-visual, lógicamente para el audio es psico-acústico. A grandes rasgos, la compresión del audio se realiza de tal forma que las frecuencias que el oído humano no alcanza a percibir se eliminan. Para esto también se considera una transformación de la señal y un modelo acústico adaptado a los humanos. La señal comprimida de audio forma parte también del flujo de datos codificados para el video, se transmiten bajo la normas de la capa de transporte del estándar MPEG-2.

Debido al diseño y a las características que ofrece el MPEG-2, ha sido considerado como el formato estándar para compresión de video y como esquema de la capa de transporte para los 2 principales sistemas de televisión digital terrestre, el ATSC-8VSB y el DVB-T COFDM.

2.1.1. Codificación del video MPEG-2

El MPEG-2 es un poco más complejo que el MPEG-1, pero tiene la ventaja de que usa todas las herramientas en las que se basa MPEG-1 y añade otras. De esta forma, un decodificador MPEG-2, también puede decodificar al MPEG-1.

MPEG-2 proporciona nuevos algoritmos para codificar video entrelazado y soportar diversas tasas de bits. MPEG-2 también proporciona herramientas que permiten escalabilidad³, es decir, sólo con algunas partes, en el sentido de que con algunas partes del total del flujo de bits, se puede decodificar una secuencia de imágenes. Por tanto, el flujo de bits total puede estar codificado en capas, donde una capa base permite la decodificación del video y otras capas añaden refinamiento, permitiendo así la mejoría de la resolución. Para esto, el estándar define los conceptos de perfil y niveles.

2.1.1.1. Niveles y perfiles del MPEG-2

Dada la generalidad y para la amplia gama de aplicaciones que puede ser usado, el estándar MPEG-2 define una sintaxis que permite considerar varias características para codificar el video, donde para la facilidad del manejo se definen los conceptos de perfiles y niveles.

El perfil define las características de la sintaxis que pueden usarse para crear un flujo de bits (*bitstream*), mediante un algoritmo particular. Los perfiles indican básicamente las características disponibles [42]. El nivel identifica a los valores en los parámetros, por ejemplo, el tamaño de la imagen o la tasa de bits. Dichos perfiles y niveles fueron diseñados para que cada uno de ellos fuera un subconjunto de otro (los bajos de los altos).

³Aunque algunos perfiles no necesariamente deben ser escalables.

2.1 Codificación de video con MPEG

El estándar es compuesto de los perfiles: simple (*simple*), principal (*main*), SNR, espacial (*spatial*) y alto (*high*). También existe otro perfil, pero este es considerado como no jerárquico y es conocido como el perfil 4:2:2. En párrafos siguientes se explica la diferencia entre los jerárquicos y los no jerárquicos.

Los niveles con los que cuenta son 4: bajo (*low*), principal (*main*), alto-1440 (*high-1440*) y alto (*high*).

Inicialmente las combinaciones entre perfiles y niveles se consideraron en forma jerárquica, esto es, los perfiles simples son un subconjunto de los perfiles más complejos y cada valor de un parámetro de un nivel bajo es menor o igual al valor correspondiente, en cada nivel más alto. La ventaja principal es su compatibilidad en forma directa.

Cuando la combinación es no jerárquica, el perfil no tiene relación con los otros (en términos de mayor o menor complejidad). También, los niveles no tienen necesariamente relación con los de otros perfiles. Aún así la declaración de este tipo de combinaciones, se hace de la misma forma que los jerárquicos.

Para definir las combinaciones entre perfiles y niveles se usa la siguiente sintaxis **perfil@nivel** (*profile@level*). Básicamente el perfil determina la calidad del video y el nivel, la resolución (por ejemplo, desde el formato **SIF** hasta el **HDTV**).

El cuadro 2.1 presenta las combinaciones posibles para perfiles y niveles e indica aquellos que son soportados por el estándar MPEG-2 (por medio del símbolo \checkmark).

Perfil \ Nivel	Low	Main	High-1440	High
Simple		\checkmark		
Main	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
SNR	\checkmark	\checkmark		
Spatial			\checkmark	
High		\checkmark	\checkmark	\checkmark

Tabla 2.1: Combinaciones de perfiles y niveles.

El cuadro 2.2 muestra las principales características de los diferentes niveles y perfiles del MPEG-2.

Las características de los perfiles se describen a continuación:

perfil simple (SP): se define para simplificar el codificador y el decodificador a expensas de una tasa alta de codificación, de esta forma no usa predicción bidireccional (imágenes B). Las combinaciones posibles son: **SP@ML** (perfil simple en nivel principal).

Componentes de un sistema de televisión digital

Niveles		Perfiles				
		Simple	Main	SNR/Spatial	High	4:2:2
	Pictures	I, P	I, P, B	I, P, B	I, P, B	I, P, B
	Chroma format	4:2:0	4:2:0	4:2:0	4:2:2	4:2:2
High	Max Bit Rate		80 Mbps		100 Mbps (25 base layer)	
	Samples/line		1920		1920	
	Lines/frame		1152		1152	
	Frames/sec		60		60	
High 1440	Max Bit Rate		60 Mbps	60 Mbps (15 base layer)	80 Mbps (20 base layer)	
	Samples/line		1440	1440	1440	
	Lines/frame		1152	1152	1152	
	Frames/sec		60	60	60	
Main	Max Bit Rate	15 Mbps	15 Mbps	15 Mbps (10 base layer)	20 Mbps (4 base layer)	50 Mbps
	Samples/line	720	720	720	720	720
	Lines/frame	576	576	576	576	608
	Frames/sec	30	30	30	30	30
Low	Max Bit Rate		4 Mbps	4 Mbps (3 base layer)		
	Samples/line		352	352		
	Lines/frame		288	288		
	Frames/sec		30	30		

Tabla 2.2: Niveles y perfiles del MPEG-2

perfil principal (MP): utiliza los tres tipos de imágenes (I,P y B) para establecer un compromiso entre tasa y costo, por lo que genera codificadores y decodificadores más complejos. Las combinaciones posibles son: **MP@LL** (perfil principal en nivel bajo), **MP@ML** (perfil principal en nivel principal), **MP@H-14** (nivel principal en nivel alto-1440), **MP@HL** (perfil principal en nivel alto).

perfil SNR (SNR): permite la transmisión de una imagen con calidad básica (capa base) en términos de la resolución espacial (perfil escalable espacialmente) o precisión en la cuantificación (perfil de SNR escalable) y de información suplementaria que permiten que las características de la imagen sean mejoradas. Las posibles combinaciones son: **SNR@LL** (SNR en nivel bajo), **SNR@ML** (SNR en nivel principal).

perfil espacial (Spatial): permite tanto escalabilidad espacial como escalabilidad SNR, donde el flujo de bits total puede estar por 2 o 3 capas diferentes. Cuando se usan 2 capas hay escalabilidad espacial y una de SNR, pero cuando hay 3

capas, cualquiera de los tipos de escalabilidad puede ser usado. Las combinaciones posibles son: **Spatial@H-14** (perfil espacial en nivel alto-1440).

perfil alto (HP): es empleado para la HDTV en formato 4:2:0 y 4:2:2. Las combinaciones posibles son: **HP@ML** (perfil alto en nivel principal), **HP@H-14** (perfil principal en nivel alto-1440), **HP@HL** (perfil alto en nivel alto).

Los cuatro niveles se describen de la siguiente manera:

nivel bajo (LL): corresponde a la resolución que es característica de un formato conocido como SIF y es equivalente a 360 muestras/líneas por 288 líneas/cuadro.

nivel principal (ML): corresponde a la resolución estandar 4:2:0. 720 muestras/línea por 576 líneas/cuadro.

nivel alto 1440 (H-14): es fijado para la HDTV. 1440 muestras/líneas por 1152 líneas/cuadro.

nivel alto (HL): está optimizado para la HDTV con pantalla amplia (*wide screen*) y una resolución de hasta 1920 muestras/líneas por 1152 líneas/cuadro.

Debido a que existe cierta compatibilidad entre los perfiles, un decodificador de un perfil puede decodificar los perfiles de menores rangos.

Una de las combinaciones más usadas en aplicaciones de televisión abierta es conocida como **MP@ML** (perfil principal en nivel principal -*main profile at main level*). Este corresponde a una codificación MPEG-2 de imágenes entrelazadas en formato 4:2:0 con una resolución de $720 \times 480 @ 30\text{Hz}$ o $720 \times 576 @ 25\text{Hz}$, según sea el caso, con la posibilidad de codificar imágenes I, P y B. Dependiendo de la tasa de bits y calidad de imagen deseada, así como la naturaleza de las imágenes, la tasa de bits generalmente estará entre 4 Mbps y 9 Mbps.

Una de las principales características del MPEG es el establecimiento de protocolos para el manejo del video. MPEG define una jerarquía de tres flujos de datos principales: *elementales*, *programa* y *transporte*. Estos flujos describen la forma en que tiene que ser ordenada la información para viajar por un canal de manera confiable, proponiendo para esto, la forma de multiplexar varios programas y la especificación de la información para la sincronización y la forma necesaria para su decodificación (la información acerca del multiplexaje y el transporte de los flujos se describe en la sección 2.3).

La codificación del audio juega un papel importante en los estándares de televisión digital, ya que en la actualidad no sólo se procesa audio en estéreo (2 canales), también es posible procesarlo para obtener el denominado “sonido envolvente”, donde se requiere el manejo de 4 a 6 canales de audio. En la sección siguiente se explica brevemente el tema de su codificación.

2.2. Codificación del audio

Para la compresión del audio son explotadas ciertas limitaciones que posee el oído humano, como por ejemplo, el rango de frecuencias que puede percibir.

Desde hace mucho tiempo se conoce que la sensibilidad del oído humano se encuentra dentro del rango entre 20 Hz y 20 kHz. Dentro de este rango puede establecerse una curva que describe el umbral de percepción en función de las frecuencias (figura 2.2). Si una señal es audible es porque excede el umbral de percepción. Esta curva puede ser modificada por diversas señales. Por ejemplo, en el caso de que se tengan dos señales con frecuencias relativamente cercanas, la señal con más fuerza hace que el umbral de percepción se incremente, provocando que el oído sea menos sensible en esa región de frecuencia. A este efecto se le conoce como *enmascaramiento frecuencial* (figura 2.3).

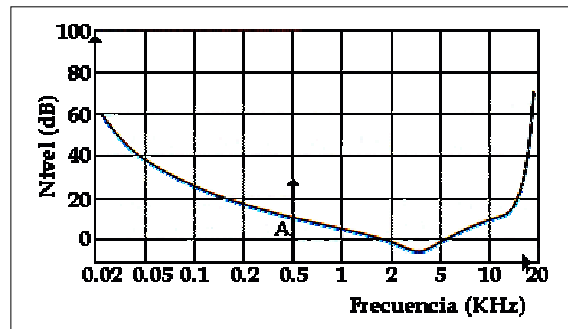


Figura 2.2: Umbral de percepción del sonido en función de la frecuencia.

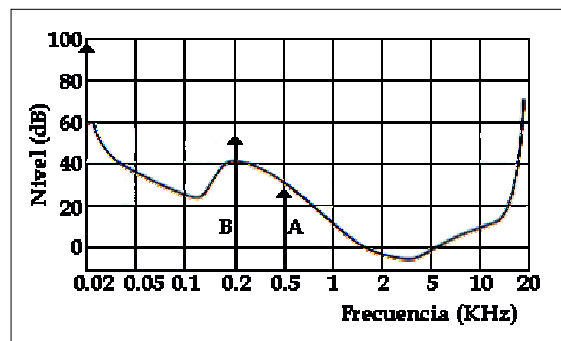


Figura 2.3: Enmascaramiento frecuencial.

También existe otro efecto similar, donde un sonido con una amplitud considerable (que rebasa un umbral de enmascaramiento) enmascara a sonidos que lo preceden o que le siguen en el dominio del tiempo. A este efecto se le conoce como *enmas-*

enmascaramiento temporal (figura 2.4).

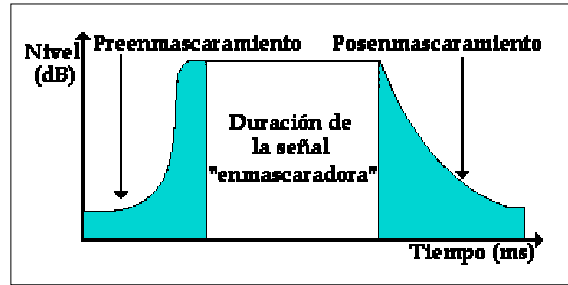


Figura 2.4: Enmascaramiento temporal.

Con la consideración de estos efectos se llegó a proponer un modelo psico-acústico después de muchos experimentos. Este modelo llevó a la realización de un codificador perceptual, caracterizado por una curva de enmascaramiento y señales que ayudan a la cuantización y que varían según la señal que se va a codificar.

El proceso de codificación consiste en dividir una banda de frecuencias en 32 sub-bandas con intervalos equidistantes por medio de un banco de filtros.

Dicho modelo psico-acústico permite la eliminación de todas las señales en las sub-bandas que se encuentren por abajo del umbral de percepción, ya que esas no pueden ser escuchadas por el oído humano, también define la precisión en la cuantización para cada sub-banda, de manera que el ruido de cuantización permanezca por debajo del umbral audible. De esa forma, las regiones de frecuencia donde el oído es más sensible son cuantificadas con mayor exactitud, que aquellas donde no lo es.

El análisis de la señal para determinar la curva de enmascaramiento es llevada a cabo en un intervalo de tiempo llamado *cuadro*⁴ (frame), que corresponde a la duración de 12×32 muestras (o pulsos del PCM) para el MPEG-1 (capa 1) o 12×96 muestras (pulsos de PCM) para el MPEG-1 (capa 2). En este intervalo el codificador tiene que evaluar la amplitud máxima de la señal para definir un *factor de escalamiento* codificado en 6 bits, cubriendo un rango dinámico de 128 dB en 64 pasos de 2 dB [15]. Toda la información necesaria para la decodificación del sonido es aplicada a nivel de cuadros.

A diferencia del video, para la codificación del audio se usan varias técnicas como el MPEG Layer II o el Dolby[©] digital. La forma de codificación de ambos es similar, por lo que se describirá a grandes rasgos una de ellas y se mencionarán las características más importantes de ambos.

⁴Un cuadro es la unidad más pequeña para el acceso aleatorio a la secuencia (comparable a un grupo de imágenes, en la compresión del video).

2.2.1. Capas de audio en el MPEG

En el MPEG se definen tres capas para el audio, obteniendo distintas tasas de compresión de acuerdo a la calidad requerida de audio. Las capas que contempla son las siguientes:

- **Capa I:** también conocida como “pre-MUSICAM” usa un algoritmo adaptable y codificación por sub-bandas para usar una variedad de tasas de bits desde los 32 hasta 448 kb/s; para la calidad denominada “*hi-fi*” es necesario usar 192 kb/s por canal, de esta forma se usan 384 kb/s para codificar en estéreo. La principal ventaja de esta capa es su simplicidad en el codificador y en el decodificador.
- **Capa II:** usa las bases de un algoritmo conocido como MUSICAM, desarrollado por el grupo de audio digital de Europa (DAB). Este algoritmo tiene la ventaja que para obtener un calidad equivalente a la que se obtendría en la capa I, se necesita de un 30 a un 50% menos para la tasa de bits. Teniendo como desventaja que el codificador y el decodificador es más complejo. La tasa de bits puede fijarse dentro del rango de 32 a 192 kb/s por canal. Para una calidad hi-fi se requieren 128 kb/s por canal o 256 kb/s para estéreo. Esta capa es la que usa el sistema DVB-T estudiado.
- **Capa III:** usa la codificación Huffman y un análisis de la señal usando la transformada DCT (Transformada Coseno Discreta -*Discrete Cosine Transform*) en lugar de la codificación en sub-bandas. La principal ventaja de esta capa es que es posible obtener hasta dos veces más compresión que la capa II con una calidad preestablecida. La desventaja otra vez es que el codificador y el decodificador son más complejos. Para una calidad hi-fi, solamente se requieren 64 kb/s por canal (128 kb/s para estéreo). Cabe mencionar que esta capa es mejor conocida como MPEG-3 y que es la que genera el formato de archivos mp3.

El algoritmo MUSICAM es usado como la base que se adoptó por el grupo MPEG para la codificación del audio en las capas I y II del estándar MPEG. A partir de que se terminó de especificar el algoritmo de la Capa I del MPEG, el algoritmo MUSICAM no fue usado más. En algunos casos, el nombre es usado erróneamente cuando se hace referencia a la codificación de audio de la capa II del MPEG, ya que el nombre MUSICAM es una marca registrada, en todo caso es preferible referirse a él como MPEG Capa II o sólo Capa II.

La palabra MUSICAM es un acrónimo de *Masking pattern Universal Sub-band Integrated Coding And Multiplexing*. Emplea la técnica de codificación pisoacústica especificada por el MPEG-2 Capa II. El sistema codifica sólo las componentes de la señal de audio que se pueden percibir y descarta aquellos que no.

MUSICAM es un proceso de codificación de audio eficiente que comprime señales de audio digital para generar tasas entre los 8 kbit/s hasta los 384 kbit/s, usando una frecuencia de muestreo de 48 kHz o si el servicio es de baja calidad de audio, se puede muestrear a 24 kHz.

2.2.2. Capa II

La Capa II del MPEG surge a consecuencia de la necesidad de realizar mejoras a los algoritmos de codificación. En este sentido, se puede hablar de la Capa II del MPEG-1 y del MPEG-2, es decir, la Capa II del MPEG-2 contiene las mejoras de la Capa II del MPEG-1. Lo importante en este caso, es que el decodificador de MPEG-2, puede decodificar audio codificado con la Capa II del MPEG-1. Sin embargo, también puede existir equipo MPEG-1 que pueda decodificar parcialmente el audio codificado con MPEG-2, es decir, sólo extrae la parte compatible con MPEG-1. Este es un concepto que ha manejado el grupo MPEG y se denomina *Backwards Compatibility* o “Compatibilidad hacia atrás” [57].

El algoritmo de codificación de esta capa fue diseñado principalmente para las aplicaciones de radio digital (por ejemplo, Eureka 147); manejaba hasta dos canales y tenía la capacidad de llevar datos auxiliares.

La especificación de las características de la codificación de la Capa II del MPEG se encuentran en ISO/IEC 11172-3 y en ISO/IEC 13818-3. Algunas de sus características son:

- permite tasas de muestreo de 48, 44.1, 32 kHz
- el rango de la tasa de bit permitido es de 8 a 384 kbit/s
- el grado de compresión promedio es de 6:1
- los modos de codificación que maneja son mono, mono dual (se transmiten dos señales monofónicas), estéreo, y “*joint* estéreo”, donde en esta última se combinan la información de los canales estéreo para ganar mayor compresión.

Algunas de las mejoras que permite MPEG-2 es que puede muestrear a la mitad de frecuencia que el MPEG-1, esto es, permite tener tasas de muestreo de 24, 22.05 y 16 kHz. Se aplican prácticamente en canales de comentarios, canales multilinguaje y otros. La reducción de la tasa de muestreo, también permite tener tasas de bit desde 8 kbps para el algoritmo de la Capa II.

La Capa II del MPEG-2 considera la codificación multicanal 5.1 *surround*. Donde dada la filosofía que maneja el estándar se dice que la Capa II del MPEG-2 es un MPEG-1 estéreo pero con una extensión que permite tener canales extra [70]. Para codificar en este modo, requiere aproximadamente una tasa de 640 kbit/s.

Componentes de un sistema de televisión digital

La cantidad de canales del modo multicanal son 5 de banda completa (izquierdo, derecho, centro y dos canales “*surround*”), más un canal de baja frecuencia y/o hasta 7 canales de comentario/multilingüaje.

Algunas aplicaciones prácticas donde emplean la codificación del audio de MPEG, dentro del mercado profesional y del consumidor son:

- Almacenamiento en disco compacto (CD-i, CD-Video)
- DVD
- Televisión terrestre, por cable y satelital (DVB, USSB, DirecTV, EchoStar)
- Transmisión abierta de audio digital (*Digital Audio Broadcasting -DAB*)
- Radio Internet
- Aplicaciones multimedia

2.2.3. Dolby[©] digital

Esta es una organización estadounidense que desarrolló el sistema “*Digital Surround Sound*” con 5.1 canales (también conocido como **AC3**). Esta propuesta nació a consecuencia de la necesidad de manejar más canales de audio. Fue diseñado principalmente para transmisión y provee hasta 6 canales de audio en un solo flujo de datos.

Fue desarrollado en 1992 para trabajar con formatos de 35-mm y llevar canales múltiples de audio. Este estándar es usado prácticamente para codificar el audio y ser entregado a un decodificador para el usuario final, es decir, que no fue diseñado para aplicaciones donde se tenga que codificar y decodificar varias veces hasta llegar al usuario final. Se codifica una sola vez y se transmite, esto debido a que se empiezan a notar desperfectos a consecuencia de la pérdida de información en la señal, después de dos o tres codificaciones o decodificaciones [43].

El sistema toma seis canales de audio de 20-bit muestreados a 48 KHz, generando un flujo de datos de 6 Mbit/s. Este es reducido por un tasa de 15:1 a 384 kbit/s, aceptable para ocasiones donde no se requiere re-codificar el flujo. En caso de que se requiera, la tasa de datos debe aumentar y si se aumenta a 640 kbit/s, un par de codificación/decodificación pueden ser ejecutadas sin llegar a afectar. Incluso si sólo se mandan dos canales se puede usar la misma tasa de 384 kbit/s para codificar/decodificar hasta 10 o mas veces sin llegar a afectar.

La eficiencia de codificación del AC-3 es logrado por el uso de la técnica de compresión psicoacústica de audio. Como se mencionó anteriormente, el ser humano escucha en un rango de 20 Hz a 20 kHz. Una señal de audio no es escuchada si esta se

encuentra por debajo del umbral del silencio. Se puede usar enmascaramiento espectral para provocar que los tonos ruidosos enmascaren la presencia de tonos suaves. El enmascaramiento temporal provoca que los tonos ruidosos enmascaren la presencia de tonos suaves inmediatamente antes o después de que ocurra un tono ruidoso.

En el proceso de codificación, AC-3 reparte el espectro audible en pequeñas bandas. Considera el enmascaramiento para reducir la tasa de datos. Las frecuencias de sonido de bajo nivel que se encuentran cerca de frecuencias de alto nivel son eliminadas. El enmascaramiento puede provocar efectos interesantes si la tasa es demasiado pequeña, el más común es el ruido de fondo. Por ejemplo, un evento deportivo donde mucha gente grita puede escucharse sólo como un evento concurrencial pero no tan ruidoso. Otro puede ser que un melodía de una banda de 5 instrumentos se escuche o interprete como una de 3 instrumentos.

Un codificador AC-3 considera hasta 6 canales de audio PCM, información de control por metadatos, referencia y tiempo de codificación. Soporta tasas de codificación de 32, 47.1 y 48 kHz. El rango de salida de la tasa va de 32 hasta 640 kbit/s. Si se asumen 5.1 canales a 48 kHz usando 20 bits se puede codificar a una tasa de 13:1 [43].

Los decodificadores AC-3 permiten 5 modos para escuchar lo que se codificó:

1. Rango dinámico completo de 5.1 canales
2. Rango dinámico reducido de 5.1 canales, usado en ambientes donde no se permite demasiado volumen
3. Dolby surround de dos canales codificado de forma mezclada
4. Normal de dos canales estéreo
5. Mono

Para el mejor *performance* del sistema Dolby se requieren de 6 bocinas principalmente. Esto es, tres bocinas al frente, dos a los costados y una opcional en la parte frontal. Esta última tiene la característica de producir frecuencias bajas y dado que sólo utiliza una pequeña fracción del ancho de banda, es identificado como 0.1 de una bocina [51]. El diagrama de distribución de las bocinas se muestra en la figura 2.5.

Después de digitalizar la señal analógica y hacer la separación por bandas (eliminando aquellas que no son necesarias), la señal es codificada usando dos tipos de datos. Unos llamados *información esencial*, con información del sonido y algunos otros datos de sincronía y otros llamados *metadatos*, con información del contenido del audio, por ejemplo, si es mono, estéreo o 5.1, puede llevar información acerca de como transformar audio codificado en 5.1 a mono. Otro tipo de información que puede ir en los metadatos es la relacionada al control del rango dinámico, ya que

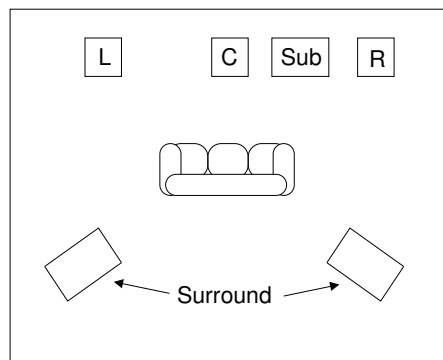


Figura 2.5: Diagrama de distribución de las bocinas en el sistema Dolby[©].

puede haber diferentes programas que hayan codificado el audio en diferentes niveles. Es por eso que el decodificador tiene que ajustar el audio de los diferentes programas para escucharse en el mismo nivel y no que el volumen de uno sea mas fuerte que el de otros [51].

Codificado el video y audio, se generan paquetes de transporte, mismos a los que también hay que integrar la información necesaria para la decodificación del audio y video. Los paquetes se generan de tal manera que se crea sólo un flujo de datos.

La etapa de multiplexaje no juega un papel primordial en el desempeño de los estándares, en cuanto a errores que se puedan generar en la etapa de decodificación e impactar las mediciones de desempeño en la transmisión o en la calidad del video o audio. Por tal motivo, sólo se dará una explicación breve de lo que consiste esa etapa.

2.3. Multiplexaje y transporte

Después de realizar el proceso de codificación de audio y video mediante un algoritmo específico, la información tiene que ser “acomodada” o distribuida en paquetes de transporte, para trabajarse en las etapas posteriores de un sistema de codificación-decodificación (principalmente los sistemas correctores de errores).

La estructura de la capa de transporte del MPEG-2 se define en el estándar ISO/IEC 13818-1, esta estructura debe completarse con la información del servicio (**SI** -*Service Information*), de cada uno de los estándares de televisión digital.

Una vez que se codificó el audio y el video son generados los flujos de información elemental (*elementary streams*). Cada flujo de información elemental lleva información de control para su decodificación.

Estos flujos de información también llevan información adicional como datos privados, los cuales tendrán que estar codificados de tal forma que el decodificador pueda reconstruir la información y sincronizar el video, el audio y los contenidos que un usuario puede elegir (por ejemplo, acerca del programa presentado). El estándar MPEG define las reglas que constituyen la **capa del sistema** (*system layer*) agrupando video, audio y datos privados en un flujo simple de bits, así como los requerimientos que permitan su combinación, por ejemplo, para obtener una tasa constante de bits [15].

Cada flujo de datos elemental es cortado en paquetes para formar los “flujos de datos empaquetados” (PES), el cual comenzará con un encabezado (*header*) seguido por los datos elementales.

Las funciones principales de la capa del sistema y que engloban a la capa de compresión, son las siguientes:

- empaquetamiento y combinación de varios flujos de información en uno solo
- inserción de marcas de tiempo sobre los flujos elementales para la sincronización en la reproducción
- inicialización y administración de los espacios temporales (*buffers*) para la decodificación de los flujos

De esta forma, un dispositivo de codificación MPEG tiene que, además de codificar el video y audio, multiplexar estos datos junto con los datos privados e información necesaria para sincronizar las partes de audio y video e indicar los recursos necesarios para la decodificación.

El estándar MPEG-2 define la organización del multiplexaje de los flujos, en dos formas diferentes que producirán flujos de bits distintos de acuerdo a la aplicación destino. Uno es el flujo de programa y otro es el flujo de transporte.

2.3.1. Flujos de programa y transporte

El flujo de programa es usado regularmente para ambientes que no son muy ruidosos y de esa forma la pérdida de datos es mínima. Las aplicaciones en este caso pueden usarse en disco duro o en CD-ROM. En cambio, el flujo de transporte se usa en ambientes donde los datos están expuestos a la pérdida a causa del ruido. Lo anterior se puede observar en la figura 2.6.

A continuación se explica de manera breve las características de los paquetes en dichos flujos.

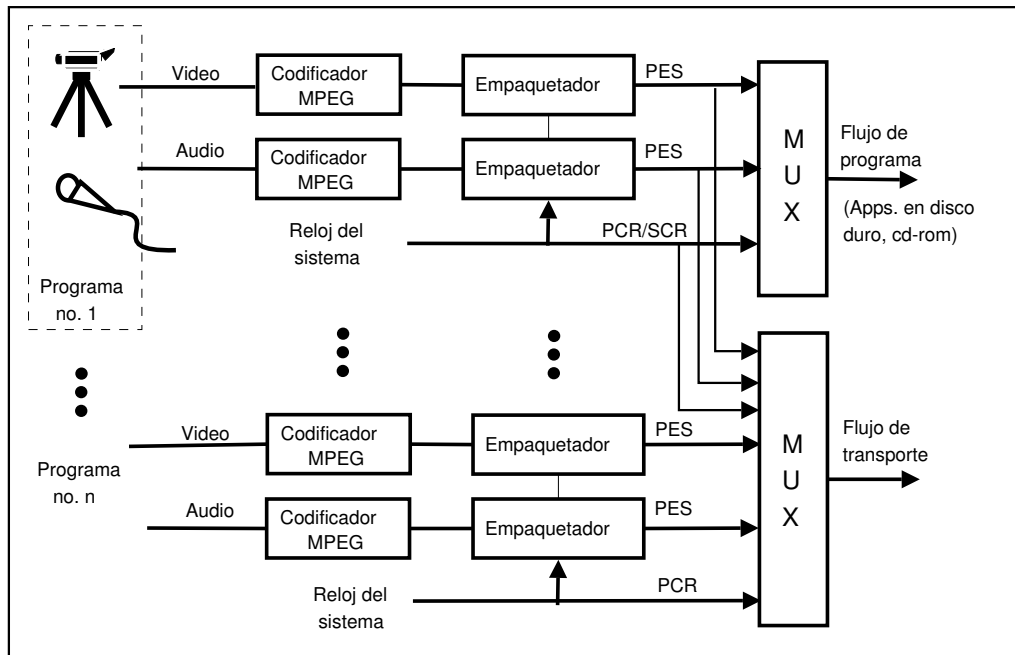


Figura 2.6: Flujos de datos en el MPEG-2.

2.3.1.1. Flujo del programa

Este flujo está formado por uno o más PES (video, audio o datos privados) los cuales comparten el mismo reloj del sistema para su sincronización. Este tipo de flujos están acondicionados a aplicaciones donde el canal de transmisión o medio de almacenamiento es propenso a introducir una cantidad muy pequeña de errores a los bits, alrededor de una tasa de bit en error $BER \leq 10^{-10}$ (lo que significa que su probabilidad de bit en error sea muy baja). Por tanto, estos medios son denominados “quasi-libres de errores (QEF)” y regularmente aparecen en aplicaciones multimedia basadas en CD-ROM, en DVD o en un disco duro. Debido a esta característica la longitud de los paquetes es relativamente grande (2048 bytes) ya que la probabilidad de que se modifiquen es muy baja.

A continuación se presenta el flujo usado por los estándares de televisión digital.

2.3.1.2. Flujo de transporte

Este flujo es generado para acondicionarse al transporte de datos a grandes distancias de programas de televisión, por ejemplo, cuando los ambientes son susceptibles a provocar tasas altas de bit en error ($BER \geq 10^{-4}$); como es el caso de la televisión digital.

2.3 Multiplexaje y transporte

Los flujos de transporte fueron diseñados para multiplexar programas para llevarse sobre redes digitales distribuidas. Las especificaciones de los flujos incluyen temporización sofisticada, sincronización y mecanismos de corrección de *jitter*⁵, vitales para su transmisión confiable a grandes distancias. Una de las ventajas es que la longitud fija del paquete se mapea perfectamente a sistemas ATM [14].

En este caso la longitud del paquete es relativamente pequeña, para dar lugar a que los algoritmos de corrección de errores sean eficientes. De esta forma, el paquete de transporte se ha fijado a una longitud de 188 bytes para los programas de televisión via satélite, cable y terrestres (para ambos estándares, ATSC y DVB-T).

Cada programa consistirá típicamente de video, audio y datos (donde tanto el audio como los datos pueden estar en varios idiomas). Estos programas están formados por los flujos elementales (**ES**, *Elementary Streams*), ligados a una referencia común de tiempo denominado **PCR** (*Program Clock Reference*), éste puede adjuntarse a cada programa o tener uno para varios programas. Los ES son cortados en pequeñas secciones, denominadas **TP** (*Transport Packet*), para multiplexarlas y generar un sólo flujo de transporte (**TS** *Transport Stream*) (figura 2.7).

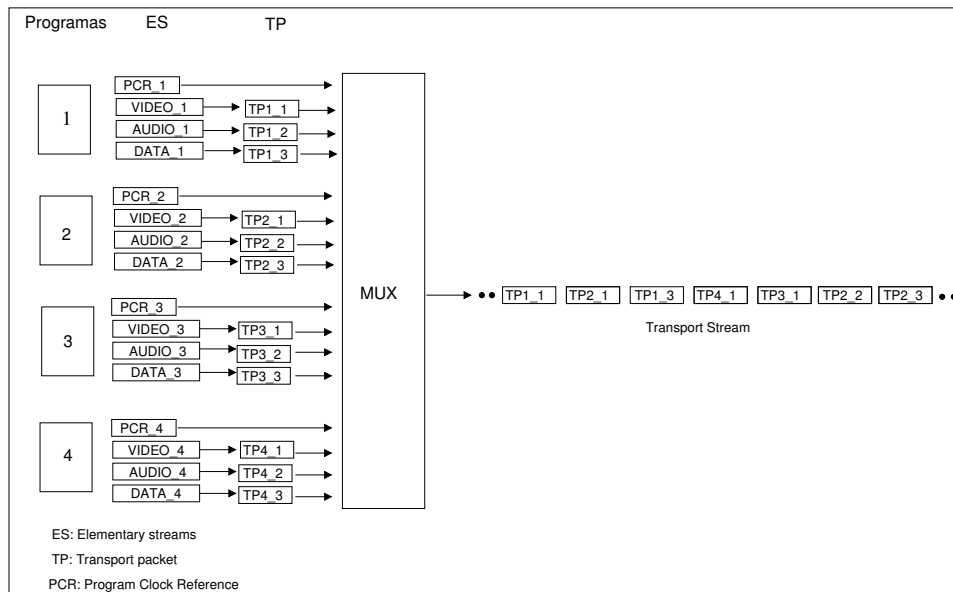


Figura 2.7: Multiplexaje y transporte de paquetes elementales.

El paquete de transporte de 188 bytes está formado por un encabezado de 4 bytes y un conjunto de 184 bytes de PES y de la información específica del programa (**PSI**

⁵Es un efecto que se produce al desplazar la señal transmitida en tiempo o fase, introduciendo errores y pérdida de sincronización.

Program Specific Information) que componen un programa de televisión; a ambos (el PES y el PSI) se les denomina, en algunos casos, “carga útil” (*payload*) (figura 2.8). En ocasiones en el paquete de transporte existirán datos de carga útil o también datos agrupados en un campo opcional denominado “campo adaptable”. De esta forma los paquetes PES tendrán que ser divididos en bloques de 184 bytes. Dado que la longitud de estos paquetes generalmente no son múltiplos exactos de la longitud, el último paquete de transporte lleva consigo un paquete PES que tendrá que empezar con un campo adaptable de longitud 184 menos el número de bytes que restan del paquete PES. Además de esto, el campo adaptable será usado para llevar datos opcionales y la referencia de reloj del programa (*program clock reference* PCR).

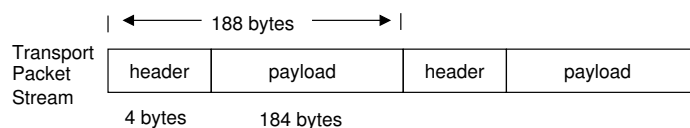


Figura 2.8: Flujo de paquetes de transporte.

El encabezado del paquete de transporte básicamente está formado por un byte de sincronización, de valor 47 hexadecimal, campos con banderas, indicadores de control y el campo adaptable.

La televisión digital hace posible que varios programas de televisión sean transportadas en un sólo flujo de datos. En este sentido, se puede decir que por un mismo canal es posible transmitir varios programas⁶. A diferencia de la televisión analógica donde sólo se transmite un programa por canal.

Para llevar a cabo esa tarea, en la etapa de multiplexaje de paquetes es necesario considerar diversas tablas donde se almacena la información específica de cada programa. En ellas se almacena la información que permite decodificar cada flujo perteneciente a un programa. En [43, 42, 31, 71] se encuentra información más detallada para el demultiplexaje tanto de programas codificados en ATSC como en DVB-T.

El siguiente paso después de tener los flujos de video y audio empaquetados es protegerlos del deterioro al que pueden estar sujetos los datos en su transmisión por un canal. Este siguiente proceso conocido como **codificación de canal** agrega redundancia a los datos y realiza diversos “reacomodos” o dispersión de los datos para protegerlos de ráfagas de ruido o diversos factores que pueden afectar la decodificación óptima, como los rebotes de la señal (o efecto conocido como “multitrayectorias” -*multipath*).

⁶La cantidad dependerá de los parámetros de codificación y la tasa de bit que requiera cada uno de ellos.

2.4. Codificación de canal

La codificación de canal es la transformación intencional que se le hace a una señal que se quiere transmitir para mejorar el desempeño en las comunicaciones, contrarrestando los efectos que sufre la señal en el canal a consecuencia del ruido o interferencias.

Considerando el esquema de transmisión de una señal de televisión presentado al inicio del capítulo (figura 2.1), la codificación de canal es el proceso posterior a la compresión y multiplexaje de las señales de entrada (video, audio y datos), debido a este último, la entrada a este proceso es un sólo flujo de datos.

La codificación de canal puede llevarse a cabo en varios niveles, uno a nivel de selección de la forma de onda adecuada y otro a nivel del diseño de estructura de bits. Al seleccionar o diseñar la forma de onda adecuada se transforma la señal de tal manera que el proceso de detección (de dicha señal) sea lo menos sensible a los errores. Los códigos más populares de este tipo son los de señalización M -aria (FSK, PSK, QAM), ortogonales y codificación Trellis (TCM). El diseño de estructuras de bits (o secuencias estructuradas) se refiere a transformar las secuencias de bits en “mejores secuencias”, agregando bits de redundancia a los datos. Dichos bits se usan para detectar y corregir errores. Ambos niveles proveen a la señal codificada con propiedades como la distancia entre sus datos codificados. La distancia entre las señales codificadas da una idea de que tan diferentes son (por ejemplo para representar un 0 ó 1 binario). Mientras más diferentes sean, existe menor probabilidad de que el proceso de detección o decodificación se “equivoque”, cuando son alteradas y modificadas por ruido [64]. El nivel al que hará referencia esta sección, es de la codificación de estructuras de bits (en adelante *secuencias estructuradas*).

Uno de los procesos que intervienen en la codificación de canal de una señal digital que se transmitirá, es la codificación para detectar y/o corregir errores. Los errores en una señal se identifican por la alteración de un valor en una señal. Por ejemplo, si es una señal binaria y se transmite un bit igual a 0, se detecta un error si se recibe un bit igual a 1. En la figura 2.9 se presenta el diagrama básico entre un emisor y un receptor. El emisor transmite un mensaje x (en este caso como secuencias de bits), al transmitirse por un canal es alterado por el error e , haciendo que el receptor reciba el mensaje modificado y . En el ejemplo de la figura se transmite 100001 y se recibe 101001, secuencia alterada por un error.

En los esquemas de transmisión y recepción de señales se consideran principalmente dos tipos de control de error. El primero consiste en la detección del error y la solicitud de retransmisión de la señal; en este esquema no se considera la corrección del error. Requiere dos vías de comunicación entre transmisor y receptor. Los métodos usados son conocidos como *solicitud de repetición automática* (*automatic repeat request*) o *consulta de retransmisión automática* (*automatic retransmission query*)

Componentes de un sistema de televisión digital

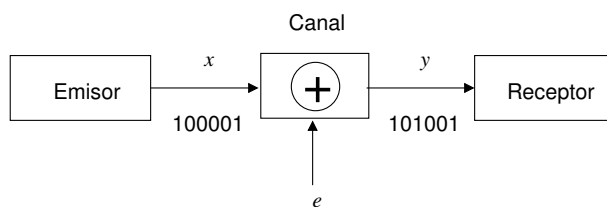


Figura 2.9: Diagrama básico de transmisión entre emisor y receptor en un canal ruidoso.

o simplemente ARQ. El segundo requiere sólo de una vía de comunicación, ya que además de detectar, corrige los errores. A éste se le denomina *corrección de errores directa* (FEC -*forward error correction*). Para un sistema de transmisión de televisión digital terrestre (y en general un sistema de transmisión de televisión digital) se requiere un tipo de control FEC, ya que no sería práctico el uso de un método ARQ, por el hecho de no aceptar retrasos en la decodificación.

Los procedimientos en la codificación de canal que son clasificados como secuencias estructuradas son denominados así, porque representan métodos de inserción de redundancia en los datos fuente. Dichas secuencias son divididas en tres categorías [64]:

1. códigos de bloque (códigos lineales)
2. códigos convolucionados
3. códigos turbo

Los sistemas de televisión digital terrestre sólo consideran los primeros dos. En ambos casos, se protegerán los datos de la señal de tal manera que sea posible detectar y corregir errores. La cantidad de errores que se pueden detectar y corregir están en función de las características del código usado. Los códigos turbo son una clase de códigos que últimamente han tenido mucho auge, ya que son muy eficientes en ambientes de baja potencia, anchos de banda limitado y ruido considerables⁷. Los códigos turbo no son considerados por los estándares en estudio, pero en un futuro es posible que se agreguen especificaciones para soportarlos.

Para este trabajo de investigación, es de particular interés, conocer las características de dichos códigos y entender de que manera ayudan a mejorar el desempeño (*performance*), de los sistemas de transmisión de televisión digital terrestre. Principalmente de la ganancia que se obtiene en términos de la proporción señal a ruido, para disminuir la probabilidad de errores en los datos decodificados, cuando se consideran diferentes parámetros de configuración en los códigos.

⁷<http://www.csee.wvu.edu/~mvalenti/turbo.html>

Antes de describir los métodos usados por los estándares de televisión digital terrestre en el proceso de codificación de canal, se presentará una breve introducción a los códigos de bloque.

2.4.1. Códigos de bloque

Los códigos de bloque o mejor dicho, los códigos lineales detectores-correctores de error, tienen un papel muy importante en las comunicaciones digitales. Con su uso es posible aminorar los efectos que sufre una señal digital al ser transmitida desde un emisor hasta una entidad receptora, a través de un canal. La base del diseño de este tipo de códigos se debe a la denominada teoría de códigos.

Los códigos de bloque son llamados así porque la entrada del código la forman un conjunto o bloque de símbolos provenientes de una fuente. Para tener una idea general de como se usan en un sistema de transmisión de señales digitales, considerar el diagrama de la figura 2.9.

Se puede notar en la figura 2.9 que el emisor envía una señal en forma de secuencia de bits $x = 100001$ y que el receptor recibe la secuencia $y = 101001$, alterada y modificada por el ruido del canal en el tercer bit (de izquierda a derecha). En la teoría de códigos es útil tratar a estas secuencias como vectores binarios. De esta forma, las secuencias x e y pueden ser vistas como vectores binarios de longitud 6.

Considerando entonces x e y como vectores, se puede determinar el vector de error e con la resta de x e y ; asumiendo que el ruido altera la secuencia en forma aditiva. La operación de suma en el campo de los números binarios se denota con el operador \oplus . La resta de vectores en este campo coincide con la suma para vectores de cualquier longitud. La suma en números binarios se obtiene sumando los elementos del vector módulo-2; por tanto, el vector $e = x \oplus y$. Para este ejemplo, $e = 001000$, donde se puede notar que el bit igual a 1, indica la posición donde se encuentra el error.

Bajo el esquema del diagrama de la figura 2.9, la forma de proteger a los bits del mensaje consiste en agregar datos redundantes a éste. Esperando que el receptor tenga más información para deducir el mensaje enviado. Es así como resulta necesario agregar dos elementos al diagrama, uno que agregue la redundancia y otro que deduzca y/o corrija errores por medio de esa redundancia. Esto se hace por medio de la codificación del mensaje, razón por la que se requiere de un codificador y un decodificador (figura 2.10) [36].

El codificador recibe el mensaje del emisor, agrega bits de redundancia y entrega una secuencia de bits codificada al canal. Cada codificador es diseñado para entregar estas secuencias y que en conjunto con el decodificador puedan detectar y/o corregir una cantidad limitada de errores.

Componentes de un sistema de televisión digital

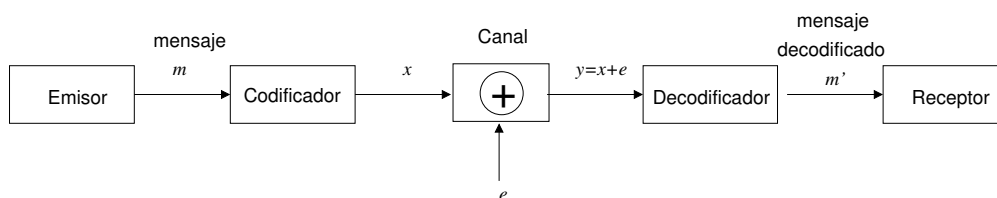


Figura 2.10: Diagrama básico de transmisión entre emisor y receptor en un canal ruidoso, con codificador y decodificador.

Para detectar y corregir esa cantidad limitada de errores, el codificador y decodificador tienen conocimiento a priori sobre cómo se construyen las secuencias codificadas a partir de un mensaje. De esta forma, un decodificador cuando recibe una entrada, debe determinar si la secuencia recibida forma parte del conjunto finito de todas aquellas secuencias válidas que un codificador puede generar. Si determina que forma parte, entonces por el conocimiento a priori, tiene forma de regenerar el mensaje que fue enviado. En caso de que no, el decodificador habrá detectado errores y de acuerdo a las características del esquema de codificación-decodificación, tratará de corregirlos.

La teoría de los códigos lineales es quien determina las reglas para construir este tipo de códigos. Cada código lineal tiene asociados 3 parámetros principalmente [49], estos son:

longitud n : se refiere al número de símbolos que se obtienen después de codificar un conjunto (bloque) de símbolos (o mensaje),

dimensión k : determina la cantidad de palabras de código que un código puede tener. Por ejemplo, si el código es binario, el número de palabras de código es igual a 2^k . También determina el número de símbolos de un mensaje que el codificador acepta como entrada,

distancia mínima d : se refiere a un término conocido como la distancia mínima de Hamming. La distancia de Hamming d_H , es el número de lugares donde 2 vectores difieren, esto es, al compararlos. Por ejemplo la distancia de Hamming entre el vector 10100 y 00101 es $d_H(10100, 00101) = 2$, ya que ellos difieren en el primer y último símbolo. El concepto de distancia mínima en un código, se usa para determinar que tan “diferentes” o alejados podrían estar las palabras de código.

De esta forma, un código C lineal se denota como $C[n, k, d]$ [49].

Con base en los parámetros del código, es posible obtener la cantidad de errores que puede corregir. Un código con distancia mínima d puede corregir $\lfloor \frac{1}{2}(d - 1) \rfloor$

errores. Si t es la cantidad de errores que un código puede corregir, entonces:

$$t = \left\lfloor \frac{d-1}{2} \right\rfloor \quad (2.1)$$

si d es par, entonces simultáneamente puede corregir $\frac{1}{2}(d-1)$ y detectar $d/2$ errores [49].

En los códigos lineales entonces, se usa un bloque de k símbolos de un mensaje m para generar palabras de código de n símbolos ($k \leq n$). El conjunto de palabras de código es lo que forma un código. Cada palabra de código es generada por una matriz denominada *matriz generadora del código*. Las palabras de código son transmitidas por un canal y en el receptor o decodificador, una *matriz de chequeo de paridad* puede determinar si la palabra recibida pertenece al código.

Los detalles de la generación, chequeo de paridad de las palabras de código y corrección de errores, quedan fuera del alcance de esta introducción, pero en [49, 64] se pueden consultar los detalles.

Existen diversos tipos de códigos detectores-correctores de error, tales como:

- Hamming
- de repetición
- Golay
- Cíclicos
- BCH
- Reed-Solomon
- Reed Muller

El código que es usado por los sistemas de transmisión de televisión digital, es conocido como Reed-Solomon.

2.4.1.1. Códigos Reed-Solomon

El código de Reed-Solomon es un código lineal y es una variante de los BCH, que a su vez se derivan de una clase llamados cíclicos [64]. Los códigos cíclicos son una subclase importante de los códigos lineales y pueden ser implantados de manera eficiente por registros de corrimiento [26, 64].

Los códigos Reed-Solomon son no binarios y codifican secuencias de símbolos de m bits, donde m es un entero positivo mayor a 2. Esto es, la secuencia de símbolos

no pueden ser números binarios, sino que deben ser símbolos que estén formados por 3 o más bits [64]. Son caracterizados por su longitud, dimensión y distancia mínima, pero para diferenciarlos de los binarios se usarán la letras mayúsculas N , K y D , respectivamente.

Este tipo de códigos son muy efectivos debido a que tienen la característica de tener la distancia mínima D más grande para cualquier código lineal con la misma longitud y dimensión [64]. Para códigos no binarios, la distancia de Hamming entre dos palabras de código, se define como el número de símbolos donde difieren. Por ejemplo, la distancia de Hamming de las palabras de código 24351473 y 24627473 es igual a 3. Para los códigos de Reed-Solomon, la distancia mínima D para los códigos Reed-Solomon está dada por [64]:

$$D = N - K + 1 \quad (2.2)$$

Considerando las ecuaciones 2.2 y 2.1 se tiene que la capacidad de corrección de errores t de un código Reed-Solomon es [64]:

$$t = \left\lfloor \frac{(N - K + 1) - 1}{2} \right\rfloor$$
$$t = \left\lfloor \frac{N - K}{2} \right\rfloor \quad (2.3)$$

donde $\lfloor x \rfloor$ significa el entero más grande menor o igual a x .

Una de las ventajas de los códigos no binarios se puede ver en el siguiente ejemplo. Considerar un código lineal binario con $n = 7$ y $k = 3$. El espacio vectorial entero contiene $2^7 = 128$ vectores, de los cuales sólo $2^3 = 8$ son vectores de código, es decir, sólo 1/16 del conjunto completo. Por otro lado, considerar ahora un código no binario con $N = 7$ y $K = 3$ donde cada símbolo está formado por $m = 3$ bits. El espacio de vectores en este caso está formado por $2^{Nm} = 2^{21} = 2097152$ vectores, de los cuales sólo $2^{mK} = 2^9 = 512$ son vectores de código. Esto es, 1/4016 del conjunto entero, son palabras de código. Esto indica que mientras una pequeña fracción del espacio entero de vectores, sean vectores de código, es posible tener una distancia mínima D grande [64] entre ellos.

Para describir el proceso de codificación y decodificación de este tipo de códigos, se requiere del conocimiento de la rama de las matemáticas conocida como *teoría de campos* y polinomios sobre *campos finitos* o *campos de Galois* (GF). Las palabras de código se obtienen a través de un polinomio generador $g(x)$, a diferencia de la matriz generadora de código que se usa para códigos binarios. Es por eso que la mayoría de las veces que se hace referencia a un código de Reed-Solomon de ciertos parámetros, se presenta también su polinomio generador $g(x)$. Por ejemplo, en la descripción de los estándares de televisión digital terrestre estudiados (ATSC [9], DVB-T [5]), los

parámetros de los códigos de Reed-Solomon usados en cada estándar, van acompañados de los polinomios generadores del código.

Los códigos de Reed-Solomon son efectivos contra ráfagas de errores [49, 64], ya que corrigen todos los bits de un símbolo; si alguno o todos ellos fueron modificados. Por ejemplo, si un bloque de símbolos codificados con un código Reed-Solomon con $N = 204$, $K = 188$ y $m = 8$ bits por símbolo (con capacidad de corrección $t = 8$ símbolos), fuera afectado por una ráfaga de ruido que modifica 57 bits consecutivos (afectando 8 bytes⁸), el decodificador se encargará de corregir los 8 símbolos afectados. Sin embargo, si los 57 bits no fueran consecutivos, probablemente afectarían a más de 8 símbolos, excediendo la capacidad de corrección del código e impidiendo corregir todos ellos.

En términos generales para cualquier tipo de código, es importante considerar el proceso de decodificación en un sistema de transmisión de señales digitales porque es ahí donde se comprueban las propiedades del código y donde se puede analizar el número de errores que se generan durante la transmisión. El número de errores da una idea de que tan eficiente puede ser el código bajo las características del canal donde se transmite la señal. Si el número de errores promedio provocados durante la transmisión, excede la capacidad de corrección del código, entonces debería analizarse el sistema global para solventar ese problema.

En los sistemas de comunicaciones digitales se puede considerar; a) aumentar la potencia de transmisión de la señal transmitida o b) considerar otro código que tenga más capacidad de corrección. Cualquiera de estas alternativas tiene consecuencias para el sistema. En el inciso *a*, es necesario determinar si es posible aumentar la potencia de transmisión, lo que implicaría hacer más gasto de energía y en muchos casos eso puede ser muy costoso. En el inciso *b* podría impactar con la tasa de datos que se transmite, mismo que en muchos casos no es permisible o con el aumento en el ancho de banda, imposible en muchos casos o podría ser costoso (tanto económico como tecnológicamente).

En los sistemas de transmisión de televisión digital terrestre, el inciso *b* mencionado en el párrafo anterior no se considera, ya que al contar con estándares, se fijó el tipo y las características del código Reed-Solomon usado. Al optar entonces por el inciso *a*, el aumento de potencia para disminuir el número de errores provocados en el canal, se convierte en un factor relevante, ya que repercute en el llamado desempeño (o *performance*) del sistema y puede considerarse como una desventaja significativa cuando se comparan dos o más estándares que implantan sistemas de transmisión de televisión digital terrestre. En las secciones 2.4.1.2 y 2.6 se presenta más información relacionada con los elementos que se requieren para analizar el desempeño de un código y del papel que juegan en el sistema de transmisión global.

⁸Considerando que 1 byte es igual a 8 bits.

A pesar de que uno los algoritmos más eficientes para decodificar códigos de Reed-Solomon denominado *el algoritmo de Berlekamp-Massey*, se haya propuesto a finales de 1960's, hoy en día se siguen fabricando dispositivos que lo usan para ese propósito. Tal es el caso de empresas líderes en el ramo de procesamiento de video digital, como 4i2i (www.4i2i.com) y Xilinx (www.xilinx.com) que ofrecen este y otros algoritmos en los denominados *ip cores*⁹, para implantarse en dispositivos FPGA (arreglo de compuertas programable, *Field Programmable Gate Array*) y ASIC (circuitos integrados para aplicaciones específicas, *Application Specific Integrated Circuit*), usados en diversos *set top boxes* en el mercado. También, existe otro algoritmo conocido como el “Algoritmo de Euclides”, el cual se caracteriza por su “fácil” implantación [4]. Junto con éstos, se usan otros algoritmos como el de “Chien y Fourney”, necesarios para la decodificación con Reed-Solomon. Estos son usados también en diversos *codecs* disponibles en el mercado [6, 75, 21, 24].

Para finalizar la sección introductoria a los códigos correctores de error, cabe mencionar que pueden analizarse para obtener la probabilidad de que se produzcan errores de decodificación. Este parámetro es usado para comparar el desempeño de los códigos con respecto a los errores que se pueden generar. También con este parámetro, es posible conocer la proporción entre la energía de la señal y el ruido que debe mantenerse para minimizar la cantidad de errores, después del proceso de decodificación. En la siguiente sección se presenta a que se refiere el desempeño en cuanto a la cantidad de errores, que se pueden presentar durante la transmisión, considerando la probabilidad de error.

2.4.1.2. Desempeño a errores de los códigos de bloque

El análisis del desempeño a errores de los códigos de bloque es útil para comparar las ventajas que se obtienen al usar un código u otro. Se compara básicamente la probabilidad de error de 1 bit con respecto a la probabilidad de error en el canal. Para esto se consideran los factores que definen al código (longitud, dimensión y distancia mínima).

También se puede medir el desempeño de un código en función de la cantidad de energía que se requiere para obtener una probabilidad de error por bit. Es decir, un código puede requerir una proporción señal-ruido (E_b/N_0) de 9 dB para lograr una probabilidad de error de 1 bit (P_B) de 10^{-6} , mientras que otro requiere de 10 dB. En este sentido habrá que evaluar que ambos códigos tengan características semejantes (longitud, dimensión y distancia mínima) para determinar que el primero es mejor que el segundo, en cuanto a la potencia de transmisión necesaria para obtener dicha proporción señal-ruido (figura 2.11). También es posible hacer el trazado de las curvas que producen las características de diversos códigos, esto con la finalidad

⁹Término usado para describir métodos o funciones que se pueden integrar en dispositivos FPGA o ASIC.

de evaluar otras alternativas en el diseño de un sistema de transmisión por ejemplo.

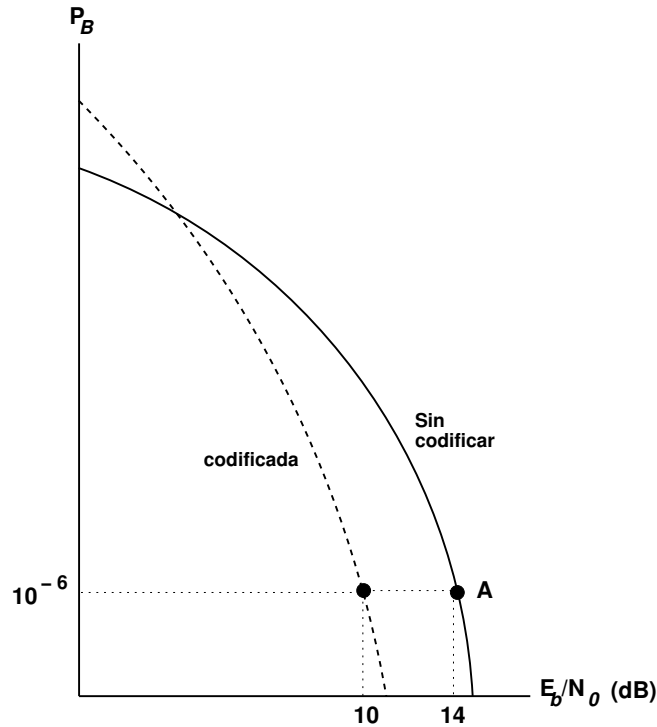


Figura 2.11: Curvas típicas de sistemas con y sin codificación.

El desempeño a errores de los códigos acompaña al análisis que se hace de un sistema de transmisión como el de televisión digital terrestre. Ya que es necesario considerarlo junto con el que se hace para determinar el proceso de detección de los símbolos transmitidos en el proceso de demodulación. Para continuar con la explicación, primero se presentan otros conceptos involucrados en la codificación y transmisión de la señal, continuando con este tema en la sección 2.6.

Para continuar con el tema de los procesos que intervienen en la codificación de canal de los sistemas de transmisión de televisión digital terrestre evaluados, se presenta a continuación una breve introducción de lo que hacen y aportan al sistema global.

2.4.2. Codificación en televisión digital terrestre

El proceso de codificación de canal en los sistemas de televisión digital terrestre está formado por varias etapas. Consiste de las etapas de dispersión de energía, inserción de bytes de redundancia (codificación externa, usando códigos de bloque), intercalado de bits y una etapa final de codificación convolucional (codificación interna), que añade un poco más de redundancia. En dichas etapas, destacan los codificadores

internos y externos, denominados así por ser considerados desde la perspectiva de un **canal virtual**¹⁰. La figura 2.12 muestra el diagrama a bloques del proceso de codificación de canal [15].

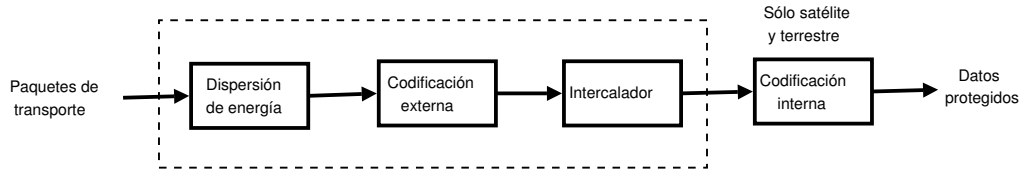


Figura 2.12: Diagrama a bloques del proceso de codificación de canal.

Los métodos para corregir errores se dividen en codificadores de errores por bloque y convolucionales. En el caso de los códigos de bloque, el flujo de datos de entrada son divididos en bloques de longitud fija n , donde n denota el número de símbolos. Cada símbolo puede ser de 1 o más bits.

La redundancia calculada en los códigos de bloque es agregada a las m posiciones de información en las k posiciones de corrección, de esta forma se transmite un bloque de $n = m + k$. La tasa de codificación indica la proporción entre la información m y los n símbolos transmitidos.

Los codificadores convolucionales difieren de los de bloque por usar siempre un registro de corrimiento binario. En este caso no existe división del flujo de entrada de los datos, sino que la información es distribuida sobre varias salidas de datos. Esto es porque los códigos convolucionales están destinados a corregir errores en bits individuales. En este caso, se define la tasa de codificación como la proporción entre el número de bits de entrada y el número de bits de salida, generados en el mismo paso. La figura 2.13 muestra una comparación entre los códigos de bloque y los códigos convolucionales.

La etapa de dispersión de energía, no forma parte del proceso de codificación de canal estrictamente. Pero los algoritmos de codificación de ATSC y DVB-T la incluyen.

2.4.3. Dispersión de energía

Se le llama proceso de dispersión de energía, aquel que reduce la posibilidad que bits consecutivos sean del mismo valor, lo cual puede provocar un efecto similar al de corriente directa (DC) en la señal. Cuando esta secuencia de bits es trasladada al dominio de la frecuencia, la energía se concentra en una frecuencia particular; la

¹⁰Un canal virtual es creado entre la entrada de la etapa protectora contra errores desde la etapa de transmisión, hasta la salida de los datos de la etapa de corrección de errores, del lado del decodificador.

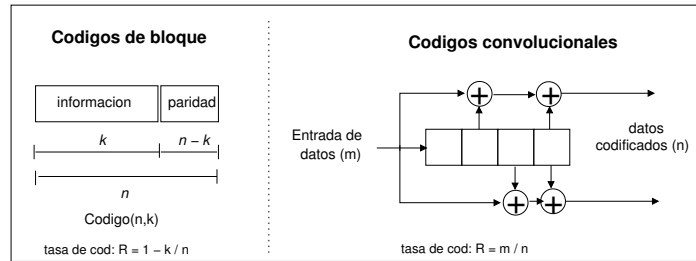


Figura 2.13: Diagrama de comparación entre los códigos de bloque y convolucionales.

presencia de tales concentraciones puede producir interferencias con mayor probabilidad, que aquellas que son distribuidas a lo largo del espectro.

Este proceso se lleva a cabo, posterior a la codificación de fuente. En términos generales, los valores de los bits del flujo (proveniente del codificador MPEG) son modificados de manera pseudoaleatoria. Esto se obtiene usando registros de corrimientos y compuertas O exclusivas (XOR's). Regularmente, los datos provenientes de la codificación de fuente se procesan junto con unos valores fijos iniciales (o secuencia de inicialización). Estos valores junto con los datos del flujo, generan una secuencia de bits pseudoaleatoria a través de un polinomio generador.

Los únicos datos que no son modificados son los de sincronía, aunque en ocasiones, se invierten los valores del byte (de sincronía), es decir, se obtiene el complemento del byte. Esto sirve para proporcionar una señal al decodificador. La característica de la operación XOR¹¹ hace que en el decodificador, los datos regresen a su valor original, donde posteriormente se decodificarán para obtener los datos auxiliares, audio y video.

Ya que los bits en una secuencia pseudoaleatoria están no correlacionados, cuando se aplica este proceso a una señal con ruido aditivo blanco Gaussiano, la densidad espectral de potencia del ruido permanece plana. Lo cual hace que cualquier señal que pueda considerarse no correlacionada, también tenga un espectro similar, característica que es conveniente en el proceso de transmisión. Esto debido a que dicha señal es menos probable que interfiera con otras. Para el caso de la televisión, hace que la señal DTV no interfiera por ejemplo, con la señal NTSC.

La siguiente etapa se encarga de realizar la protección de los bits por medio del código Reed-Solomon. Es común que la literatura refiere a esa etapa de la codificación como "codificación externa".

¹¹ $X \oplus Y \oplus Y = X$, donde el símbolo \oplus se refiere a la operación O exclusiva.

2.4.4. Codificación externa

La primer etapa del proceso de corrección de errores es llamada codificación externa (*outer coding*)¹² y es llevada a cabo usando la códigos de Reed-Solomon. En la sección 2.4.1.1 se mencionaron las características de éstos.

En los sistemas de televisión digital terrestre, estos códigos son concatenados con un proceso que incrementa la eficiencia y que protege a los datos aún más de ráfagas de ruido. Este proceso es conocido como “entrelazado” (*interleaving*) y tiene como función propagar de manera temporal los errores. Esto quiere decir que si una ráfaga de ruido llegara a afectar un bloque codificado con Reed-Solomon, en el proceso de decodificación los errores no serían en bloques o bytes consecutivos del flujo original. De esta forma, el proceso de corrección de errores de Reed-Solomon se vuelve más eficiente. A continuación se presenta una breve descripción de este proceso.

2.4.4.1. Entrelazado Externo

Este proceso hace más eficiente la codificación Reed-Solomon, ya que distribuye o propaga ráfagas de errores introducidos en el canal.

El proceso del entrelazador “revuelve” (mueve de su lugar original) los datos codificados en el flujo (*stream*), mientras que en el decodificador los desentrelaza o “reacomoda” a su posición original. La operación realizada separa los bits consecutivos de la secuencia antes de ser transmitidos, con la finalidad de contrarrestar los efectos de las ráfagas de ruido que ocurren en el canal [54].

La estructura de un simple entrelazador para un código de bloque puede ser visto como un arreglo rectangular de I renglones por n columnas. Cada elemento del arreglo almacenará un “símbolo” (no confundir con los símbolos de la modulación). Comúnmente el tamaño de un renglón es la longitud del bloque del código usado, de tal manera que un renglón almacena una palabra de código (*codeword*). La dimensión I del arreglo es llamado el “factor de entrelazado”. Puede observarse que una ráfaga de error afectando $l \leq I$ símbolos produce al menos un error en l palabras de código consecutivas. Es por eso que la selección del valor I depende de las longitudes de las ráfagas esperadas [54].

Aunque las ráfagas hayan sido propagadas entre palabras de código sucesivas, es importante tener en cuenta que perturbaciones periódicas pueden producir varios errores en una sólo palabra. Esto en el caso de que un canal produzca errores periódicos en la transmisión, a una tasa múltiplo de I .

A pesar de que el uso del entrelazador mejora en gran medida el desempeño en canales reales, se deben considerar principalmente dos puntos importantes. El

¹²Nombrada así en la mayoría de las referencias consultadas en la televisión digital.

primero es la sincronización del entrelazador-desentrelazador y el segundo es el retraso provocado por el uso de entrelazadores “grandes”. Por ejemplo, en una aplicación de comunicación por voz, un retraso muy prolongado es inaceptable.

El proceso de entrelazado puede ser usado también por códigos convolucionales. Uno de los más usados es aquel propuesto por Forney, donde los datos son almacenados en una estructura tipo arreglo, pero de forma triangular (figura 2.14). En la figura 2.14 se presentan los bloques del arreglo que en realidad son registros de corrimiento, donde cada bloque almacena sólo un bit. Los datos codificados alimentan al entrelazador de bit en bit a la vez. En la figura 2.14 se puede observar que los bits adyacentes de los datos codificados son separados por al menos 8 bits. Una de las características importantes de los entrelazadores convolucionales son que también pueden ser usados por códigos de bloque [54].

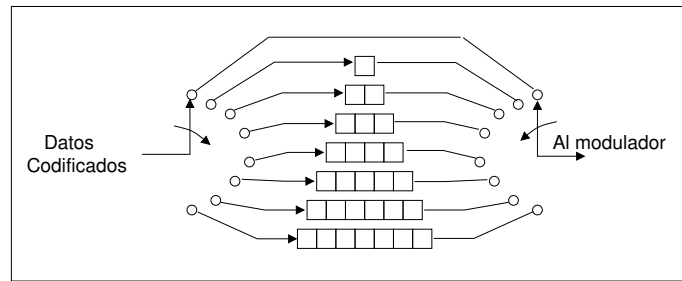


Figura 2.14: Estructura de un entrelazador convolucional.

El circuito mostrado en la figura 2.14 puede servir también como desentrelazador, simplemente haciendo que los conmutadores roten en el sentido inverso [54].

El proceso de codificación de canal continua con otra capa de codificación a nivel de flujo, donde se usan los codificadores convolucionales. A continuación se presentan las características generales de este tipo de codificación.

2.4.5. Codificación interna

La codificación interna es una codificación convolucional, donde el término interno es especificado desde el punto de vista de un decodificador¹³. Como se pudo notar, la codificación externa pertenece al conjunto de los códigos de bloque, transforma un bloque k de datos en una palabra de código de n símbolos. La codificación convolucional en cambio, opera a nivel de bit, es decir, conforme van llegando los bits de un flujo de datos, estos van siendo codificados “al vuelo”. En este caso, la

¹³En el camino a la decodificación para obtener los datos originales codificados, se considera la demodulación una de las fases que se encuentra a la mitad del proceso de transmisión-recepción, la codificación y decodificación convolucional, son los más internos viéndolos desde la mitad hacia los extremos.

Componentes de un sistema de televisión digital

memoria utilizada para esta codificación es relativamente pequeña y de bajo costo, ya que solamente hay que almacenar un número reducido de bits [51].

Si la codificación de árbol es lineal, invariante con el tiempo y tiene una longitud de salida finita, entonces es referida como un código convolucional. Este tipo de códigos son descritos por tres parámetros n , k y K . Donde k es la cantidad de bits a la entrada del codificador, n son los bits de salida, producidos por las $k \cdot K$ etapas del código. La tasa de codificación es $R = k/n$ y tiene un significado equivalente a los códigos de bloque [64]. El parámetro K es denominado “longitud de restricción”, representa el número de etapas en el registro de corrimiento (usados regularmente en este tipo de códigos)¹⁴. Esto porque el codificador requiere memoria, ya que los bits de salida no son directamente relacionados con los bits de entrada, sino están en función de las $K - 1$ entradas [64].

El codificador de un código convolucional puede representarse por un diagrama de las conexiones entre las etapas del registro de corrimiento y sumadores módulo-2, por una máquina de estados finita, por un diagrama de árbol o por un diagrama Trellis [64].

Un ejemplo del diagrama de conexiones con los sumadores módulo-2, se muestra en la figura 2.15. Para el ejemplo, $n = 2$, $k = 1$ y $K = 6$. Cada bloque o rectángulo en la figura se usa para almacenar k bits en un tiempo t . En el tiempo $t + 1$ los k bits serán recorridos al siguiente bloque a su derecha.

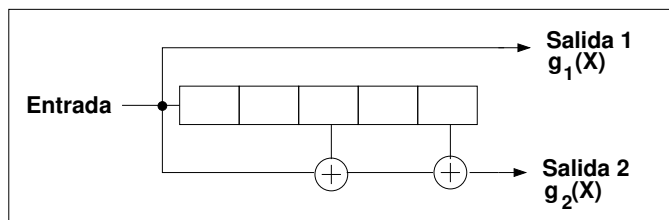


Figura 2.15: Representación de un codificador convolucional.

Con base en el diagrama mostrado en la figura 2.15, se pueden usar polinomios para describir las salidas del codificador. Estos son denominados polinomios generadores [64]. Cada polinomio es de grado $K - 1$ o menor y son formados considerando la conexión entre la etapa del registro y el sumador. Si hay conexión, el valor del polinomio en esa posición es 1, en otro caso es 0. Por ejemplo, las salidas del codificador

¹⁴Algunos autores describen el valor K como el número de *taps* del registro de corrimiento + 1, mientras que otros es igual al número de *taps*. La diferencia entre uno y otro radica en como manejan la suma del bit que ingresa al codificador. Si el bit se suma antes de entrar al registro de corrimiento, K es igual al número de *taps* + 1. Ver [71] y [64].

de la figura 2.15 son representadas por los siguientes polinomios:

$$\begin{aligned} g_1(X) &= 1 \\ g_2(X) &= 1 + X^3 + X^5 \end{aligned}$$

Se puede notar como el polinomio $g_1(X)$ especifica que el primer bit de la palabra de código es una copia del bit a codificar. En cambio el polinomio $g_2(X)$ especifica que el otro bit de la palabra de código es igual al bit a codificar más la suma módulo 2 de los bits almacenados previamente y que se encuentran en las posiciones 3 y 5 (de izq. a der. empezando por 1) del registro.. Esto también puede mostrarse como si existieran dos flujos de salida para este codificador.

La representación de un codificador por medio de un diagrama *Trellis*, se hace por medio de una gráfica, referida como “enrejado” (*trellis*) (figura 2.16). En esta gráfica se muestra un conjunto de nodos que representan estados del codificador. Cada estado dependerá del estado inicial y del valor recibido a codificar. Las rutas de izquierda a derecha del enrejado especifican las alternativas de las palabras de código.

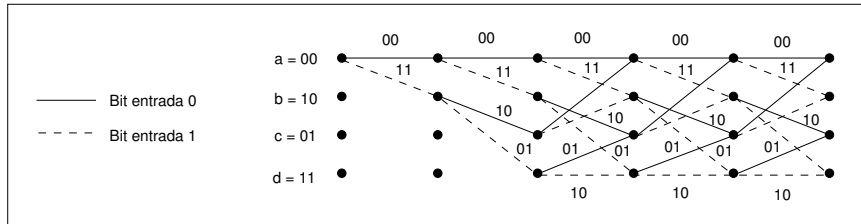


Figura 2.16: Gráfica de enrejado (Trellis).

La codificación regularmente comienza en el estado $a = 00$ y va cambiando de estado, conforme los valores de los bits de entrada. En la figura 2.16 se observa que la ruta se puede ir trazando si se codifica un 0 (línea continua) o un 1 (línea punteada); así como sus cambios de estado.

La decodificación de los códigos convolucionales parte de la premisa (como los códigos de bloque) de encontrar la distancia mínima entre el flujo de datos recibido y el que originalmente se codificó. Esto trae como consecuencia el cálculo de todas las posibles secuencias (o palabras de código) de longitud n . De esta forma, cuando llegue una palabra de código al decodificador se tendrá que comparar ésta con cada una de las del enrejado. Así la palabra de código del enrejado que más se parezca con la que llega al decodificador, es la que se escogerá como palabra decodificada. Si es exactamente la misma, quiere decir que no hubo errores, pero si es muy parecida a la del enrejado, querrá decir que la palabra de código que llegó no pertenece al conjunto de las enrejado y por el hecho de escoger la más parecida se habrá entonces eliminado los posibles errores. Esta búsqueda es muy intensa computacionalmente, es por eso que se tienen que considerar algoritmos más eficientes y que logran el

mismo resultado, como el desarrollado por Viterbi.

El algoritmo de Viterbi [72] usa un procedimiento de comparación de palabras similares. Este algoritmo sólo examina las rutas posibles y elige las mejores basándose en condiciones probabilísticas. Usa el diagrama *trellis* para localizar aquella ruta con mayor similitud a la recibida, eliminando así aquellas que no lo son. La medida de similitud puede calcularse obteniendo la máxima similitud (*likelihood*) o por la distancia mínima de Hamming [64].

Los puntos más importantes del algoritmo de Viterbi son:

- avanza en el *trellis* acumulando las distancias de Hamming que tienen conexión con el enrejado
- cuando hay más de un camino de llegada a un solo nodo, se descarta el camino con la métrica más alta
- cuando dos caminos compiten por un nodo y traen la misma métrica, se escoge al azar alguno de los dos
- cuando se termina la secuencia se insertan $5k$ veces ceros al final para que el algoritmo converga
- una vez que el algoritmo converga se comparan las métricas acumuladas en un instante t_i para saber cual es la más pequeña y que será la ganadora.

Dadas las ventajas que se tienen al usar el algoritmo de Viterbi, este también es usado por otro tipo de codificadores como los llamados “turbo”. Estos trabajan regularmente con decisión suave y se han consolidado como otra alternativa de los códigos convolucionales.

En lo que a la evaluación de la codificación convolucional se refiere, el análisis del desempeño o *performance* considerando diferentes tasas de codificación, depende del tipo de modulación y parámetros del canal empleado para éste; por ejemplo, la probabilidad de símbolo en error del canal en ambientes de ruido Gaussiano. Como ejemplo, en [64] se presenta una expresión que permite el cálculo del límite de la probabilidad de bit de error, al considerar un tipo de modulación BPSK en un canal AWGN.

Posterior a la codificación convolucional, algunos estándares de DTV agregan una etapa más de protección al flujo de datos a transmitir. Tal es el caso del estándar DVB-T, que contiene una etapa de “entrelazado interno”. Donde “reorganiza” el flujo de bits para modular a distintas portadoras. En las secciones siguientes se explicará porque se lleva a cabo esta etapa.

Ya que el “entrelazador interno” es usado sólo por uno de los estándares estudiados, su explicación y características será mencionado en la sección correspondiente, cuando se expliquen las características del DVB-T.

La codificación de canal termina en esta etapa, posteriormente los datos del flujo serán adecuados para modular a o las portadoras para su transmisión. A continuación se presenta una introducción a la modulación de señales.

2.5. Modulación

Modulación es el proceso de comunicar la información de una señal fuente a través de una portadora con frecuencia f_c , usando perturbaciones en amplitud, frecuencia o en fase.

En los sistemas de televisión digital terrestre, el modulador convierte la señal MPEG-2 (protegida contra errores en la codificación de canal) en un formato apropiado para transmitirlo por el aire.

La señal proveniente de una fuente modula una señal portadora bajo un esquema apropiado. El esquema dependerá de las características del sistema global. En comunicaciones analógica, la modulación puede realizarse considerando la amplitud, frecuencia o fase de la señal portadora. Un esquema típico se muestra en la figura 2.17.

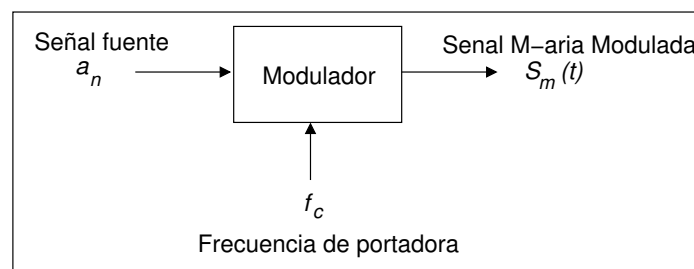


Figura 2.17: Esquema de un modulador.

En la transmisión de televisión digital terrestre la señal portadora es sinusoidal y las características ajustadas son amplitud y fase. Esto también se conoce como modulación de banda de paso intermedia o de radio frecuencia (IF o RF). La razón principal para emplear la modulación IF es transformar señales codificadas bajo MPEG-2 en señales con un espectro más deseable. Esto permite:

1. que las señales puedan ser ajustadas a las características de los diferentes medios

Componentes de un sistema de televisión digital

2. que las señales se combinen usando un multiplexado por división de frecuencias (FDM) y subsecuentemente transmitidas usando un medio físico común de transmisión, por ejemplo, *transponder* de cable o satelitales
3. el espectro de radio pueda ser regulado, de esta forma las interferencias entre sistemas diferentes pueda ser mantenido en niveles aceptables.

A continuación se presenta una introducción a las técnicas de modulación digital usadas por los estándares de televisión digital terrestre.

2.5.1. Modulación digital

La modulación digital proporciona ventajas en relación a la analógica al ejecutar este proceso en una señal. La modulación al ser digital, proporciona más capacidad de información, compatibilidad con servicios digitales de datos, alta seguridad en la reconstrucción de los datos, que conlleva a una mejor calidad en las comunicaciones. En un sistema de comunicaciones, hay que enfrentar siempre los siguientes aspectos:

- disponibilidad del ancho de banda
- nivel de potencia permisible
- nivel de tolerancia al ruido

La modulación digital ha ayudado a sobrellevar la necesidad de compartir el espectro de RF con una basta cantidad de servicios existentes. Los esquemas de modulación digital permiten manejar grandes cantidades de información que los esquemas de modulación analógicos.

A pesar de las ventajas, existe un compromiso fuerte entre la simplicidad del *hardware* para modular y el ancho de banda que usaría. Se puede usar *hardware* simple en transmisores y receptores para comunicar información. Sin embargo, el ancho de banda usado es bastante grande. Alternativamente, usando *hardware* más complejo en transmisores y receptores, permite usar menos ancho de banda para transportar la misma información, pero es difícil diseñarlo, probarlo y construirlo. Este compromiso siempre existe ya sea en comunicación por aire o alambrada, analógica o digital.

Con el paso de los años la modulación ha evolucionado de las técnicas de AM, FM y PM (modulación en amplitud, frecuencia y fase, respectivamente) a nuevas técnicas como:

- QPSK - Quadrature Phase Shift Keying
- FSK - Frequency Shift Keying
- QAM - Quadrature Amplitud Modulation

Al transmitir una señal por el aire es necesario realizar tres pasos fundamentales:

1. generar la portadora en el transmisor
2. la portadora es modulada con la información a ser transmitida. Cualquier cambio detectable y confiable en las características de la señal (amplitud, frecuencia o fase) puede llevar información
3. en el receptor, las modificaciones o cambios son detectados y demodulados

Amplitud y fase pueden ser moduladas simultánea y separadamente, pero es difícil de generar y de detectar. En lugar de esto, la señal es separada en componentes independientes I (*Inphase*) y Q (*Quadrature*). Estas componentes son ortogonales y no interfieren una con otra.

Las componentes I y Q son una representación rectangular del diagrama polar. En un diagrama polar, el eje I se alinea con la referencia de fase en 0 grados y el eje Q es rotado 90 grados. La proyección de los vectores de la señal en el eje I y Q forman las componentes en cada uno de los ejes (figura 2.18).

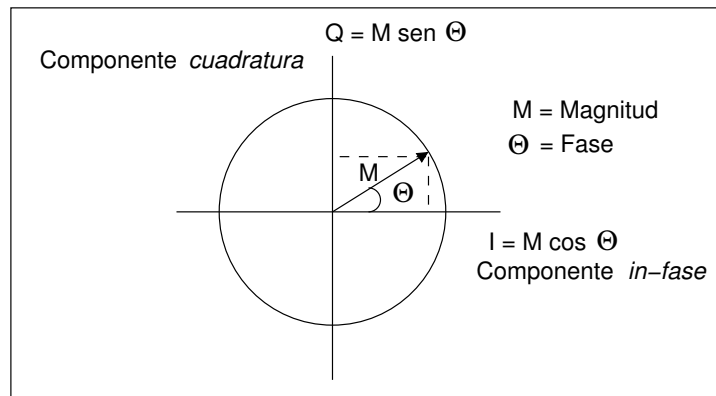


Figura 2.18: Formato I-Q.

Los diagramas I/Q son usados frecuentemente porque permiten observar la manera en que las señales digitales son usadas en un modulador I/Q . En el transmisor, las señales I/Q son mezcladas con un oscilador local. Para generar las señales en cuadratura se realiza un corrimiento en la fase de 90 grados a una de las rutas del oscilador. De esta forma se producen dos señales totalmente independientes. Cuando se combinan, son sumadas a una señal compuesta de salida. Estas se pueden mandar y recibir con circuitos simples, lo que simplifica el diseño de los receptores digitales. Cuando una de estas señales llega a un receptor, la señal es mezclada con un oscilador local en la frecuencia de la portadora de dos maneras. Una es considerando una fase cero arbitraria y la otra con un corrimiento de 90 grados. De esta forma se obtienen las señales I y Q .

Componentes de un sistema de televisión digital

La modulación digital es más sencilla cuando se usan moduladores I/Q, ya que los datos son mapeados en un número finito de puntos discretos en el plano I/Q. Estos se conocen como puntos de una constelación. Cuando la señal se mueve de un punto a otro, se produce una modulación de amplitud y fase.

Una característica importante de la modulación digital es que transmite símbolos a partir de un conjunto de bits del flujo de entrada. La cantidad de bits por símbolo dependerá de la técnica de modulación. A esto se le conoce como modulación M -aria, donde M es la cantidad de símbolos que maneja la técnica de modulación. En este caso el número de bits por símbolo es $b = \log_2 M$.

Se dice que la modulación M -aria proporciona una eficiencia espectral de:

$$\eta = \frac{\log_2 M}{T_0 B} \text{ bit/symb/Hz} \quad (2.4)$$

para símbolos equiprobables y estadísticamente independientes, donde T_0 define el periodo del símbolo y B representa el ancho de banda de la señal modulada.

A continuación se presentan algunos tipos de modulación digital comúnmente usados en transmisiones de televisión digital.

2.5.2. Modulación PSK

La modulación PSK (*Phase Shift Keying*) es una de las más usadas en la transmisión de televisión satelital y puede usarse para transmisión terrestre. La forma más simple de este tipo de modulación digital es conocida como BPSK *Bi-phase Shift Keying*, donde la fase de una portadora de amplitud constante se mueve entre cero y 180 grados. En un diagrama I/Q, sólo el estado I tiene dos valores diferentes. Por lo que sólo se puede mandar un valor binario (uno o cero). La tasa de símbolos es de un bit por símbolo.

Un tipo más común de modulación de fase es QPSK *Quadrature Phase Shift Keying*. Este es usado en servicios de telefonía celular, redes inalámbricas, DVB-S y DVB-T, entre otros. La cuadratura significa que los cambios de fase de la señal están separados 90 grados. Por conveniencia, el primer punto de la constelación se ubica en los 45 grados, por lo que los demás se encontrarán en 135, 225 y 315 grados. De esta forma sólo se requieren 2 valores para I y Q, obteniendo así una tasa de dos bits por símbolo. Se puede notar que en relación al ancho de banda este método es el doble de eficiente que el BPSK (cuando T_0 y B son los mismos en la ecuación 2.4). Los diagramas de constelación para BPSK y QPSK se muestran en la figura 2.19.

Cabe mencionar que los diagramas de constelación mostrados no pretenden indicar que se mandan los símbolos I y Q en portadoras diferentes, sino que sólo es para facilitar la comprensión del método. Lo que en realidad se realiza es la suma de

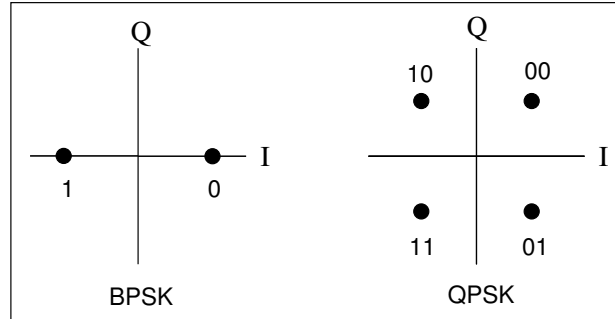


Figura 2.19: Diagramas de constelación para BPSK y QPSK.

las señales moduladas para I y Q, para generar sólo una señal modulada. De esta forma la señal al ser demodulada tiene que separarse en las componentes I y Q para obtener de nuevo, los bits que formaron el símbolo. En la figura 2.20 se muestra el diagrama a bloques de un modulador QPSK.

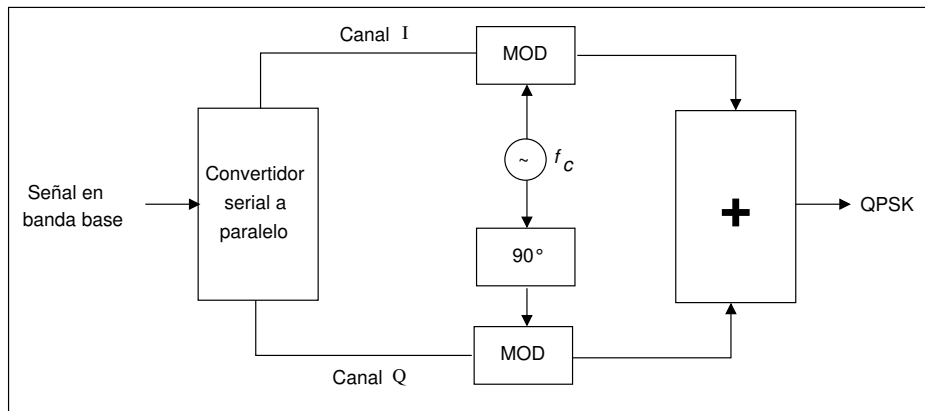


Figura 2.20: Modulador QPSK.

Cuando se “reconstruye” una señal modulada en el receptor y se genera el diagrama de constelación, se observan puntos dispersos alrededor del valor teórico, es decir, la posición no corresponderá exactamente a la que se ubicó antes de la transmisión. Esto debido a que factores como el ruido tienden a degradar la señal, provocando los cambios de posición en el diagrama. La ventaja de la modulación digital es que los puntos cercanos a las posiciones teóricas dentro del diagrama, son considerados como tales. Ayudando así a la reconstrucción “perfecta” de la señal.

El diagrama de constelación permite mostrar rápidamente cuantos bits forman un símbolo. Es así que si un diagrama de constelación tiene más puntos que otros, haría más eficiente el ancho de banda, ya que se transmitirían más bits por símbolos

en el mismo ancho de banda. A continuación se presenta un esquema que permite transportar más bits por símbolo.

2.5.3. Modulación QAM

QAM (*Quadrature Amplitud Modulation*), es la combinación de las técnicas de ASK (*Amplitud Shift Keying*) y de PSK. Este método es usado en radio digital por microonda, en DVB-C y DVB-T y en módems. El QAM tiene varias modalidades, una de ellas es el 16 QAM, que permite tener 16 estados diferentes. En este se requieren 4 valores para I y cuatro para Q. De esta forma la tasa es de cuatro bits por símbolo. Este tipo de modulación es más eficiente, espectralmente hablando, que el BPSK, QPSK y el 8 PSK (tasa de 3 bits por símbolo). En la figura 2.21 se muestra el diagrama de constelación del 16 QAM.

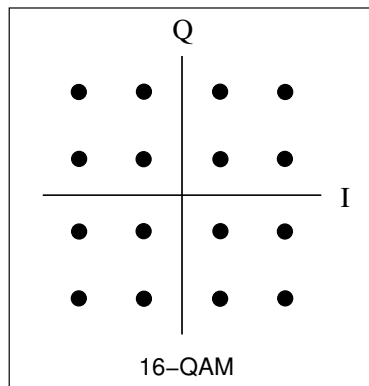


Figura 2.21: Diagrama de constelación del 16 QAM.

Otra modalidad es el 64 QAM, de 64 estados diferentes. La tasa de símbolos para este modo es de 6 bits por símbolo. El límite práctico es el 256 QAM, aunque teóricamente nada impide que se pueda tener 512 o 1024 QAM. El problema al incrementar la cantidad es que los puntos en la constelación quedan muy juntos y en presencia de ruido, los símbolos pueden demodularse erróneamente.

Cada vez que se incremente la tasa de símbolos es necesario incrementar la potencia de transmisión, de esta forma mientras la tasa sea más alta será más eficiente espectralmente, pero será más costosa en cuanto a potencia se refiere.

A manera de resumen, la tabla 2.3 presenta la eficiencia η (ecuación 2.4) considerando que la duración del símbolo T_0 y el ancho de banda B , es el mismo para cada método de modulación.

Además de las técnicas de modulación mencionadas, existen otras que pueden considerarse tanto técnicas de modulación como de canalización (*multiplexing*). Una

Modulación	η [bit/s/Hz]
BPSK	1
QPSK	2
16-QAM	4
64-QAM	6

Tabla 2.3: Eficiencia del ancho de banda con respecto al formato de modulación.

de ellas es conocida como OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y puede ser combinada con otras técnicas de modulación como QPSK y QAM. En la siguiente sección se mencionan sus características principales.

2.5.4. OFDM

Esta técnica se considera tanto de modulación como de canalización (*multiplexing*) [47], además de ser una técnica de transmisión de multiportadoras en paralelo. La canalización regularmente se refiere al manejo de aquellas señales producidas por diferentes fuentes que comparten el espectro del canal.

OFDM es un caso especial de la técnica de canalización conocida como FDM (*Frequency Data Multiplexing*), consiste en dividir el ancho de banda disponible para el envío de señales independientes.

Cuando la técnica OFDM es usada en conjunto con una codificación de canal, es conocida como **COFDM** (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y regularmente tienen las siguientes propiedades:

- resistencia al efecto de multitrayectorias (*multipath*)
- resistencia a pequeños cambios en la distorsión de fase y atenuación de la señal (*fading*)
- permite el uso de redes de frecuencia simple (*single frequency networks*)
- hace posible la transmisión de una señal a receptores móviles

2.5.4.1. Principios

El principio del OFDM consiste en paralelizar un flujo de bits y que a su vez, modulen a un conjunto de sub-portadoras dentro de un canal. Lo importante en esta técnica radica en que las portadoras deben ser ortogonales entre sí, evitando la interferencia entre ellas. Al no interferir, permite sumarlas en una sola portadora y transmitirla por el canal. El receptor entonces puede descomponer la señal recibida para extraer cada una de las subportadoras y posteriormente los bits transmitidos.

Componentes de un sistema de televisión digital

La técnica enfrenta las imperfecciones que ocurren en la propagación de un canal de comunicación, ya sea alámbrico o inalámbrico. En ellos, regularmente intervienen factores que hacen que una señal se degrade debido a atenuación o distorsiones de fase.

Para superar el problema, se propuso extender los datos a transmitir en un gran número de sub-bandas de frecuencia relativamente cercanas. De esta manera, si parte de los datos son perdidos en el proceso de transmisión, la protección de los datos antes de este proceso haría que se pudieran reconstruir.

Por ejemplo, se puede repartir un flujo de datos de 1 Mbps en 500 flujos paralelos, donde cada uno tendrá una tasa de 2 kilobits por segundo (2 kb/s). Cada uno de estos flujos modularán a 500 portadoras espaciadas cada 2 kHz. De esta forma, el ancho de banda ocupado es de 1 MHz.

Los números seleccionados tanto para el espaciamiento entre portadoras como para la tasa de bits tienen que satisfacer el principio de ortogonalidad. Este es un concepto matemático que indica que la consideración de las portadoras debe ser tal que cada una de ellas pueda ser demodulada sin interferencia de cualquiera de las otras. Con esto se evita el problema de la interferencia entre símbolos (*Inter Symbol Interference*- ISI).

Considerando el ejemplo anterior (flujo de datos de 1 Mbps), si se usa 16 QAM para modular en cada portadora, se transmitirán 250 000 símbolos por segundo, dado que para los 16 estados se requieren 4 bits por símbolo. Si ahora se consideran 1000 portadoras, la tasa de símbolo por portadora será de 250 símbolos por segundo y para que se preserve el principio de ortogonalidad el espacio entre portadoras deberá ser 250 Hz. Así, el ancho de banda requerido es ahora 250 KHz. Teniendo de esta manera, una relación simple entre la tasa de bits, los bits por símbolo, la tasa de símbolos, el espaciamiento entre portadoras y el ancho de banda requerido para el canal [16].

2.5.4.2. Generación del OFDM

Antes de generar la portadora OFDM conviene realizar un proceso de entrelazado de los bits dentro de un flujo. Regularmente los estándares de transmisión de televisión digital consideran etapas de entrelazado y protección de bits antes de generar la señal OFDM, incluso usan procesos de mapeos de símbolos como el QPSK y QAM.

Para la generación de la señal se realiza un particionamiento del canal de transmisión tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, para organizar un conjunto pequeño de sub-bandas de frecuencia y un conjunto de pequeños segmentos de tiempo contiguos. Esto debido a que un canal de transmisión tiene características estables en un periodo corto de tiempo.

Dentro de cada segmento de tiempo, conocido como símbolo OFDM, se genera una portadora dentro de cada sub-banda de frecuencia. Para evitar interferencia entre portadoras, el espaciamiento entre ellas es igual al inverso de la duración del símbolo, de esta forma las portadoras son ortogonales.

Para generar la señal OFDM, regularmente se usan ondas de senos y cosenos como portadoras, ya que esas forma de onda y sus armónicas, son ortogonales entre sí.

En el caso más simple (el más impráctico), un flujo de bits es separado para modular a varias portadoras. Por ejemplo, si se usaran 4 portadoras, se debería usar un convertidor serial a paralelo que proporcione ahora 4 flujos, donde cada uno de ellos modulará a una portadora. Posterior a esto la señales moduladas serán sumadas para formar una sola señal OFDM. Esta idea es presentada en la figura 2.22, donde la función $s(t)$ es la señal OFDM.

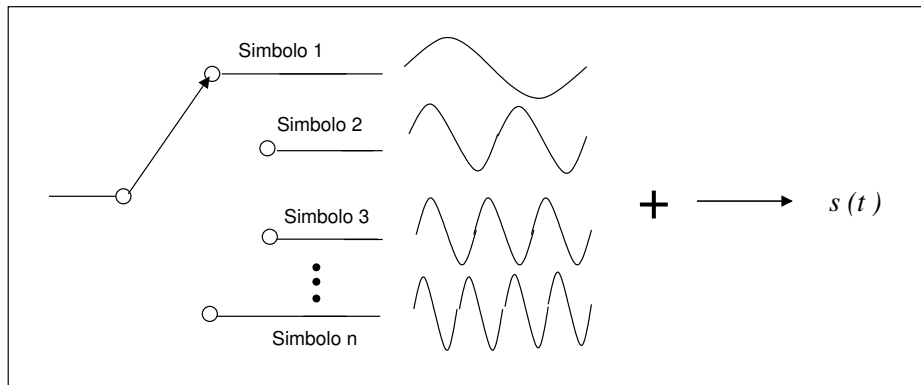


Figura 2.22: Idea básica de la técnica OFDM.

De esta forma podemos decir que la señal $s(t)$ es igual a:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N m_n(t) \sin(2\pi n t)$$

donde $m_n(t)$ corresponde a la señal del símbolo n .

La ecuación anterior es un tanto burda, pero da la idea básica de la técnica OFDM.

2.5.4.3. Banda de guardia entre símbolos OFDM

Como se mencionó anteriormente, la técnica OFDM enfrenta aquellos problemas en la recepción de una señal, que tienen que ver con retardos o reflejos de la señal,

producto de las características del canal terrestre. Estos problemas se deben a que cuando se transmite la señal, puede desviarse de su trayectoria directa al receptor ya sea por factores ambientales o de estructuras como los edificios en una ciudad. Regularmente los retrasos modifican la ganancia de la señal e incluso pueden llegar a debilitarla, provocando que un receptor no pueda demodularla. Estos retrasos pueden ser más pequeños o más grandes que la duración de un símbolo.

Las características de un canal terrestre varían con el ambiente y pueden ser descritas matemáticamente por el número, nivel y fase de los ecos¹⁵ [33]. Existen dos tipos de canales principalmente, que consideran los ecos o retrasos de la señal, para la evaluación de sistemas de transmisión. Uno es conocido como *Ricean*, que considera que la ruta directa entre transmisor y receptor es por ecos de nivel y fase variable. El otro es conocido como *Rayleigh*, que no considera ruta directa entre transmisor y receptor y los ecos son los mismos que para un canal Ricean [33]. NOTA: estos diferentes tipos de canales, además del Gaussiano, son considerados para fijar los valores de los parámetros en los sistemas de transmisión de televisión digital terrestre.

Los reflejos que provocan retrasos más largos que la duración de un símbolo provocan un tipo de atenuación denominada de “frecuencia selectiva”. OFDM proporciona ventajas en un canal que tiene respuesta de frecuencia selectiva, ya que sólo algunas portadoras de cierta frecuencia pueden perderse, con lo cual a su vez pueden perderse algunos bits, pero con codificación previa apropiada, estos pueden recuperarse.

Si se determina la duración del retraso de una señal, la señal OFDM puede diseñarse de manera que los símbolos estén separados por ese tiempo del retraso. De esta forma, el retraso de uno, no afectará al siguiente símbolo. En principio podría dejarse un espacio en blanco entre símbolos, pero esto no es posible, ya que se perdería la continuidad de la señal.

La forma en que OFDM maneja esto, es retrasando el inicio del símbolo (el tiempo que pueda durar el retraso de la señal) e insertando “algo” en ese espacio de guardia, para mantener la continuidad de la señal. Ese “algo” es la parte final del símbolo. Por ejemplo, puede extenderse la duración del símbolo de manera que ahora sea 1.25 veces, después se tendría que copiar la última cuarta parte de la señal del símbolo para insertarlo antes del inicio de éste. Así lo único que restaría, es ajustar la fase de inicio del receptor. Lo anterior puede observarse en la figura 2.23. El procedimiento anterior es denominado inserción del prefijo cíclico (*cyclic prefix*).

Ya que el OFDM usa muchas portadoras, en teoría debería insertarse el prefijo a cada una de ellas. Sin embargo, en la práctica esto sólo se realiza una vez a la señal OFDM compuesta [71]. En un sistema práctico, la inserción se realiza después

¹⁵También conocido como reflejos o multitrayectorias de la señal.

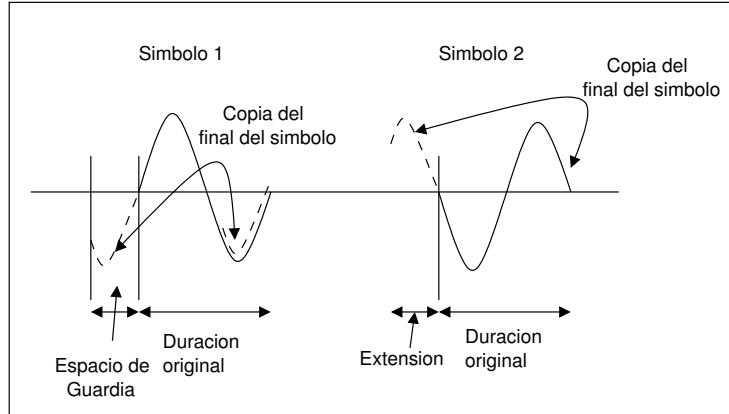


Figura 2.23: Inserción de la parte final de la señal en el espacio de guardia.

de realizar la IFFT y obtener la señal compuesta, posteriormente en el receptor, primero hay que eliminar el prefijo y realizar la FFT para obtener los símbolos de cada portadora.

La desventaja de esta técnica es que al disminuir los efectos de la interferencia entre símbolos por consecuencia de los retrasos, se incrementaría el ancho de banda si se transmitiera la misma cantidad de símbolos por segundo, pero como en la mayoría de las veces esto no es posible, regularmente se tiene que reducir la tasa de símbolos [47].

El proceso de creación de la señal OFDM es matemáticamente similar a realizar la transformada de Fourier inversa a la señal a modular. Es por eso que los esquemas de modulación OFDM llevan a cabo esa tarea a cada una de las señales en paralelo. La demostración puede consultarse en [47, 26, 71].

En la figura 2.24 se muestra un esquema que presenta los bloques de la generación de la señal OFDM.

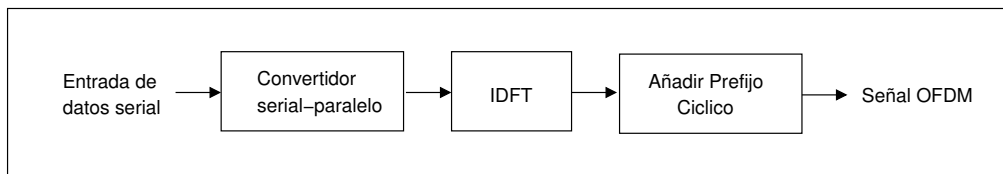


Figura 2.24: Esquema general de la generación de la señal OFDM.

Cuando la técnica OFDM se usa para sistemas de transmisión de señales de televisión, como en el caso del estándar DVB-T, hay que añadir a la señal OFDM portadoras que sirvan para la sincronización, como algunas denominadas “piloto”. En

la sección 3.1.4 se presentarán más detalles de las características de estas portadoras.

2.5.4.4. Propiedades

Cada una de las portadoras que son moduladas por los símbolos tienen un espectro de frecuencia similar al mostrado en la figura 2.25. El espectro muestra un pico central en la frecuencia de la portadora y puntos de magnitud cero en las bandas laterales de frecuencia correspondientes a múltiplos de la tasa de símbolos. Si un número de portadoras están espaciadas de tal forma que preserven el principio de ortogonalidad (la punta de cada lóbulo de ellas coincide con las regiones donde el espectro es igual a cero de todas las otras), se forma el espectro mostrado en la figura 2.26 [16].

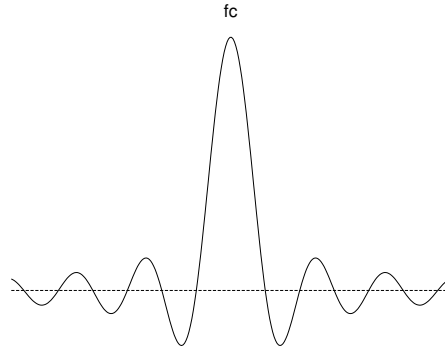


Figura 2.25: Espectro de una portadora de la señal OFDM.

Cualquier portadora que aparece en la figura 2.26 puede ser demodulada. Si una portadora contiene bits erróneos por efectos de atenuación o ruido, las técnicas de codificación de canal corrigen esos errores.

Por otro lado, la eficiencia del ancho de banda en el OFDM tiende a ser igual a

$$\frac{N + 1}{N} \text{ bits por Hz}$$

donde N es el número de portadoras. De esta forma, mientras más portadoras sean, la eficiencia del ancho de banda es mayor.

La tasa de bit en error (BER) del OFDM es aceptable en canales donde existan retrasos de la señal. Es decir, la técnica OFDM no es recomendable cuando se requiere de una línea directa entre el transmisor y el receptor (canal Gaussiano), como en el caso de un satélite. Esto a consecuencia de que el OFDM no se comporta bien en ambientes no lineales, como aquellos provocados por amplificadores de alta potencia [47]. Por tanto, su uso es más enfocado a ambientes donde haya receptores

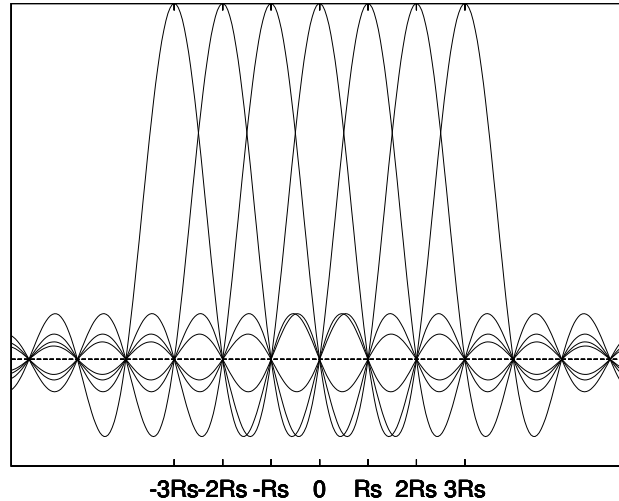


Figura 2.26: Espectro de frecuencias de la señal OFDM.

que enfrenten situaciones de trayectorias múltiples de la señal.

El uso de la técnica de modulación COFDM (OFDM con codificación de canal) lleva a considerar en la práctica a las redes de frecuencia única (SFN, *Single Frequency Networks*). Las características de este tipo de redes se presentan en la sección siguiente.

2.5.5. Redes de frecuencia única

Las redes de frecuencia única (SFN, *Single Frequency Networks*) son un conjunto de transmisores distribuidos en un territorio, ya sea una ciudad o una región, para transmitir de manera sincronizada los mismos datos a la misma frecuencia.

Este tipo de redes se adaptan de manera óptima al esquema OFDM, ya que una de sus cualidades es la de usar las señales de eco (o reflejos) a su favor (por ejemplo para “incrementar” la potencia de la señal recibida). Aprovecha los ecos producidos por el medio ambiente de forma natural, fortalecidos por fuentes de ecos, como transmisores co-canal o repetidores [30].

Los transmisores en una SFN deben estar separados de manera que abarquen una zona de cobertura (la separación la determinan los parámetros del OFDM, principalmente el intervalo de guardia). Cada transmisor se rige por tres reglas fundamentales, donde cada uno de ellos tiene que radiar a:

- la misma frecuencia
- al mismo tiempo

- los mismos datos (bits)

Su función es que un conjunto de transmisores cubran con la señal radiada una zona o región (creando un área de cobertura). Los transmisores pueden ser de baja potencia, donde para las zonas donde la señal se debilita (por consecuencia del medio como la presencia de edificios, zonas de árboles abundantes, etc.), se pueden usar cierto tipo de amplificadores denominados “gap fillers”. Así, ya sea por este tipo de amplificadores o por transmisores vecinos, la señal en el receptor debería tener la suficiente potencia para demodularla.

Estas redes pueden ser usadas tanto en pequeñas como en grandes áreas. La extensión puede ser limitada por las interferencias entre diferentes redes (quizá por distintas ciudades o países).

Como se mencionó anteriormente, lo más importante al usar las redes de frecuencia única es la sincronización, así [44]:

- la sincronización de frecuencia requiere que un oscilador de referencia común, “alimente” a cada uno de los osciladores en cada transmisor
- en el tiempo, requiere que cada transmisor transmita el n -ésimo símbolo en el instante $T_n \pm 1ms$
- a nivel de bit, requiere que el mismo símbolo sea transmitido al mismo tiempo. Por tanto todas las subportadoras deberían ser moduladas idénticamente.

Algunas de sus ventajas es que hacen mejor uso del espectro al distribuir la potencia de los transmisores. También existe la ganancia en la red debido a la recepción simultánea de señales útiles.

Algunas de las desventajas al usar estas redes es que no permite el remplazo de forma dinámica de los contenidos de un programa. También propicia que la tasa de datos sea reducida al considerar intervalos de guardia largos.

Se puede notar en el capítulo siguiente que el estándar DVB-T usa la modulación OFDM con codificación de canal para el transporte de su señal. Requiriendo así de una red de frecuencia única. Cuando se describan los componentes se presentarán algunas características con las que debe contar la red de frecuencia única usada.

También el estándar permite manejar más de un flujo de datos, uno llamado de prioridad alta y otro de baja, por medio de lo que se denomina modulación jerárquica. A continuación se presenta una explicación para conocer sus características.

2.5.6. Modulación jerárquica

La modulación jerárquica, más que un método alternativo de modulación digital, como el QPSK, QAM, etc., es un método de canalización de datos con diferentes car-

acterísticas. Este método fue propuesto en el estándar de televisión digital terrestre DVB-T. Se desconoce si el término haya sido definido anterior a la especificación de este estándar, ya que no se encontraron referencias que así lo indicaran.

Con la denominada modulación jerárquica es posible transmitir dos flujos de datos independientes multiplexados en la misma frecuencia del canal. Estos flujos son denominados de alta prioridad (HP- *High Priority*) y de baja prioridad (LP- *Low Priority*). Cada uno de estos flujos se transmite con una calidad diferente. Dando lugar a establecer dos “tipos de servicio diferentes”. Por ejemplo, en el mismo flujo transmitir señal de video en resolución SDTV y otra en HDTV. También, es factible establecer dos zonas diferentes de cobertura, una que reciba los datos en forma confiable y otra que no, pero que permita la visualización de la señal.

Esta modulación se considera como la separación del canal en dos circuitos virtuales, cada una con su respectiva tasa de bits [29]. Sus características dependen de la constelación y de la combinación de las tasas de datos aplicados. La idea es tener dos canales virtuales, de los cuales uno sea más riguroso que el otro, es decir, el flujo HP tiene una protección contra ruido e interferencias más robusta que el LP. El HP tiene una tasa de bit menor y requiere menos potencia promedio que el LP, que es más propenso a sufrir los daños del ruido, tiene una tasa de datos mayor y requiere mayor potencia promedio de transmisión.

La modulación jerárquica se basa en el hecho de trabajar con dos esquemas de mapeo de bits, por ejemplo, QPSK y 16-QAM para ser combinados y obtener al final un esquema de mapeo como el 64-QAM. Esto es, el flujo de datos HP será mapeado en el diagrama de constelación mediante QPSK, que requiere 2 bits por símbolo. Mientras que el flujo LP, será mapeado con 16-QAM, que requiere 4 bits por símbolo. Cuando son combinados, la ubicación de un “estado” dentro de su cuadrante en el diagrama de constelación final y el número de cuadrante, son considerados como información importante; misma que es transmitida junto con los demás parámetros de codificación y modulación. Cuando se considera QPSK y 16-QAM como esquemas de mapeo, se dice que se usa “QPSK en 64-QAM” y la tasa de bit de ambos esquemas forman al final, la tasa de bit que requiere 64-QAM [62], en este caso 6 bits por símbolo.

Para explicar la modulación jerárquica se debe considerar que los datos que modulan el flujo HP van a elegir el cuadrante donde se transmitirá el punto de la constelación final. Para el flujo HP siempre hay que considerar el modo de mapeo QPSK. Por ejemplo, si el bit a transmitir tiene el valor '10', le corresponderá el cuadrante superior izquierdo (figura 2.27a). Por otro lado, los datos que modulan al flujo LP determinarán el punto exacto dentro del cuadrante en el diagrama de constelación final. Para el flujo LP se puede considerar tanto el modo de mapeo QPSK y 16-QAM. Por ejemplo, si la secuencia de bits fuera '0111' (16-QAM), hará referencia al

punto de la constelación que se muestra en la figura 2.27b. La combinación de los flujos genera el diagrama de constelación similar al 64-QAM (figura 2.27c) [50]. Ahí se puede observar la posición del estado que corresponde a la secuencia de bits **100111**.

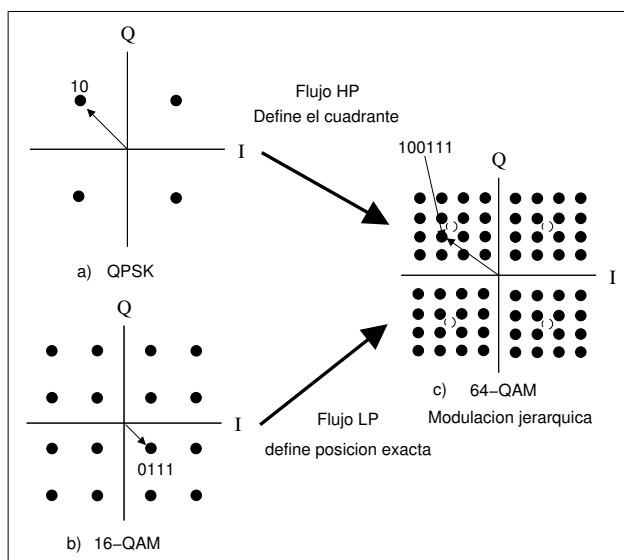


Figura 2.27: Modulación jerárquica.

De la misma forma que se puede usar el mapeo QAM para el flujo LP, quedando así la modulación jerárquica como “QPSK en 16-QAM”.

El espaciamiento de los puntos en la constelación es uniforme, pero puede ser alterado mediante el uso de un factor denominado α , donde $\alpha = 1, 2, 4$ [71]. Este factor añade cierto desplazamiento a cada uno de los puntos adyacentes en un cuadrante y el espaciamiento entre dos puntos de cuadrantes adyacentes. Haciendo que la distancia entre ellos aumente. Mientras más grande sea, provoca que se requiera más C/N (*carrier-to-noise*, proporción-ruido-signal) para el flujo LP. Por ejemplo, $\alpha = 1$ es considerado para el diagrama de constelación de la figura 2.28.

Este factor hace que el flujo HP sea más robusto a expensas del flujo LP que se vuelve menos y más sensible al ruido. Esto se debe a que la distancia disminuye entre puntos vecinos dentro del mismo cuadrante.

Además del factor α , otros factores importantes a considerar son las tasas de codificación de bit para los flujos. Por ejemplo, para proteger aún más el flujo HP, se usa una tasa de codificación baja¹⁶ (1/2 o 2/3), mientras que para el flujo LP puede ser más alta (3/4).

¹⁶Tasa del codificador convolucional.

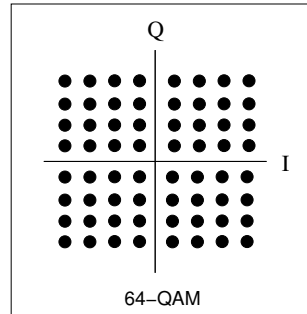


Figura 2.28: Diagrama de constelación de 64-QAM en modo no jerárquico.

Las razones por las cuales se puede usar la modulación jerárquica son principalmente las que llevan a hacer mejor uso del canal de transporte. Regularmente siempre existe el compromiso entre transportar la mayor cantidad de datos para obtener buena calidad y los factores que involucran ese proceso (tasa de codificación, selección del esquema de modulación, intervalo de guardia, etc.). La modulación jerárquica lleva a establecer el compromiso entre tasa de bit y robustez, el cual repercute en el área de cobertura [29].

Considerando que cada flujo permite obtener un área de cobertura diferente, no tendría mucho sentido el que se destinaran a un sólo servicio. En cambio, tiene más sentido si se planea el uso eficiente del canal para corresponder a dos servicios. Por ejemplo, adecuar los parámetros para los servicios en receptores portátiles y fijos.

Las posibles aplicaciones de la modulación jerárquica son principalmente:

- transmitir de dos flujos MPEG independientes en el mismo canal de RF, por ejemplo video en SDTV y en HDTV,
- transmitir servicios de televisión digital terrestre a receptores móviles y fijos al mismo tiempo,
- proporcionar una protección contra errores determinada a cada flujo para recepciones en diferentes zonas de cobertura.

Para finalizar esta sección se explicará de manera breve otro de las opciones para modular la señal de televisión digital terrestre, conocida como VSB. Usada principalmente por el estándar de televisión digital terrestre ATSC.

2.5.7. VSB

La modulación VSB surgió como otra alternativa para hacer eficiente el uso del ancho de banda en un canal de transmisión. La modulación VSB es una variación

Componentes de un sistema de televisión digital

de la modulación AM (DSB y SSB) de una señal.

En una técnica de modulación AM se involucran componentes de frecuencias de la portadora. Estas componentes se localizan en las bandas laterales a la frecuencia central de la portadora. Así la señal AM y sus componentes en dichas bandas se denominan DSB (*Double SideBand*- Doble banda lateral). Esta requiere de un ancho de banda considerable para transmitir un programa de televisión (dos veces la frecuencia máxima de la señal), ya que la información de la señal es transmitida en las dos bandas laterales.

Debido a la simetría del espectro de frecuencias de una señal modulada en AM con respecto a la frecuencia de la portadora, es posible transmitir la señal en modo SSB (*Single SideBand*- Banda lateral simple). Este tiene la ventaja de que se requiere sólo de la mitad del ancho de banda (sólo se transmite información de una banda lateral), la única desventaja es que su implantación es muy costosa.

Para compensar este factor se usa VSB (*Vestigial SideBand*- Banda vestigial residual). VSB es obtenida por una supresión parcial de una de las bandas laterales de una señal DSB. Esta puede ser una señal AM o una señal DSB-SC [22]. Hereda las ventajas de DSB y SSB y evita sus desventajas a un costo muy bajo. Las señales VSB son relativamente fáciles de generar y al mismo tiempo, su ancho de banda es sólo un 25 % más que la requerida por SSB.

En el VSB, en lugar de rechazar una banda lateral completa como en el caso del SSB, se acepta una pequeña parte de la banda a eliminar después de la frecuencia de corte (figura 2.29). La señal en banda base se recupera en forma exacta por un detector asíncrono en conjunto con un filtro ecualizador en el receptor (figura 2.30).

El uso del VSB es atractivo para los sistemas de transmisión de televisión. La señal de televisión en banda base ocupa un ancho de banda alrededor de los 9 MHz. Usando SSB puede disminuir hasta los 4.5 MHz pero la fabricación de los transmisores y receptores es muy costosa¹⁷. En cambio usando VSB disminuye hasta los 6 MHz.

En la figura 2.31 se presentan una comparación del ancho de banda usado por DSB y VSB, donde se puede notar que el ancho de banda requerido disminuye para este último.

El estándar de televisión digital terrestre ATSC contempla el uso de la modulación VSB para transmitir su señal, teniendo una tasa de bit de 19.39 Mbit/s. El grupo de desarrollo para la televisión en avanzada en Estados Unidos de América,

¹⁷La señal de video en banda base contiene potencia considerable en la región de baja frecuencia y es complicado suprimir toda una banda lateral

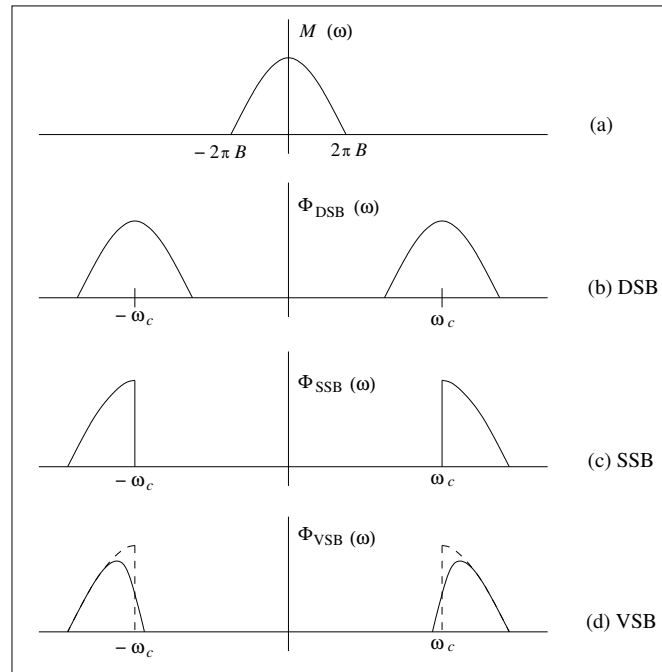


Figura 2.29: Espectro de una señal modulada con su DSB, SSB y VSB.

propuso una técnica para transmitir los bits de la señal digital con una cantidad de niveles o amplitudes de voltaje de la señal portadora. Se propusieron 5 modos VSB diferentes para la transmisión de una señal de televisión digital, estos son 2, 4, 8, 8-trellis y 16 niveles. La televisión digital terrestre usa el modo de 8-trellis, mientras que para los sistemas de cable se usa el modo de 16 niveles [20].

NOTA:El modo al cual se seguirá haciendo referencia en las secciones subsecuentes, será 8-VSB o simplemente VSB, a menos que se haga explícita la referencia a otro modo.

La modulación 8-VSB considera las características antes mencionadas para transmitir una señal usando VSB, sólo que para esto usa 8 niveles de voltaje en la amplitud de la señal portadora. Estos niveles de voltaje corresponden a +7, +5, +3, +1, -1, -3, -5 y -7. Dado que son 8 niveles, permite transmitir 3 bits por cada símbolo.

Para transmitir los pulsos generados por los niveles de voltaje y adaptarse al ancho de banda requerido, el método 8-VSB realiza un filtrado a estos, además de la eliminación casi por completo de la banda inferior del espectro de frecuencia. Esto provoca que los pulsos pierdan la apariencia de su parte plana (donde su amplitud es constante). Por tanto es importante considerar como serán detectados los niveles de los pulsos.

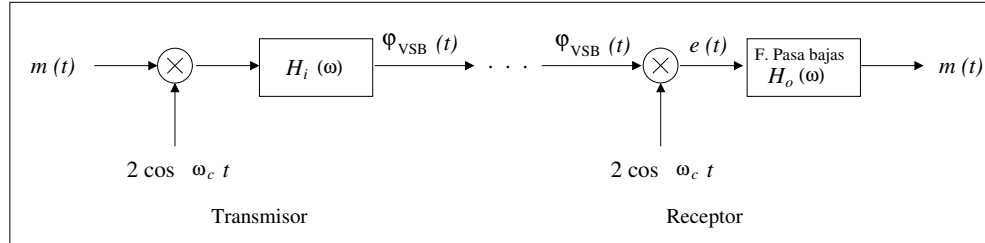


Figura 2.30: Modulador y demodulador VSB.

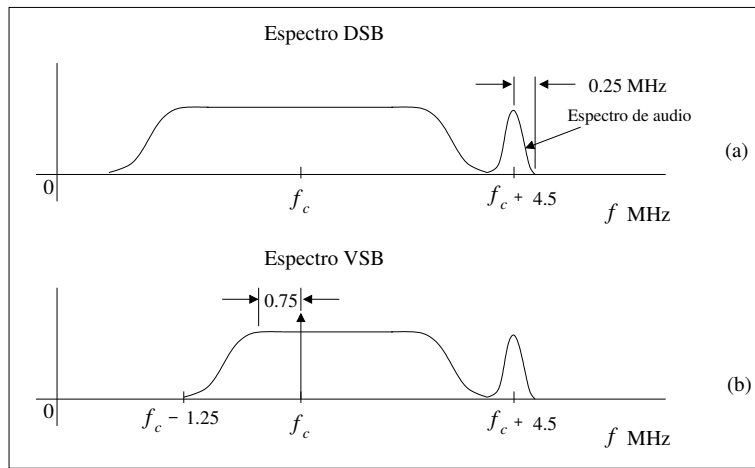


Figura 2.31: Espectro DSB y VSB de una señal de televisión.

El esquema de modulación 8-VSB es un sistema modulado en cuadratura, con componentes I y Q [43], donde una señal en banda base I y una ortogonal Q modulan una portadora. Pero por las características del ATSC, se usa principalmente la componente I , ya que lleva la información de los niveles. La componente Q es usada para reducir el ancho de banda, cancelando la banda inferior del espectro. Debido a que los canales Q de la banda inferior tienen una fase opuesta a la de I , gran parte de esta banda es eliminada cuando se combinan estas componentes. Así la componente I tendrá un valor en cada punto medio del periodo del símbolo, mientras que Q no contiene información útil para el receptor [43].

Ya que cada símbolo en I puede verse como un señal impulso, la información antes y después no tiene relevancia para ese símbolo y su amplitud puede ser modificada [43]. Lo importante es que para un instante de tiempo en el muestreo, la señal asuma uno de los ocho niveles. Esta característica hace que la señal en el tiempo oscile (*ringing*) antes y después del pulso. Lo relevante es que esas oscilaciones pasarán por el nivel de voltaje 0 y no afectarán a los símbolos previos ni posteriores, evitando así la interferencia entre símbolos (ISI). Esto como en el caso del OFDM, puede

darles una característica ortogonal (figura 2.32) [66]. Así, la envolvente de la señal RF estará compuesta por la suma de las “oscilaciones” generadas por cada símbolo.

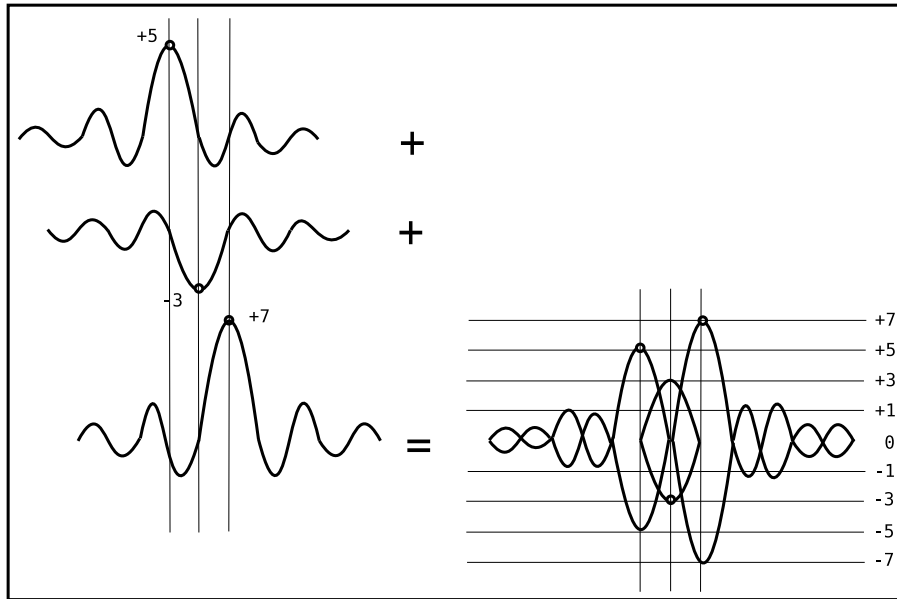


Figura 2.32: Pulsos ortogonales para los símbolos en el 8 VSB.

Al igual que otras formas de modular, 8-VSB también tiene varias representaciones, el “diagrama de ojo” y el diagrama de constelación. El primero tiene que ver con el traslape de los trazos de la amplitud de la señal RF recibida, en la frecuencia de muestreo. Esto debido a que la señal RF tiene que ver con alguno de los 8 niveles que se presentan según la tasa de muestreo. La convergencia de muchos trazos de la señal forma 7 “ojos” que coinciden con la ocurrencia de los pulsos de reloj en el receptor [66].

El diagrama de constelación es una representación en dos dimensiones de la amplitud y fase de la portadora 8-VSB que ocurre en cada tiempo de muestreo. Sólo que en este caso, la información es transmitida en amplitud y no en fase. Por eso a diferencia de otros esquemas como el QAM, donde cada punto de la constelación es una combinación de la amplitud y fase de la portadora, el canal Q no es útil, ya que los ocho niveles se recuperan a partir de un detector síncrono del canal I (*In-phase*). El diagrama lo forman una serie de ocho líneas verticales que corresponden a los ocho niveles transmitidos (figura 2.33). Al eliminar cualquier dependencia con el canal Q, se reduce el uso de componentes de hardware requeridos, ayudando a la simplicidad y bajo costo en el diseño del demodulador [66].

El proceso posterior que sigue una señal modulada es su transmisión. La señal viajara por el aire y podrá ser captada por un aparato receptor. Este llevará a cabo

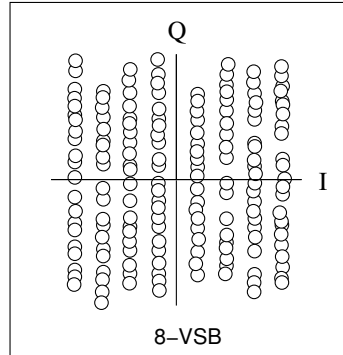


Figura 2.33: Diagrama de constelación del 8-VSB.

las etapas de demodulación y decodificación, para obtener (en el mejor de los casos), la señal original transmitida.

2.6. Desempeño de sistemas de transmisión

Se ha mencionado en secciones anteriores que los sistemas de transmisión están propensos a los efectos que el ruido puede provocar en la señal. Además del ruido, los sistemas pueden presentar problemas de detección de símbolos, por un problema conocido como interferencia entre símbolos *ISI -Intersymbol Interference*. Este problema se presenta cuando en el receptor no es posible identificar o detectar los símbolos que fueron transmitidos. Esta interferencia no puede eliminarse del todo, es decir, siempre estará presente, pero existen técnicas que permiten mitigarla.

Es así como en la transmisión de señales digitales se presentan dos problemas importantes:

1. La correcta recepción de los símbolos transmitidos
2. La correcta recepción de los bits transmitidos

Entiéndase por “correcta recepción” simplemente a obtener justamente lo que fue enviado.

La recepción correcta de los símbolos transmitidos tiene que ver con la etapa de demodulación. En esta etapa, el demodulador tiene que ejecutar procesos de detección para reconstruir los símbolos.

Las técnicas de modulación digital modelan su proceso para estimar tasas de errores en símbolos a partir de las características del canal. En la mayoría de los casos, se considera un canal con fuentes de ruido de tipo Gaussiano.

2.6 Desempeño de sistemas de transmisión

En una fuente de ruido de tipo Gaussiano se modela la probabilidad de error en términos de funciones Gaussianas. Esto porque se considera que una de las fuentes de ruido es el llamado “ruido térmico”. El ruido térmico es provocado por “el movimiento de electrones dentro de un medio conductor” [64]. Dicho movimiento produce ruido en los amplificadores y circuitos electrónicos del receptor, modifica la señal recibida de forma aditiva (suma de la amplitud del ruido con el de la señal).

La característica del ruido térmico es que estadísticamente, su amplitud es distribuida por una normal o distribución Gaussiana [64]. En términos espectrales, su densidad espectral de potencia es plana en las frecuencias de interés (en sistemas de comunicaciones). Es decir, tiene la misma potencia por Hz en frecuencias bajas, como en altas (hasta los 10^{12} Hz [64]). Cuando dicha potencia de la densidad espectral tiene esa característica, se dice que el ruido es “blanco” [64].

Debido a que el ruido térmico está presente en todo sistema de comunicaciones, siendo una fuente predominante de ruido y teniendo características de ser aditivo, blanco y Gaussiano (*Additive White Gaussian Noise*-AWGN), se usa para modelar el ruido en procesos de detección de una señal transmitida y para el diseño de receptores [64].

Es común ver que la detección de señales consideren fuentes de ruido AWGN. Donde las expresiones para el cálculo de la probabilidad de error, estén en función de la llamada “función de error complementaria, $Q(x)$ ”. Usada para aproximar la probabilidad de error de detectar un símbolo binario (o bit). La probabilidad de error es numéricamente igual al área bajo la curva de la sección intersectada por dos curvas que indican la probabilidad de detección de un símbolo transmitido. La función complementaria de error se define como [64]:

$$Q(x) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

Como la función no puede ser evaluada de forma cerrada, los valores son extraídos de tablas. En [64] se presenta una tabla para distintos valores de x .

La probabilidad de error en el proceso de detección de símbolos aumenta o disminuye en función de la potencia de la señal transmitida. Si la señal se recibe con una potencia muy cercana a la que tuvo cuando se transmitió, la probabilidad de error será muy baja. En cambio si la señal pierde potencia (o de manera burda “fuerza”), la probabilidad de error crecerá.

La potencia mencionada se refiere, en sistemas de comunicaciones digitales, como la proporción entre la energía de la señal (E) y la densidad del ruido (N_0) [22]. En muchos casos esta proporción es llamada “proporción señal-ruido (S/N -*signal to noise*)”, ya que conceptualmente es muy parecida a la medida usada en comunicaciones analógicas, indicando la proporción entre la potencia promedio de la señal

Componentes de un sistema de televisión digital

con la potencia promedio del ruido [64].

La energía de la señal es manejada como la energía del bit (E_b) y se obtiene multiplicando la potencia promedio (P_{avg}) de la señal y la duración del bit (T_b):

$$E_b = P_{avg} T_b$$

mientras que la densidad espectral del ruido N_0 es descrita como la potencia del ruido N dividido por el ancho de banda (W) [64]:

$$N_0 = \frac{N}{W}$$

Entonces, la proporción entre la energía del bit y la densidad del ruido, E_b/N_0 es:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_{avg} T_b}{N/W} = \frac{P_{avg}/R_b}{N/W}$$

donde R_b es la tasa de bit (inverso de la duración del bit).

El parámetro E_b/N_0 es una de las medidas más importantes que ayudan a determinar el desempeño (*performance*) de sistemas de comunicaciones digital. Regularmente, se traza una curva de la probabilidad de error de un bit (P_B) contra E_b/N_0 . Se puede notar un ejemplo en la figura 2.11, que la gráfica indica la probabilidad de error de bit contra E_b/N_0 que se obtienen con sistemas con codificación o sin ella.

Dicho parámetro es muy usado para medir el desempeño de un sistema y compararlo con otro. Es adimensional y regularmente se expresa en decibeles (dB). Mientras más pequeño sea el valor requerido para E_b/N_0 , más eficiente será el proceso de detección para una determinada probabilidad de error (fija) (dado que no habría mucho gasto de energía en relación a la densidad del ruido) [64]. En muchas ocasiones la probabilidad de error se fija y se busca que la eficiencia del sistema sea mayor, haciendo que la proporción sea lo más pequeña posible.

Es así como las expresiones para el cálculo de la probabilidad de error de un proceso de detección, se dejan en términos de la función de error complementaria, quedando ésta a su vez, en términos de E_b/N_0 . Por ejemplo, la probabilidad de error de bit del proceso de detección de una señal modulada con BPSK (*Binary Phase Shift Keying*, que transmite un bit por símbolo usando PSK), usando detección coherente (se considera una referencia de fase), se puede expresar como [64]:

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

Para cada método de modulación de señales digitales se puede obtener una expresión que determine la probabilidad de error, como en ejemplo anterior. Permitiendo

2.6 Desempeño de sistemas de transmisión

así comparar la eficiencia de los métodos. Cada uno de los métodos de modulación permite el modelaje de ese tipo de expresiones para el cálculo de la probabilidad de error. La literatura en comunicaciones digitales, presenta todos los detalles para crear la expresión y el cálculo de ellos, por ejemplo [64].

Parte del propósito del trabajo de investigación, es conocer el desempeño de los métodos usados para codificar y transmitir la señal. En este sentido, un análisis más profundo permitiría observar las gráficas de desempeño de la modulación VSB y de OFDM. Sin embargo, las medidas de desempeño se obtuvieron a partir de las pruebas de recepción prácticas, realizadas por diversas instituciones, en varios países. Llevadas a cabo precisamente para comparar el desempeño o *performance* de las señales codificadas con los estándares estudiados. Aún así, en [71] se presentan expresiones que modelan las tasas de símbolo de error de los diferentes métodos de modulación mencionados en este capítulo.

Al igual que las expresiones para determinar la probabilidad de error basado en el tipo de modulación, se pueden determinar expresiones para el tipo de código de bloque usado en la codificación de canal. Sólo que en este caso, las expresiones están en función de la probabilidad de decodificar un símbolo erróneo.

Por ejemplo, la probabilidad de error de un esquema de codificación es la probabilidad de que el decodificador genere una palabra de código equivocada o que no fue la que originalmente se codificó. Si la decodificación es basada en el arreglo estándar (ver sección 2.4.1), un error de decodificación se produce si el patrón de error no pertenece a una clase lateral. Entonces, si hay α_i patrones de error pertenecientes a una clase lateral con peso de Hamming i , se tiene la siguiente expresión para el cálculo de la probabilidad de error, de un código de longitud n [49]:

$$P_{err} = 1 - \sum_{i=0}^n \alpha_i p^i (1-p)^{n-i}$$

A partir de la expresión anterior se puede obtener la expresión de la probabilidad de error de un bit, P_B .

Para comparar la eficiencia de los códigos en relación a la probabilidad de error de bit. Regularmente se combinan las expresiones del cálculo de la probabilidad de error de bit en el proceso de detección de la señal recibida y la probabilidad de error de bit del decodificador. Al combinarlas se pueden generar curvas que relacionen la probabilidad de error de bit y la proporción E_b/N_0 . Dando una idea de la eficiencia global del sistema de transmisión. Un ejemplo de estas curvas se presenta en la figura 2.34.

La figura 2.34 presenta las curvas de desempeño de varios tipos de códigos de bloque y sin codificar, mostrando la probabilidad de error al transmitir un bit por

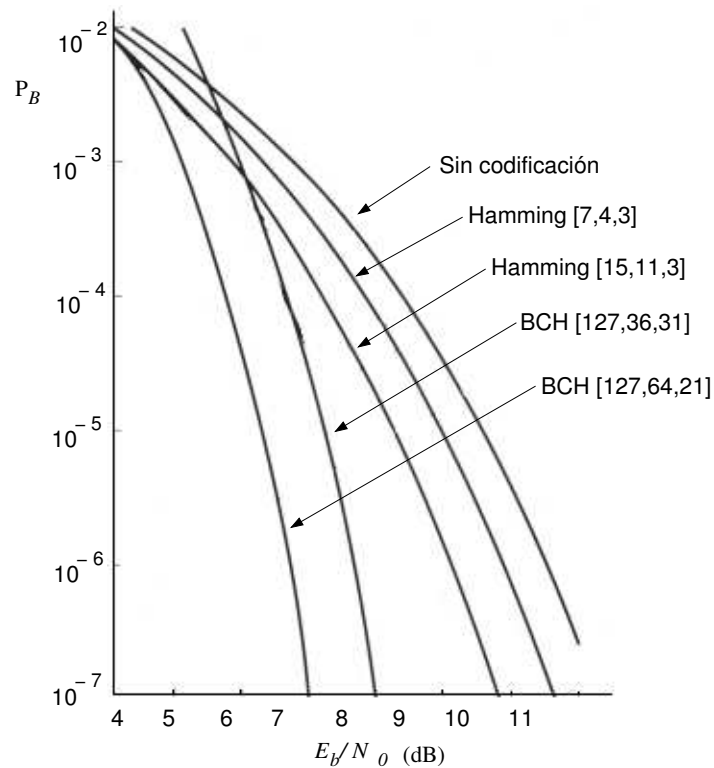


Figura 2.34: Gráfica de P_B vs E_b/N_0 para BPSK con demodulación coherente, de varios códigos.

símbolo usando BPSK con demodulación coherente, sobre un canal Gaussiano¹⁸. La demodulación se especifica porque el desempeño de los sistemas varía, cuando la demodulación es no coherente.

Cabe mencionar que en ocasiones la probabilidad de error de bit usada para medir el desempeño de un sistema, es denominada “tasa de bit en error” (*Bit Error Rate*- BER). Debido a que da información de la proporción de bits decodificados erróneamente por la cantidad total de bits recibidos [71, 31, 22].

Otro factor a considerar en los demoduladores, es si el demodulador hace decisiones “duras” o “suaves”, en el proceso de detección. Una decisión dura consiste de fijar un umbral. Con base en él se decide sobre el valor que tendrá el símbolo. Por ejemplo en el caso de un bit, la decisión asigna el valor de 0 ó 1, dependiendo si el valor cae en determinada región establecida por el umbral. En cambio, el criterio de decisión suave determina el valor de acuerdo a una aproximación cuantizada de un alfabeto continuo [64]. Es decir, existen valores intermedios, por ejemplo entre 0 y 1 [71].

¹⁸Basada en la figura presentada en [64] pp. 369.

2.6 Desempeño de sistemas de transmisión

En el capítulo 4 se discuten los parámetros involucrados en los procesos de codificación y modulación de los estándares de televisión digital estudiados. Las medidas mostradas de la tasa de bit en error con relación a la proporción señal-ruido, fueron obtenidas por dispositivos en pruebas de evaluación reales (no simuladas), llevadas a cabo por organizaciones que buscaban la mejor opción para migrar su servicio analógico al digital.

El siguiente capítulo muestra las características de los estándares de televisión digital estudiados. Se mencionan los procesos que conforman sus etapas de codificación de fuente, canal y modulación.

Capítulo 3

Estándares de televisión digital

Existen principalmente tres estándares para el desarrollo de la televisión digital terrestre a nivel mundial. Uno de ellos es el estándar desarrollado en Europa llamado **DVB-T COFDM** (*Digital Video Broadcasting-Terrestrial Code Orthogonal Data Multiplexing*), el cual usa muchas de las características y principios de estándares ya aprobados en ese continente, como el DVB-S (*Satellite*) y el DVB-C (*Cable*). Otro de los estándares es conocido como **ATSC 8-VSB** (*Advanced Television System Committee Vestigial Side Band*), desarrollado en los Estados Unidos de América. El tercero es conocido como **ISDB-T BST-OFDM** (*Integrated Services Digital Broadcasting*), este fue desarrollado en Japón y es muy parecido al estándar europeo.

Debido a que DVB-T y ATSC son los estándares más populares y con mayor aceptación a nivel mundial, fueron considerados para la revisión técnica de este trabajo de investigación. Las organizaciones que los desarrollaron están en constante promoción, para que cada estándar tenga aceptación y sea adoptado como oficial en países que quieran poner en práctica el servicio.

Cada estándar tiene características propias, con sus ventajas y desventajas. Los procesos que sigue la señal desde la codificación de fuente a la modulación son muy parecidos. Característica que permite el análisis y comparación. El propósito de este capítulo es mostrar las características de las etapas que comprenden la codificación de fuente, canal y modulación, para posteriormente, en el siguiente capítulo, analizarlas y discutir sus diferencias.

3.1. DVB-T

El proyecto DVB (*Digital Video Broadcasting*) nació y se desarrolló en Europa en la década de los 90's del siglo pasado. Desde 1991 los fabricantes de equipo, la industria de la televisión y una comisión regulatoria, se reunieron para discutir el

desarrollo de la televisión digital en Europa.

De esa forma, los grupos europeos con intereses en “Medios” (audio y video, principalmente) tanto del sector público como privado, así como fabricantes, personal de las estaciones televisoras y comisiones reguladoras crearon el grupo ELG (*European Launching Group*), para discutir todos aquellos asuntos relacionados con la televisión digital Europea y generar memorias de entendimiento (*Memorandum of Understanding*), para considerar la creación de un marco para introducir el estándar MPEG-2 en los sistemas de televisión digital. Este grupo se autodenominó en 1993 como el proyecto **DVB** (*Digital Video Broadcasting Project*). Este grupo estuvo dedicado a estudiar la forma de hacer posible la televisión digital terrestre en Europa, introduciendo conceptos que beneficiarían a varios mercados, por ejemplo, la televisión móvil y la televisión de alta definición (HDTV).

El grupo estuvo enfocado primeramente en la creación de especificaciones para un sistema de televisión digital, las cuales posteriormente fueron convertidas en estándares avalados por organizaciones internacionales como la ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) y el CENELEC (*Comité Européen de Normalisation Electrotechnique*). La idea principal era crear un sistema unificado que permitiera manejar básicamente los mismos esquemas para cualquiera de las formas de transmisión. Debido a factores técnicos y regulatorios, el grupo decidió desarrollar y poner en marcha los estándares para transmisión satelital y por cable primero, dejando para un futuro la parte terrestre. De esa forma, a partir de 1997 el grupo comenzó el desarrollo de la televisión digital terrestre [27].

A pesar de que el grupo se hizo llamar DVB, su trabajo no sólo se enfocó al video digital, también se consideró el manejo eficiente del audio y datos auxiliares¹.

3.1.1. Requerimientos para el sistema DVB

Los requerimientos establecidos por el grupo del proyecto DVB para la adopción del estándar de transmisión terrestre estipularon que:

- el sistema de transmisión terrestre debe ser similar a los sistemas de cable y de satélite que ya usan una señal digital
- los programas DVB deben ser transmitidos en un contenedor de datos y sus capacidades deben ser tan grandes como se pueda. El ancho de banda en Europa debe ser tal que el espacio ocupado por los canales de 8 MHz sea soportado
- el sistema debe tener cierta área de cobertura óptima para una recepción fija con una antena área. El soporte para la recepción fija con un receptor portátil es deseable; la recepción móvil no es un objetivo a desarrollar

¹Denominado así por considerarse auxiliares al video y audio. Por ejemplo, pueden manejar información textual del contenido de un programa o audio presentado

- debe ser posible transmitir señales en redes de frecuencia única (SFN)
- la modulación jerárquica debe ser considerada como una opción.

Para lograr la mejor similitud entre los estándares terrestres, satelitales y de cable, se escogió el mismo sistema corrector de errores. Estos comprenden codificadores internos y externos, así como herramientas de dispersión de errores. De acuerdo al requerimiento de usar una red de frecuencia única, conlleva al uso de la técnica de modulación de multiplexaje por división de frecuencias ortogonal (OFDM). La combinación de este tipo de modulación con los métodos de corrección de errores lleva a una *Codificación por multiplexaje de división de frecuencias ortogonal (COFDM)*.

Los cambios que se fueron incorporando en el transcurso del desempeño del estándar fueron resultado de requerimientos de países no Europeos, los cuales demandaban soporte para canales de 6 y 7 MHz y para recepción movil. Por lo que el grupo del proyecto DVB-T hizo disponibles las versiones para 6, 7 y 8 MHz y consideró la recepción en receptores móviles.

Como se observará a lo largo del capítulo, todos y cada uno de estos requerimientos fueron cubiertos por el estándar adoptado.

El diagrama a bloques del proceso de codificación de la señal para su transmisión se muestra en la figura 3.1.

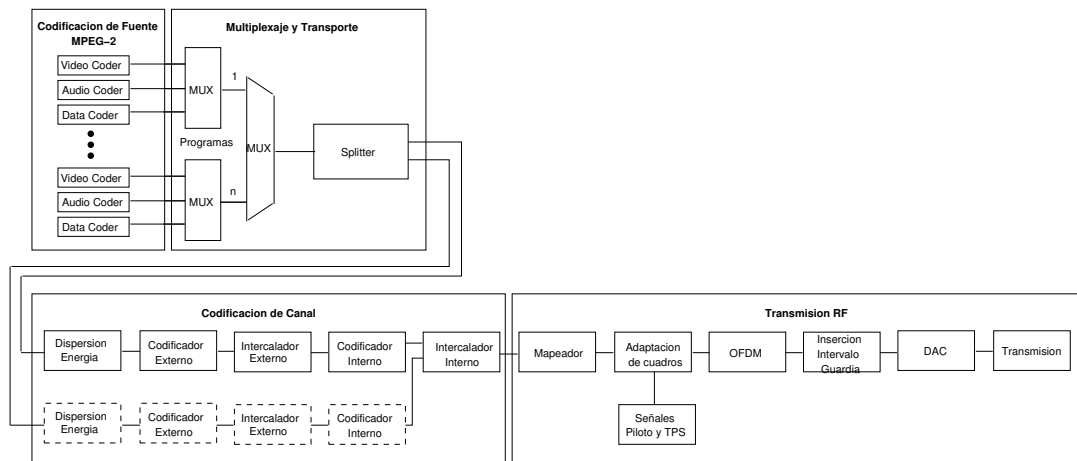


Figura 3.1: Diagrama a bloques del sistema de codificación del DVB.

A continuación se presentarán las características principales de este estándar de acuerdo al modelo básico de un sistema de transmisión digital.

3.1.2. Codificación de fuente

El estándar consideró para la codificación de los datos de entrada el estándar MPEG-2. Cabe mencionar que MPEG-2 es también usado para la presentación de video y filmes comerciales por medio del sistema DVD (*Digital Video Disk*), conocido y aceptado en gran parte del mundo, por presentar video con muy buena calidad.

3.1.2.1. Codificación de video

Los parámetros de codificación de video están basados en las especificaciones del perfil principal (*main level*, ver tabla 2.1 en sección 2.1.1.1) del MPEG. Cada una de las combinaciones que se consideren tendrán que ser decodificadas por un dispositivo IRD (*Integrated Receiver Decoder*). Los parámetros a considerar para la codificación permitirán presentar imágenes en formato SDTV o HDTV. Aunque, el estándar permite la codificación de contenidos en formato SDTV y HDTV en el mismo flujo de datos, esto implica que los IRD's tienen que decodificar cualquiera de las dos formatos de ese flujo [1].

Se consideran cuatro parámetros base:

1. codificación de SDTV a 25 Hz
2. codificación de HDTV a 25 Hz
3. codificación de SDTV a 30 Hz
4. codificación de HDTV a 30 Hz

Para el estándar DVB se considerarán tres tipos principalmente de IRD, estos son:

- aquellos que permitan tasas de cuadros de 25 Hz o 30 Hz. El uso de uno u otro dependerá de la tasa que se use en un país determinado. Sin embargo, existe la posibilidad de fabricar uno que permita ambas tasas
- SDTV o HDTV, donde las capacidades de uno de SDTV es un subconjunto del HDTV.
- con interface digital o "línea base". Lo que dependerá si será usado junto con un dispositivo de almacenamiento digital.

El estándar considera los parámetros de codificación de video que se muestran en el cuadro 3.1, para los formatos SDTV y HDTV.

3.1.2.2. Codificación de audio

La codificación del audio debe realizarse bajo las especificaciones del MPEG-2 capa I (*Layer I*) y capa 2 (*Layer II*), para esto se pueden usar los siguientes modos:

Formato	Perfil/Nivel	Tasa cuadros (Hz)	Modo	Resolución Luminancia	Prop. aspecto
SDTV	MP@ML	25	i	720 × 576	4:3 16:9 2.21:1 opc.
				544 × 576	
				480 × 576	
				352 × 576	
				352 × 288	
		23.97		720 × 480	4:3 16:9 2.21:1 opc.
		24		640 × 480	
		29.97		544 × 480	
		30		480 × 480	
				352 × 480	
				352 × 240	
HDTV	MP@HL	25	i,p	1920 × 1080	16:9 2.21:1 opc.
		50	p		
		23.97	p	1920 × 1080	16:9 2.21:1 opc.
		24	p		
		29.97	i,p		
		30	i,p		
59.94	p				
60	p				

Tabla 3.1: Parámetros para codificación del video en el sistema DVB (El modo i se refiere a entrelazado- *interlaced* y p a progresivo- *progressive*).

- MPEG-1 canal simple (*single channel*), canal dual, *joint stereo*², estéreo
- MPEG-2 audio multi-canal

Las tasas de bits para la capa I pueden ser: 32, 64, 96, 128, 160, 192, 224, 256, 288, 320, 352, 384, 416 o 448 Kbps. Para la capa II pueden ser: 32, 48, 56, 64, 80, 96, 112, 128, 160, 192, 224, 256, 320, 384 Kbps. Si se requiere usar una tasa más alta que las mencionadas, se deberá usar una extensión que puede estar en el rango de 0 a 682 Kbps.

La frecuencia de muestreo para servicios de sonido primario podrán ser: 32 KHz, 44.1 KHz o 48 KHz. Para los servicios secundarios podrán ser: 16, 22.05, 24, 32, 44.1 o 48 KHz.

El proceso de codificar las señales de entrada bajo MPEG-2, implica también la distribución de la información en paquetes de transporte, antes de entrar a la etapa de codificación de canal.

²Es una técnica que permite codificar el audio, donde un canal almacena el promedio de dos canales estéreo y otro canal que permite restaurar la información de los dos canales.

3.1.2.3. Capa de transporte

Después de codificar video y audio, los datos son canalizados o “multiplexados” en paquetes de transporte. Al empaquetarlos se crea un flujo de datos conteniendo información de video, audio y datos auxiliares. El estándar MPEG-2 define una estructura para el transporte de los datos, que permite a un dispositivo decodificar de nuevo la señal. En la sección 2.3 se explicó como empaquetar la información codificada. Básicamente se generan paquetes de 188 bytes, usando uno de ellos como byte de sincronía.

Como se mencionó en la sección 2.3 la información de video, audio y datos auxiliares son empaquetados en paquetes elementales (PES). El paquete de 188 bytes está formado por un encabezado (*header*) y por la “carga útil”. El encabezado contiene información de sincronización y control principalmente. Mientras que la carga útil es formada por lo PES junto con lo que se denomina información específica del programa (*Program Specific Information- PSI*). Esta información es necesaria para que el decodificador “descanalice” o “de-multiplexe” la señal recibida. Cuando se recibe esta información (en el decodificador), se usa para construir tablas conocidas como “tablas de información específica del programa”. Estas tablas dan información acerca de como fueron transmitidos los datos.

Además de las tablas anteriores, se pueden o no construir otras denominadas “tablas de información del servicio” (SI). Estas tablas proporcionan información al decodificador acerca de servicios y eventos de otros paquetes multiplexados, incluso por diferentes redes.

Dado que uno de los puntos a analizar en la comparación de los estándares estudiados es el desempeño o *performance*. Esta capa no juega un papel que impacte en este sentido. Para más detalles de las tablas, consultar las especificaciones en el documento EN 300 468 [3].

3.1.3. Codificación de canal

El estándar DVB aplica los siguientes procesos al flujo de transporte del MPEG-2 (ver figura 3.1):

- dispersión de energía y aleatorización
- codificación externa (Reed-Solomon)
- entrelazado externo (*outer interleaving*)
- codificación interna
- entrelazado interno

La codificación de canal en el DVB además de proteger los datos contra errores, también adecua los datos para ser transportados por la técnica OFDM.

Debido a que la técnica OFDM es multiportadora, usada para minimizar los efectos de frecuencia selectiva, ocasionados ya sea por interferencia de trayectorias múltiples (“multitrayectoria”) o por fuentes externas de interferencia (como motores eléctricos, transmisores de otros servicios), se sugiere una distribución o reacomodo de los datos consecutivos a lo largo de las portadoras disponibles. El patrón de distribución también ayuda a dispersar los efectos de perturbaciones, aún cuando es larga (en tiempo), afectando sólo a algunas portadoras o a un grupo, esperando que el código corrector de errores logre corregirlos en su gran mayoría.

A continuación se mencionarán características de los procesos que involucran la codificación.

3.1.3.1. Dispersión de energía y aleatorización

El proceso para la dispersión de energía mediante la aleatorización de los datos de los paquetes MPEG-2, se muestra en la figura 3.2. Ver sección 2.4.3 para detalles del proceso.

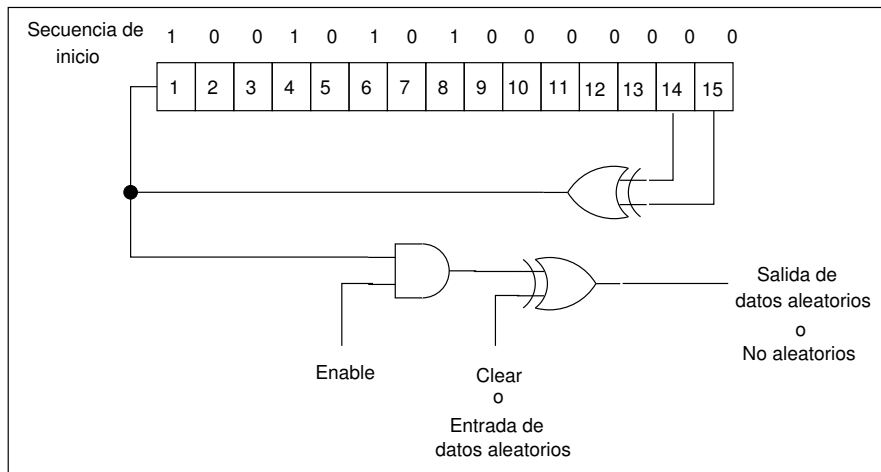


Figura 3.2: Proceso de aleatorización.

El polinomio generador de la secuencia pseudo aleatoria (PRBS, *Pseudo Random Binary Sequence*) es:

$$g(X) = 1 + X^{14} + X^{15}$$

de hecho, este es el mismo polinomio que se usa para el proceso de codificación en el DVB-S (estándar satelital).

El registro de corrimiento debe ser inicializado al valor “100101010000000”, este debe ser cargado al comienzo de cada 8 paquetes de transporte. Para el proceso de decodificación, se genera el complemento A1 del byte de sincronía, es decir, ya que el byte de sincronía para los paquetes de transporte tiene el valor 47_{HEX}, el complemento tendrá el valor B8_{HEX}.

Este proceso de aleatorización debe estar activo para evitar la emisión de portadoras no moduladas.

3.1.3.2. Codificación externa

La codificación externa se lleva a cabo por medio de un código Reed-Solomon (ver sección 2.4.1.1) con los siguientes parámetros $N = 204$, $K = 188$, $m = 8$. Considerando la ecuación 2.3 presentada en la sección 2.4.1.1, la capacidad de corrección de errores del código es $t = 8$.

Los comentarios acerca del uso del código con estas características se presentan en la sección 4.3, cuando se comparen con los usados por el otro estándar en estudio.

Cabe mencionar que las características del código usado en esta etapa, son las mismas que se usan en el estándar satelital DVB-S.

3.1.3.3. Entrelazado externo

Este proceso está basado en la convolución *Fourney*. Esta codificación convolucional tiene una profundidad $l = 12$ y es aplicado a los paquetes protegidos contra errores. La explicación de las bases del entrelazador se presentan en la sección 2.4.4.1.

El entrelazador está compuesto de 12 ramas, conectadas cíclicamente al flujo de bytes de entrada por medio de un *switch*. Cada rama j tiene asociado un registro de corrimiento que sigue la regla de una estructura de datos tipo cola (FIFO). Cada registro tendrá $j \times M$ celdas, donde $M = N/l = 17$ y $N = 204$. Cada celda debe almacenar sólo 1 byte (figura 3.3).

Para mantener la sincronización, los bytes de sincronización deben pasarse tal cual, es decir, sin ser afectados por el proceso de entrelazado.

Los comentarios acerca de este proceso y su comparación con el usado por el otro estándar en estudio se presenta en la sección 4.4.

3.1.3.4. Codificación interna

El proceso de codificación interna se lleva a cabo por medio de un codificador convolucional de tasa 1/2 (denominado *codificador convolucional madre*). Para obtener las distintas tasas permitidas (1/2, 2/3, 3/4, 5/6 y 7/8), se hace un arreglo de

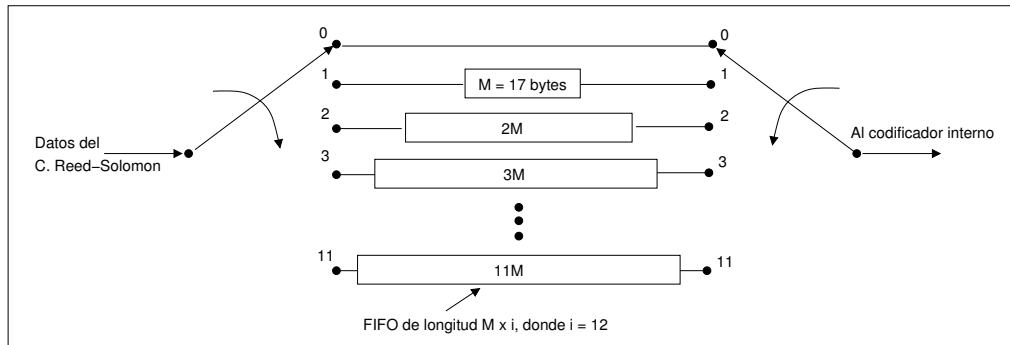
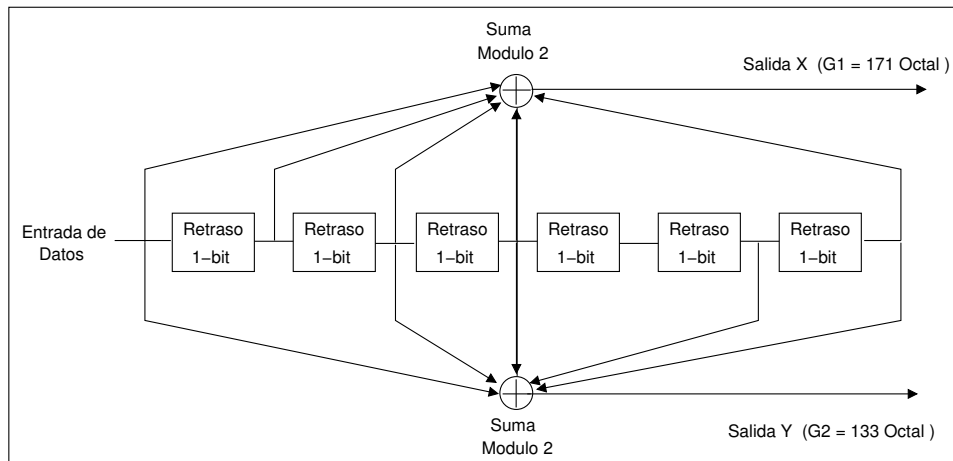


Figura 3.3: Entrezador externo.

los codificadores madre. El codificador se muestra en la figura 3.4.

Figura 3.4: Proceso de codificación interna con tasa $1/2$.

La codificación interna es acompañada por una técnica de perforación (*puncturing*) del código convolucional. Definida como el acto de eliminar algunos bits de las salidas de la codificación. El proceso degrada la redundancia, pero incrementa la tasa útil de transmisión.

Si se identifican como X y Y las salidas de un codificador interno de tasa $1/2$, en el cuadro 3.2 se especifica el patrón de perforación de acuerdo a la tasa de codificación.

Los comentarios acerca de la codificación interna al compararlo con el otro estándar se presenta en la sección 4.5.

Tasa	Patrón	Secuencia Transmitida
1/2	X: 1 Y: 1	X_1Y_1
2/3	X: 1 0 Y: 1 1	$X_1Y_1Y_2$
3/4	X: 1 0 1 Y: 1 1 0	$X_1Y_1Y_2X_3$
5/6	X: 1 0 1 0 1 Y: 1 1 0 1 0	$X_1Y_1Y_2X_3Y_4X_5$
7/8	X: 1 0 0 0 1 0 1 Y: 1 1 1 1 0 1 0	$X_1Y_1Y_2Y_3Y_4X_5Y_6X_7$

Tabla 3.2: Patrón *puncturing* de acuerdo a su tasa.

3.1.3.5. Entrelazado interno

El proceso de entrelazado interno está compuesto a su vez por dos procesos, a) entrelazado por bits y b) entrelazado de símbolos.

3.1.3.5.1. Entrelazado por bits. La codificación interna produce 1 o 2 flujos de salida (el 2do. si se considera modulación jerárquica), estos serán la entrada de este proceso. El resultado serán también flujos de salida que serán adecuados para el proceso de modulación, por ejemplo, QPSK, 16-QAM y 64-QAM, donde la cantidad de flujos de salida serán 2, 4 y 6, respectivamente.

El entrelazado de bits consiste en combinar 126 bits consecutivos de un bloque. Posteriormente estos bits ingresan al entrelazador de símbolos (figura 3.5). El entrelazamiento de bits ayuda a disminuir los efectos de perturbaciones en portadoras individuales vecinas [71].

Los detalles del entrelazador pueden consultarse en [5].

3.1.3.5.2. Entrelazado de símbolos. El propósito del entrelazado de símbolos es mapear palabras de n bits en las portadoras que se usarán en el proceso de OFDM. Este proceso usa bloques de 1512 símbolos de datos para el modo 2k y 6048 para el modo 8k.

Los valores de salida del entrelazado de símbolos son usados para mapear los datos en la constelación de la señal.

Se puede notar en la figura 3.5 que los símbolos entrelazados son mapeados para su modulación con un código Gray [71]. Con esto sólo se produciría error un bit, en caso de que la demodulación no detecte correctamente el símbolo. En un diagrama de constelación se puede notar que cada punto “etiquetado” con el mapeo Gray,

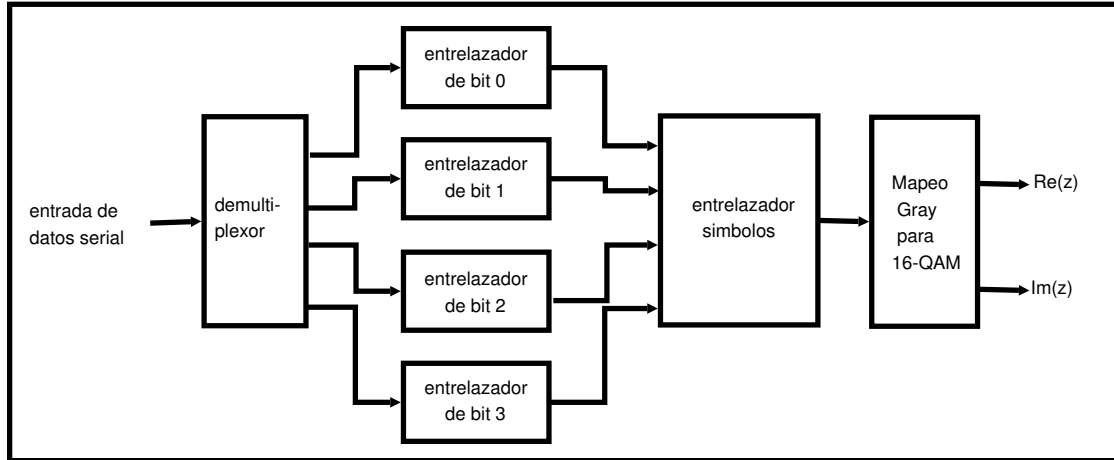


Figura 3.5: Entrelazador interno para 16-QAM.

difiere en 1 bit, de sus puntos vecinos.

Dado que el mapeo de los datos a una constelación está más relacionado con el proceso de modulación, que con el proceso de codificación de canal. A continuación se mencionarán los parámetros y características de la modulación.

3.1.4. Modulación

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema DVB usa la técnica conocida como OFDM como método de modulación. Los pasos a seguir para realizar la modulación son los siguientes:

- mapeos de amplitud y fase
- inserción de las portadoras piloto y TPS
- FFT inversa
- corrimiento en el tiempo
- inserción del intervalo de guardia
- conversión digital-analógica
- transmisión

En las siguientes secciones se presentarán sólo aquellos parámetros que son usados para manejar la información en modo no jerárquico. Para más detalles de los parámetros para el modo jerárquico consultar las especificaciones en ETS 300 744.

3.1.4.1. Mapeos de amplitud y fase

Este proceso consiste en mapear palabras de 2, 4 o 6 bits en los diagramas de constelación para los distintos modos, ya sea QPSK, 16-QAM y 64-QAM. La asignación del punto en la constelación se hace por medio del código Gray. En la figura 3.6 se presentan los diagramas para el QPSK y 16-QAM, para el modo 64-QAM consultar la referencia ETS 300 744.

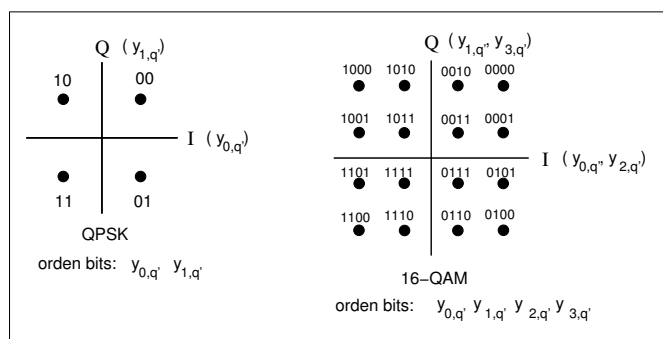


Figura 3.6: Diagramas de constelación para QPSK y 16-QAM.

En la figura 3.6 la notación $y_{u,q}$ denota los bits representando el número complejo z .

Después de mapear los datos en el diagrama de constelación, el proceso continua con la generación de los cuadros del OFDM (*OFDM frames*) para adecuarlos a la transmisión. Además de los datos que se van a transmitir, un cuadro OFDM contiene:

- celdas piloto dispersas (*scattered pilot cells*).
- portadoras piloto continuas (*continual pilot carriers*)
- portadoras TPS

A continuación se presentan los parámetros para crear los cuadros OFDM.

3.1.4.2. Cuadros OFDM

Los cuadros OFDM son formados para transportar la información útil de la señal y aquellos que se usan para la sincronización y control. Por tanto, es necesario añadir ciertos tipos de portadoras (portadoras piloto dispersas, continuas y TPS), además de las que transportan la información útil.

Cada cuadro consiste de 68 símbolos OFDM, que se enumeran del 0 al 67 y tiene una duración T_F . Cada símbolo está constituido por un conjunto de 1705 portadoras para el modo 2k y 6817 para el modo 8k y tiene una duración de T_S . Cada símbolo

contendrá una parte útil que tiene una duración T_U y un intervalo de guardia con una duración Δ , el cual es insertado antes de la parte útil. Cada cuatro cuadros es considerado como un “super-cuadro” (*super-frame*).

Las portadoras son indexadas por $k \in [k_{min} : k_{max}]$ donde $k_{min} = 0$ y $k_{max} = 1704$ para el modo 2k o $k_{max} = 6816$ para el modo 8k. El espacio entre portadoras consecutivas es $1/T_U$. Los valores para los parámetros mencionados anteriormente en el modo 2k y 8k se muestran en el cuadro 3.3.

Parámetro	modo 2k	modo 8k
Número de portadoras	1705	6817
Duración T_U	$224\mu s$	$896\mu s$
Espacio entre portadoras $1/T_U$ (aprox.)	4464 Hz	1116 Hz

Tabla 3.3: Valores numéricos para el OFDM.

Los valores T_F y T_S dependen del valor del intervalo de guardia. Este intervalo sólo puede tener 4 valores para el DVB y es un múltiplo de $T = 7/64\mu s$, que a su vez es un factor de la duración de la parte útil. En el cuadro 3.4 se muestran los valores para los parámetros restantes.

Parámetro	modo 2k				modo 8k			
Intervalo de guardia (Δ/T_U)	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Intervalo de guardia Δ	$56\mu s$	$28\mu s$	$14\mu s$	$7\mu s$	$224\mu s$	$112\mu s$	$56\mu s$	$28\mu s$
Duración símbolo $T_S = \Delta + T_U$	$280\mu s$	$252\mu s$	$238\mu s$	$231\mu s$	$1120\mu s$	$1008\mu s$	$952\mu s$	$924\mu s$

Tabla 3.4: Duración de símbolos de acuerdo al intervalo de guardia.

Las portadoras llamadas piloto, también son conocidas como señales de referencia, ya que contienen información referenciada, la cual el receptor conoce y puede interpretar. Estas señales se pueden dividir en celdas y son denominadas celdas piloto dispersas o continuas. Para detalles de éstas consultar [5].

Después de insertar las portadoras piloto y TPS, el proceso continua ejecutando la transformada de Fourier inversa que produce las 1705 o 6817 portadoras.

3.1.4.3. FFT Inversa

Este bloque es el que produce las 1705 para el modo 2k o las 6817 portadoras para el modo 8k.

Este proceso es una parte muy importante para el COFDM, ya que cómo se mencionó en la sección 2.5.4.2, la transformada discreta de Fourier inversa (IDFT) es equivalente a un proceso de multicanalización por división de frecuencias (FDM) en el transmisor y una DFT en el receptor[51].

El estándar DVB-T no determina un procedimiento o algoritmo para llevar a cabo la transformada de Fourier inversa. Sin embargo, aunque no se menciona mucho, el uso de la IFFT es ideal para este caso.

Así mismo, se puede notar que la forma de onda emitida durante cada periodo de un símbolo transmitido, depende de un valor complejo K que define la amplitud compleja de las K portadoras activas para ese periodo. Esto produce una función que tiene un gran parecido con una transformada de Fourier discreta (DFT). Por tanto es recomendable que la implantación de la IFFT se lleve a cabo con algoritmos de la IDFT[5].

El resultado de la IDFT producirá muestras que corresponden a la parte “útil” (con duración T_u) de cada símbolo. Enseguida, se inserta una copia de las últimas $N\Delta/T_u$ de estas muestras al inicio para añadir el intervalo de guardia. Posteriormente se realiza el proceso de “*up-conversion*” que genera una señal centrada en la frecuencia f_c . Estos últimos procesos se explican a continuación.

3.1.4.4. Intervalo de guardia

Como se mencionó en la sección 2.5.4.2, el espacio o intervalo de guardia, es útil en el esquema COFDM para contrarrestar los efectos de los retrasos en las múltiples rutas que sigue una señal, desde el transmisor hasta el receptor.

También, el intervalo de guardia es útil para identificar el inicio de un símbolo en un receptor.

Los intervalos de guardia permitidos para la transmisión de una señal son sólo cuatro: 1/4, 1/8, 1/16 y 1/32 de la duración de un símbolo.

Después de la inserción del intervalo de guardia por cada símbolo en la señal, el siguiente paso es convertir la señal de analógica a digital, filtrarla y realizar el proceso de “*up-conversion*”.

3.1.4.5. Upconversion

Después de convertir la señal digital a analógica, ésta se prepara para su transmisión.

Este proceso convierte la frecuencia de una señal a una frecuencia apta para la transmisión. Aquí es donde se elige la frecuencia para transmitir la señal en una banda determinada (VHF o UHF).

El resto de la cadena de transmisión es mandar la señal a una antena y transmitirla por el aire.

Los detalles y discusión de los parámetros usados por la modulación se presentan en la sección 4.6. La siguiente sección mencionará las características del ATSC, de la misma forma que se hizo para el DVB-T.

3.2. ATSC

Las siglas ATSC provienen de *Advanced Television Systems Committee* (Comité de Sistemas de Televisión Avanzada) fundado en Estados Unidos de América desde 1982, con el propósito de investigar las nuevas tecnologías para el desarrollo de la televisión. Está formado por corporaciones, asociaciones e instituciones educativas, proponen estándares para los sistemas de televisión avanzada incluyendo televisión de alta definición. En general, la industria de la televisión en E.U. es representada por este grupo donde se incluyen estaciones transmisoras, compañías de cable, proveedores de servicios satelitales, fabricantes, compañías de telecomunicaciones y cómputo y empresas relacionadas con investigación en imágenes en movimiento. Trabajando en conjunto con el Comité Asesor para la televisión digital, el cual fue formado en 1987 para aconsejar a la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de Estados Unidos de América, los asuntos técnicos y públicos de la televisión avanzada. La ATSC fue responsable de desarrollar y documentar las especificaciones para la ATV (*Advanced Television*) basado en el sistema de la “Gran Alianza”.

La “Gran Alianza” fue formada en mayo de 1993 por diversos grupos importantes en el campo de la televisión en E.U. para realizar una propuesta de un sistema de televisión cien por ciento digital. Éste fue basado en cuatro propuestas realizadas en 1990 y que estuvieron en continua competencia para ganar la exclusiva. Estas propuestas contemplaban ya la televisión de alta definición (HDTV). El prototipo de esta alianza fue construido de manera modular y consideró lo mejor de cada una de las cuatro propuestas. Al final, cada uno de los módulos fue armado por diferentes compañías pertenecientes a esta alianza. El sistema fue terminado y probado en agosto de 1995.

La ATSC consideró y desarrolló los consensos industriales de varios formatos de la televisión en definición estándar (SDTV), los cuales fueron añadidos al sistema propuesto por la Gran Alianza para formar el sistema completo de televisión estándar. Entre otras cosas, los formatos propuestos contemplaban la interoperabilidad con los estándares de televisión existentes y la convergencia de los diferentes dispositivos de

televisión y cómputo. Finalmente el sistema fue aprobado por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de ese país, en noviembre de 1995.

3.2.1. Requerimientos

Los puntos principales que motivaron la construcción de un sistema digital para la ATSC, fue el poner práctica los estándares adoptados, con miras a obtener un sistema de alta calidad de video y audio, que permitiera mantener homogéneos los servicios de televisión.

Algunos de los requerimientos que se pueden puntualizar son los siguientes:

- representar video, audio y datos con la menor cantidad de bits posible (maximizar la información pasada a través del canal), preservando el nivel de calidad requerido para la aplicación
- el sistema debe tener la capacidad de “convivir” con el sistema analógico actual (NTSC), siendo importante la no interferencia entre canales (ICI) de ambos servicios
- el sistema debe mantener el ancho de banda usado por el estándar analógico (6 MHz)
- el envío de una señal en formato de alta definición es una característica deseable

Como se observará a lo largo de esta sección, todos los requerimientos antes mencionados, fueron cubiertos.

El estándar de televisión digital fue diseñado para transmitir video y audio de alta calidad junto con datos auxiliares sobre un canal de 6 MHz. Este fue uno de los principales requerimientos, ya que se pensaba que como mínimo debería cubrir el ancho de banda que usa actualmente la televisión analógica. El sistema entrega una tasa de datos de 19.38 Mbps para televisión digital terrestre y alrededor de 38 Mbps para televisión digital por cable. Con esto, se tiene 5 veces más resolución que la televisión convencional (NTSC) [9]. En la figura 3.7 se presenta un diagrama a bloques del sistema.

En él se pueden apreciar cuatro bloques principalmente:

- codificación de fuente
- multiplexaje y transporte
- codificación de canal
- transmisión RF

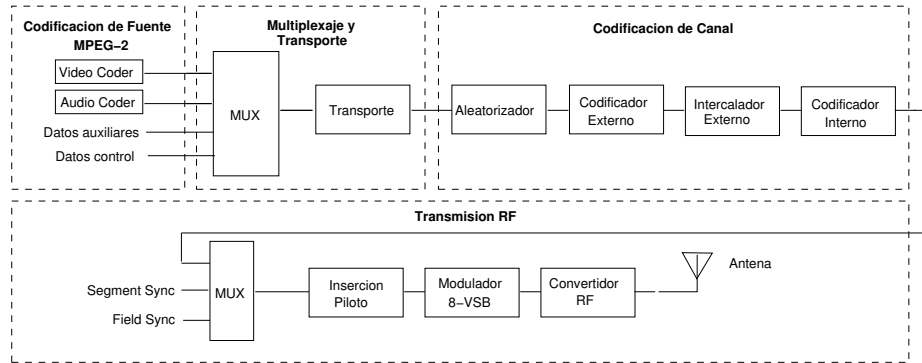


Figura 3.7: Diagrama a bloques del sistema ATSC.

En las secciones siguientes se presentan las características principales de dichos bloques.

NOTA: La información referida en las siguientes secciones fue obtenida de algunos documentos de la descripción del estándar, estos son:

1. *A 53, ATSC Standar: Digital Television System, revision B* [9]
2. *A 54, Recomend Practice: Guide to the Use of the ATSC Digital Television Standard* [12]

3.2.2. Codificación de fuente

El bloque de codificación de fuente lleva a cabo la codificación y compresión de video y audio. Este último incluye los datos de control, datos de acceso condicional, datos asociados con los servicios del programa en video y audio. Este sistema emplea la sintaxis de flujos de datos del MPEG-2 para codificación de video y el estándar AC-3 para la codificación del audio.

Como tal, no hay formatos de entrada restringidos para este estándar. Para la entrada de la codificación de fuente se pueden usar aquellos que ya existan, por ejemplos los mostrados en la tabla 3.5. Los formatos que si son fijos son los de salida y para este estándar, se debe garantizar que todo decodificador ATSC pueda decodificar cada uno de los formatos establecidos.

Estandar de video	Líneas activas	Muestras activas/línea
SMPTE 274M	1080	1920
SMPTE 296M	720	1280
ITU-R BT.601-4	483	720

Tabla 3.5: Formatos de entrada de video estandarizados.

Estándares de televisión digital

Los algoritmos usados para comprimir el video deben considerar la sintaxis del “perfil principal” (*Main Level*) del MPEG-2 (ver sección 2.1.1.1), hasta en sus máximos niveles (*Main Profile at High Level-MP@HL*).

El formato de salida después de la compresión tiene que considerar las características mostradas en la tabla 3.6. Ahí se muestran los 18 formatos de despliegue soportados por ATSC.

Sistema	Formato	Líneas verticales	Píxeles/línea	Prop. aspecto	Modo Expl.	Tasa cuadros (fps)
HDTV	1080p	1080	1920	16:9	Progresivo	24
	1080p	1080	1920	16:9	Progresivo	30
	1080i	1080	1920	16:9	Entrelazado	30
	720p	720	1280	16:9	Progresivo	24
	720p	720	1280	16:9	Progresivo	30
	720p	720	1280	16:9	Progresivo	60
SDTV (EDTV)	480p	480	704	16:9	Progresivo	24
	480p	480	704	16:9	Progresivo	30
	480p	480	704	16:9	Progresivo	60
	480p	480	704	4:3	Progresivo	24
	480p	480	704	4:3	Progresivo	30
	480p	480	704	4:3	Progresivo	60
	480p	480	640	4:3	Progresivo	24
	480p	480	640	4:3	Progresivo	30
	480p	480	640	4:3	Progresivo	60
SDTV	480i	480	704	16:9	Entrelazado	30
	480i	480	704	4:3	Entrelazado	30
	480i	480	640	4:3	Entrelazado	30

Tabla 3.6: Formatos de compresión de salida.

Las tasas de muestreo varían según el estándar de video de entrada, éstas se pueden ver en la tabla 3.7, donde el número de bits para cada muestra de luma y crominancia es de 8 bits.

Formato	Líneas totales por cuadro	Píxeles totales por línea	Tasa cuadros (fps)	Tasa muestreo (MHz)
1080 × 1920	1125	2200	24, 30	74.25
720 × 1280	750	1650	60	74.25
480 × 704	525	858	59.94	13.5

Tabla 3.7: Tasas de muestreo.

3.2.3. Codificación de audio

ATSC usa el estándar AC-3 para la compresión del audio. Las características de éste se presentan principalmente en el documento A/52 del ATSC [8].

El algoritmo de compresión de AC-3 puede codificar de 1 a 5.1 (en realidad son 6, el canal 0.1 es un canal de baja frecuencia) canales de una fuente de audio en representación PCM, de un flujo de datos serial que puede tener una tasa desde los 32 kbps a 640 kbps.

Las tasas de muestreo para codificar el audio pueden ser 48, 44.1 y 32 KHz. Mientras que las tasas de bit pueden ser de 32, 40, 48, 56, 64, 80, 96, 112, 128, 160, 192, 224, 256, 320, 384, 448, 512, 576 y 640 Kbps.

Los modos de codificación de los canales se presentan en la tabla 3.8, indicando como se identifican, el número de canales y cuales están involucrados. En la tabla 3.8 la L es de *Left* (canal izquierdo), la R es de *Right* (canal derecho), la C de *Center* (canal central), la S de *Surround* (canales envolventes- *surround*), la SR de *Surround Right* y la SL de *Surround Left*. Ch1 y Ch2, se refieren a dos canales mono independientes.

Modo	Num. canales	Canales
1 + 1	2	Ch1, Ch2
1/0	1	C
2/0	2	L, R
3/0	3	L, C, R
2/1	3	L, R, S
3/1	4	L, C, R, S
2/2	4	L, R, SL, SR
3/2	5	L, C, R, SL, SR

Tabla 3.8: Modos de codificación de audio en AC-3

Después de codificar el video y el audio, la información obtenida hasta este proceso tiene que ser multiplexada (junto con los datos auxiliares) en un sólo flujo de datos (*stream*). A continuación se explica de manera breve como se genera el flujo de datos multiplexados en la capa de transporte.

3.2.4. Capa de transporte

El estándar ATSC usa la especificación de la sintaxis del MPEG-2 (definida en el documento ISO/IEC 13818-1) para el empaquetamiento y multiplexaje de video, audio y señales de datos. La sección 2.3 describe de manera general el empaquetamiento en el MPEG-2.

ATSC usa las áreas de datos privados de MPEG-2 para crear extensiones estandarizadas. Estas áreas se refieren a datos que no son definidos por MPEG-2 y que ATSC usa para definir más tablas de las usadas por MPEG-2.

El estándar MPEG-2 especifica que la entrada para el sistema de transporte deben ser flujos de datos elementales MPEG-2 (*elementary streams*). De esta forma, es posible usar otro esquema de codificación (*compresión*) diferente al MPEG, es decir, se puede usar un codificador diferente, siempre y cuando la entrada al subsistema de transporte sean paquetes de flujos elementales (PES) con la sintaxis especificada por MPEG-2. Esto puede realizarse para aplicaciones muy particulares, ya que se tendría que construir un decodificador para ese codificador particular³.

Los datos provenientes de la codificación de fuente se empaquetan en bloques de 188 bytes. Se ocupa 1 byte para la información de sincronía y el resto para la “carga útil”. La sintaxis del paquete y como es distribuida la información puede consultarse en [9].

Una de las características principales de ATSC es que la salida del bloque de transporte, es un flujo MPEG-2 con una tasa constante T_r en Mbps, cuando se transmite en 8-VSB y $2T_r$, cuando se transmite en 16-VSB [9], donde:

$$T_r = 19,30 \dots \text{ Mbps}$$

Los comentarios y discusión de la tasa de datos se presenta en la sección 4.7, cuando se compare con las del otro estándar en estudio.

A continuación se muestran las características del proceso de codificación de canal.

3.2.5. Codificación de canal

Los procesos que involucra el estándar para la codificación de canal son los siguientes:

- Aleatorización
- Codificación externa (Reed-Solomon)
- Entrelazado externo
- Codificación interna (*Trellis*)

³Incluso se han desarrollado codificadores para codificar video con MPEG-4 (referencia: www.envivio.com)

Es así que la codificación de canal primero distribuye los datos de manera aleatoria, posteriormente los protege contra errores usando la codificación Reed-Solomon, enseguida son entrelazados nuevamente y se pasan a un codificador convolucional. Estos procesos no son aplicados al byte de sincronía del paquete de transporte del MPEG-2. Por último y antes de la modulación, se insertan las señales de sincronía y son multiplexadas juntos con los datos de la codificación de canal.

3.2.5.1. Aleatorización

Los datos de entrada son aleatorizados sin incluir los bytes de sincronía. Para esto se usa una secuencia binaria pseudo aleatoria (PBRs) de 16 bits, el cual es inicializado al principio de un campo de datos (*Data field*). La secuencia es generada con un registro de corrimiento de 16 bits, el cual tiene 9 lazos de retroalimentación. Se usan 8 salidas del registro de corrimiento para aplicar una XOR al correspondiente bit de entrada. El polinomio generador es el siguiente:

$$g(X) = 1 + X + X^3 + X^6 + X^7 + X^{11} + X^{12} + X^{13} + X^{16} \quad (3.1)$$

El valor de inicialización es F180 hex y ocurre durante el intervalo de la sincronía del segmento de datos. El diagrama del aleatorizador se muestra en la figura 3.8.

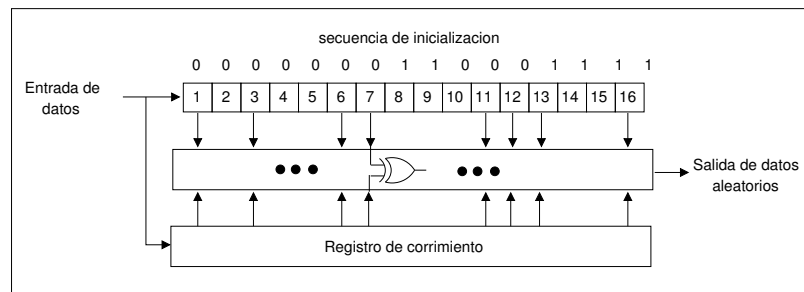


Figura 3.8: Aleatorizador de datos del ATSC.

Los comentarios y discusión acerca de los parámetros que usa se mencionan en la sección 4.2, cuando se compare con el proceso llevado a cabo por el otro estándar en estudio.

3.2.5.2. Codificación externa

La codificación externa la lleva a cabo un codificador Reed-Solomon con los siguientes parámetros: $N = 207$, $K = 187$ y $m = 8$. Que añade 20 bytes de redundancia por cada bloque de 187. Con base en la ecuación 2.3 presentada en la sección 2.4.1.1, la capacidad de corrección de errores del código es $t = 10$ errores.

Los detalles del codificador pueden consultarse en [9]. Los comentarios acerca de la codificación y su comparación con el usado por el otro estándar se presentan en la sección 4.3.

3.2.5.3. Entrelazado externo

Las características de un entrelazador y como influye en la codificación de canal se presentan en la sección 2.4.4.1.

El entrelazador usado por el estándar tiene 52 ramas. Está compuesto de registros de corrimiento con característica de cola tipo FIFO (*First-In First-Out*- primero que entra, primero que sale). La más grande de las FIFOs tiene 204 bytes, por lo que cada byte de entrada será retrasado 4, 8, 12, ..., 204 bytes, dependiendo de su índice. Los bytes de sincronía no son entrelazados.

Las características del entrelazador son:

$i = 52$ Número de ramas (por tanto, número de registros de corrimiento)

$L = 208$ (logitud máxima del paquete)

$M = (L/i) \times j$ (tamaño de la FIFO en bytes)

j : índice que va de 0 a $j - 1$

En la figura 3.9 se muestra el entrelazador para el ATSC.

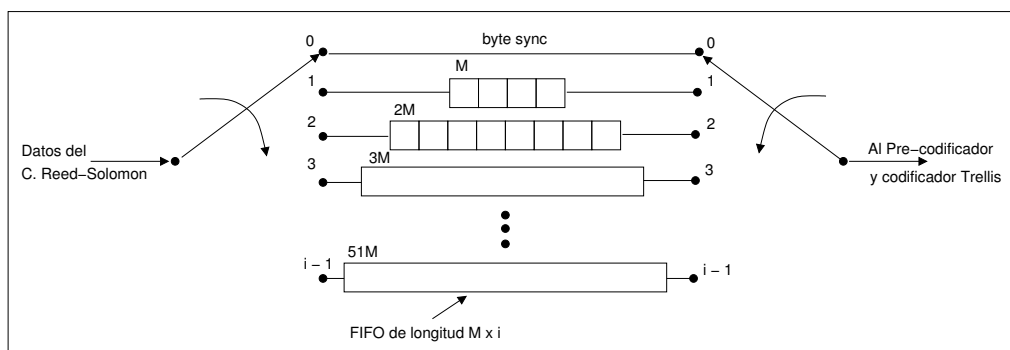


Figura 3.9: Entrelazador convolucional del ATSC.

La salida del entrelazador va directamente al codificador *trellis* (codificación interna).

Los comentarios acerca de los parámetros del entrelazador y su comparación con el usado por el otro estándar estudiado, se presenta en la sección 4.4.

3.2.5.4. Codificación interna

La codificación interna en el ATSC se lleva a cabo con un codificador convolucional con tasa 1/2. Añade un bit de redundancia por cada dos de entrada. Sin embargo, usa sólo un codificador con tasa 1/2 y el otro bit pasa a la salida tal cual (sin codificación). De esta forma los 3 bits de salida, se convertirán en los 8 niveles del 8-VSB. También, en este proceso debe usarse un codificador de 4 estados, por lo que cada codificador tendrá sólo 2 registros de corrimiento.

El proceso global usa 12 codificadores convolucionales actuando sobre 12 grupos de símbolos entrelazados. Las salidas de los codificadores son multiplexados para posteriormente ser mapeados a los niveles del VSB. En la figura 3.10 se presenta el diagrama del codificador *trellis*, pre-codificador y mapeador de símbolos.

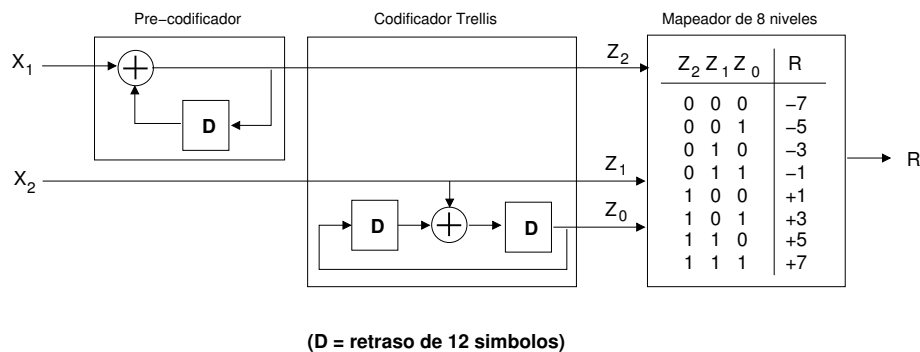


Figura 3.10: Codificador *trellis*, pre-codificador y mapeador del ATSC.

Para más detalles acerca de la codificación interna consultar [9].

Los comentarios de los parámetros y su comparación con el método usado por el otro estándar en estudio se presenta en la sección 4.5.

Los datos antes de mapearse, son organizados en “cuadros de datos” (*Data Frames*) para su transmisión. Un cuadro está formado por dos campos (*Fields*), donde cada uno está formado por 313 segmentos de datos (*Data Segments*). Cada segmento está compuesto por 832 símbolos y la información que llevan proviene de los paquetes de 208 bytes (188 bytes del MPEG-2 más 20 del Reed-Solomon). Los primeros 4 símbolos de cada segmento corresponden a la señal de sincronía, incluyendo el byte de sincronía del paquete MPEG. Los restantes 828 símbolos son transmitidos como señales de 8 niveles, por lo que cada uno lleva 3 bits. Por tanto, cada segmento de datos lleva $828 \times 3 = 2484$ bits. Esto es:

$$187 \text{ bytes de datos} + 20 \text{ bytes del Reed-Solomon} = 207 \text{ bytes}$$

$$207 \text{ bytes} \times 8 \text{ bits/byte} = 1656 \text{ bits}$$

por cada 2 de los 1656 se produce uno más, esto es: $(3/2) \times 1656 = 2484$ bits

A cada “cuadro de datos” (*Data Frame*) se le insertan dos señales de sincronía. Estas señales son conocidas como sincronía del segmento de datos (*Data Segment Sync*) y sincronía del campo de datos (*Data Field Sync*). Estas señales se insertan junto con los datos provenientes de la codificación de canal por medio de un multiplexor.

Como se mencionó anteriormente, la señal de sincronía de 4 símbolos (de sólo dos niveles) se inserta al inicio de cada segmento de datos. El patrón que tiene la señal es 1001 (donde el nivel +5 corresponde a 1 y el nivel -5 corresponde a 0) y es repetido cada $77,3\mu s$.

La señal de sincronía de campo indica el inicio de cada cuadro. Esta señal es la misma que la del segmento, la única diferencia es que se identifica después de cada 313 segmentos. La figura 3.11 presenta como está compuesto el cuadro VSB.

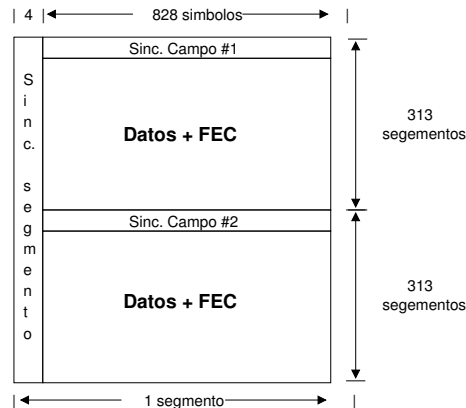


Figura 3.11: Estructura del cuadro VSB.

Después de insertar las señales de sincronía, el proceso continua con la modulación de la señal.

3.2.6. Modulación

El proceso de modulación involucra otros procesos previos a la adecuación de la señal para su transmisión, estos son:

- Mapeo de bits a símbolos
- inserción de señal piloto
- proceso VSB

Las características de los puntos anteriores se muestran a continuación.

3.2.6.1. Mapeo a símbolos

Los bits de salida del codificador convolucional son mapeados a los respectivos niveles de voltaje según una tabla establecida. El mapeo se presenta en la tabla 3.9.

Bits de salida (Trellis)	Nivel
0 0 0	-7
0 0 1	-5
0 1 0	-3
0 1 1	-1
1 0 0	+1
1 0 1	+3
1 1 0	+5
1 1 1	+7

Tabla 3.9: Mapeo de bits a símbolos VSB

Después del mapeo, se le suma un valor de 1.25 a cada valor nominal presentado en la tabla, para efectos de la señal piloto.

3.2.6.2. Portadora piloto

A la señal en banda base se le debe agregar una pequeña señal piloto. Esto con la finalidad de adquirir la portadora en el receptor.

Para crear esta portadora es necesario sumar un valor de 1.25 a los niveles mapeados, incluyendo los valores de sincronía. Esta señal piloto de bajo nivel sólo añade 0.3 dB a la potencia total de la señal. Aunque las ventajas son que ayuda a la recuperación de la portadora independiente de los datos y proporciona una recuperación confiable de la portadora aún por debajo de los 0 dB de la proporción señal-ruido (S/N) [20].

La frecuencia de esta señal depende del rango de frecuencias del canal. Para esto se le debe agregar un *offset* de 309.440559 kHz al límite bajo del rango de frecuencias, por ejemplo para el canal 45 (656-662 MHz), la frecuencia nominal de la portadora piloto es 656.309440559 MHz [12].

3.2.6.3. VSB

En la modulación, la señal en banda base es filtrada con un filtro complejo (filtro pre-equalizador) que opera en el canal I (ya que no hay canal Q. Ver detalles de modulación en la sección 2.5.7). Este es el encargado de la forma plana del espectro de frecuencia de la señal IF.

El filtrado produce las componentes *in-phase* y *quadrature*, para la modulación. Estas son convertidas en señales analógicas y usadas para modular la portadora IF, creando una banda vestigial por medio de la cancelación de la banda lateral.

El siguiente proceso antes de transmitir la señal por la antena se conoce como *up-conversion*. A continuación se muestran algunos aspectos de este proceso.

3.2.7. Upconversion

Los transmisores de hoy en día realizan el proceso de modulación en dos pasos. El primero consiste en la modulación de la señal en banda base en la portadora IF, la cual tiene la misma frecuencia para todos los canales. El siguiente, consiste en el traslado al canal RF deseado [9].

El proceso de *up-conversion* traslada el espectro de la señal IF al canal RF deseado. Donde la frecuencia nominal del oscilador (*RF upconverter oscillator*) en DTV, es la misma a la usada en los transmisores analógicos.

Existen algunos aspectos a considerar antes de que la señal sea pasada a la antena para su transmisión, pero a grandes rasgos se puede considerar que los puntos mencionados hasta aquí, son por los que pasa la señal digital antes de transmitirse.

El siguiente capítulo presenta la discusión y comparación de los parámetros que usan ambos estándares. Se presentan sus ventajas y desventajas, además de comantar sobre los procesos de evaluación (en la práctica y en pruebas de laboratorio) que hicieron algunas organizaciones.

Capítulo 4

Comparación de los estándares ATSC y DVB-T

La comparación de los estándares de televisión digital ATSC y DVB-T es una tarea compleja, ya que la descripción de los estándares para la codificación y transmisión no es la misma. Es decir, los estándares llevan a cabo procesos similares para transmitir la señal a los receptores, pero no usan los mismos métodos ni parámetros, como de alguna forma se pudo notar en el capítulo anterior. En este sentido, comparar los sistemas puede ser una tarea injusta, porque los estándares en principio tenían requerimientos iniciales diferentes, aunque al final, la función es proporcionar video y audio con calidad alta. Esto hace que los estándares tengan desempeños diferentes, más allá de ser un sistema para un mismo propósito. Aún así, se pueden indicar ventajas y desventajas de uno u otro y enfatizar en aquellos comentarios que realizaron diversas instituciones o países que hicieron el análisis de desempeño de los estándares. Claro está que la determinación o aseveración al indicar que uno es mejor que el otro, es muy subjetiva. En este capítulo se mencionarán aquellas diferencias que tienen los sistemas y se comentará acerca de los aspectos que intervienen en un proceso de adopción, basándose en mediciones, comentarios y sugerencias, presentados en documentos que realizaron el análisis de desempeño (*performance*) de los estándares.

La discusión comenzará recorriendo los bloques que componen los sistemas desde la codificación de fuente hasta los aspectos involucrados en la transmisión de la señal. Para posteriormente hacer mención de características globales de los sistemas y su impacto en la práctica.

4.1. Codificación MPEG

Ambos sistemas usan la definición del estándar MPEG-2 como su método base de codificación de video y empaquetamiento de los diferentes flujos en su capa de transporte. La longitud de los paquetes que forman el flujo de salida es de 188 bytes.

Comparación de los estándares ATSC y DVB-T

Ambos estándares soportan el perfil principal a nivel principal (MP@ML) y perfil principal a nivel alto (MP@HL), de la especificación del MPEG para proporcionar su salida de video digital, permitiendo proporcionar video digital a una resolución de definición estándar (SDTV) y alta definición (HDTV). En este sentido sólo ATSC obliga a soportar 18 formatos de salida (combinaciones entre resolución, proporción del aspecto, modo de exploración y tasa de cuadros) para sus decodificadores, mientras que DVB-T no y considera algunos como opcionales. Lo anterior se debe a que el DVB-T no contempla al formato de la televisión de alta definición como esencial en sus formatos de transmisión. Teóricamente lo soporta, pero en muchos lugares donde se ha adoptado no es considerado como algo primordial y no obliga a que los dispositivos receptores forzosamente decodifiquen el formato (en la sección 4.10.5 se presenta la discusión acerca de este tema).

La única diferencia que presentan en la codificación de fuente, es la forma de codificar el audio.

El estándar ATSC usa el método de codificación Dolby AC-3 desarrollado en Estados Unidos, permitiendo hasta 5 canales de audio (5.1). Por otro lado, el DVB-T usa el método denominado Capa II del MPEG (*MPEG-1,2 Layer II*).

Las diferencias entre uno y otro método de codificación de audio, radica principalmente en el manejo de los modos multicanal, como se mencionó en la sección 2.2. El MPEG-2 Capa II añade la característica multicanal a partir de que surgió el AC-3. Esto lo pone en cierta desventaja dado que no consideró esa característica desde su diseño, en cambio el AC-3, sí. La desventaja es que se requieren aproximadamente 640 Kbit/s para codificar en ese modo usando MPEG-2 Capa II, mientras que en el AC-3 se hace en un rango de 384 a 448 Kbit/s [70]. Otra diferencia también importante es que en las pruebas de campo realizadas en diversos países, el Dolby AC-3 ha mostrado calidad muy superior a la multicanal propuesta por DVB-T [69, 32].

Esto ha provocado que países que adoptaron el estándar DVB-T hayan establecido algún mecanismo para considerar el Dolby AC-3 como su método de codificación de audio. Por ejemplo, Australia adoptó el estándar DVB-T pero se inclinó por el sistema Dolby para la codificación del audio. Finalmente, se estableció que el estándar en Australia debería soportar la codificación tanto MPEG-2 Capa II como Dolby AC-3 [32].

Lo anterior provocó que DVB-T, modificará la descripción de la codificación de audio, para incluir Dolby AC-3. La nueva especificación técnica del DVB-T v1.5.1 de mayo del 2004 describe los lineamientos para incluir uno o mas flujos de bits (*bitstream*) generados con el sistema AC-3, en el flujo de transporte del DVB-T [28].

El mismo caso se presentó en Singapur, donde se adoptó el estándar DVB-T, pero uno de los requerimientos fue que el sistema debería soportar la decodificación de audio en MPEG-2 Capa II y Dolby AC-3 [69].

En términos generales, el sistema Dolby AC-3 ha presentado más ventajas que el considerado por el MPEG, tanto tecnológicamente, como en penetración en el mercado.

Por otra parte, a partir de que los datos de video, audio y datos auxiliares son codificados, se genera un solo flujo de datos, realizando multiplexaje o canalización junto con datos de control. Ambos estándares optaron por elegir la capa de transporte del MPEG-2. De esta forma, el flujo de datos generado es dividido en paquetes de 188 bytes. Cada uno de estos paquetes ingresan al bloque de codificación de canal. Como se ha mencionado anteriormente, este proceso añade más bytes y procesa la información para protegerla contra errores, generados regularmente durante la transmisión de la señal.

A continuación la discusión se centrará en la etapa de codificación de canal. Considerando los procesos que integran esta etapa por cada uno de los estándares y que fueron mostrados en las figuras 3.1 y 3.7.

4.2. Dispersión de energía

Ambos estándares realizan un proceso de aleatorización a los bits del flujo de datos provenientes del MPEG. El resultado de dicho proceso genera un espectro de frecuencias plano, característica deseable en un sistema de transmisión. Como se menciona en la sección 2.4.3, la aleatorización de los datos, hace que la señal DTV no interfiera con su contraparte analógica o señal NTSC o PAL; esto debido a que ambas señales ocupan un ancho de banda de 6 u 8 MHz. También se menciona que los bits del flujo de datos son modificados generando una secuencia pseudo aleatoria por medio de un polinomio generador.

El polinomio generador del estándar ATSC (sección 3.2.5.1) es diferente al del DVB-T (sección 3.1.3.1), obteniendo así secuencias pseudo aleatorias diferentes para mismas entradas. La diferencia entre ellos es el número de compuertas y el arreglo de los registros de corrimiento, pero esencialmente cumplen con la misma función. La única ventaja que presenta el usado por ATSC es que el polinomio fue adaptado para la codificación de televisión digital terrestre, mientras que el usado por DVB-T es el mismo al usado en el estándar DVB-S (satelital), donde podría tener consecuencias en el manejo de interferencias con la señal a diferentes frecuencias (o canales)¹. Si el propósito es enfrentar interferencias entre las señales analógicas, se podría esperar

¹Más que nada porque las frecuencias para transmisión satelital son mucho mayores a las usadas por transmisión terrestre

que el ATSC enfrente mejor esta situación, por el hecho de que el ATSC conviviría más con el NTSC en un escenario de transmisión de señal abierta, que una señal que se usará vía satélite.

La etapa siguiente presenta las diferencias que tienen los estándares en cuanto a la corrección de errores por medio de la codificación Reed-Solomon.

4.3. Codificación externa

La codificación externa en ambos estándares se lleva a cabo con un código de Reed-Solomon. Como se mencionó en la sección 2.4.4, este tipo de codificación ayuda a combatir los efectos de las ráfagas de ruido en el canal.

El estándar ATSC usa un código Reed-Solomon con $N = 207$, $K = 187$ y $m = 8$. Con la capacidad de corregir hasta $t = 10$ errores, agregando 20 bytes de redundancia. Por otro lado, el estándar DVB usa un código Reed-Solomon con $N = 204$, $k = 188$ y $m = 8$ con la capacidad de corregir hasta $t = 8$ errores, agregando 16 bytes de redundancia.

En este sentido, el estándar ATSC maneja mayor protección para sus paquetes, teniendo la capacidad de corregir 2 errores más que el DVB-T. Una de las posibles razones por las que DVB-T usó dichas características para su código, puede ser porque dicho código es el mismo que usa el estándar satelital europeo (DVB-S). De aquí se percibe que para el estándar DVB-T, el manejo de la compatibilidad entre sus estándares fue primordial. Desde la sección pasada se pudo notar, que también el proceso usado para la aleatorización es el mismo usado por el estándar satelital europeo.

Para Estados Unidos de América, casos como el anterior no se presentaron, ya que en Estados Unidos el estándar satelital usado es precisamente el DVB-S y más allá de buscar compatibilidad con éste, ellos optaron por generar un estándar más robusto que permita el envío de HDTV.

La literatura revisada no presentó una comparación para saber si el código RS usado por ATSC requiere más o menos E_b/N_0 que el usado por DVB-T para diversos tipos de canales (por ejemplo *AWGN*) y tipos de modulación, como se presenta para algunos códigos RS en [64]. Sin embargo, el desempeño o *performance* puede ser muy similar en cuanto a la proporción entre potencia y ruido, ya que la implantación de cada uno de estos códigos puede realizarse con códigos de Reed-Solomon que tengan parámetros proporcionales, en relación a la longitud, dimensión y corrección de errores. Por ejemplo, el código usado en DVB-T es derivado de un código de Reed-Solomon con longitud $N = 255$, dimensión $K = 239$ y $t = 8$ y para adecuarse a los parámetros que debe usar el DVB-T, se agregan 51 bytes igual a 0 antes de los de información a la entrada de este código [5]. En el caso del ATSC, no se encontraron

referencias que indicaran algo similar, pero es muy probable que se siga la misma lógica, ya que en la práctica, los dispositivos son más eficientes si se trabajan en potencias de 2.

Por otro lado, en algunas referencias como en [74] se menciona que las diferentes implantaciones de los códigos entre los estándares, puede resultar en una “pequeña diferencia” en la evaluación de la proporción portadora-señal (C/N). Asimismo en [67] se indica que dadas las características de los codificadores RS, el sistema ATSC tiene una ventaja de 0.5 dB de la proporción portadora-ruido (C/N), con relación al DVB-T, sin indicar la razón de dicho resultado. Aún así esa diferencia (0.5 dB) es la misma que se obtiene al evaluar algunos códigos de Reed-Solomon con longitud y dimensión iguales, pero con diferencia de corrección de errores de 2 [64].

Ambos estándares acompañan a la codificación RS con un proceso de entrelazado, el cual ayuda a contrarrestar los efectos de ráfagas de ruido. En la siguiente sección se presenta la comparación de sus características.

4.4. Entrelazado externo

Tanto el estándar ATSC como el DVB-T, llevan a cabo un proceso de entrelazado externo, después de la codificación con Reed-Solomon.

En la sección 2.4.4.1 se describió este proceso y se mencionó que básicamente lo que realiza es modificar la ubicación original de los datos dentro del flujo. El estándar ATSC usa un método de entrelazado formado por 52 ramas ($B = 52$), donde cada j -ésima rama ($j = 0, 1, \dots$) contiene un registro de corrimiento de $j \times M$ celdas que contienen un byte. En este caso $M = 4$ (ver figura 3.9). De acuerdo a estos valores, cada byte consecutivo es desplazado $N = 208$ bytes en el flujo de salida y entre ellos existen $M = 4$ bytes pertenecientes al mismo paquete protegido (flujo de 208 bytes original). En el caso del estándar DVB-T, los valores de su entrelazador externo son $B = 12$, $M = 17$ y $N = 204$ (ver figura 3.3). Lo cual quiere decir que entre bytes consecutivos hay 17 bytes que pertenecen al mismo paquete protegido, lo cual lo hace más vulnerable que el usado por ATSC, ya que ráfagas de ruido de 208 bytes, puede afectar hasta 18 bytes del mismo paquete, mientras que para ATSC sólo podría afectar hasta 4 bytes. Esto hace que el código RS del DVB-T sólo corrija el 44.4% de los bytes, mientras que el ATSC puede corregir todos ellos.

Ya que en los sistema de transmisión de televisión digital, la codificación Reed-Solomon junto con el entrelazado pueden ser vistos como un sólo proceso (denominado codificación externa), su desempeño ayuda a mitigar los efectos del ruido impulsivo y la interferencia co-canal [74]. Además en algunos estudios del análisis del desempeño de estos estándares, se muestra una ventaja de 0.5 dB de diferencia, de la proporción portadora-señal (C/N) a favor del ATSC, con respecto al DVB-T

[74].

Posterior a la codificación externa, viene un proceso de codificación interna.

4.5. Codificación interna

Los dos estándares realizan procesos diferentes para la codificación interna. ATSC está basado en codificación convolucional de tasa fija $2/3$, que adaptará los bits codificados al proceso de modulación, mientras que DVB-T usa un codificador convolucional de tasa variable junto con un patrón de perforación (*punctured*), posteriormente también realiza otros procesos para adaptar los bits de salida a la modulación (mapeos).

El estándar ATSC usa un codificador de tasa $R = 2/3$, donde el primer bit no es codificado, pero es pre-codificado, mediante un mecanismo que ejerce un retraso en él. A su vez, el otro bit es codificado con un código convolucional de tasa $R = 1/2$. La codificación se basa en un método conocido como *Trellis Coded Modulation*, que usa un código convolucional de tasa $1/n$, adaptado a las características de la modulación; por ejemplo, 8-VSB para este estándar. En este caso $n = 2$, por lo que se usa un codificador convolucional de tasa $1/2$. Al codificador de tasa $R = 2/3$ entran 2 bits y salen 3, mismos que se necesitan para mapear las 8 formas de onda que requiere 8-VSB.

En el mapeo se usan 12 grupos de codificadores internos alimentados por un entrelazador de bytes, el cual generaría un sub-proceso en paralelo, aunque las salidas son leídas secuencialmente. De esta forma se crean secuencias para organizar cada símbolo proveniente del codificador en los cuadros de datos (*Data Frame*), que se crean en la transmisión (figuras 3.10, 3.11).

El estándar DVB-T por su parte, usa un codificador convolucional perforado (*punctured*), el cual tiene como código base (o “madre”), uno de tasa $R = 1/2$ con 64 estados (6 celdas en el registro de corrimiento). Presenta algunas ventajas ya que la tasa de codificación interna puede variarse. Así, es posible usar además, tasas de $2/3$, $3/4$, $5/6$ y $7/8^\dagger$, donde cada código tiene su patrón de perforación. Serializando también los bits de salida, éstos alimentan a un entrelazador interno, el cual tiene dos sub-procesos, uno a nivel de bit y otro a nivel de símbolo, para mapearlos en la modulación (figuras 3.4 y 3.5).

El proceso de codificación convolucional usado, en general aporta una ganancia denominada “ganancia de codificación”, esta ganancia puede ir de los 2 a los 6 deci-

[†] Regularmente los códigos convolucionales perforados usan un código de tasa $1/n$, donde $n = 2, 3, \dots$, para obtener tasas más pequeñas, usando este código en paralelo junto con el patrón de perforación.

beles, dependiendo de las características, ya sea que se use decodificación suave o dura (ver sección 2.6).

Regularmente los códigos convolucionados no perforados de la misma tasa que los que si son, tienen mejor rendimiento (*performance*) pero las ventajas que ofrecen los perforados es que permiten una serie de códigos convolucionales con mayor tasa, siendo decodificados con el algoritmo de Viterbi y simplifican la estructura del decodificador, al requerir la misma para decodificar al código “madre”. Aún así, el decremento del rendimiento de los códigos perforados con relación a los no perforados, no es por mucho. En [19] se menciona que la diferencia en decibelios para algunos códigos de tasas $2/3$ y $3/4$, considerando modulación PSK y un canal AWGN está entre 0.1 y 0.2 dB. Esa tasa se hace más significativa cuando la tasa aumenta.

En sistemas de transmisión como los estudiados en este trabajo, es difícil evaluar el desempeño por separado de este tipo, principalmente por la diferencia entre los métodos de modulación usados por los diferentes estándares. Aún así, el sistema DVB-T puede variar el desempeño, al variar su tasa de codificación, característica que no es posible en el ATSC por usar uno de tasa fija.

Otra de las características de interés del estándar DVB-T a este nivel, es el uso de la modulación jerárquica, donde el flujo paralelo de datos pasa por el mismo proceso de codificación de canal, hasta ahora mencionado. Así la primera parte del entrelazador interno, reacomoda los bits de los dos flujos, en caso de que se requiera de la modulación jerárquica. Al igual que el ATSC, en este proceso se adecuan los bits para ser modulados, por tanto, este proceso subdivide el flujo de entrada, por medio de un demultiplexor, en v sub-flujos, donde $v = 2, 4, 6$ para QPSK, 16-QAM y 64-QAM, respectivamente. Cada sub-flujo alimenta a un entrelazador de bits, por tanto se tienen hasta v entrelazadores de este tipo. Teniendo v salidas entrelazadas, se agrupan para formar los símbolos y por medio del entrelazador de símbolos se mapean cada uno de ellos en las 1512 portadoras, para el modo 2k o las 6048, para el modo 8k. Cabe notar que deja ver otra de las características importantes del DVB-T, el cual puede manejar dos modos de operación, el 2k y el 8k.

El siguiente paso en el proceso es la modulación. A continuación se discute acerca de la comparación entre los métodos usados por los estándares.

4.6. Modulación

El proceso de modulación de la señal es completamente diferente en ambos estándares. ATSC usa modulación 8-VSB de una sola portadora, mientras DVB-T usa COFDM en multiportadora, con la posibilidad de usar 3 formas de modulación, QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Este proceso marca la diferencia primordial entre los estándares de televisión digital terrestre.

Comparación de los estándares ATSC y DVB-T

En las secciones anteriores se describieron los procesos que comprenden la codificación de canal del sistema de transmisión y se indicó que a pesar de tener procedimientos diferentes, usaban componentes que hacían la misma función con parámetros muy similares. En la modulación, a pesar de que el proceso como tal es adecuar la señal para su transmisión, las formas de llevarla a cabo por los diferentes estándares es muy diferente. Los parámetros de modulación más representativos, se presentan en el cuadro 4.1.

Parámetro	ATSC 8-VSB	DVB-T COFDM
bits por símbolo	3	2,4,6 (QPSK,16-QAM,64-QAM)
num. de portadoras	1	1705 y 6817 (modo 2k y 8k, respect.)
tipo de red	MFN	SFN
modulación jerárquica	No	Si

Tabla 4.1: Características generales del proceso de modulación de los estándares.

Con base en la modulación, cada uno de los sistemas tienen sus ventajas y desventajas. De acuerdo con la información del cuadro 4.1, se puede notar que el esquema COFDM es más flexible en algunas características que el 8-VSB. Se pueden transmitir más bits y más portadoras por cada símbolo e incluso puede manejar dos tipos de flujos en la modulación jerárquica. Esto hace que se favorezcan diversos tipos de ambientes, ya sea aquellos que sean más ruidosos o con características especiales de ruido. Sin embargo, las características del 8-VSB se adaptan con muy buenos resultados a las necesidades de los países que lo usan, permitiendo manejar video en alta resolución (HDTV). Además, una característica importante es el gasto (de energía) que hace un sistema u otro, en el manejo de los datos en la modulación. Esto es, cuánta potencia o qué relación señal-ruido se requiere para transmitir la señal de manera que se obtenga una tasa de símbolo en error aceptable; considerando las condiciones del ambiente (estos últimos datos serán presentados en la sección 4.8.1).

Teóricamente ambos procesos de modulación (sin involucrar la codificación de canal) tienen la misma proporción portadora a ruido (*Carrier to noise ratio*) o C/N en un ambiente con ruido aditivo blanco Gaussiano (AWGN) [74]. Esta se puede definir como:

$$C/N = \frac{E_b}{N_0} \times \frac{R_b}{W}$$

donde R_b es la tasa de bits y W es el ancho de banda.

De tal manera que para fines de comparación, la C/N debe ser muy similar en ambos casos, ya que es necesario que los valores de R_b y W sean aproximadamente los mismos. En la realidad, lo que marca precisamente la diferencia de este valor en los estándares, son los esquemas de implantación de la codificación de canal, la

estimación y esquemas de ecualización. Estos últimos dos no han sido mencionados, pero juegan un papel muy importante en la recepción de la señal, ya que ayudan a adaptar de la mejor forma posible la señal recibida, para ser demodulada y decodificada, eliminando distorsiones (de amplitud y/o fase) e interferencia entre símbolos. A pesar de que se acostumbra mencionar el parámetro C/N para indicar la proporción entre la potencia de la portadora y la potencia del ruido (SNR) en los sistemas de transmisión analógicos, es preferible usar E_b/N_0 , como el parámetro para medir la proporción señal a ruido, que mide la energía del bit por densidad del ruido, en los sistemas de comunicaciones digitales [64]. La ampliación y discusión acerca de este parámetro en la comparación de los estándares continua en la sección 4.8.1.

En cada esquema de modulación se puede calcular la probabilidad de símbolo en error, la cual depende de la cantidad de energía que se le asigna a cada símbolo al transmitirlo, que es proporcional a la energía del bit y del proceso de detección usado. Para efectos de comparación, se podrían comparar estos parámetros sin la codificación de canal, pero muchas de las ventajas de usarlos se acompañan de los procesos anteriores a la modulación. Por tanto, en secciones posteriores se presentan las medidas publicadas que muestran el desempeño de los sistemas, en diversas condiciones.

Después de mapear los bits del flujo de acuerdo a un tipo de modulación electo, al flujo de datos se le añaden las señales de sincronía, que se utilizan para la recepción de la señal. Cada uno de los estándares tiene formas diferentes de insertar estas señales, así como la cantidad usada para acompañar a la información de video, audio y datos auxiliares codificados. Al finalizar esta inserción se tendrá la tasa de bit usada por el estándar. A continuación se presentan, los valores de esta tasa usados por los estándares.

4.7. Tasa de bits

La tasa de datos del estándar ATSC es fija y siempre proporciona una tasa de 19.39 Mbit/s a la salida de la codificación de canal, mientras que la tasa del estándar DVB-T es variable, desde 4.98 a 31.67 Mbit/s y depende básicamente de la tasa de codificación interna, del esquema de mapeo de bits (QPSK, 16-QAM o 64-QAM), número de portadoras (2k u 8k), el valor del intervalo de guardia y el ancho de banda por cada canal.

4.7.1. Cálculo de la tasa de bit

El cálculo de la tasa de bit para el estándar ATSC es el siguiente [51]:

$$\begin{aligned}\text{tasa bit} &= \frac{D \times S \times M \times C \times F}{T} \times B \times F_s \\ &= \frac{313 \times 832 \times 3 \times 2/3 \times 2}{48,4 \text{ ms}} \times \frac{188}{208} \times \frac{312}{313} \\ &= 19,39 \text{ Mbit/s}\end{aligned}$$

donde:

D es el número de segmentos de datos (está fijado a 313)

S es el número de símbolos (valor fijado a 832)

M es el número de bits por símbolo (igual a 3)

C es la tasa de codificación convolucional (2/3)

F es el número de segmentos por cuadro 8-VSB (igual a 2)

B es la eficiencia de la codificación Reed-Solomon (188/208)

F_s es la sobrecarga debido a los pulsos de sincronía del campo de datos (312/313)

T es la duración del cuadro 8-VSB completo (48 ms)

Mientras tanto, el cálculo de la tasa de bit para el estándar DVB-T es el siguiente [51]:

$$\text{tasa bit} = \frac{B \times C \times M \times N}{T}$$

donde:

B es la eficiencia del codificador Reed-Solomon (188/204 = 0,92)

C es la tasa de la codificación interna (1/2, 2/3, 3/4, 5/6, y 7/8)

M es el número de bits por portadora (2 para QPSK, 4 para 16-QAM y 6 para 64-QAM)

N es el número de portadoras (1512 para el modo 2K y 6048 para el modo 8K)

T es la duración total del símbolo (224 μs para 2K y 896 μs para 8K), más el tiempo del intervalo de guardia .

NOTA: recordar que los intervalos de guardia considerados para el DVB-T son sólo 4 y son 1/4, 1/8, 1/16 y 1/32 de la duración del símbolo.

Modulación	Tasa cod. Convol.	Intervalo de guardia			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	4.97	5.52	5.84	6.02
	2/3	6.62	7.36	7.79	8.03
	3/4	8.28	9.20	9.74	10.04
	5/6	8.52	9.46	10.02	10.32
	7/8	8.69	9.66	10.23	10.54
16-QAM	1/2	9.94	11.04	11.69	12.04
	2/3	13.25	14.72	15.59	16.06
	3/4	16.56	18.40	19.48	20.07
	5/6	17.03	18.93	20.04	20.6
	7/8	17.39	19.32	20.46	21.08
64-QAM	1/2	14.90	16.56	17.53	18.07
	2/3	19.87	22.08	23.38	24.09
	3/4	24.84	27.60	29.22	30.11
	5/6	25.55	28.39	30.06	30.97
	7/8	26.08	28.98	30.68	31.61

Tabla 4.2: Tasas de bit del DVB-T (en Mbit/s) para A.B. de 8 MHz.

En la tabla 4.2 se presentan las diferentes tasas de bit que se obtienen, considerando las combinaciones de los valores de la fórmula (para un ancho de banda de 8 MHz).

Al considerar anchos de banda menores a 8 MHz, se tiene que adecuar la duración del símbolo y por consecuencia la duración del intervalo de guardia. La forma de adecuarlo puede ser multiplicando la duración del símbolo por un factor de $8/6$ para un ancho de banda de 6 MHz u $8/7$ para un ancho de banda de 7MHz.

La tabla 4.3 muestra los valores de la tasa de bit considerados en un ancho de banda de 6 MHz.

4.7.2. Comparación

Para comparar en primer instancia ambos estándares deberían seleccionarse aquellos parámetros del DVB-T, que permitan obtener la mayor aproximación a la tasa del ATSC. Para un ancho de banda de 6 MHz y de acuerdo con los datos de la tabla 4.3, estos parámetros corresponden a:

- 64-QAM a una tasa de $2/3$ con un intervalo de guardia de $1/32$ (18.07 Mbit/s)
- 64-QAM a una tasa de $3/4$ con un intervalo de guardia de $1/4$ (18.63 Mbit/s)
- 64-QAM a una tasa de $5/6$ con un intervalo de guardia de $1/4$ (19.16 Mbit/s)

Comparación de los estándares ATSC y DVB-T

Modulación	Tasa cod. Convol.	Intervalo de guardia			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	3.73	4.14	4.38	4.52
	2/3	4.97	5.52	5.84	6.02
	3/4	6.21	6.90	7.31	7.53
	5/6	6.39	7.10	7.51	7.74
	7/8	6.52	7.24	7.67	7.90
16-QAM	1/2	7.45	8.28	8.77	9.03
	2/3	9.94	11.04	11.69	12.04
	3/4	12.42	13.80	14.61	15.05
	5/6	12.77	14.19	15.03	15.48
	7/8	13.04	14.49	15.34	15.81
64-QAM	1/2	11.18	12.42	13.15	13.55
	2/3	14.90	16.56	17.53	18.07
	3/4	18.63	20.70	21.92	22.58
	5/6	19.16	21.29	22.54	23.23
	7/8	19.56	21.74	23.01	23.71

Tabla 4.3: Tasas de bit del DVB-T (en Mbit/s) para A.B. de 6 MHz.

- 64-QAM a una tasa de 7/8 con un intervalo de guardia de 1/4 (19.56 Mbit/s)

Como se puede observar, todas las tasas mostradas están por debajo de la tasa del ATSC. Desde este punto de vista, la ventaja la tiene el ATSC dado que se puede usar una tasa de bit mayor a la que permite DVB-T, para el mismo ancho de banda por canal.

Ya que el ATSC también puede usarse en anchos de banda de 8 MHz, su tasa de bit teórica aumenta, estas corresponden a 21.6 Mbit/s para 7 MHz y 27.5 Mbit/s para uno de 8 MHz [74]. Considerando esto, ahora la ventaja la tiene el DVB-T, ya que permite manejar una tasa de bit mayor (hasta 4 Mbit/s) a la que se consigue con ATSC, para dicho ancho de banda. Sin embargo, a la fecha de escritura de este trabajo de investigación, no se contó con información publicada que especificara que se habían hecho pruebas del ATSC en ambientes de 8 o 7 MHz, en la mayoría de los casos cuando se trataba de comparar el desempeño del sistema en esos ambientes, se hacían considerando la señal para un ancho de banda de 6 MHz [11, 56, 58]. Sólo se mencionó en [10] que se había construido un prototipo en las pruebas que se hicieron en China.

Los valores de los parámetros del DVB-T usados en ambientes de 6 MHz, en diferentes países fueron:

- 64-QAM a una tasa de 2/3 con un intervalo de guardia de 1/32, logrando una tasa $R_b = 17,9$ Mbit/s [74], la cual es casi idéntica a la mostrada en el cuadro 4.3.

4.8 Parámetros del desempeño de los estándares

- 64-QAM a una tasa de 3/4 con un intervalo de guardia de 1/32, logrando una tasa $R_b = 20,4$ Mbit/s [74], la cual es casi 2 Mbit/s menos del valor teórico, mostrado en el cuadro 4.3.
- 64-QAM a una tasa de 3/4 con un intervalo de guardia de 1/16, logrando una tasa $R_b = 19,76$ Mbit/s [60], menos de 2 Mbit/s al valor teórico mostrado en el cuadro 4.3.

El valor de la tasa de bit es importante porque es quien determina la cantidad de programas en determinada resolución, que se pueden transmitir. Por ejemplo, mandar de 2 a 4 programas por el mismo canal en una resolución estándar (SDTV), o mandar un sólo programa en HDTV.

En la batalla por demostrar la mayoría de las ventajas entre estándares, ATSC defiende su posición al indicar que por una banda de 6 MHz pueden transportarse mayor cantidad de bits que con DVB-T, permitiendo transmitir programas en resolución de alta definición (HDTV). Para DVB-T no es importante ni relevante, la industria en el mercado de la televisión digital en Europa, no considera como primordial el envío del video digital en esa resolución.

Con la información mencionada hasta aquí, se presentará a continuación el análisis y discusión de los factores que determinan el desempeño (*performance*) de los sistemas de transmisión de los estándares en estudio.

4.8. Parámetros del desempeño de los estándares

Retomando el tema de la modulación, cabe mencionar que este proceso junto con los aspectos considerados en la codificación de canal, marcan la pauta para el desempeño global del sistema. Son estos quienes determinan la complejidad del sistema, la potencia necesaria para transmitir la señal, el tipo o factores de ruido a los que son más robustos o vulnerables, la capacidad para transmitir datos para diferentes servicios y varios aspectos más.

La calidad de la señal digital transmitida se puede medir en términos de la tasa de bit erróneos (**BER**, *Bit Error Rate*). La tasa de bit en error es una función del factor denominado E_b/N_0 , proporción entre la energía del bit y la densidad del ruido. Como ya ha sido mencionado (ver sección 2.6), E_b/N_0 es usado comúnmente para comparar sistemas de comunicaciones digitales, aún teniendo tasas de bit y métodos de modulación diferentes. En términos de la potencia de la señal E_b es determinado por:

$$E_b = \frac{P_{avg}}{R_b}$$

donde P_{avg} es la potencia promedio de la señal y R_b es la tasa de bits.

Comparación de los estándares ATSC y DVB-T

N_0 es llamada la densidad del ruido y es la potencia total del ruido en la banda de la señal, dividida por el ancho de banda también de la señal. Es medida en Watts/Hz y es la potencia del ruido en 1 Hz de ancho de banda. Esto es:

$$N_0 = \frac{N}{W}$$

donde N es la potencia del ruido y W es el ancho de banda [46]. Así, la proporción entre la energía del bit y la densidad del ruido E_b/N_0 es:

$$E_b/N_0 = \frac{P_{avg}/R_b}{N/W}$$

Con la ecuación anterior se puede notar que al disminuir el ancho de banda, se reduce el valor del parámetro. Esto debido a que la densidad del ruido aumenta y la cantidad del mismo ahora ocupa un espacio más pequeño de la señal. También se disminuye cuando se aumenta la tasa de bit R_b , así, una forma de mejorar la proporción E_b/N_0 en un sistema de transmisión-recepción, es disminuyendo la tasa de bit.

4.8.1. Proporción portadora a ruido

La proporción portadora a ruido, C/N , es una medida que indica la proporción entre la potencia de la portadora y la densidad del ruido. Se usa principalmente para señales analógicas y en algunas ocasiones se usa C/N_0 semejante a como se usa E_b/N_0 , donde C/N_0 es la potencia de la portadora por unidad de ancho de banda. Estos tres factores están relacionados de la siguiente manera:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} \times R_b$$

$$\frac{C}{N} = \frac{E_b}{N_0} \times \frac{R_b}{W}$$

en decibeles:

$$\frac{C}{N} = \frac{E_b}{N_0} + R_b - B$$

Este parámetro es importante para planear la red digital terrestre de televisión, por lo que se necesita conocer el mínimo requerido para tener una recepción confiable bajo las condiciones establecidas por el canal, ya sea AGWN, Ricean o Rayleigh.

De acuerdo a pruebas de evaluación de los estándares y como resultado de simulaciones por computadora, en [74] se menciona que dadas las características de ambos estándares en cuanto a parámetros de la codificación Reed-Solomon, codificación interna, dispositivos en receptores (ecualizadores) y degradaciones provocados por la implantación de receptores para permitir señales en multitrayectoria y rechazo de interferencias, el estándar ATSC obtiene una diferencia entre 2-3 dB de la C/N

4.8 Parámetros del desempeño de los estándares

requerida para la recepción de la señal en un canal AGWN.

Sin embargo, los valores de C/N en un canal AGWN son usados sólo como *benchmarks* en sistemas de transmisión, es sólo un indicador y no representa un modelo de un canal real [74].

El valor de C/N necesario para el sistema está determinado por un umbral que se fija para obtener una tasa de bit en error. Estos umbrales fueron definidos de diferente forma en ambos sistemas. En ATSC se considera un umbral denominado **TOV** (*Threshold of Visibility* o umbral de visibilidad) y el DVB-T considera el **QEF** (*Quasi Error Free* o quasi-libre de errores), fijados a una tasa $BER = 3 \times 10^{-6}$ después de la codificación Reed-Solomon y $BER = 2 \times 10^{-4}$ antes de la codificación Reed-Solomon, respectivamente. Este último valor corresponde a una BER menor a 1×10^{-11} después de la codificación Reed-Solomon. Es obvio que el QEF es más estricto que el TOV, ya que el primero admite 3 bits erróneos por cada 1 000 000, mientras que el segundo admite 1 bit erróneo por cada 100 000 000 000.

El rango de valores de diferencia de C/N mencionado en párrafos anteriores, no consideran esta diferencia en dichos umbrales, ya que fue producto de considerar las diferencias entre parámetros de los sistemas. Por tanto, no es recomendable su evaluación para fines de comparación.

Para hacer una comparación más justa se debe considerar el parámetro E_b/N_0 ; mientras más pequeño sea este valor, se dice que el sistema es más robusto. Debido a que alcanzan las tasas de bit en error deseadas con menor gasto de energía por densidad del ruido. Para fines de comparación entre estándares, es recomendable aplicar un factor de corrección entre TOV y QEF. En [74], este factor correspondió a 0.8 dB para ATSC y 1.3 dB para DVB-T en un canal AGWN. En la tabla 4.4 se presentan los umbrales para la proporción E_b/N_0 en un canal AWGN, que se obtuvieron a partir de simulaciones por computadora y de pruebas reales (columna **Prueba RF**), aplicando los factores de corrección.

Se puede notar en la tabla 4.4 que a pesar de la corrección aplicada, los valores requeridos de potencia son menores en ATSC que en DVB-T. Desafortunadamente no se encontraron más reportes donde constatarán o pudieran contradecir los valores mencionados en el cuadro anterior. Sin embargo, las opiniones sobre este punto van todos a favor de ATSC, ya que en otros reportes [51, 56] indican que los valores teóricos y medidos en pruebas de C/N , son siempre menores a los del DVB-T.

4.8.2. Ruido impulsivo

El ruido impulsivo es provocado por ocurrencias aleatorias de impulsos con amplitudes aleatorias. La fuente de este ruido puede ser equipo industrial o casero (hornos de microondas, secadoras de cabello, lavadoras, motores de cisternas.). Tam-

Comparación de los estándares ATSC y DVB-T

Sistema y parámetros	Umbral	E_b/N_0 (dB)	
		Simulación	Prueba RF
ATSC			
$R = 2/3$ (convol.)	TOV	9.7	10.1
$R_b = 19,39$ Mbit/s	QEF	10.5	10.9
DVB-T (64-QAM)			
$R = 2/3$ $GI = 1/32$	TOV	10.4	12.5
$R_b = 17,9$ Mbit/s	QEF	11.7	13.8
DVB-T (64-QAM)			
$R = 3/4$ $GI = 1/32$	TOV	11.4	13.5
$R_b = 20,4$ Mbit/s	QEF	12.7	14.8

Tabla 4.4: Umbrales E_b/N_0 para un canal AWGN.

bién pueden ser líneas de transmisión de alto voltaje, sistema de encendido de automóviles y motores eléctricos.

Dada la característica de ser impulsivo, este tipo de ruido es de corta duración (menos de 1 segundo). Es muy complicada su medición y es difícil caracterizarlo.

Teóricamente, la modulación OFDM debe ser más robusto a la interferencia impulsiva en el dominio del tiempo, porque el cálculo de la FFT en el receptor puede promediar los impulsos de corta duración [42]. Sin embargo, considerando los procesos en la codificación de canal que protegen contra este tipo de ruido, se considera que el estándar ATSC es más robusto, ya que la codificación Reed-Solomon puede corregir 2 errores más por cada bloque de 187 bytes y el proceso de entrelazado externo tiene más ramas que el DVB-T. En estudios de laboratorio se determinó una diferencia de entre 0.3 y 0.5 dB, en cuanto al aporte para disminuir la C/N en favor del ATSC [74]. Asimismo, los resultados de las primeras pruebas realizadas en Australia, muestran que ATSC puede manejar un nivel de interferencia impulsiva en un nivel de la señal entre 8 y 11 dB más bajo que el DVB-T [58].

Otra forma de proteger este tipo de ruido es a nivel de instalación, donde será importante usar cables de buena calidad, en algunos casos contar con antena exterior y usar protección en las terminales. Aunque estos últimos puntos son más bien del diseño de recepción y no tienen relación con el desempeño del sistema.

4.8.3. Interferencia co-canal

La interferencia co-canal se refiere a aquella que es producida por una señal que afecta a otra en el mismo ancho de banda del canal [68]. Este tipo de interferencia se puede provocar cuando una señal de televisión digital que se usa en un canal en cierta banda (VHF/UHF), afecta a otra por ejemplo, NTSC transmitida en el mismo canal. La interferencia se presenta cuando en diferentes estados o países (por ejemplo en las

4.8 Parámetros del desempeño de los estándares

fronteras), los transmisores de televisión que envían la señal en un mismo canal, están a una distancia menor a los 180 km (distancia mínima requerida [42]). La cercanía de los transmisores por diversas circunstancias, es en ocasiones inevitable, por lo que se requiere de un mecanismo para proteger a la señal contra este tipo de interferencia.

Generalmente deberían considerarse los dos factores, tanto como afecta una señal NTSC o PAL a una señal digital ATSC o DVB-T transmitida en el mismo canal; y como afecta la señal digital a una analógica, durante el periodo de transición. Aún así se menciona que el hecho de que una señal analógica afecte a una digital, no se considera como un factor crítico. Sino que es más preocupante como afecta la digital a la analógica. Para este caso, se fijan los niveles de la señal digital para que la interferencia no sea muy “molesta” al percibirla en un aparato receptor de televisión analógica. Se usa un factor conocido como la proporción de la señal deseada/no-deseada D/U (*desired/undesired signal ratio*) y su valor puede fijarse a prueba y error.

Para proteger la señal digital de la analógica, ATSC usa unos filtros denominados *comb filter* u otros que se denominan *notch filter*. Estos filtros rechazan las portadoras visuales, aurales y subportadoras de color del NTSC que afectan la señal digital ATSC.

El sistema DVB-T por su parte no requiere de filtros adicionales para el manejo de esta interferencia [56]. Para contrarrestar estos efectos se hace una estimación del canal y se adecuan los parámetros de transmisión, tratando de hacer decodificación suave en los receptores.

En [42] se menciona que ambos sistemas presentan resultados similares en las pruebas realizadas, aunque no muestra valores ni indica si esto sucede cuando NTSC interfiere con la señal ATSC y DVB-T, mucho menos si se consideró un sistema PAL. Por otro lado, en pruebas de laboratorio realizadas en Estados Unidos ([60]) se menciona que la proporción del factor D/U para NTSC en DVB-T es de 2.7 dB y de 5.5 dB para ATSC; indicando que la señal ATSC es más inmune a la interferencia por una señal NTSC.

Por otro lado, en pruebas realizadas de interferencias de señales digitales afectando otras digitales en el mismo canal, en [74] se menciona que dado que los sistemas ATSC y DVB-T se comportan como señales de ruido blanco Gaussiano, el desempeño de la interferencia DTV en otra DTV está altamente correlacionado con el factor C/N . Por tanto, dado que ATSC presenta una ventaja en relación a este factor, hace que el manejo de la interferencia DTV en DTV sea mejor en este estándar, que por DVB-T. Los resultados de las pruebas de laboratorio mostrados en el artículo *8 VSB/COFDM Comparison report (phase 1)* [60] lo comprueban, indicando que ATSC tiene una proporción D/U de 15.4 dB, mientras que DVB-T tiene una de 19.5

dB, cuando un observador calificaba las imágenes de video digital.

4.8.4. Interferencia de canales adyacentes

La interferencia por canales adyacentes se refiere a la perturbación que sufre una señal en un canal de frecuencia n a consecuencia de señales en canales ubicados en los canales $n \pm 1$. Puede provocarse señales no deseadas traslapando el espectro de frecuencia o “inyectando” energía en el canal de interés [64]. La interferencia de canales adyacentes puede provocarse por un filtrado inadecuado, por sintonización impropia o por un control deficiente de frecuencia, ya sea en el canal de referencia o por el canal que interfiere [2].

Para este caso también se vuelve importante la interferencia que puede producir la señal digital en un canal, ya sea analógico o digital en el canal adyacente. Las pruebas de laboratorio mostradas en [60] indican que la interferencia, usando la proporción D/U , en la parte baja del espectro de la señal DTV afectando una señal NTSC es de -2.30 dB para DVB-T y -8.0 dB para ATSC. Indicando que ATSC afecta menos a la señal NTSC en esa parte del espectro. Por otro lado en la parte superior, los valores mostrados fueron muy similares, -6.90 dB para DVB-T y -6.55 dB.

Los valores mostrados para la interferencia de una señal DTV en otra DTV, muestran un desempeño muy similar en ambos sistemas, -31.5 dB para DVB-T y -32 dB para ATSC.

4.8.5. Distorsión por multitrayectoria

La distorsión por multitrayectoria es la que se genera cuando la señal que se decodifica proviene de un conjunto de replicas de la señal que no sufrió distorsión. Regularmente estas versiones de la señal donde su trayectoria hacia el receptor se desvía, están defasadas e incluso pueden ser afectadas por distintas fuentes de ruido. Estos “ecos” son provocados por factores ambientales como árboles, montañas o por edificios, vehículos de transporte y en general todo aquello que provoque que una señal se refleje o desvíe.

Por características de diseño, el sistema DVB-T es más robusto a este tipo de distorsiones que el ATSC y se debe principalmente al uso del esquema de modulación COFDM. Puede trabajar en situaciones graves donde los ecos pueden tener una potencia similar a la de la señal recibida (0 dB). La desventaja es que para lograr esto, requiere por otro lado un aumento en la C/N de alrededor de los 6 dB [74]. El hecho de contar con el intervalo de guardia, hace que contrarreste los efectos de esta distorsión. Además, es una característica necesaria en una red de transmisores SFN (redes de frecuencia única).

ATSC muestra un desempeño similar al DVB-T en el manejo de ecos estáticos

(fantasmas) y puede ser mejor cuando los niveles de eco esten entre los 4 dB y 6 dB [42]. Sin embargo, las pruebas de campo realizadas en diversos países muestran que ATSC es más vulnerable a la recepción con antenas de interiores.

4.8.6. Eficiencia del espectro

La eficiencia del espectro a nivel de los estándares de televisión digital, es considerada como la cantidad de ancho de banda útil, usado por cada estándar. Este ancho de banda útil está relacionado con la cantidad de la energía de la señal que esta por arriba de los 3 dB en un ancho de banda determinado. En [74] se menciona que teóricamente COFDM es ligeramente más eficiente espectralmente que ATSC. Esto se debe a que en el ancho de banda disponible por canal (6 MHz para Estados Unidos), es usado por la señal DVB-T en aproximadamente 5.7 MHz, por lo que usa aproximadamente 95 % de este ancho de banda. Mientras que el ATSC usa 5.38 MHz de los 6 MHz disponibles.

Aún así, debe considerarse que para fines prácticos, DVB-T tiene que especificar un intervalo de guardia para contrarrestar los efectos de las trayectorias múltiples de una señal, lo que provoca que la cantidad de datos útiles que viajan por el canal sea mucho menor que los que viajan por ATSC. De esta forma, si se considera DVB-T en un ancho de banda de 6 MHz, debe usar 64-QAM con una tasa de codificación $R = 2/3$, donde sólo podría alcanzar una tasa de datos máxima teórica de 18.1 Mbit/s, mientras que ATSC mantiene su tasa fija a 19.39 Mbit/s.

De esta forma, considerando fines prácticos ATSC es más eficiente espectralmente en ambientes de 6 MHz, porque viajan más datos que el DVB-T.

4.8.7. Cuadro comparativo

Hasta este punto se han mencionado algunas de las características más importantes del desempeño de los estándares, considerando únicamente los efectos de la transmisión de la señal en pruebas de campo que se han llevado a cabo en varios países. El cuadro 4.5 resume el desempeño que ha presentado cada estándar en las pruebas comparativas de campo.

Cabe recordar que la información del cuadro 4.5 resultó como consecuencia de las experiencias en pruebas de laboratorio y campo, que se hicieron en varios países entre los años de 1999 y 2001 y que fueron publicados.

En la actualidad los equipos han evolucionado y han salido las nuevas generaciones de codificadores, transmisores y receptores. De tal forma que la información presentada en el cuadro, puede cambiar en pruebas comparativas realizadas.

Comparación de los estándares ATSC y DVB-T

Parámetro	ATSC	DVB
Proporción señal-ruido (E_b/N_0)	Menos potencia	Más potencia
Ruido impulsivo	mejor	peor
Interferencia co-canal	mejor	peor
Interferencia de canales adyacentes	similar	similar
Distorsión por multitrayectoria	peor	mejor
Eficiencia espectral	mejor	peor

Tabla 4.5: Características del desempeño.

En México también se hicieron pruebas de desempeño de los estándares más populares en el año 2001. Estos son básicamente ATSC, DVB-T e ISDB-T. Como en muchos países, la información colectada en el periodo de pruebas no es publicada y sólo se conoce entre las organizaciones involucradas en los procesos de evaluación de los estándares. A continuación se presentan algunos de los resultados que fueron obtenidos de dichos procesos.

4.9. Pruebas de evaluación en México

La información que se presenta a continuación fue obtenida de una presentación del *Comité Consultivo de Tecnologías Digitales para la Radiodifusión*, formado principalmente por representantes de la industria de la televisión y el sector gubernamental, titulada “Pruebas Comparativas de Recepción ATSC/DVB/ISDB”, en noviembre de 2001 [61].

Los estándares evaluados fueron ATSC, DVB-T e ISDB-T, éste último usando prototipos para ambientes de 6 MHz. Los objetivos de las pruebas fueron conocer los parámetros reales de operación del estándar ISDB-T en ambientes de 6 MHz, transmitiendo en formato SDTV y HDTV para recepción en móviles y en interiores. Además, comparar el comportamiento entre los tres estándares más el estándar actual NTSC, transmitiendo desde el cerro de Tres Padres hacia las zonas de servicio en la Ciudad de México. Asimismo, las pruebas de evaluación fueron un complemento a los trabajos realizados con miras a la adopción de un estándar.

Las zonas de servicio consideradas para las pruebas fueron aquellos sitios donde hay problemas de recepción de NTSC (como el Angel de la Independencia, la plaza de la Cibéles y el área de Santa Fe). Las zonas de sombra al norte de la Cd. de México. El rumbo de Chapultepec y Santa Fe para la recepción en interiores y zonas de la av. Periférico para la recepción en móviles. Estas zonas fueron denominadas “*Zonas de conflicto*” (figura 4.1).

La configuración de los transmisores considerada para los diferentes estándares en el proceso de evaluación, es mostrado en la tabla 4.6.

4.9 Pruebas de evaluación en México

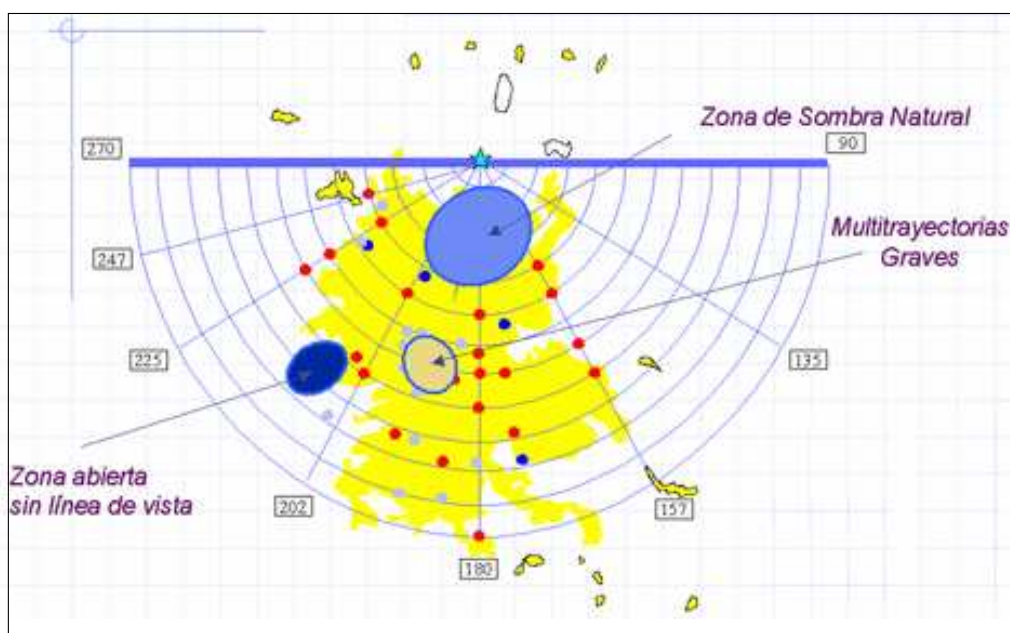


Figura 4.1: Zonas de conflicto de recepción de NTSC.

	ATSC	ISDB			DVB	
Formato	HD/SD	EDTV-1	EDTV-2	SDTV	EDTV	SDTV
Bit Rate Mbps	19.39	19.915	20.284	8.133	19.63	4.0
Video Mbps	18.1	16.71	17.26	4.53	16.71	2.606
Ancho Banda	6 MHz	6 MHz	6 MHz	6 MHz	6 MHz	6 MHz
Portadoras	1	5617	5617	2809	8 K	2 K
Modulación	8VSB	64QAM	64QAM	16QAM	64QAM	QPSK
FEC	2/3	3/4	5/6	1/2	2/3	1/2
I. Guardia		1/32	1/8	1/8	1/32	1/4

Tabla 4.6: Configuraciones de los transmisores.

En la información de la tabla 4.6, el término *EDTV* (*Enhanced DTV*) se refiere al formato de televisión mejorada, el cual en calidad, se encuentra entre la SDTV y la HDTV. También se puede notar que tanto el ISDB como el DVB-T permiten la modificación de sus parámetros, los cuales propician la diversificación de los distintos formatos y permiten enfrentar situaciones de ruido extremas. La desventaja es que la tasa de bit disminuye considerablemente, así como la tasa de video que se requiere para el formato de imagen a recibir.

Las pruebas de evaluación se llevaron a cabo a partir del mes de julio de 2001 y duraron aproximadamente 1 mes. Los resultados de recepción en las zonas de servicio

Comparación de los estándares ATSC y DVB-T

de la Ciudad de México, considerando las distintas configuraciones, se muestran en la tabla 4.7.

	NTSC	ATSC	ISDB			DVB		CMNT
	Calidad	HDTV	EDTV-1	EDTV-2	SDTV	SDTV	EDTV	
Sitios Problema								
Plaza Cibéles	3	√	...	√	√	√	...	$BER < 10E - 2$
Angel Independencia	2	...	★	★	√	√	★	NTSC-ghost
Edificio Arco Bosques	2	√	√	√	√	√	√	
Zonas Sombra								
San Juan Ixhuatepec	2	★	...	...	...	...	...	46 dBu COFDM
Sitios Abiertos								
Balderas	5	√	√	√	√	√	√	
San Angel	5	√	√	√	√	√	√	
Polanco	4	√	√	√	√	√	√	
Santa Fe	3	√	√	√	√	√	√	
Interiores								
Balderas	3	...	...	...	√	√	...	Sin L. Vista
Santa Fe	2	√	√	√	√	√	√	
Móvil								
Periférico (Ref-Sat)	Var	...	...	...	√	√	...	Cortes: DVB $c/2$ min ISDB $c/3$ min

Tabla 4.7: Resultados de las pruebas.

En la tabla 4.7, el símbolo √ se refiere a recepción con una antena de conejo y ★ con una antena logarítmica. Las mediciones en exteriores se hicieron a 4 m sobre el nivel de tierra (*SNT*).

En resumen los resultados de las pruebas fueron los siguientes:

ATSC:

- es posible SDTV multicanal y HDTV en 6 MHz, lo que implica un mejor uso del espectro
- permite transmisión de datos
- permite recepción en fijos con receptores actuales
- fue difícil la recepción en interiores con STB's actuales (se esperará la madurez del EVSB)
- se obtuvo un umbral de recepción de 41 dBu
- existen receptores comerciales para ambientes de 6 MHz

DVB y ISDB:

- permite la recepción de un canal con formato SDTV en fijos, interiores y móviles
- no permite la recepción de HDTV en 6 MHz, entrega de manera confiable EDTV
- si se requiere video con una tasa mayor a los 18 Mbps, la recepción es poco confiable
- es más robusto a multitrayectorias pero no es inmune
- se detectaron problemas críticos con ajuste de transmisor (intermodulaciones)
- los estándares transmiten datos
- umbral de recepción a 45 dBu (lo que implica transmisores más potentes)
- en las fechas de las pruebas existían receptores prototipo a 6 MHz

Cabe remarcar que los resultados presentados fueron únicamente cualitativos y no fue posible obtener resultados cuantitativos, habiendo retroalimentado los comentarios sobre el desempeño entre estándares, presentado en las secciones anteriores.

Con base en los resultados se presentaron los siguientes comentarios a manera de conclusiones (tabla 4.8), del proceso de pruebas de campo y evaluación.

A partir de los resultados, el Comité Consultivo tuvo más herramientas para incrementar su nivel de análisis en el proceso de adopción. Tuvieron el panorama técnico, que complementa los aspectos sociales, legales y económicos, que también se deben considerar. Lo importante es que Gobierno e Industria, buscan el aprovechamiento máximo de las nuevas tecnologías para ofrecer más y mejores servicios de telecomunicaciones a la sociedad de México.

Siguiendo con el análisis de los estándares, a continuación se presentan una serie de conceptos que son una consecuencia del diseño de los propios estándares. En estos temas se presentan también ventajas y desventajas de uno y otro.

4.10. Características a consecuencia de los parámetros

Como consecuencia de los parámetros de los estándares para ponerlos en práctica, se desencadenan una serie de conceptos que repercuten más en el aspecto práctico, ya que tienen que ver con características de recepción de la señal, cobertura, convivencia con sistemas analógicos de televisión, compatibilidad de servicios, características potenciales como la televisión de alta definición (HDTV), recepción en dispositivos

Comparación de los estándares ATSC y DVB-T

	ATSC	DBV	ISDB
Recepción	problemas en interiores y móviles con receptores actuales	en móviles e interiores (SDTV)	mejor comportamiento en interiores (SDTV)
Zonas conflicto (sombra)	mejor comportamiento	no recepción	no recepción
Umbral de recepción	menor (41 dBu)	mayor (45 dBu)	mayor (45 dBu)
Tasa de bit	más eficiente	menos eficiente, requiere más para HDTV real	menos eficiente, requiere más para HDTV real
Multitrayectorias	susceptible	robusto	robusto
Transmisión de datos	soporta	soporta	soporta
Disponibilidad de equipos	existen comerciales	sólo prototipos para 6 MHz	sólo prototipos para 6 MHz
Estaciones operando	existen actualmente (con HDTV)	existen en SFN (sólo con SDTV)	no existen en 6 MHz

Tabla 4.8: Conclusiones sobre las pruebas de evaluación.

móviles y servicios agregados.

Las secciones siguientes presentan un panorama general de estos aspectos.

4.10.1. Cobertura

El área de cobertura tiene que ver con la potencia efectiva radiada (ERP) de un transmisor. Las comisiones de comunicaciones de cada país son los encargados de especificar la ERP máxima de un servicio, para minimizar efectos de interferencias con otros.

En general se espera que la cobertura proporcionada por la DTV sea por lo menos, similar a la que se tiene actualmente con los sistemas analógicos. En primer instancia, los sistemas digitales se verán afectados, ya que para la DTV se deben fijar niveles de potencia que no interfieran con el servicio analógico; impactando así el área de cobertura. Cuando se decida hacer el cambio completo de un sistema a otro, la cobertura de la DTV mejorará.

El análisis de cobertura de los sistemas regularmente se hace por medio de simulaciones por computadora. En la mayoría de los casos se consideran los parámetros de transmisión y los radios de interferencia (proporción D/U) de otras fuentes en mismos canales (co-canal) o en canales adyacentes. En [60] se estudió un modelo donde se consideraron los radios de interferencia según aquellas que se generan por DTV en NTSC, NTSC en DTV y DTV en DTV, para determinar la cobertura y el

4.10 Características a consecuencia de los parámetros

impacto de las interferencias, tomando en cuenta la tabla de distribución de canales DTV en Estados Unidos (*FCC DTV Table of Allotments*²), basado en un canal AG-WN. Con ese estudio obtuvieron datos de predicción de servicio en áreas limitadas por interferencia, incluyendo porcentaje de población por cada estación registrada en Estados Unidos de América. Los resultados de la simulación indicaron que la cobertura DTV afectada por señal NTSC mostró que el área de servicio o cobertura perdida es de 12.9% (alrededor de 5.3 millones de millas cuadradas) si se considera el estándar DVB-T, afectando al 5.8% de la población, que al considerar ATSC.

Lo que si es un hecho, es que se requiere menor potencia de transmisión para DTV que para la transmisión de televisión analógica actual. La diferencia es considerable, así que en la mayoría de los casos es muy probable que la cantidad de potencia requerida para cubrir una zona de cobertura idéntica a la servida de manera analógica, sea menor.

4.10.2. Recepción en dispositivos fijos

La recepción en dispositivos fijos para la DTV se consideran usando una antena exterior (en azoteas por ejemplo) y/o usando una antena interior (dentro de un inmueble sin considerar antena exterior).

Los resultados de pruebas comparativas en ambos estándares fueron los siguientes.

En [60] se menciona que en general ATSC se recibe de manera más confiable que DVB-T usando una antena externa de 30 pies y que la recepción usando una antena de 6 pies es similar. Otros resultados mencionados en [32, 40] también indican que ATSC se recibe mejor que DVB-T usando una antena exterior que usando antenas de interiores. Opuesto a esto, en las pruebas realizadas en Singapur [69], Hong Kong y Taiwan [38] mencionan que ATSC y DVB-T se recibe igual de bien para las condiciones de dichas pruebas.

Cabe recalcar que la recepción usando antenas interiores (*indoor reception*) es mejor en el sistema DVB-T que ATSC. Esto se debe principalmente a los factores que producen la multitrayectoria de la señal (las desviaciones producidas por paredes y el movimiento de la gente o incluso de mascotas, como principales factores).

A pesar de que no se indicaron muchos detalles en cuanto a parámetros y tipos de antena, los resultados generales de diversas pruebas de evaluación, mostraron a ATSC como el estándar con mejor recepción en antenas exteriores y a DVB-T con mejor recepción en interiores.

²En esta tabla se muestra la distribución de frecuencias para canales NTSC y DVT, parámetros de transmisión y recepción, así como el área de cobertura por estación y la población servida.

4.10.3. Recepción en receptores móviles

La recepción en dispositivos que están en movimiento (cualquier aparato receptor que se encuentre dentro de un vehículo en movimiento) es una característica considerada a consecuencia del diseño del estándar DVB-T, no así en ATSC, porque por la forma en la que se transmite la señal (red MFN), no es posible asegurar la recepción confiable en este tipo de dispositivos. Por tal motivo, DVB-T soporta la recepción en este tipo de dispositivos y ATSC no.

Ha habido mucho debate a nivel tecnológico y comercial acerca de esta característica. Tanto, que desde los resultados obtenidos en las primeras pruebas para comparar los estándares y ver esta “debilidad” del sistema ATSC, diversas organizaciones en Estados Unidos criticaron mucho el no haberla contemplado [18], pero fueron tantos los avances y tanta la presión por aprobar el estándar, que no hubo tiempo para hacer las modificaciones necesarias y considerar esa característica. La buena noticia es que los últimos avances del desarrollo del ATSC y la nueva propuesta para modular la señal denominada E-VSB, permite más flexibilidad en los parámetros de transmisión y así dar la posibilidad de recepción en dispositivos móviles [13, 65]. A la fecha de escritura de este trabajo de investigación no se contó con información que indicara que se habían hecho pruebas de recepción confiables en móviles con E-VSB.

A pesar de que el DVB-T permite la recepción en dispositivos móviles, la organización DVB ha lanzado desde noviembre de 2004, un nuevo estándar denominado DVB-H. Este estándar está enfocado a la transmisión de contenido multimedia (datos, video, audio) a receptores portátiles denominados “*handheld*”; dentro de los cuales caen los organizadores electrónicos, teléfonos celulares e incluso algunas computadoras portátiles. El DVB-H está basado en el DVB-T y hereda la característica de compatibilidad con estándares adoptados (*backward compatibility*). Puede también usarse en canales de 6, 7 y 8 MHz y puede coexistir con DVB-T, multiplexando sus flujos de datos en un sólo flujo de transporte. El propósito de crear este nuevo estándar se debió principalmente, a que el uso del DVB-T en este tipo de dispositivos consume demasiada potencia y hace que la pila se descargue rápidamente. Para ahorrar este consumo de potencia, DVB-H pone en práctica lo que denomina *time-slicing* o particionamiento en tiempo. Lo cual quiere decir que recibe la información por ráfagas de datos en tiempos específicos, no de manera continua como se requiere en DVB-T. Esto hace que el dispositivo no opere en gran parte del tiempo y por tanto ahorra energía (<http://www.dvb.org>). Otra de las características importantes de este estándar es que puede combinarse (opcionalmente) con parámetros de codificación y transmisión, diferentes al DVB-T. Permite agregar una capa de protección de errores denominada MPE-FEC (*Multi-Protocol Encapsulation/Forward Error Correction*), la cual protege aún más los datos, para recibirlos en un dispositivo que tiene una antena muy pequeña y que puede situarse en localidades muy diversas [25]. Asimismo, puede transmitirse usando un modo de 4k portadoras (3409) que junto con un

4.10 Características a consecuencia de los parámetros

entrelazador más robusto, permite mayor protección contra ruido impulsivo.

Sin duda, la recepción de contenido multimedia a dispositivos móviles va a ponerse de moda en unos años, pero aparentemente no hay mucho interés por parte de televisoras o incluso el público en general. Sin embargo, DVB está ganando mucha experiencia y proponiendo nueva tecnología, para en un futuro no muy lejano, seguir siendo los pioneros en esta área.

4.10.4. Modulación jerárquica

La modulación jerárquica es también una característica considerada a consecuencia del diseño del estándar DVB-T y no así en el ATSC. De esta forma, DVB-T tiene más alternativas para transmitir diferentes flujos de señales por el mismo canal.

La explicación de la modulación jerárquica se presenta en la sección 2.5.6. Entre una de sus posibles aplicaciones, permite la transmisión de un servicio básico de DTV en alta prioridad (HP), mientras que se pueden mandar servicios adicionales con baja prioridad (LP); incluso se puede mandar un servicio con calidad HDTV, ya que la tasa de datos puede variar entre 15 y 20 Mbit/s, dependiendo del ancho de banda que se use (6, 7 u 8 MHz) [74].

Una de las desventajas al considerar la modulación jerárquica es que implica mayor potencia de transmisión, ya que para una recepción fija la diferencia de la relación portadora-ruido está entre 9 y 11 dB más que la que se requiere en el modo no jerárquico. Es por eso que el uso de esta modalidad se recomienda sólo en aquellos casos donde realmente satisfaga las necesidades de las estaciones transmisoras, por ejemplo en zonas rurales [62]. El flujo de datos de alta prioridad puede recibirse en receptores fijos y móviles, mientras que el de baja prioridad, sólo en recepción fija.

4.10.5. Capacidad para HDTV

La televisión de alta definición fue uno de los principales propósitos que se fijaron en el diseño del estándar ATSC. Para esta organización la HDTV era un factor primordial, porque pensaban que el mercado de la televisión terrestre pudiera estar en una seria desventaja [9] sino lo contemplaba. Con los 19.39 Mbit/s que se pueden transmitir en el flujo del ATSC, es factible transmitir programación en alta definición según los perfiles y niveles establecidos por el grupo MPEG (MP@HL) e incluso puede transportar datos o servicios adicionales.

Debido a que se requiere al menos, de una tasa de datos de 18 Mbit/s para transmitir televisión de alta definición, el estándar DVB-T no contempla como una prioridad la transmisión de televisión en este formato. Para algunas combinaciones de los parámetros del DVB-T sería imposible (QPSK y 16-QAM con menos de una tasa de codificación $R = 3/4$) (aún en ambientes de 8 MHz) y para los casos donde

Comparación de los estándares ATSC y DVB-T

se puede transportar, se requiere de un nivel de alrededor de 1.5 dB más de potencia de la señal [74].

Desde los primeros reportes publicados de la organización DVB, se especificaba que el DVB-T permitía la transmisión de programación con calidad HDTV (en ambientes de 7 y 8 MHz, porque las pruebas en Australia así lo demostraron), sin embargo, las estaciones televisoras en Europa no creen que sea una opción viable de mercado, dado el costo de producción y recepción e incluso el público no ha sido demandante en este punto. Su posición inicial fue esperar a ver los resultados que se daban en Estados Unidos y Australia [39].

La HDTV en Estados Unidos ha permanecido en el gusto del público y tiene alrededor de 61 estaciones (de las 1491 que transmiten DTV), transmitiendo por lo menos un programa diario en este formato³. En Australia se están enfrentando a los problemas relacionados con el formato híbrido que adoptaron (a grandes rasgos, video en DVB-T, audio en ATSC), por lo que la transmisión de programas en este formato se ha retrasado algunos años. Uno de los principales problemas se debe a la demanda de los receptores, la gente no puede comprar cualquier tipo de receptor HDTV de diversas marcas porque es muy probable que no pueda decodificar la señal transmitida en Australia. Por tanto, tienen que adquirir diversos dispositivos más costosos y que incrementan el monto de recibir programación en HDTV. Esto lógicamente cae en el descontento de la población. Aún así, en la actualidad, se están poniendo productos al consumidor a precios más accesibles (<http://www.dansdata.com/hdtv.htm>).

Por otro lado, hoy en día la organización DVB no ha mencionado su preocupación por la transmisión de programación en HDTV y tal parece que la controversia entre estos estándares, seguirá con el enfoque de defender por un lado, la recepción en móviles del DVB-T y por otro, la transmisión y recepción de programación en HDTV de ATSC. Esto se prevee que dure por lo menos unos cuantos años más.

4.10.6. Convivencia con sistemas de TV analógicos

Por políticas en diversos países, es muy probable que en la transición del sistema analógico al digital, se usen ambos sistemas al mismo tiempo. En muchos casos los canales pueden estar muy separados frecuencialmente (incluso en bandas diferentes), pero en otros casos es probable que no. Por tal motivo es importante que los estándares protejan ambos servicios, tanto como el digital afecta al analógico, como el analógico al digital, dependiendo de la asignación de canales.

La característica de convivencia la tienen ambos estándares. Han considerado desde su diseño aquellos parámetros que se deben usar para no afectar al servicio

³http://www.ce.org/publications/books_references/dtv_guide/default.asp CEA (*Consumer Electronics Association*), <http://www.nab.org/newsroom/issues/digitaltv/> NAB (*National Association of Broadcasters*)

4.10 Características a consecuencia de los parámetros

existente. Aunque como se pudo observar en secciones anteriores, ATSC afecta menos en cuanto a características co-canal o de canales adyacentes.

Otro de los factores que se deben considerar es la potencia de transmisión requerida para recepción confiable, porque como también se mencionó, DVB-T requiere alrededor de 3 dB más para mantener la relación portadora-ruido, de manera que el área de cobertura sea similar en ambos estándares. Al requerir más potencia de transmisión, implica que los canales analógicos estén más propensos a interferencias.

4.10.7. Compatibilidad con otros sistemas de televisión

El término compatibilidad se aplica cuando 2 o más entes son afines y pueden llevar a cabo sus tareas sin necesidad de modificación alguna. Por ejemplo, compatibilidad en hardware se refiere a que varios componentes pueden conectarse directamente. En términos de sistemas de televisión, se refiere a que un sistema puede usarse con otro sin necesidad de hacer cambios en su estructura interna.

De acuerdo a la filosofía de DVB, la compatibilidad juega un papel muy importante en el diseño de un nuevo estándar. Para esta organización cada nuevo estándar se estudia y se diseña para tratar de que sea compatible con los ya existentes. Prueba de ellos son los estándares DVB-S, DVB-C y ahora DVB-T, los cuales en los procesos de codificación de fuente, transporte y codificación de canal son muy parecidos y siempre tratan de seguir una misma línea y cuando es necesario, añaden la funcionalidad necesaria para adaptarse a las circunstancias. Otra prueba de ello es el nuevo estándar liberado y conocido como DVB-H, mencionado anteriormente. Si cada sistema que implanta uno de los estándares anteriores, fuera construido por módulos que realizan cada uno de los procesos en la codificación de fuente, canal y modulación, se podría ver su compatibilidad por el hecho de coincidir en su estructura. Por ejemplo, aceptan video y audio en formato MPEG, los paquetes en la capa de transporte son de 188 bytes, los métodos de codificación de canal son en muchos casos idénticos o en otros casos se quita o sustituye un módulo por otro, los formatos de salida son los mismos, etc.

ATSC en cambio no consideró características compatibles con otros sistemas ya existentes, llámese de cable o satélite, simplemente partió de requerimientos iniciales y estableció las reglas para crear un nuevo estándar. En parte porque la mayoría de la televisión por cable o satélite que se usa en Estados Unidos, usa estándares que no fueron desarrollados por organizaciones de ese país. Así que dada la oportunidad, propusieron un estándar para transmisión terrestre y por cable, los cuales son compatibles. Se cree que no hicieron muchos esfuerzos en televisión digital por satélite, más que nada porque 2/3 partes del público televisivo en Estados Unidos, reciben la señal por cable (<http://www.fcc.gov>).

Se puede notar que ATSC y DVB-T en general no son compatibles, usan procesos

de modulación completamente diferentes y de codificación de canal. La única característica similar es que usan el estándar MPEG-2 para codificación de video, su capa de transporte es determinada por el estándar MPEG-2 y la longitud de los paquetes multiplexados es de 188 bytes. Inicialmente, no eran compatibles en la codificación de audio, pero a solicitud de soportar el sistema Dolby, DVB-T agregó la definición al estándar. En lo único que son compatibles es en las características de la señal de entrada. Lo cual por obvias razones, debe permitir que la mayoría de las señales de video que se manejan en los sistemas analógicos sean una fuente de entrada.

4.10.8. Servicios agregados

Los estándares de televisión además de transmitir video y audio con excelente calidad, permiten también el transporte de datos que pueden usarse para diversas aplicaciones. Esta es una funcionalidad extra que trae consigo la televisión digital. Los datos que acompañan al flujo de video y audio pueden usarse ya sea para un programa de televisión (por ejemplo, la sección con la programación diaria o la síntesis de un programa o película), así como para ejecutar aplicaciones que no esten relacionados con algún programa. Para esto es necesario la creación de estándares para la transmisión de datos (*Datacasting*).

Estos servicios aunque no forman parte fundamental de la televisión, ya que gran parte del ancho de banda lo consumen los datos para el transporte y recepción confiable de video y audio, pueden convertirse en una herramienta atractiva para los usuarios. Las distintas funciones que pueden realizar los servicios van a depender en muchos casos del contenido de los programas. Por ejemplo, una de las aplicaciones que se han visto hasta el momento (incluso aquí en México con la televisión satelital) es la interacción con un programa deportivo, donde el usuario puede seleccionar una vista o cámara diferente a la que establece la estación transmisora por omisión. Así el usuario puede apreciar el encuentro deportivo desde diferentes ángulos o vistas. También hay servicios donde el usuario puede solicitar datos adicionales de un jugador que se encuentre en pantalla, del equipo donde juega y ver estadísticas. En general, pueden haber muchas opciones para realizar programas interactivos que vayan desde el ámbito político, comercial, deportivo hasta el educativo. Se pueden desarrollar aplicaciones para compras por televisión, interacción en programas deportivos, programas de encuestas y trivias en canales infantiles, programas de encuestas en noticieros y políticos y más. La limitante aquí es la cantidad máxima de datos disponibles que se pueden transmitir en el canal y la imaginación para usarlos.

Los servicios agregados están abriendo nuevas vertientes de la televisión tradicional, dando paso al nuevo concepto de la televisión digital. Su gran aliado es la Internet. Es por tal motivo, que la televisión digital no sólo tiene que enfocarse a la forma tradicional de transmisión; transmitiendo programación desde una antena y recibéndola en un aparato televisor. Ahora puede extenderse hasta transmitir contenidos para ser recibidos y procesados ya sea por un aparato televisor o por una

4.10 Características a consecuencia de los parámetros

computadora personal, donde la interactividad se pueda dar incluso a través de la misma Internet.

Los estándares ATSC y DVB han propuesto estándares que les permitan generar aplicaciones para servicios interactivos.

Los esfuerzos de estandarización están tomando tres rumbos principalmente: 1. los ambientes declarativos, 2. los ambientes procedurales y 3. los estándares de metadatos.

Un ambiente declarativo permite diseñar contenidos en un lenguaje de alto nivel para ser procesados por un dispositivo generador de gráficos. Estos dispositivos pueden estar dentro de los *set-top box*⁴. Aquí un usuario navega a través del contenido interactivo.

En un ambiente procedural las aplicaciones son ejecutadas directamente dentro de un sistema operativo dentro del *set-top box*. Este ambiente surgió como una alternativa para crear aplicaciones que fueran más eficientes que aquellas que corrieran en un navegador (*browser*). Más que nada para aquellas situaciones donde el soporte del navegador era muy sobrado y una aplicación podría proporcionar funcionalidades específicas.

La programación con metadatos (datos acerca de los datos) ha crecido de manera importante. Ya que se usan para situaciones donde sólo es necesario incluir información extra de un programa o de una porción del contenido. El lenguaje usado es regularmente XML, lo cual hace más sencilla la integración y aligera el proceso de la interacción [35].

ATSC propuso un estándar conocido como DASE (*DTV Application Software Environment*). Este estándar forma la base para crear una amplia gama de servicios interactivos, definiendo las funciones avanzadas de un receptor “común”⁵. Dicho receptor debe contener una arquitectura, modelo de ejecución, sintaxis y semántica bien definida [7]. DASE soporta un ambiente declarativo, así como procedural. Permite la creación de contenidos considerando una funcionalidad similar a la de HTML 4.0; usando XDML (*Extensible DTV Markup Language*) y XHTML (*Extensible Hypertext Markup Language*). Además son soportados, diversos tipos de contenidos (CSS, DOM y varios más), así como los formatos más comunes de gráficos y video [35]. DASE interactúa con la plataforma receptora para aceptar entrada del usuario final y generar gráficos y audio para presentarlos en la plataforma de despliegue y sistemas de producción de audio. La plataforma receptora por su lado, debe proporcionar

⁴Dispositivo que permite la decodificación de la señal recibida

⁵La idea es construir una vez y correr la aplicación exitosamente en un receptor que adopte el estándar. Para esto cada receptor común debe garantizar su decodificación y despliegue. Así mismo los fabricantes tienen la libertad de seleccionar su hardware y sistemas operativos de su preferencia.

Comparación de los estándares ATSC y DVB-T

los sistemas operativos, servicios de entrada-salida y memoria. La interactividad en muchos casos se puede dar sin considerar canales de retorno, de hecho, la primer versión de DASE no soporta un canal de retorno, esta característica se ha dejado para versiones posteriores (el denominado DASE-2) [73]. Cabe mencionar que DASE es propuesto para aplicarse en sistemas de transmisión terrestres, pero no impide que puedan ser aplicados por sistemas de cable o satelitales.

A la fecha de escritura de este trabajo de investigación el estándar aceptado por ATSC para los servicios de televisión interactiva es DASE, pero actualmente hay una nueva propuesta para considerar un estándar para estos servicios. La propuesta se llama ACAP (*Advanced Common Application Platform*) y retoma la funcionalidad de sistemas de televisión interactiva como OCAP y el mismo DASE. Ya que OCAP es una derivación del estándar europeo MHP, hereda muchas de las características de éste, incluyendo la funcionalidad para tener un canal de retorno. Aunque con un ligero cambio a como se hace en MHP. Se cree que esta propuesta sea adoptada como un estándar por ATSC en el 2005 (www.tvtechnology.com).

Por su parte, el estándar DVB tiene el MHP, el cual va en su versión MHP 1.1. MHP viene de *Multimedia Home Platform* y es un estándar que define una plataforma abierta para servicios multimedia y de televisión interactivos. Fue aprobado desde Julio de 2000 y desde esas fechas ha continuado su desarrollo, para mejorarlo y añadir más funcionalidad. MHP define una interfaz genérica entre las aplicaciones interactivas y los dispositivos en los cuales se ejecutan. Su arquitectura es definida en tres capas, 1. recursos (procesamiento MPEG, gráficos, dispositivos de entrada/salida, memoria, CPU), 2. software del sistema (provee una vista abstracta de la plataforma hacia las aplicaciones, considerando API's, protocolos de transporte, máquinas virtuales, navegadores) y 3. aplicaciones (guías electrónicas de programas, servicios informativos, juegos, comercio electrónico, aplicaciones educativas). MHP está basado en un estándar denominado DVB-J, el cual incluye una máquina virtual como la máquina virtual Java definida por *Sun Microsystems*. Esto permite el uso de la mayoría de los paquetes definidos para Java, además de incrementar el API, donde se definen más funciones que se adapten a este tipo de aplicaciones. MHP maneja varios perfiles de aplicaciones, donde tienen bien definidas las herramientas que se usan para cada una de ellas. Algunas son para los servicios de transmisión mejorados (*Enhanced Broadcasting*), transmisión interactiva (*Interactive Broadcasting*) y acceso a Internet (*Internet Access*). El perfil de transmisión mejorada está enfocado principalmente a aplicaciones de una sola transmisión (sin considerar canal de retorno o si lo requiere será muy limitado), el de transmisión interactiva considera servicios con canales de retorno y el acceso, potencialidad y uso de Internet (www.mhp.org). Las aplicaciones en MHP pueden presentar imágenes, clips de video, música y texto en diversos formatos y pueden ser usados de manera similar a como se realiza en una computadora personal. La única diferencia es que no hay dispositivos como un teclado o un ratón, todo tiene que hacerse a través del control remoto del aparato receptor.

4.10 Características a consecuencia de los parámetros

Para los primeros dos perfiles mencionados en el párrafo anterior el canal de retorno puede formarse con un módem telefónico o de cable, pero para el tercero es más adecuado un módem de cable u otras tecnologías de banda ancha. Estos módems serán incluidos como parte de las características del *set-top box*.

Considerando las experiencias del proceso de evaluación entre diferentes estándares y la información de sus características, producto de los parámetros del desempeño para ponerlos en práctica, en el capítulo siguiente se presentan comentarios y sugerencias a manera de recomendación técnica para un proceso de adopción.

Capítulo 5

Recomendación técnica para la adopción

En el capítulo anterior se mencionan aquellos factores técnicos importantes que consideraron diversas organizaciones en distintos países, para evaluar el desempeño de los estándares en condiciones locales. Con la evaluación de cada uno de esos factores, las organizaciones emitieron recomendaciones técnicas a los comites gubernamentales, para decidir sobre la adopción de un estándar de televisión digital terrestre.

A continuación se presenta una breve reseña de las experiencias que se tuvieron en diversos países, con miras a la adopción de un estándar. Se menciona además, si dicho país ha adoptado uno.

5.1. Experiencias de DTV en diversos países

5.1.1. Estados Unidos de América

A pesar de que en Estados Unidos se diseñó y desarrolló el estándar ATSC 8-VSB, se hicieron pruebas de desempeño y comparación con el estándar DVB-T COFDM. El proyecto fue denominado *8VSB/COFDM Project* y lo formaron una gran cantidad de estaciones transmisoras voluntarias, con el propósito de hacer pruebas de laboratorio y recepción con antenas exteriores, interiores y portátiles, para comparar el desempeño de los estándares; usando el mejor equipo disponible hasta ese momento. Para las pruebas de campo se consideraron tres ciudades principalmente: Washington, Baltimore y Cleveland. Las zonas de prueba en esas ciudades fueron seleccionadas por ser consideradas como zonas geográficas conflicto para la recepción de televisión analógica.

Las primeras tareas realizadas fueron con respecto a la selección del equipo, sometiéndolas a pruebas de laboratorio y campo. Cabe mencionar que los fabricantes de equipo juegan un papel muy importante, ya que sin su colaboración las pruebas de

Recomendación técnica para la adopción

este tipo serían mucho más costosas de lo que ya son. El equipo (tanto moduladores como receptores) con los mejores resultados en la evaluación, fueron seleccionados, configurados y calibrados, para adaptarse a las condiciones de las pruebas de campo.

La evaluación de las pruebas fue llevada a cabo bajo las condiciones actuales de cobertura e interferencia que se presentan en zonas donde el terreno es muy variado y que propician un ambiente de multitrayectorias fuertes, moderadas o débiles, así como también ambientes con ruido impulsivo. La evaluación de la cobertura se hizo tomando en cuenta mediciones de forma *radial*, en *arco*, en *grids* y en *cluster*.

Las medidas en forma radial estudian la variabilidad de la señal en un rango de condiciones de terreno y distancia, donde la intensidad del campo¹ a lo largo de la zona radial de interés, es teóricamente predecible como una función de la distancia del transmisor. Las medidas en arco estudian la variabilidad de la señal, sobre condiciones de terreno a una distancia única del transmisor. Estas ayudan a eliminar la dependencia de la distancia del transmisor. Las medidas en *grids* estudian la variabilidad de la señal en áreas rectangulares definidas en zonas urbanas, suburbanas, rurales con áreas de vegetación y topografía variada. Las medidas en cluster se usan para obtener un grano fino de los datos en las mediciones de *grids* [60].

Las pruebas también consideraron condiciones donde hubiera interferencia entre NTSC y DTV y DTV-DVT en canales adyacentes o co-canal.

En cada una de las localidades se distinguieron los sitios de prueba y se hicieron pruebas de recepción considerando antenas ubicadas a aprox. 1.88 m y 9.14 m, 6 y 30 pies, respectivamente. Las antenas también fueron sujetas a rotación en intervalos regulares.

Las pruebas de laboratorio se hicieron a cada uno de los equipos recibidos (tanto de ATSC como DVB-T), para seleccionar aquel que tuviera el mejor desempeño para las pruebas de campo. Las pruebas realizadas a los equipos fueron para evaluar:

- proporción portadora-ruido (C/N)
- interferencia co-canal (DTV-DTV)
- interferencia en canales adyacentes superior e inferior (NTSC-DTV, DTV-DTV)
- multitrayectorias, cancelación de fantasmas (estáticos y dinámicos)
- rangos dinámicos del receptor (máximos y mínimos)

¹También referido como la “fuerza del campo” (*field strength*), es un término que usualmente significa la magnitud del campo eléctrico, comúnmente expresado en volts por metro (<https://ewhdbks.mugu.navy.mil/fieldint.htm>)

- ruido de fase

Después de haber seleccionado los mejores equipos para transmitir y recibir, se seleccionaron las instalaciones para la transmisión. Regularmente se usan aquellas que transmiten televisión analógica y se usan vehículos equipados para la recepción de la señal.

La calibración de los equipos juega un papel fundamental para proporcionar medidas confiables y proporcionar valores apegados a los ambientes reales. Cada vez que los equipos se sometían a pruebas se realizaban procesos de calibración para obtener los mejores parámetros de recepción. La calibración se hizo para cada tipo de prueba de campo, tanto en exteriores, portátiles como en interiores.

También se llevaron a cabo análisis de fallas. Esto es, se trataron de determinar los posibles factores que provocaron que la recepción confiable no se haya llevado a cabo. Algunas de las posibles razones se debieron a:

- nivel de señal inadecuado (la señal no rebasa el mínimo requerido)
- ruido (ya sea natural o provocado por el hombre)
- señales RF que interfieran (co-canal o canales adyacentes, incluso señales de radio FM)
- multitrajectorias (ecos estáticos o dinámicos)
- características del receptor

Después de recopilar datos de las pruebas de campo, se llevo a cabo un proceso para analizar dichos datos. El análisis consideró la intensidad del campo y la distancia del transmisor para mostrar el número de sitios con recepción exitosa. La recepción exitosa se consideró como aquella que tuviera no más de 5 *hits* en intervalos de 5 minutos; definiendo como *hit* aquel desperfecto provocado por la no corrección de los datos en el proceso de decodificación, generando *macroblocking*, “congelamiento de cuadros” o simplemente no mostrando imagen alguna. Si cada uno de estas imperfecciones se producían en 1 segundo, se contaba como un *hit*. Cada sitio que tuviera más de 5 hits en un periodo de 5 minutos se consideraba como un sitio fallido. Los datos de las mediciones que no pudieran ser tomados por diversas razones, como el mal funcionamiento del equipo o la pérdida de la comunicación con el transmisor, fue completamente descartado.

Uno de los análisis que tuvieron mayor importancia para el estudio, fue la cantidad de población beneficiada o afectada con el uso de un estándar u otro. Este es considerado como un factor primordial por las televisoras, ya que no tendría caso poner en práctica un estándar donde la recepción confiable sea en aquellas zonas donde hay menos población.

Recomendación técnica para la adopción

Es difícil pensar que los Estados Unidos de América llegara a descartar el estándar propuesto por ellos. Aún así, hicieron el esfuerzo para comparar los estándares y ganar con eso la experiencia y el conocimiento de la debilidad de su estándar para el reforzamiento en un futuro.

5.1.2. Unión Europea

La Unión Europea desde los años 1980's, ha estado proponiendo nuevos esquemas para el desarrollo de la transmisión de televisión de alta definición y posteriormente la televisión digital para satélite, cable y terrestre. En ese entonces, diversas empresas alemanas mantenían relaciones de negocios con fabricantes japoneses, lo que dió lugar a que un grupo de ellos también se involucrara en los grupos de discusión. Se propuso un esquema denominado HD-MAC, donde era posible transmitir televisión de alta definición en redes de satélite y cable. Dado que el sistema no era del todo viable, en Suecia se hicieron esfuerzos por desarrollar otro estándar que permitiera la transmisión de HDTV. El sistema fue denominado HD-DIVINE, pero los esfuerzos no fueron del todo bien enfocados y el sistema fue considerado no viable técnicamente. De esta forma a finales de 1991, un grupo encabezado por la industria alemana, comenzó las primeras discusiones para proponer una solución técnica mundial, para la transmisión de televisión digital, dando como resultado el surgimiento, un par de años después, del proyecto internacional DVB.

Con estos antecedentes era muy difícil que alguien de la Unión Europea adoptara un estándar diferente para su país. Todos estaban aportando ideas y soluciones para que el estándar que estaban construyendo, fuera usado y adaptado a condiciones propicias para su país, incluso a nivel mundial. El primer país que puso en marcha un servicio comercial de televisión digital, fue Francia en abril de 1996 [52], pero el primer país en poner en marcha los estándares propuestos por DVB, fue Reino Unido. Comenzaron con el DVB-S en octubre de 1998, luego con DVB-T en noviembre de 1998 y posteriormente el DVB-C. El resultado fue que para noviembre de 2001, Reino Unido tenía 8.3 millones de casas digitales; 5.5 millones usando DVB-S, 1.6 usando DVB-C y 1.2 usando DVB-T [71].

La estrategia de Reino Unido (en particular de la *British Broadcasting Corporation-BBC*, en conjunto con otras estaciones transmisoras) para poner en marcha el estándar digital terrestre, fue hacer un plan inicial que contemplaran pruebas de laboratorio y campo, para conocer los parámetros propicios para el planeamiento del servicio.

Las pruebas de laboratorio las dividieron en 2 partes principalmente. La primera fue para establecer los radios de protección para los servicios existentes (PAL-I) que pudieran ser afectados por DVB-T, por ejemplo con interferencia co-canal y en canales adyacentes. La segunda fue para verificar el desempeño del modulador/demodulador usado, donde se observó el desempeño en condiciones de interferencia co-canal PAL-I, con ruido aditivo blanco Gaussiano (AGWN) y señales eco (multi-

trayectoria).

Las pruebas de campo las llevaron a cabo definiendo la frecuencia de transmisión, los parámetros del modulador (modo de mapeo, número de portadoras, tasa de co-dificación, intervalo de guardia) y adecuando un vehículo para las pruebas de recepción en móviles. En ellas obtuvieron los valores mínimos para la proporción portadora-ruido de la señal (C/N), determinaron la magnitud de la variación de la intensidad de campo en pequeñas áreas geográficas (1 x 1 km) dentro del área de cobertura. Hicieron pruebas de recepción en exteriores y en interiores para hacer mediciones principalmente con antenas de 10 m de altura.

Cabe mencionar que diversos grupos de la industria de la televisión en la comunidad Europea propusieron un proyecto denominado VALIDATE (*Verification And Launch of Integrated Digital Advanced Television in Europe*), el cual a su vez forma parte del proyecto ACTS (*Advanced Communication Technologies and Services*). VALIDATE fue encabezado por la BBC de Londres desde finales de 1995, quienes junto con 19 representantes de 9 países europeos, donde se incluyeron además de estaciones transmisoras, centros de investigación, la EBU (*European Broadcasting Union*), especialistas en redes y telecomunicaciones, junto con fabricantes de equipo. En conjunto hicieron la planeación para verificar el estándar DVB-T, con miras al lanzamiento de los servicios. En dicho proyecto primero se hicieron pruebas de laboratorio y simulaciones por computadora, posteriormente se hicieron pruebas de campo. Se especificaron los procedimientos para la toma de mediciones en pruebas de laboratorio y campo y se acordó el intercambio de resultados para su comparación. Con la ayuda de las simulaciones y pruebas de laboratorio lograron establecer el rango extensivo de los resultados, el cual posteriormente era ratificado o ajustado con las pruebas en campo. También se evaluó el desempeño general del sistema, donde se usaron diferentes combinaciones de parámetros y diferentes condiciones de recepción [56].

Con tal organización y con las experiencias de los primeros países en poner en marcha los estándares digitales, cada vez son más los países que están proporcionando servicio de televisión digital terrestre (lógicamente todos ellos usando DVB-T), entre los que destacan: Suecia, Alemania, España, Holanda, Italia, Finlandia, Irlanda, Dinamarca y Portugal.

5.1.3. Australia

Australia fue uno de los primeros países que no pertenece a la unión europea y además de Estados Unidos de América, en considerar el cambio de televisión analógica terrestre a digital. El proceso inició desde enero de 1997 cuando un grupo especialista en la transmisión de televisión digital terrestre le recomendó al gobierno australiano la puesta en marcha de un estándar digital. Le aconsejaron que dicho estándar debería soportar el ancho de banda usado por sus canales analógicos (7

Recomendación técnica para la adopción

MHz).

Australia se convirtió así en el primer país que tenía que decidir por el uso de uno de los estándares de televisión digital terrestre más populares, DVB-T o ATSC. Formaron un panel que incluía representantes de todas las estaciones transmisoras y por gente del gobierno. En él se determinaron las pruebas de laboratorio y transmisión para ambos sistemas. También, otra de las tareas del panel fue evaluar los resultados y hacer una recomendación que indicara cual de los estándares era más apropiado para los requerimientos de Australia.

El reporte del panel recomendó la adopción del estándar europeo DVB-T, y además recomendó el uso del sistema de procesamiento de audio Dolby AC-3, usado por el estándar ATSC y no soportado en aquel entonces por DVB-T [56].

Los criterios que se establecieron para la adopción, incluían factores que no se considerarían como fundamentales y aquellos que sí. Entre los no fundamentales destacan:

- la disponibilidad de equipo de transmisión, modulación y multiplexaje
- costos operativos del sistema
- soporte para programación múltiple
- interoperabilidad con video reproductoras
- exploración entrelazada vs. progresiva

Aquellos factores que destacan en los fundamentales son:

- Cobertura
 - cobertura primaria y secundaria de servicio a la población
 - capacidad para recepción en móviles
 - desempeño co-canal
 - desempeño entre canales adyacentes
 - desempeño con multitrayectorias
 - inmunidad a interferencia electromagnética
- Elementos de diseño de los sistemas
 - uso de antenas comunes de transmisión analógico y digital
 - costo de implantación y facilidad de uso en transmisores traductores (*in-fill transmitters*)
 - capacidad de retransmisión de canal común

- Modos de operación soportados
 - HDTV
 - subtítulo (*closed captions*)
 - audio multi-lingüístico
 - sistema de audio
- Elementos de recepción
 - capacidad para MP@HL (usado para HDTV)
 - capacidad para PAL y DTTB
 - disponibilidad de receptores no específicamente diseñados para Australia
 - actualizaciones de software y herramientas
 - disponibilidad para proporcionar selección automática del canal

Para la evaluación se consideraron los resultados de las pruebas de laboratorio, de las pruebas de campo, la información disponible del mercado de la televisión digital terrestre, el conocimiento acumulado en los años de participación en el estudio y desarrollo de la televisión digital, así como los requerimientos legislados por el gobierno, particularmente, la necesidad de proveer de HDTV, transmisión simultánea de programas (en analógico y digital) y proporcionar la misma cobertura en digital, del actual estándar analógico.

De acuerdo con los resultados de las pruebas y de los análisis realizados se optó por recomendar el estándar europeo. Incluso se llega a mencionar, que se debió al vínculo estrecho que mantienen con los países de la Unión Europea, ya que muchas de las pruebas realizadas favorecían al ATSC. Uno de los cuales era precisamente la transmisión de HDTV, ya que como se ha mencionado, para la comunidad europea, por ahora no es factor primordial. Aún así, las pruebas realizadas en ATSC fueron llevadas a cabo en su ambiente para el cual fue diseñado, es decir, en 6 MHz. Esto implica hacer cambios en la planeación del espectro y también hacer las modificaciones pertinentes para que convivan el estándar actual analógico y el ATSC, una de las razones por las cuales, prefirieron mejor optar por un estándar para uso en canales de 7 MHz.

Una de las consecuencias de la recomendación australiana, después de optar por el uso de DVB-T, fue que los costos de transición aumentaron, ya que por requerimiento, Australia tenía que seguir transmitiendo televisión analógica, además de hacerlo en televisión digital en formato STDV, ya que en ese entonces, no se contaba con equipo que soportara HDTV con DVB-T y seguir con pruebas para soportar el formato de alta definición. Esto implicó hacer un *triplecast* de su programación (PAL, SDTV y pruebas para HD). Otra de las partes costosas son los equipos receptores, ya que se tuvieron que empezar a fabricar equipos que permitieran la decodificación

Recomendación técnica para la adopción

en DVB-T, audio Dolby AC-3 y la opción para HDTV, solamente para Australia, ya que ningún otro país a optado por la misma solución.

5.1.4. Brasil

Brasil también fue uno de los primeros países en comenzar los procesos de transición a la televisión digital terrestre. Comenzó desde 1994 definiendo un grupo para el estudio técnico de la televisión digital, el cual fue denominado ABERT (*Associação Brasileira de Emissores de Rádio e Televisão*). Este grupo junto con el SET (*Sociedade Brasileira de Engenharia de Televisão e Telecomunicações*) fueron los comisionados para hacer las pruebas pertinentes y realizar el análisis comparativo para recomendar un estándar de televisión digital terrestre.

Brasil cuenta con un estándar analógico propio, el cual es denominado PAL M. Este estándar considera el barrido en formato NTSC para blanco y negro y el barrido en formato PAL para el color, en canales de 6 MHz. El haber seleccionado este estándar de televisión analógica, hizo que los costos de los receptores fueran más altos que los rangos nominales en precios de receptores NTSC o PAL. En la actualidad, Brasil está pasando por una situación similar, ya que existe una tendencia para adecuar características de los estándares disponibles, para formar uno propio. Esto es, la tendencia es usar características importantes de ambos estándares digitales para crear un híbrido.

Las pruebas y resultados realizados en Brasil fueron muy discutidas, tanto que hasta la fecha Brasil no cuenta con un estándar de televisión digital terrestre adoptado. Este país también fue de los primeros países en hacer pruebas de comparación de los estándares disponibles (ATSC, DVB-T e ISDB-T). En un principio, las opiniones del estándar a adoptar estaban a favor del DVB-T, básicamente por la característica de recepción en dispositivos móviles. Al darse cuenta de esta tendencia, ATSC emitió una serie de comentarios a ANATEL (*Agência Nacional de Telecomunicações*), donde hacía ver que los primeros resultados emitidos por sus pruebas, tenían ciertas deficiencias y en algunos casos se habían omitido algunos valores que justificaran el fallo final². Brasil continuo haciendo pruebas, incluso con equipo de generaciones más reciente. De tal forma que con la retroalimentación por parte de ATSC y nuevos equipos de DVB-T e ISDB y la experiencia ganada, esperarían que la determinación del estándar a usar fuera la más apropiada.

Al parecer, ATSC ha hecho una labor de mayor convencimiento, ya que ha emitido a ANATEL diversos documentos con comentarios, presentando las ventajas de adoptar ATSC para su país. Aún así, las pruebas recientes hechas ya con prototipos de nueva generación (incluso considerando E-VSB) han dado la ventaja a ISDB, ya que de acuerdo al modelo de negocios que quieren adoptar (el cual considera

²Documento emitido por ATSC llamado *ATSC Comments on SET/ABERT "3rd Partial Report and Data"*

transmisión de HDTV o múltiples programas, transmisión para receptores móviles, portátiles y transmisión de datos (*Datacasting*), todos ellos con la característica de ser flexibles), resulta ser el más apropiado [63].

5.1.5. China

China fue otro de los países que no se conformó con adoptar un estándar establecido, por creer que no cubría las expectativas y requerimientos.

La Universidad de Tsinghua junto con diversos grupos de investigación (HDTV-TEEG *Technical Expert Executive Group* y la ABS *Academy of Broadcasting Science*) y la industria de la televisión, así como con apoyo del gobierno, impulsaron el desarrollo de un estándar propio, basado en algunas características de los estándares ATSC y DVB-T. Ellos han estado muy atentos al desarrollo de la DTV en otros países donde se usa ATSC y DVB-T y no se convencieron en adoptar alguno por pensar que tenían deficiencias que les preocupaban, dando pie al planteamiento para que China cuente con un estándar propio.

Fue así que en el grupo de desarrollo están proponiendo soluciones basadas en COFDM y 8-VSB, para recepción en móviles y con HDTV, en ambientes de 8 MHz, poniendo también mucho peso en los servicios agregados, para transmisión de datos y servicios de video en demanda. Aún cuando las propuestas fueran aprobadas, se harían pruebas de campo con ATSC y DVB-T, para determinar cual adoptar³.

Son dos las propuestas que compiten por ser el estándar local. Uno es denominado DMB-T *Digital Multimedia Broadcasting/Terrestrial* de la Universidad de Tsinghua y ADTB-T *Advanced Digital Television Broadcasting-Terrestrial* de la Universidad de Shanghai Jiaotong. El DMB-T está basado en la transmisión de multipotadoras (semejante al DVB-T) y el ADTB-T está basado en una tecnología de portadora única (semejante al ATSC). Incluso para este último, existen reportes emitidos por el CRC (*Communications Research Centre*) de Canada, el cual hizo pruebas de laboratorio a finales del 2002. En dicho reporte se indica que el sistema es muy robusto al efecto Doppler, producido en la recepción en móviles, así como a fuertes distorsiones de multitrayectoria estáticas y dinámicas; características que les permitirán transportar datos a altas velocidades en receptores móviles. Sin embargo, recomendaron que deberán hacerse pruebas exhaustivas de campo para tener resultados más precisos y confiables [23].

Los chinos estaban convencidos que el estándar propuesto para su país, superaría tanto al estadounidense como al europeo. Sin embargo, para principios de febrero del 2004, China seguía sin decidir por un estándar. El gobierno pospuso indefinidamente el lanzamiento de un estandar DTV, ya que hubo que mejorar las propuestas

³<http://www.china.org.cn/english/6942.htm>

Recomendación técnica para la adopción

locales porque tenían defectos técnicos. Además la adopción de un estándar externo implicaba para las empresas chinas invertir en altos costos de derechos⁴.

Hasta la fecha China no tiene un estándar adoptado, pero tienen la fecha límite de 2005 para hacerlo⁵.

5.1.6. Taiwan

Dada la tendencia de este país por ir en el camino de lo digital. El gobierno de Taiwan después de hacer una evaluación y ver las ventajas económicas para su país, mencionó en 1998 que el estándar a adoptar sería el propuesto por Estados Unidos de America (ATSC) y que para finales del año 2001, todas las estaciones deberían estar en servicio. La determinación pudo deberse a que en Taiwan se usa el estándar analógico NTSC en canales de 6 MHz.

Sin embargo, unos años después (febrero de 2001) se llevarían a cabo las pruebas de los dos estándares más populares, para reafirmar la decisión inicial y tener un soporte para determinar el estándar a adoptar. Las pruebas de recepción consideraron lo siguiente (en un ambiente de 6 MHz):

- recepción fija con antena exterior (en 102 estaciones)
- recepción móvil en exteriores (a lo largo de avenidas y calles)
- recepción fija con antena en interiores (en 103 estaciones)

En las pruebas de recepción con antena exterior se midieron la potencia promedio de la señal, la proporción portadora ruido, la proporción portadora ruido en el umbral de visibilidad (cuando se deja de ver imagen), la tasa de símbolo en error, la tasa de bit en error, el grado de visibilidad según CCIR, entre otros. Los resultados determinaron que la recepción con DVB-T fue mejor y que la señal fue recibida con mayor grado CCIR en el DVB-T, en más sitios que el ATSC.

Los resultados de las pruebas de recepción en vehículos en movimiento fueron totalmente a favor del DVB-T, ya que no fue posible la recepción con ATSC.

Finalmente para las pruebas de recepción en interiores, hubo que considerar que la ciudad de Taiwan tiene muchos edificios altos, los cuales pueden generar multi-trayectorias de la señal. En este sentido, de nueva cuenta los resultados favorecieron al DVB-T, ya que la recepción se logró en mayor cantidad de sitios que el ATSC. Con estas pruebas se dieron cuenta que la misma configuración de parámetros del DVB-T usado para la recepción confiable en interiores, fue la misma que la usada en la recepción en móviles. Dando lugar así a proponer una base para la transmisión

⁴<http://www.asiamedia.ucla.edu/article.asp?parentid=7164>

⁵http://www.usito.org/uploads/310/weekly_mar11.html

del estándar.

Con base en el análisis de los resultados, la autoridad de telecomunicaciones en Taiwan decidió adoptar el estándar DVB-T. El cual es usado en la actualidad por las cinco estaciones transmisoras de televisión en el país [38].

5.1.7. Singapur

En 1997 se formó en Singapur el comité técnico para la televisión digital. Dicho grupo está formado por gente del gobierno y comisiones regulatorias, por proveedores de servicio y estaciones transmisoras, así como de institutos de investigación. Este grupo tuvo como propósito emitir la recomendación para adoptar un estándar de televisión digital.

Para la planeación de sus pruebas el grupo determinó la serie de factores que se consideraron para la adopción y para ponerlas en marcha, fueron asesorados por grupos de expertos de los 3 estándares a probar; aunque el ISDB-T en aquel entonces no era aceptado todavía por la ITU. Diversos grupos se unieron también al comité, dentro de los que destacan grupos de trabajo para la validación, propagación y predicción de los datos y dispositivos de recepción. Los factores a considerar para la adopción fueron los siguientes:

- robustez en cuanto a recepción de la señal con respecto al nivel de potencia
- inmunidad a interferencia eléctrica
- distorsiones por multitraectoria
- cobertura efectiva y eficiente en términos de transmisión con menos potencia
- recepción con antenas en interiores
- recepción en áreas de poca recepción
- desempeño con canales analógicos y digitales adyacentes
- desempeño co-canal
- recepción en móviles

Además de estos factores, se consideró también la disponibilidad de equipo a corto plazo, consideraron los costos para los consumidores, así como los servicios de valor agregado que otorga la DTV, entre los que destacan: TV en móviles, servicios multimedia interactivos y video en demanda, así mismo, había cierta tendencia para considerar audio multicanal 5.1.

Recomendación técnica para la adopción

En relación a la HDTV, las dos principales cadenas televisoras decidieron no darle prioridad a ese servicio.

Después de llevar a cabo las pruebas y de haber hecho el análisis pertinente el panel emitió una serie de recomendaciones, donde la primera indica que por unanimidad acordaron recomendar el estándar DVB-T. Las demás recomendaciones estuvieron enfocadas a las aplicaciones, interoperabilidad entre servicios y a los receptores [69].

5.1.8. Malasia

En Malasia también se creó un grupo dedicado a estudiar los estándares disponibles y proponer uno que sea apropiado para las condiciones del país. Los estándares a evaluar también fueron los tres principales.

Aquí se usó una metodología peculiar para la adopción [41]. Consistió en asignar una cantidad de peso y calificaciones a los factores de decisión. Lo que se hizo fue calificar del 1 al 3 el desempeño del sistema considerando un factor, éste se multiplicó por un peso fijado para obtener una calificación parcial. Para esto se formó una lista de factores y sumando los resultados parciales para cada estándar, se obtuvo una calificación final. La cual fue usada para decidir por el estándar que se adoptó. Un ejemplo de la tabla usada con la lista de factores se muestra en la tabla 5.1.

La lista de factores mostrados en la tabla 5.1 muestra sólo algunos de los factores, la lista completa se presenta en [41]. Se desconoce cuáles fueron los criterios de calificación para cada factor. Aún así, no solo fueron considerados los factores técnicos, también hicieron estudios para determinar cuál era mejor comercialmente. El estándar adoptado debería ser aquel que fuera usado en muchos países, para garantizar el intercambio de programas.

Al final decidieron que el estándar DVB-T es el más apropiado para sus requerimientos, a pesar de que el ISDB (estándar japonés) mostraba aspectos técnicos superiores.

5.1.9. Hong Kong

Hong Kong también fue uno de los países polémicos para la adopción de su estándar de televisión digital terrestre. Las pruebas llevadas a cabo en dicho país favorecieron en gran medida a ATSC, la recepción con antena exterior y en interiores fue buena, incluso en aquellas zonas donde el sistema PAL (estándar analógico actual) no era recibido satisfactoriamente. El grupo evaluador se mostró preocupado porque ATSC no fue diseñado para redes de frecuencia única, ni para recepción en móviles; siendo este último un factor sin mucha importancia en esa región.

5.1 Experiencias de DTV en diversos países

Factor	Desempeño sistema			Peso	Calificación			Comentarios
	ATSC	DVB-T	ISDB		ATSC	DVB-T	ISDB	
Recepción robusta	1	2	3	3	3	6	9	ISDB tiene canalización en tiempo y frecuencia
Recepción en exteriores	3	2	1	1	3	2	1	ATSC da mejor cobertura con la misma potencia del transmisor
Recepción en interiores	1	2	3	3	3	6	9	COFDM puede contrarrestar los problemas de propagación de multitrauectorias
Recepción en móviles	0	2	3	2	0	4	6	DVB-T mejoró recepción con antenas diversas
Eficiencia del espectro	1	2	3	2	2	4	6	ISDB permite manejar servicios de radio, TV y HDTV
Servicios de HDTV	3	1	2	1	3	1	2	DVB-T no está promoviendo este servicio
...
Puntos Totales					55	88	58	DVB-T es la mejor opción

Tabla 5.1: Análisis de TV digital terrestre en Malasia.

El comité de Hong Kong recomendó adoptar el estándar DVB-T, argumentando que era el más apropiado para su país, ya que su estándar analógico actual trabaja en 8 MHz.

Los resultados de su reporte hicieron que ATSC emitiera varios comentarios al desempeño de sus pruebas y los resultados en su evaluación, similar a como lo había hecho con Brasil, ahí indicaban que las pruebas no fueron hechas correctamente, en principio porque los sistemas fueron probados en periodos muy largos unos tras otros, incluso meses después, además de que algunas pruebas no se hicieron en los mismos sitios. Esto provocaría que las condiciones del tiempo fueran muy diferentes en la evaluación de los estándares e impediría que se hiciera una comparación justa⁶.

Aún así Hong Kong decidió adoptar el estándar DVB-T, pero con una variante

⁶ATSC Comments on Honk Kong Tests of DTTB Systems and Comparison of Results for ATSC, DVB-T and ISDB-T

Recomendación técnica para la adopción

similar a la adoptada por Australia y Singapur, decidieron incluir el estándar Dolby AC-3 (el usado en ATSC), para la codificación del audio.

5.1.10. Argentina

En Argentina se presentaron algunos problemas a consecuencia de la adopción de su estándar de televisión analógico PAL N (625 líneas, 25 cuadros por segundo, 6 MHz ancho de banda, sonido FM y formato de color PAL) por características adicionales que después sólo se podían usar con NTSC. Lo adoptaron porque determinaron que era el más adecuado tecnológicamente. Los problemas se debieron a que los receptores de televisión eran escasos y caros, ya que había que hacer los ajustes necesarios para usar canales de 6 MHz. Tuvieron que adquirir receptores que ofrecían soporte tri-norma (PAL M, PAL N y NTSC) para cubrir las recepciones en todas las fronteras (ya que Brasil había adoptado PAL M y Chile NTSC). Además cuando aparecieron los nuevos servicios se tuvieron que adaptar aquellos que pudieron ser recibidos con el formato NTSC, ya que no habían sido diseñados para PAL N. Algunos de estos fueron:

- audio estéreo (norma BTSC-NTSC)
- subtítulaje (*closed caption*)
- cancelador de fantasmas (los canales lo transmitían, pero no había receptores PAL N disponibles)
- salida de video de PC's y cámaras de fotos digitales
- DVD (sólo en formato NTSC)
- DTH TV directa por satélite
- TV PC Intranet o Internet en la TV, sólo para formato NTSC

Esos antecedentes llevaron a los grupos de radiodifusión, al gobierno, a los fabricantes de receptores y organizaciones de defensa del consumidor a estudiar las alternativas tecnológicas para la adopción de TV digital. Analizando además, el modelo comercial.

En 1998 se adoptó formalmente el estándar ATSC, pero el nuevo gobierno después de ese año, especificó que serían revisadas las decisiones hechas por el anterior gobierno. De esta forma se analizaron las propuestas tanto Estadounidense como Europea, además de considerar las experiencias de otros países como Brasil, Australia, Japón y China.

Las consideraciones que se tuvieron para la TV digital fueron las siguientes:

- compatibilidad de sistemas de cable, satélite y terrestre

5.1 Experiencias de DTV en diversos países

- respetar el ancho de banda por canal de 6 MHz
- transmitir la mayor calidad posible desde el inicio (HDTV)
- posibilidad de fabricar convertidores de HDTV a NTSC para usarse con los actuales receptores analógicos
- disponibilidad para diferentes tamaños de emisoras, grandes, medianas y chicas
- disponibilidad de servicios ya desarrollados para la audiencia pública

Decidieron hacer sólo pruebas con un estándar nativo (en cuanto a los 6 MHz), para evitar costos. Con eso se dieron cuenta que el estándar más apropiado para Argentina era el ATSC. También influyo mucho el estudio de mercado, con base en la penetración y costos que tenían los receptores de TV digital en Estados Unidos de América.

Finalmente ratificaron la decisión de adoptar ATSC, no definiendo plazos ni fechas para la puesta en marcha del estándar⁷.

5.1.11. Canada

Canada ha estado involucrado junto con Estados Unidos en el desarrollo del estándar ATSC. De esta forma adoptó formalmente el estándar desde 1997[†].

El caso particular es que Canada no tiene que hacer fuertes inversiones en pruebas ni desarrollo (más allá de las invertidas por el desarrollo del estándar), principalmente por participar conjuntamente con Estados Unidos en las pruebas de transmisión y recepción, sacando ventaja de las experiencias de Estados Unidos y porque pueden tomar ventaja de los bajos precios en equipo de producción y para el consumidor, cuando el estándar sea usado en el periodo de transición.

5.1.12. México

A raíz de la liberación de los estándares a nivel mundial, México comenzó también su análisis con miras a adoptar un estándar.

Junto con entidades de gobierno y representantes de las cadenas televisivas más importantes del país, se formó el “Grupo Consultivo de Tecnologías Digitales para la Radiodifusión”. Este grupo estuvo encargado de hacer las pruebas necesarias de los estándares digitales disponibles, para emitir una recomendación.

⁷Consideraciones sobre la TV digital Terrestre para la Argentina. Ing. Juan Carlos Guidobono. Junio de 2004

[†] <http://www.atsc.org/fccdtv.html>

Recomendación técnica para la adopción

En el año 2001 se evaluaron los tres principales estándares (ATSC, DVB-T e ISDB-T), siendo también de los primeros países donde se hacían pruebas con dichos estándares y el primero en hacerlo en canales de 6 MHz.

Los objetivos de las pruebas fueron: completar el trabajo de evaluación de la DTV, conocer los parámetros reales de operación del ISDB en 6 MHz, transmitiendo SDTV y HDTV, para recepción en móviles e interiores. Además, comparar el comportamiento de cada uno en convivencia con NTSC, midiendo la recepción de la señal en las zonas conflicto de la Ciudad de México⁸ y en las zonas de sombra al norte de la ciudad, transmitiendo la señal desde el cerro de Tres Padres (norte de la CD. de México).

Las pruebas se llevaron a cabo configurando cada uno de los estándares para transportar la misma cantidad de datos (tasa de bit aproximada a 19 Mbps) y proporcionar la mejor calidad de imagen posible. Las pruebas fueron exitosas y se pudieron identificar los parámetros mínimos para tener recepción confiable en las zonas de recepción descritas anteriormente. En las pruebas de recepción en vehículos en movimiento, sólo la señal DVB-T pudo observarse pero con una tasa de bit muy baja (alrededor de los 4 Mbps y permitiendo sólo calidad SDTV).

Los resultados dejaron ver que para hacer un uso eficiente del espectro, la opción más viable era ATSC, ya que permite transmitir HDTV o SDTV multi-programas, aunque las pruebas en interiores fueron complicadas con los *set-top box* usados en ese momento. Otra de las ventajas era que se contaba ya con receptores comerciales para 6 MHz, mientras que para DVB-T e ISDB eran sólo prototipos. En el caso de existir una necesidad considerable para recepción en móviles, DVB-T o ISDB son la mejor opción, aunque debería de acompañarse de un plan de mercado realizado a profundidad⁹.

Con el paso del tiempo se completaron los trabajos de planeación del espectro, considerando los costos de implantar redes de frecuencia única, se hicieron también análisis de mercado para el consumidor e inversiones del sector industrial.

Con base en los trabajos y estudios mencionados y después de un largo periodo de discusión y acuerdos, México decide adoptar el estándar ATSC en julio de 2004. La decisión fue acompañada por un documento emitido por la Secretaria de Telecomunicaciones y Transporte (SCT) donde indica las causas por las que México decide la adopción, especificando además, el plan a seguir para los próximos años. Dicho documento indica que “mediante los trabajos realizados por el Comité, se identi-

⁸Se han identificado diversas zonas que causan conflicto en la recepción de la señal NTSC, algunas de las más importantes por su ubicación son: Santa Fe, el Angel de la Independencia, Plaza de la Cibéles, Chapultepec

⁹Reporte emitido por el Comité Consultivo de Tecnologías Digitales para la Radio-difusión. Ing. J. Leonardo Ramos M.

5.1 Experiencias de DTV en diversos países

caron las necesidades para el aprovechamiento eficiente del espectro radioeléctrico, el cual permita elevar la calidad de las transmisiones que recibe la población y que favorezca los servicios que convergan en las telecomunicaciones”, siendo alguno de los factores determinantes los siguientes:

- capacidad para transmitir de manera confiable televisión de Alta Definición en canales de 6 MHz
- eficiencia de la transmisión de la señal, al abarcar una zona con la menor potencia posible (igualando o superando, la zona de cobertura actual)
- disponibilidad de aparatos de recepción en condiciones favorables en calidad y precio
- potencial de nuevos servicios para transmisión de datos y recepción en receptores portátiles

El plan a futuro es hacer que las cadenas televisoras hagan un esfuerzo extra para invertir de manera gradual, en el proceso de transición. Dentro del plan se establece que para el año 2021 México debería tener al 100 % cubierta la parte de migración, dejando así de transmitir la señal analógica¹⁰.

5.1.13. Distribución de estándares adoptados en el mundo

En la actualidad muchos países han decidido por adoptar un estándar y comenzar su proceso de transición a la televisión digital terrestre. Varios de ellos hicieron pruebas de comparación de los estándares disponibles y otros simplemente adoptaron el que satisfacía sus necesidades.

En las figuras 5.1 y 5.2, se presenta el panorama de adopción de los estándares, hasta julio del 2004.

En la figura 5.1 se presenta el mapa publicado en un foro de la ATSC donde se indica básicamente los países que han adoptado un estándar y los países que aún no han decidido optar por alguno. En él se puede notar que los únicos países que han adoptado ATSC hasta esa fecha son: Estados Unidos de América, Canada, Alaska, Argentina, Corea del Sur y México.

En la figura 5.2 se muestra otro mapa pero ahora el publicado por la DVB. En este mapa también se muestra la distribución de países que han adoptado un estándar, pero aquí se muestra con más detalle aquellos que tienen ya su servicio funcionando, los que han adoptado, los que están en etapa de pruebas y los que aún no han decidido. Además también se muestran aquellos donde ha habido una

¹⁰El documento está publicado en <http://www.sct.gob.mx> bajo el Proyecto: Acuerdo por el que se Adopta el Estándar Tecnológico de Televisión Digital Terrestre y se Establece la Política para la Transición a la Televisión Digital Terrestre en México

Recomendación técnica para la adopción

recomendación por DVB-T, que es prácticamente la zona norte de Africa y algunos países del este de Europa.

Se puede notar en ambas figuras que en cuestión de territorio, el estándar DVB-T abarca mucho más que ATSC y que ISDB. De este último se puede notar, que sólo ha sido adoptado en Japón¹¹.

La siguiente sección muestra los resultados de la comparación entre los estándares.

5.2. Resultados de la comparación

Con base en los elementos discutidos en el capítulo anterior se presentan los siguientes comentarios a manera de resultados de la comparación.

Considerando las características del diseño de los estándares se concluye lo siguiente.

Codificación de fuente:

- ambos estándares trabajan con la codificación de fuente y empaquetamiento MPEG-2. Soportan tanto el perfil principal a nivel principal y alto, para la codificación del video e incluyen los paquetes del codificador de audio y datos dentro de su flujo de salida
- la codificación de audio en Dolby AC-3 usado por ATSC ha sido mejor aceptada que el MPEG-2 layer II, usado por DVB-T. Tal ha sido el impacto que el estándar DVB-T tuvo que adecuarse para soportar audio codificado en AC-3. Esto le da cierta ventaja a ATSC por haberlo considerado como parte de su diseño original

Codificación de canal:

- la dispersión de energía considerada en ATSC se adapta mejor al ambiente de la transmisión digital terrestre, porque fue diseñado para eso. En cambio, el considerado para DVB-T fue diseñado para transmisión satelital, lo cual en ocasiones puede tener sus implicaciones y bajar el rendimiento contra problemas de ruido
- el código de Reed-Solomon usado por ATSC corrige más errores que el DVB-T (2 más), dándole cierta ventaja en la recepción en ambientes donde existan ráfagas de ruido

¹¹<http://www.tomshardware.com/2005/03/14/digital.tv/page3.html>

- el proceso de entrelazado externo usado en conjunto con el Reed-Solomon por ATSC es más robusto a problemas de ráfagas de ruido de mayor longitud que los que pudiera enfrentar DVB-T, haciendo que el proceso de corrección de errores de ATSC sea más eficiente que el DVB-T
- la codificación interna provee mecanismos para enfrentar corrección de errores a nivel de bit, en este caso el método que usa ATSC aporta a la disminución de la C/N entre 0.5 y 1.0 dB, más que el usado por DVB-T. Sin embargo, DVB-T aporta métodos flexibles para variar la tasa de codificación
- como consecuencia de las características de diseño el estándar DVB-T permite la modulación jerárquica. La cual enfrenta situaciones donde se requiera transmitir dos flujos, uno con mayor prioridad que otra (el cual es más robusto). Esto es una ventaja del DVB-T, aunque por el momento no se hayan publicado resultados de la puesta en marcha de este servicio, en países que adoptaron dicho estándar

Considerando ahora las pruebas de campo realizadas, se concluye lo siguiente.

Pruebas de desempeño:

- a pesar de que la proporción portadora-ruido C/N tiende a ser la misma para los procesos de modulación (la tasa y el ancho de banda para fines de comparación deben ser “prácticamente” los mismos), la potencia requerida para transmitir la señal de DVB-T es 4 dB más que la requerida para transmitir ATSC. Además, en algunos casos la red de transmisores requerida para transmitir ATSC puede ser más atractiva, ya que se requiere de un sólo transmisor para cubrir una zona de servicio, mientras que el DVB-T requiere de una red de varios transmisores. La ventaja de este último, es que esa característica hace que el DVB-T sea más robusto a la multitrayectoria de la señal
- las características del ATSC hacen que tengan un uso mejor del espectro que DVB-T, ya que es posible transmitir 19,34 *Mbps* en un canal de 6 MHz. A pesar de que teóricamente DVB-T puede alcanzar tasas muy cercanas a esa, en la práctica no se han publicado resultados de recepción exitosos y regularmente se ha tenido que disminuir la tasa. Sin embargo, el manejo variable de la configuración del estándar DVB-T, hace que la recepción llegue a ser confiable en zonas de ruido extremas, con la desventaja de transmitir sólo imagen en definición estándar (SD)
- con base en las características de diseño y considerando los resultados prácticos, el estándar ATSC se comporta mejor en ambientes con ruido impulsivo, a consecuencia de los parámetros de la codificación Reed-Solomon y el entrelazador externo. En estudios de laboratorio se determinó una diferencia mínima en decibeles (de 0.3 a 0.5 dB), pero con ventaja de ATSC

Recomendación técnica para la adopción

- ATSC también se comportó de mejor forma que DVB-T en los análisis de interferencia co-canal, en pruebas de laboratorio y de campo. La diferencia con respecto a DVB-T fue de alrededor de 2.8 dB, mientras que en la interferencia de canales adyacentes, se comportan igual de bien
- la interferencia por multitrayectorias de la señal afecta menos al estándar DVB-T que al ATSC, básicamente por el uso del intervalo de guardia entre símbolos, al usar el método de modulación OFDM
- los resultados de algunas pruebas de evaluación indicaron que ATSC se recibe en más sitios y de manera más confiable, con una antena exterior (a 6 pies sobre el nivel de tierra) que el DVB-T
- los resultados de las pruebas de recepción con antenas en interiores indicaron que se recibió en más sitios y de manera más confiable con el DVB-T que con ATSC. Esto como consecuencia del mejor manejo en la multitrayectoria de la señal
- la recepción en dispositivos móviles fue sólo posible con DVB-T. ATSC está trabajando para hacer su modificación al estándar y esperar que con E-VSB los resultados en receptores móviles pueda ser posible
- para transmitir y recibir HDTV se puede hacer tanto con ATSC como con DVB-T, la ventaja que tiene ATSC es que puede transmitirlo usando una menor tasa de datos (19.39 Mbps) que con DVB-T (aprox. 30 Mbps en ancho de banda de 7 MHz)
- en relación a la compatibilidad con diferentes modos de transmisión de televisión, el estándar DVB-T es compatible con otros servicios de televisión (satélite y cable), esto por ser parte de la filosofía del grupo DVB, en cambio ATSC prefirió no buscar compatibilidad y propuso un estándar para cable, muy similar al terrestre, dejando de lado la compatibilidad con estándares satelitales
- los servicios agregados son soportados por los dos estándares. Sin embargo hay cierta ventaja por parte de DVB-T, ya que su especificación para el manejo de datos está ya en operación y han adquirido vasta experiencia con el modo satelital. No así por parte de ATSC en donde están en espera de la adopción de un nuevo estándar, ya que su primer propuesta no logró el grado de madurez que se esperaba y no contemplaba el uso de un canal de retorno.

Con base en los resultados presentados y considerando las experiencias publicadas en los procesos de comparación de los estándares, a continuación se enlistan una serie de consejos que pueden ser útiles para un proceso de adopción.

5.3. Consejos para la adopción

La adopción de un estándar tecnológico para un país es un proceso que no sólo depende de características técnicas. Influyen factores económicos, políticos y sociales. Cada país dará entonces, un peso particular a cada uno de ellos en su proceso de adopción. La puntos que forman parte de la siguiente recomendación están basados en su mayor parte por características técnicas de los estándares discutidos y en algunas experiencias (desde luego técnicas) que han tenido algunos países que han pasado por el proceso de adopción. Asimismo, estos consejos sólo consideran aspectos de la transmisión de la señal, no así aspectos de captura, producción y post-producción de los programas televisivos.

Los siguientes, son una lista de consejos que pueden considerarse en un proceso de adopción:

- integrar diversas organizaciones en grupos de trabajo, ya sea gubernamentales y del sector privado, como cadenas televisoras, consultorias, fabricantes de equipo. Conviene en estos casos tener ayuda de expertos en el manejo de equipo y configuración de los equipos que se usarán para las pruebas. Regularmente los fabricantes están de acuerdo en prestar equipos para las pruebas, ya sea codificadores, transmisores y algunos equipos para la recepción (en algunos casos prototipos)
- hacer un análisis de la infraestructura con la que se cuenta. Considerar en primer instancia el estándar analógico y las características de la red eléctrica. Es importante considerar los posibles problemas que hayan surgido a consecuencia de la adopción del estándar analógico (como el caso de Argentina). Considerar así mismo el ancho de banda usado por canal
- hacer una planeación inicial de la asignación de canales (frecuencias) para pruebas, así como la asignación y reutilización de canales, para cuando se ponga en marcha el nuevo estándar. Esta planeación es muy importante ya que se tiene que hacer un balance entre que tanto se pudiera afectar la asignación de un canal, con las pruebas al servicio analógico disponible y que tan apegado estará a la realidad en cuanto se ponga en marcha
- definir las prioridades de resolución de la imagen, es decir, si existe una prioridad alta por proporcionar televisión de Alta Definición o transmitir multi-programación en un sólo canal usando EDTV o SDTV. Si la necesidad es grande para proporcionar HDTV en canales de 6 MHz, la opción más viable es considerar ATSC. Si la necesidad es en canales de 7 u 8 MHz, considerar DVB-T, como en el caso de Australia
- definir la calidad de audio a proporcionar. ATSC soporta de manera nativa el formato Dolby AC-3, mientras que DVB-T no, aunque es factible transmitir contenido en dicho formato. Técnicamente ya no es un problema considerar Dolby AC-3 si se adopta DVB-T, ya que en Australia se están fabricando

Recomendación técnica para la adopción

equipos para 7 MHz y en China se están considerando para 8 MHz. Aún así, es importante considerar la disponibilidad de dispositivos para su codificación y decodificación

- hacer pruebas de campo en ciudades grandes o con alto impacto de población, en ciudades con conflicto de recepción analógica y aquellas que puedan estar propensas a múltiples fuentes de ruido, pese a todas las pruebas de laboratorio que se puedan realizar de los estándares, análisis y estudios de otros países que han adoptado. Siempre es importante que se hagan pruebas de campo locales. La calibración de los equipos, previa a las pruebas juega un papel fundamental, ya que permite demostrar la veracidad de los resultados
- hacer un estudio para considerar la transmisión jerárquica. Este estudio puede hacerse considerando principalmente al estándar DVB-T, ya que fue el primero que lo soportó. La nueva propuesta de ATSC permite manejar también una transmisión con diferentes trenes de datos. La desventaja es que por el momento ningún país que haya adoptado DVB-T ha puesto en marcha el servicio de transmisión jerárquica y no se cuenta con información al respecto. El factor a considerar es que se requiere de mayor potencia que la usada para transmisión sin esta característica. Esto la pone en seria desventaja si se considera que para ATSC se requieren 4 dB menos que para transmitir DVB-T para la misma zona de cobertura
- hacer estudios para considerar redes de frecuencia única, analizar gasto de potencia y facilidades de instalación. Como se ha mencionado, ATSC requiere de una red de frecuencia múltiple (transmitiendo una sola portadora), mientras que DVB-T requiere de una red de frecuencia única (transmitiendo muchas portadoras). Instalar redes de frecuencia única puede asemejarse a las usadas por la telefonía celular. Una red de frecuencia única puede contribuir al mejoramiento de la recepción en ambientes con múltiples trayectorias. Aún así, se están haciendo propuestas para adaptar ATSC a ese tipo de redes y mejorar su recepción en condiciones de multitrayectorias
- hacer pruebas de transmisión y recepción confiable para determinar los parámetros de potencia y relación portadora-ruido, que permitan igualar el área de cobertura del estándar analógico. En este caso es conveniente que se apliquen los factores de ajuste entre ATSC y otros estándares, por el hecho de considerar diferentes umbrales o tasas de bit en error (BER). Esto agrega imparcialidad en los resultados cuando se comparan entre estándares
- hacer pruebas de recepción con antenas fijas en exteriores e interiores, en zonas abiertas y aquellas que esten propensas a multitrayectorias. Transmitir señales de prueba a diferentes tasas y diferentes formatos. Si es posible, hacer pruebas de recepción en situaciones climáticas extremas. Considerar que ATSC se recibe mejor con antena fija exterior que con interior. En primeras pruebas de

campo, ATSC tenía algunos problemas de recepción con antenas de interiores, en la mayoría de los casos DVB-T se recibió mejor, aunque las tasas de datos transmitidas no eran semejantes

- hacer análisis y pruebas en ambientes de ruido impulsivo considerable. Se ha demostrado que ATSC es más robusto al ruido impulsivo por su proceso de codificación de canal
- determinar límites máximos y mínimos de potencia promedio de transmisión, para no causar interferencia con otros servicios, así como establecer radios de protección para interferencias y proporcionar recepción confiable
- hacer pruebas para determinar interferencia co-canal y en canales adyacentes, ya sea con servicios analógicos y/o digitales. Considerar que ATSC mostró ser ligeramente más robusto (en algunos estudios) a interferencia co-canal y de canales adyacentes
- hacer análisis de factibilidad para recepción en dispositivos en movimiento. Si la recepción de este tipo es un requerimiento, considerar DVB-T. Aunque el precio que se tiene que pagar es la reducción de datos a transmitir y no podrá transmitirse HDTV. ATSC está proponiendo nuevas alternativas para mejorar su estándar y en un futuro puede ser que mejore su recepción en dispositivos en movimiento. Considerar la ventaja que provee también DVB con el uso de DVB-H para recepción en dispositivos tipo “organizadores electrónicos”, teléfonos celulares y computadoras portátiles
- hacer análisis para integrar servicios de televisión digital satelital, por cable y terrestre. En este sentido DVB-T tiene el soporte de compatibilidad con los tres sistemas a diferencia de ATSC que sólo propuso compatibilidad con servicios de cable
- considerar la transmisión de datos como parte de los servicios agregados. DVB-T tiene cierta ventaja en este punto. Ya que tienen más experiencia en el desarrollo de estándares como el MHP (que ya va en la versión 1.2). A diferencia de ATSC que apenas en este año está por definir su nuevo estándar denominado ACAP. A este nivel de servicios interactivos, DVB-T tiene también cierta ventaja por la estandarización del DVB-H y del DVB-J.

Los puntos anteriores pueden considerarse como una base técnica general para el proceso de adopción de un estándar de televisión digital terrestre. Lógicamente, cada proceso llevado a cabo desde la captura de video y audio hasta la recepción, puede ser analizado a detalle. Cada estándar tiene bien documentado esos procesos y permite el enriquecimiento de información que determine la adopción de un estándar. Gran parte de esos documentos se encuentran disponibles en los sitios o páginas principales de cada estándar, en Internet.

El capítulo siguiente muestra las conclusiones sobre este trabajo de investigación.

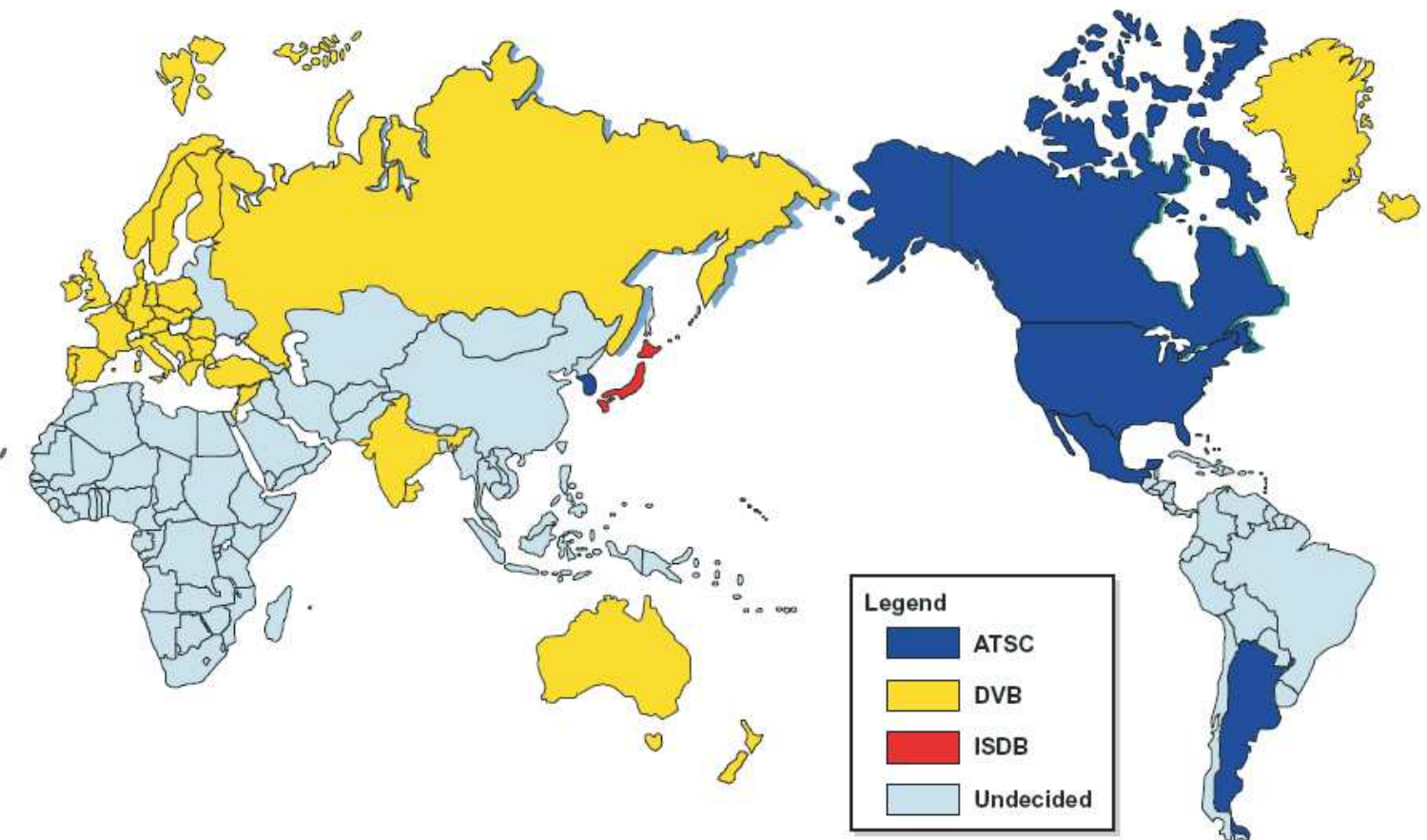


Figura 5.1: Mapa de adopción de estándares digitales.

Recomendación técnica para la adopción

Capítulo 6

Conclusiones

Se presentó una síntesis de los estándares de televisión digital terrestre más usados a nivel mundial. Se mostraron sus características técnicas, los elementos que componen su arquitectura, se indicaron las ventajas y desventajas de su uso, se mostró el panorama general de la codificación de la señal de televisión digital terrestre para su transporte y recepción. Asimismo, se presentó el desempeño en términos del funcionamiento que han tenido en localidades de diversos países.

La comparación de la arquitectura de los estándares referente al proceso de codificación y transmisión, se llevó a cabo presentando métricas cuantitativas y cualitativas. Donde dependiendo del proceso, se presentaron cantidades numéricas que facilitaron el entendimiento y que mostraba quien conseguía ventaja con respecto al otro. En algunos casos sólo fue posible indicar el impacto del resultado, de forma cualitativa. Esto se debe a que el estudio de comparación estuvo basado en resultados de los análisis hechos por organizaciones en diversos países, al comparar los principales estándares de televisión digital terrestre.

6.1. Conclusiones Generales

Los resultados indican que para contrarrestar los efectos del ruido, el estándar ATSC tiene más herramientas para enfrentarlo, principalmente por el diseño de su arquitectura. Consiguiendo así un decremento promedio de hasta 4 dB de la potencia promedio necesaria (C/N), que el requerido para transmitir DVB-T, para garantizar recepción confiable. Los elementos de las etapas de la codificación de canal, permiten a ATSC enfrentarse de mejor manera a los efectos de ráfagas de ruido, así como al ruido impulsivo, usando un código de Reed-Solomon que corrige 2 errores más, junto con la combinación de código convolucional y el entrelazador interno. A esto se le puede añadir que ATSC permite el transporte de más información en un canal de 6 MHz (entre 2 y 3 Mbps), incluso transportando video en resolución de alta definición (HDTV). DVB-T por su parte, permite una tasa de datos flexible, característica que

Conclusiones

puede ser deseable en ambientes de ruido extremo, ya que con esto puede aumentar la potencia promedio de la señal con respecto al ruido. Aunado al aspecto de flexibilidad, DVB-T por su lado permite el transporte de datos por medio de una modulación jerárquica, característica que permite mandar dos flujos con diferentes prioridades (alta y baja), esto permite cubrir diferentes expectativas en cuanto a los servicios de televisión digital, por ejemplo, mandar un flujo en HDTV y otro en SDTV o mandar en un flujo de baja prioridad la señal a receptores móviles y en alta a los receptores fijos.

Durante los primeros años de evaluación de los estándares, a partir del año 1999 y hasta el 2004, ATSC se recibía prácticamente sin problemas (dentro del área de cobertura) usando una antena aérea, pero la recepción en interiores se presentaba con muchos problemas. DVB-T por su buen manejo en la multitrayectoria de la señal, se recibe mejor en interiores, aunque también se recibe sin muchos problemas usando una antena aérea. La característica de manejar la multitrayectoria de la señal del DVB-T, hizo que se considerara también para recibirse en dispositivos en movimiento, a expensas de sacrificar la tasa de datos a transmitir.

Por otro lado, los estándares se comportan de manera muy similar en ambientes de convivencia, ya sea con estándares analógicos (NTSC, PAL) o entre digitales. Permitiendo que las etapas de transición de uno analógico a digital, se lleve a cabo de forma que el área de cobertura y calidad de la señal, no se vea afectada, siendo así transparente para el usuario.

Cabe resaltar que el estándar DVB-T a pesar de que pudiera mostrar menos ventajas que el ATSC, ha sido aceptado en más países y en ese sentido ha sido más exitoso. Además de tener el soporte de los países que pertenecen a la Unión Europea, está siendo evaluado en la parte norte del continente africano y algunos países del medio oriente y Asia. ATSC está tratando de ganar terreno en el continente americano, pero toda america central y casi toda la del sur no ha decidido por adoptar alguno.

El objetivo del trabajo de investigación no pretende indicar si un estándar es mejor que el otro. Simplemente se mostró la arquitectura de cada uno en cuanto a la codificación de fuente, canal y modulación, con sus características y los resultados que se obtuvieron en los procesos de pruebas y comparación. Decir que uno es mejor que otro es muy subjetivo porque a pesar de que al final llevan a cabo la misma tarea, no son totalmente comparables, ya que no tienen los mismos elementos en su arquitectura y no cuentan con características que permiten tener funcionalidad idéntica. En este sentido se recalcó que un proceso de comparación es un tanto injusto, pero mostrar ventajas y desventajas es un proceso recomendable.

A pesar de toda la información técnica que se pueda proporcionar, la decisión sobre el uso o adopción de un estándar, considerando lo que implica la televisión en

nuestros días, va más allá del puro aspecto técnico. En el proceso intervienen varios factores más y dependiendo de los requerimientos, se determinarán cuántos y cuáles son. Regularmente para adoptar un estándar se tienen que cumplir requerimientos particulares de un país y satisfacer sus prioridades, en muchos casos adaptándose a la economía, condición geográfica y política.

El trabajo de investigación sirvió para conocer las experiencias obtenidas de terceros y considerarlas para un proceso de adopción local. Se indicaron aspectos importantes a considerar e incluso, el impacto que tuvieron. También para observar la tendencia en cuanto a la distribución de los estándares a nivel mundial.

En este sentido se concluye que los objetivos fueron alcanzados. Sin embargo, el trabajo de investigación pretendía alcanzar un objetivo más. Determinar que tan viable podría ser implantar uno de los estándares ya sea en la UNAM o a nivel Ciudad de México, en términos de los aspectos que involucraran el desempeño de los sistemas, en cuanto a la transmisión se refiere. Este objetivo implicaba tener un contacto más directo con instituciones que estuvieran realizando un proceso de pruebas de los estándares. No fue posible en la UNAM debido a que el proceso era costoso económicamente y tampoco fue posible a nivel gubernamental, porque difícilmente esa información se hace pública e impide establecer un contacto de la Universidad con las instituciones gubernamentales correspondientes.

Al inicio del desarrollo del trabajo de investigación, se partió teniendo una idea muy simple sobre el concepto de televisión digital terrestre, casi nulo. Se tenía el conocimiento sobre la existencia de televisión digital satelital y por cable, pero se desconocía cuales eran las diferencias con la terrestre, sus características, lo que proponía y que se necesitaba para ponerla en marcha. Es así como también parte de los objetivos del trabajo de investigación, era conocer y documentar el concepto de la televisión digital terrestre, mostrar los avances y el desarrollo que ha tenido a nivel mundial y las posibles implicaciones al migrar un estándar analógico actual, que funciona y para el que se han hecho fuertes inversiones económicas y de desarrollo.

6.2. Trabajo a futuro

El conocimiento sobre los aspectos que involucra la televisión digital terrestre, permite desarrollar trabajos de investigación a futuro a nivel ingeniería. Por ejemplo en el área de desarrollo de aplicaciones de software para el uso en la televisión digital. Aquí el factor a considerar es el transporte y manejo eficiente de los datos de una aplicación interactiva, que depende del ancho de banda que se designe o el que quede disponible a consecuencia de: parámetros de codificación, número de programas de TV por canal y su resolución. Para esto será importante que se cuente con un canal de retorno, que enriquezca la aplicación interactiva. Haciendo énfasis en el estándar ATSC, donde no se han publicado muchas propuestas. DVB-T propone en principio

Conclusiones

usar la línea telefónica, pero actualmente considera un canal de retorno inalámbrico mediante el desarrollo del estándar DVB-RCT (*Digital Video Broadcasting-Return Channel Terrestrial*). También hay campos de exploración referente a la codificación de canal, existen propuestas para usar códigos turbo y mejorar el desempeño de corrección de errores en el estándar DVB-T [48]. La exploración y uso de este tipo de códigos se ha desarrollado en esa organización, no así en ATSC, donde prácticamente no se encontraron referencias para el empleo de este tipo de códigos y que da lugar a plantear propuestas.

La televisión digital terrestre es una realidad y será puesta en marcha en la gran mayoría de los países a nivel mundial en los próximos años, permitiendo mejorar e innovar las técnicas establecidas por los estándares.

Glosario

16:9	Proporción del aspecto del despliegue del video. 16 unidades a lo ancho por 9 de alto
4:3	Proporción del aspecto del despliegue del video. 4 unidades a lo ancho por 3 de alto
8-VSB	Método de modulación en banda vestigial de ocho niveles, usado por ATSC
AM	Amplitud Modulada
ASK	Amplitud Shift Keying. Esquema de modulación de señales digitales que usa la amplitud de señal para identificar el dígito binario
ATSC	Advanced Television Systems Committee. Estándar de televisión digital desarrollado en Estados Unidos de América
AWGN	Término dado a una fuente de ruido con la característica de ser aditivo, blanco y Gaussiano
BER	Bit Error Rate. Tasa de errores en los bits de una señal
C/N	Carrier-to-noise. Proporción portadora-ruido
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing. Método ortogonal de canalización por división de frecuencias acompañado de codificación, usado por DVB-T
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex. Es una OFDM acompañada de códigos correctores de errores
CRT	Tubo de rayos catódicos
Cyclic Prefix	Método de inserción de una parte final del símbolo en un espacio de guardia

DCT	Transformada Coseno Discreta
Dolby AC-3	Nombre técnico de Dolby Digital
DSB	Double Side Band. Característica de modulación que considera las dos bandas laterales del espectro de una señal
DSB-SC	Double SideBand Single Carrier.
DTV	Digital Television
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-C	Estándar de televisión digital por cable desarrollado por el grupo DVB
DVB-S	Estándar de televisión digital satelital desarrollado por el grupo DVB
DVB-T	Estándar de televisión digital desarrollado en Europa
DVD	Digital Video Disk
EDTV	Enhancement Definition Television
FCC	Siglas de la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos de América
FDM	Frequency Division Multiplexing. Técnica de canalización por división de frecuencias
FEC	Forward Error Correction. Corrección de errores directa
FFT	Fast Fourier Transform. Transformada rápida de Fourier
FM	Frecuencia Modulada
FSK	Frequency Shift Keying. Esquema de modulación de señales digitales que usa distintas frecuencias para distinguir entre un 0 y 1
HDTV	High Definition Television
HP	High Priority. Flujo de datos de alta prioridad en un esquema de modulación jerárquica
ICI	Interferencia entre canales
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform. Transformada Discreta de Fourier Inversa
IF	Frecuencia Intermedia. Es una frecuencia usada para facilitar el filtrado o modulación
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform. Transformada rápida de Fourier inversa

ISI	Inter-Symbol Interference. Interferencia entre símbolos
JPEG	Joint Picture Expert Group. Grupo que desarrolló el formato de compresión de imágenes fijas
LP	Low Priority. Flujo de datos de baja prioridad en un esquema de modulación jerárquica
MPEG	Motion Picture Expert Group. Grupo de desarrolló el estándar para compresión de imágenes en movimiento
MPEG-1	Estándar de compresión de video desarrollado por MPEG
MPEG-2	Estándar de compresión de video en formato digital
Musicam	Método de codificación de audio usado por el MPEG capa II
NTSC	National Television Systems Committee
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex-in. Técnica de canalización donde múltiples señales son enviadas con diferentes frecuencias
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex. Técnica de canalización o modulación que permite la transmisión de múltiples portadoras
PAL	Phase Alternating Line. Formato de televisión analógica usado en muchos países
PCM	Pulse Code Modulation. Método estándar de codificación de señales de audio analógicas en forma digital
PES	Packet Elementary Stream. Paquete elemental de un flujo producido en la etapa de multiplexaje de datos en el MPEG-2
PM	Modulación de Fase
PRBS	Pseudo Random Binary Sequence. Secuencia binaria pseudo-aleatoria

PSK	Phase Shift Keying. Técnica de modulación de señales digitales usando la fase de la señal
QAM	Quadrature Amplitud Modulation. Método de modulación de amplitud en cuadratura
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying. Esquema de modulación de señales digitales que usa cuatro fases
Rayleigh	Tipo de canal que considera los efectos de los ecos o retrasos en la recepción de una señal, en una ruta no directa entre transmisor y receptor.
RF	Radio Frecuencia
Ricean	Tipo de canal que considera los efectos de los ecos o retrasos en la recepción de una señal, en ruta directa entre transmisor y receptor.
SDTV	Standard Definition Television
SECAM	Estándar de transmisión de televisión desarrollado en Francia
SFN	Single Frequency Network. Red de frecuencia única usada por esquemas de transmisión que requieren más de un transmisor para la cobertura de una zona
SNF	Redes de frecuencia única. Tipo de red requerida por DVB-T
SNR	Signal-to noise ratio. Proporción ruido-señal
SSB	Single Side Band. Característica de modulación que considera sólo una banda lateral del espectro de la señal
UHF	Ultra High Frequency. Rango de frecuencias usado por canales de televisión del 14 al 69
VSB	Vestigial Side Band. Método de modulación de señales que considera la banda vestigial residual de la señal

Referencias

- [1] ETR 154. *Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the use of MPEG-2 Systems, Video and Audio in satellite, cable and terrestrial broadcasting applications*, September 1997.
- [2] Telecom Glossary 2K. http://www.atis.org/tg2k/_adjacent-channel_interference.html, february 2001.
- [3] EN 300 468. *Digital Video Broadcasting (DVB); Specification for Service Information (SI) in DVB Systems*, 1998.
- [4] 4i2i Communications. http://www.4i2i.com/reed_solomon_codes.htm.
- [5] ETS 300 744. *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital Terrestrial television (DVB-T)*, March 1997.
- [6] ASICS.ws. Reed-Solomon decoder ip core. <http://www.asics.ws>.
- [7] ATSC. ATSC DASE FAQs. http://www.atsc.org/faq/faq_dase.html.
- [8] ATSC. *A 52 ATSC Standard: Digital Audio Compression (AC-3), Revision A*. ATSC, August 2001.
- [9] ATSC. *A 53 ATSC Standard: Digital Television Standard, Revision B*. ATSC, August 2001.
- [10] ATSC. Comments of the ATSC on digital terrestrial broadcasting in Hong Kong. Technical report, ATSC, February 2001.
- [11] ATSC. Comments of the ATSC to ANATEL (Brazil). Technical report, ATSC, June 2001.
- [12] ATSC. *A 54 Recommended Practice: Guide to the Use of the ATSC Digital Television Standard*. ATSC, December 2003.
- [13] ATSC. ATSC Approves Enhancements to DTV Standard. http://www.atsc.org/news_information/press/2004/PR_EVSB.htm, july 2004.

REFERENCIAS

- [14] Chris Bennet. Understanding MPEG-2. Technical report, Hewlett Packard Company, 1996.
- [15] Harvé Benoit. *Digital Television MPEG-1, MPEG-2 and principles of the DVB system*. Arnold, 338 Euston Road, London NW1 3BH, 1st edition, 1997.
- [16] Robin Blair. *Digital techniques in broadcasting transmission*. Focal Press, Woburn, MA, 1999.
- [17] A.J. Bower. Digital radio. the Eureka 147 DAB System. http://www.bbc.co.uk/rd/pubs/papers/paper_21/paper_21.html, April 1998.
- [18] James Burger and Todd Gray. The Sinclair petition: Understanding the controversy. <http://www.digitaltelevision.com/law/law1199.shtml>, november 1999.
- [19] J. Cain, G. Clark, and J. Geist. Punctured convolutional codes of rate $(n-1)/n$ and simplified maximum likelihood decoding. *IEEE Transactions on Information Theory*, IT-25(1):97–100, January 1979.
- [20] Richard Citta and Gary Sgrignoli. ATSC transmission system: VSB tutorial. Technical report, Zenith Electronics Corporation, June 1997.
- [21] Conexant. Cs3212 configurable Reed-Solomon decoder - intelsat. <http://www.conexant.com/products/entry.jsp?id=282>.
- [22] Leon W. Couch. *Digital and Analog Communications Systems*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ., 6 edition, 2001.
- [23] Canada CRC Communications Research Centre. Results of the Laboratory Evaluation of an 8 MHz ADTB-T Television System for Terrestrial Broadcasting. Technical report, Communications Research Centre, Canada, 2003.
- [24] Digchip.com. Cs3210/12 Reed-Solomon decoders. <http://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/554/CS3210X2.php>.
- [25] DigiTAG. Television on a handheld receiver. Technical report, The Digital Terrestrial Action Group, 2005.
- [26] Pickavance Keith Drury Gordon, Markarian Garik. *Coding and Modulation for Digital Television*. Kluwer, 3300 AH Dordrecht, The Netherlands, 1st edition, 2001.
- [27] DVB. Página principal. <http://www.dvb.org>.
- [28] ETSI. *ETSI TS 101 154 v1.5.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the use of MPEG-2 Systems, Video and Audio in satellite, cable and terrestrial broadcasting applications*, May 2004.

- [29] Gerard Faria. DVB-T hierarchical modulation: An opportunity for new services? Technical report, ITIS, France, 1999.
- [30] Gerard Faria. Single frequency networks: a magic feature of the COFDM. Technical report, ITIS, France, 2003.
- [31] Walter Fischer. *Digital Television. A Practical Guide for Engineers*. Springer-Verlag, Germany, 2004.
- [32] Robert Greeney. Choosing Digital Television Standard - an Australian Perspective. Technical report, Australian Broadcasting Authority, 1999.
- [33] Lis Grete M. COFDM and the choice of parameters for DVB-T. Technical report, Tele Danmark, 1998.
- [34] P.D. Griffis. Interactive TV in a DTV world. In *Broadcast Interactive Conference*. National Association of Broadcasters, 2001.
- [35] Tim Halle. Standards for interactive television: A brief state of the union. <http://etvcookbook.org/reference/standards.html>.
- [36] Gerardo Vega Hernández. *Algunos Resultados Sobre Funciones Booleanas, Cajas de Sustitución y Z_{2^k} -Códigos Lineales*. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México, 2001.
- [37] Rod Hewitt. North American MPEG-2 Information. <http://www.coolstf.com/mpeg/>, November 2001.
- [38] Chi-Fang Huang, TheÑan Chang, and Hsu Chau-Yun. Field evaluations in Taiwan of the DVB-T COFDM and ATSC 8-VSB digital tv systems. Technical report, Graduate Institute of Communication Engineering, Tatung University, Taiwan, July 2003.
- [39] Martin Jacklin, MacAvock Peter, and Andrew Oliphant. Facts about DVB-T. Technical report, DVB, December 1998.
- [40] V. Jeewa. Digital terrestrial television for Malaysia. In *4th Conference on Telecommunication Technology Proceedings*, 2003.
- [41] V. Jeewa. Digital terrestrial television for Malaysia. Technical report, Radio TV Malaysia, 2003.
- [42] Whitaker Jerry. *DTV Handbook: The Revolution in Digital Video*. McGraw Hill, New York, 3 edition, 2001.
- [43] Boston Jim. *DTV Survival Guide*. McGraw Hill, New York, 1 edition, 2000.
- [44] R. Garcia et Al. J.M. Fernández, J. Capdevila. Single frequency networks for digital video broadcasting. <http://www.broadcastpapers.com/tvtran/RetelevisionSFNforDVB04.htm>.

REFERENCIAS

- [45] Brad Johanson. Telepresence information. <http://graphics.stanford.edu/~bjphanso/telepresnce/bj-telepresence.html>.
- [46] Charan Langton. Intuitive guides to principles of communications -link budgets. <http://www.complextoreal.com>, 1998.
- [47] Charan Langton. Orthogonal Frequency Division Multiplexing tutorial. <http://www.complextoreal.com>, 2004.
- [48] Mauro Lattuada, Renzo Posega, Marco Mattavelli, and Daniel Mlinek. Improving DVB-T forward error correction by concatenated turbo code scheme. Technical report, LTS3-ITS-STI EPFL, 2003.
- [49] F.J. MacWilliams and N.J.A. Sloane. *The theory of error-correcting codes*. North-Holland Mathematical Library, 1st edition, 1978.
- [50] Phill Mardsen. Some thoughts on the use of hierarchical modulation in DVB-T. Technical report, BBC, 2002.
- [51] Mark Massel. *Digital Television: DVB-T COFDM and ATSC 8-VSB*. digitalTVbooks.com, Hong Kong, 1999.
- [52] Laurence Meyer and Gilles Fontaine. Development of digital television in the European Union. Technical report, IDATE, Institut de l'audiovisuel et des télécommunications en Europe, june 2000.
- [53] Mark J. Pescatore Michael Silbergleid. *The Guide To Digital Television*. <http://www.digitaltelevision.com/dtvbook/toc.shtml>, third edition, 2000.
- [54] Arnold Michelson and Allen Levesque. *Error-Control Techniques for Digital Communications*. John Wiley and Sons, 1 edition, 1985.
- [55] Office of Engineering and Technology. Digital television consumer information. <http://www.fcc.gov/Bureaus/Engineering-Technology/Factsheets/dtv9811.html>, November 1998.
- [56] DVB Project Office. DVB-T field trials around the world. Technical report, DVB, june 1999.
- [57] Michael Orzessek. *ATM & MPEG-2: Integrating Digital Video into Broadband Networks*. Hewlett-Packard, 1 edition, 1998.
- [58] Neil Pickford. Results summary for Australian 7 MHz laboratory tests of DVB-T and ATSC DTTB modulation systems. <http://happy.emu.id.au/lab/rep/rep/9804/9804.001.htm>.
- [59] Charles Poynton. *Digital Video and HDTV Algorithms and Interfaces*. Morgan Kauffman, San Francisco, 1 edition, 2003.

- [60] VSB/COFDM Project. 8VSB/COFDM comparision report (phase 1). Technical report, VSB/COFDM Project, December 2000.
- [61] Leonardo Ramos. Pruebas comparativas de recepción ATSC/DVB/ISDB. Comité Consultivo de Tecnologías Digitales para la Radiodifusión, noviembre 2001.
- [62] Weck Chris Schertz Alexander. Hierarchical modulation, the transmission of two independet DVB-T multiplexes on a single frequency. Technical report, Institut für Rundfunktechnik (IRT), April 2003.
- [63] A.E.F. Silva, P.H. Castro, and F.W. Pietrukowicz. New Brazilian digital television tests. Technical report, TV Globo, Brazil. ABERT SET Group, Brazil, 2003.
- [64] Bernard Sklar. *Digital Communications, Fundamentals and Applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey., 1 edition, 1988.
- [65] SMPTE. ATSC approves enhancements to DTV standard. http://www.smppte.org/sections_chapters/chicago/.
- [66] David Sparano. What exactly is 8-VSB anyway? <http://www.broadcast.harris.com/customer-service/8-vsbs.html>, November 1999.
- [67] ITU Radiocommunication study group. Guide for the use of digital television terrestrial broadcasting systems based on performance comparison of ATSC 8-VSB and DVB-T COFDM transmission systems. Technical report, International Communication Union, May 1999.
- [68] Pescatore The Guide of Digital Television, Silbergleid. DTV glossary. <http://www.digitaltelevision.com/dtvbook/glossary.shtml>, 2000.
- [69] Tay Joo Thong. Singapore digital television technical committee's final report(1999). Technical report, Singapore Digital Television Technical Committee, 1999.
- [70] Spath Tony. Audio systems for DTV. Technical report, Dolby Laboratories, November 2000.
- [71] Reimers Ulrich. *Digital Video Broadcasting. The International Standar for Digital Television*. Springer, 1st edition, 2001.
- [72] A. J. Viterbi. Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm. *IEEE Transactions on Information Theory*, IT13:260–269, April 1967.

REFERENCIAS

- [73] Jerry Whitaker. Building a future for advanced video services. <http://2002newsarchive.broadcastengineering.com/ar/broadcasting-building-future-advanced/>.
- [74] Yiyang Wu, Ewa Pliszka, Bernard Caron, Pierre Bouchard, and Chouinard Gerald. Comparison of terrestrial DTV transmission systems: The ATSC 8VSB, the DVB-T COFDM and the ISDB-T BST-OFDM. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 46(2):101–113, June 2000.
- [75] Xilinx. Reed-Solomon decoder xilinx ip core. <http://www.xilinx.com>.