



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESTADO ACTUAL DE LA  
TELEVISIÓN EN ULTRA ALTA  
DEFINICIÓN - UHD TV  
TRANSMISIÓN VÍA TERRESTRE**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**P R E S E N T A**

DIEGO SIMON GARCIA LOPEZ

**DIRECTOR DE TESIS**

ING. JESÚS REYES GARCÍA



CIUDAD UNIVERSITARIA, Cd. Mx., 2017



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*

*A mi padre, Simón*

*Por enseñarme el gran valor de la responsabilidad.*

*A mi madre, Bertha*

*Porque con su ejemplo me enseñó que siempre hay que levantarse a pesar de las adversidades.*

*A mi hermana, Fabiola*

*Por en gran medida inspirarme a estudiar una carrera universitaria.*

*A mi hermano, Daniel*

*Por su gran apoyo, compañía y consejos que me permitieron salir adelante en mi formación profesional.*

*A mi asesor el Ing. Jesús Reyes García*

*Por apoyarme en la realización de este trabajo.*

*A los profesores que aceptaron ser miembros del jurado*

*Por su tiempo y atenciones para enriquecer este trabajo.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México*

*Por brindarme la oportunidad de vivir una de las mejores experiencias de mi vida, al estudiar en La Facultad de Ingeniería, donde pude expandir mi conocimiento y obtuve herramientas para la vida. Además de que en esta institución tuve la oportunidad de conocer a personas, tanto amigos como profesores, que enriquecieron la experiencia en la facultad y que por siempre los recordaré.*



# Contenido

Acrónimos y abreviaciones .....	I
Introducción .....	V
Capítulo 1. TELEVISIÓN DIGITAL.....	1
1.1. Breve historia del desarrollo de la televisión digital .....	2
1.1.1. La búsqueda de una mejora en la calidad de imagen. Primeros sistemas de Televisión en Alta Definición (HDTV).....	2
1.1.2. Primeras investigaciones sobre sistemas HD en EUA y la creación de la televisión digital .....	4
1.1.3. Creación de un sistema digital HDTV en Europa.....	8
1.1.4. El desarrollo de la televisión digital en Asia .....	9
1.1.5. La compresión como hecho relevante en el desarrollo de la televisión digital .....	13
1.2. Digitalización y compresión de la señal de TV .....	14
1.2.1. La señal de video digital según la norma ITU-BT.R.601 .....	14
1.2.2. El estándar de compresión creado por el Motion Picture Experts Group MPEG .....	19
1.3. Estándares para la transmisión de televisión vía terrestre.....	25
1.3.1. Estándar ATSC .....	26
1.3.2. Estándar DVB-T.....	27
1.3.3. Estándar ISDB-T .....	29
1.3.4. Estándar DTMB.....	31
Capítulo 2. Televisión en Alta Definición (HDTV) .....	32
2.1. Parámetros de los formatos HDTV.....	34
2.2. Señal HDTV .....	38
2.3. Requisitos mínimos para que los equipos desplieguen imágenes HD .....	39
2.3.1. Nuevas tecnologías de visualización de imágenes .....	41
Capítulo 3. Televisión en Ultra Alta Definición (UHDTV).....	56
3.1 ¿Qué es la UHDTV?.....	56
3.2. Determinación de los parámetros de la UHDTV .....	58
3.2.1. Resolución espacial .....	59
3.2.2. Resolución temporal .....	63
3.2.3. Espacio de color en UHDTV, Wide Color Gammut .....	67
3.2.4. Profundidad de color.....	70
3.2.5. Margen dinámico .....	72
3.2.6. Audio .....	82

3.3. Tecnologías para la transmisión y despliegue de imágenes en UHDTV .....	83
3.3.1. High Efficiency Video Coding.....	84
3.3.2. Estándar de transmisión DVB-T2.....	88
3.3.3. Estándar de transmisión ATSC 3.0.....	90
3.3.4. Tecnologías HDR.....	97
3.3.5. Tecnologías en pantallas UHDTV.....	101
3.4. Estandarización de la UHDTV para la distribución de contenidos alrededor del mundo ....	105
3.4.1. Estandarización UIT .....	106
3.4.2. Estandarización SMPTE .....	109
3.4.3. Estandarización en Europa UHDTV .....	110
3.4.5. Estandarización y desarrollo en Asia.....	113
3.4.6. Parámetros que deben cumplir los equipos para ser considerados UHD según diferentes asociaciones empresariales para la producción de equipos y contenidos en UHD .....	116
3.5. Pruebas de campo UHDTV vía terrestre .....	120
3.5.1. Pruebas de campo en Corea del Sur [24] .....	120
3.5.2. Pruebas de campo en Francia [24].....	124
3.5.3. Pruebas de campo España .....	125
3.5.4. Pruebas de campo en Suecia [24] .....	127
3.5.5. Pruebas en Reino Unido .....	128
3.5.6. Pruebas de campo en Estados Unidos .....	128
3.5.7. Pruebas de campo Japón (8k) [24].....	129
Conclusiones. ....	136
Referencias.....	139
Referencias electrónicas. ....	144
Índice de figuras .....	149
Índice de tablas. ....	151

## Acrónimos y abreviaciones

---

<b>AAC</b>	Advanced Audio Coding
<b>AC- 3</b>	Adaptive Transform Coder
<b>ACATS</b>	Advisory Committee on Advanced Television Service
<b>ARIB</b>	Association of Radio Industries and Businesses
<b>ATSC</b>	Advanced Television System Committe
<b>AVC</b>	Advanced Video Codec
<b>BBC</b>	British Broadcasting Corporation
<b>BCH</b>	Bose–Chaudhuri–Hocquenghem
<b>C/N</b>	Relación portadora/ruido
<b>CB</b>	Coding Block
<b>CBS</b>	Columbia Broadcasting System
<b>CDP</b>	Cycles per degree
<b>CIE</b>	Comission Internationale de l'Éclairage (Comisión Internacional de la Iluminación)
<b>CTA</b>	Consumer Technology Association
<b>CTB</b>	Coding Tree Block
<b>CTR</b>	Cathode Ray Tube (Tubo de Rayos Catódicos)
<b>CTU</b>	Coding Tree Unit (unidad de codificación de árbol)
<b>CU</b>	Coding Unit (Unidad de Codificación)
<b>DCI</b>	Digital Cinema Initiatives
<b>DCT</b>	Discrete Cosine Transform (Transformada de Coseno Discreta)
<b>DMD</b>	Digital Micromirror Device (Dispositivo Digital de Microespejos)
<b>DTMB</b>	Digital Terrestrial Multimedia Broadcast
<b>DTV</b>	Digital TV (Televisión Digital)
<b>DVB</b>	Digital Video Broadcasting
<b>DVI</b>	Digital Visual Interface
<b>EAS</b>	Emergency Alert System.

<b>EBU</b>	European Broadcasting Union
<b>ED</b>	Enhanced Definition (Definición Mejorada)
<b>EICTA</b>	European Information, Communications and Consumer Electronics Technology Industry Associations
<b>ELG</b>	European Launching Group.
<b>EOTF</b>	Electronic Optical Transfer Function (Función de Transferencia Electrónica- óptica)
<b>ERP</b>	Effective radiated power (Potencia Radiada Aparente)
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards Institute
<b>FCC</b>	Federal Communications Commission (Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos de América)
<b>FEC</b>	Forward Error Correction
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
	Gbit/s
<b>HD</b>	High Definition (Alta Definición)
<b>HDCP</b>	High-Bandwidth Digital Content
<b>HD-MAC</b>	High Definition Multiplexed Analogue Components
<b>HDMI</b>	High-Definition Multimedia Interface (interfaz multimedia de alta definición)
<b>HDR</b>	High Dynamic Range
<b>HDTV</b>	High Definition TV (Televisión en Alta Definición)
<b>HEVC</b>	High Efficiency Video Coding
<b>HLG</b>	Hybrid Log-Gamma
<b>HRF</b>	High Frame Rate
<b>Hz</b>	Hertz
<b>iDTV</b>	Integrated Digital television
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>ISDB</b>	Integrated Services Digital Broadcasting
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union (Unión Internacional de Telecomunicaciones)
<b>JPEG</b>	Joint Photographic Experts Group
<b>KBS</b>	Korean Broadcasting System

<b>LCD</b>	Liquid Cristal Display (Pantalla de Cristal Líquido)
<b>LED</b>	Light-Emitting Diode (Diodo Emisor de Luz)
<b>LFE</b>	Low Frequency Effects (Efectos de Baja Frecuencia)
<b>LNA</b>	Low Noise Amp
<b>LoS</b>	Line of Sight (Línea de Vista)
<b>Mbit/s</b>	Megabits sobre segundo
<b>MFN</b>	Multiple Frequency Network (Red de Frecuencias Múltiples)
<b>MHz</b>	Mega Hertz
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output
<b>MPEG</b>	Moving Picture Experts Group
<b>MUSE</b>	Multi Sub-Nyquist Sampling Encoding
<b>NHK</b>	Nippon Hoso Kyokai (Japan Broadcasting Corporation)
<b>NLoS</b>	Non Line of Sight (Sin Línea de Vista)
<b>NTSC</b>	National Television System Committee, (Comité Nacional de Sistema de Televisión)
<b>OETF</b>	Optic-Electic Transfer Function (Función de Transferencia Optica-Eléctrica)
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales)
<b>OLED</b>	Organic light-emitting diode
<b>OOTF</b>	Optic-Optic Transfer Function (Función de Transferencia Optica-Optica)
<b>OTA</b>	Over the Air
<b>PAL</b>	Phase Alternating Line
<b>PCM</b>	Pulse Code Modulation (Modulación por impulsos codificados)
<b>PES</b>	Packetized Elementary Streams
<b>PLP</b>	Physical Layer Pipes
<b>PQ</b>	Perceptual Quantization
<b>PU</b>	Prediction Unit
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation (Modulación de amplitud en cuadratura)

<b>QPSK</b>	Quadrature Phase-Shift Keying (Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura)
<b>RGB</b>	Red Green Blue
<b>RTVE</b>	Corporación de Radio y Televisión Española
<b>SD</b>	Standard Definition (Definición Estándar)
<b>SDM</b>	Space Division Multiplexing
<b>SDR</b>	Standard Dynamic Range
<b>SDTV</b>	Standard Definition TV (Televisión de Definición Estándar)
<b>SECAM</b>	Séquentiel Couleur à Mémoire (Color secuencial con memoria)
<b>SFN</b>	Single Frequency Network (Red de Frecuencia Única)
<b>SHV</b>	Super High-Vision
<b>SMPTE</b>	Society of Motion Picture and Television Engineers
<b>STB</b>	Set Top Box
<b>STC</b>	Space Time Coding
<b>TFT</b>	Thin Film Transistor
<b>TS</b>	Transport Stream
<b>TTA</b>	Telecommunications Technology Association
<b>TU</b>	Transform Unit
<b>TV</b>	Televisión
<b>UHD</b>	Ultra High Definition (Ultra Alta Definición)
<b>UHDTV</b>	Ultra High Definition TV Televisión en Ultra Alta Definicion
<b>UPM</b>	Universidad Politécnica de Madrid
<b>UV</b>	Ultra Violeta
<b>VSF</b>	Vestigial Sideband (Modulación con Residuo de Banda Lateral)
<b>WCG</b>	Wide Color Gammut

# Introducción

---

Desde la invención de la televisión, ésta se convirtió en uno de los principales medios de comunicación masiva a nivel mundial, y a lo largo de su existencia se ha intentado mejorar la calidad de la imagen con el propósito de crear una experiencia lo más cercana posible a la realidad. Principalmente, la mejora en la calidad de la imagen recae en ampliar la resolución con el fin de dar un mejor detalle a ésta.

Para alcanzar una mejor calidad en la imagen surgieron formatos con mayor resolución, como los distintos formatos de Televisión en Alta Definición (HDTV por sus siglas en inglés) tanto analógicos como los más recientes formatos digitales, adoptados actualmente en un gran número de países a nivel mundial como estándar de transmisión. Sin embargo, pese a que la tecnología HD aún se encuentra en periodo de transición, ya se han hecho avances en mejorar la calidad representada por la HDTV. Este nuevo desarrollo se le conoce como Televisión en Ultra Alta Definición (UHDTV).

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar el estado actual de la Televisión en Ultra Alta Definición, tanto a nivel tecnológico como en su estandarización a nivel mundial, de tal forma que sea posible discutir la posible adopción de este formato, como un futuro sucesor de la televisión en alta definición para la transmisión vía terrestre de contenidos a nivel mundial.

Para lograr lo anterior es necesario tomar en cuenta los antecedentes de la televisión desde su transición de la señal analógica a la digital, ya que este cambio de gran relevancia permitió una mejora significativa en la calidad de imagen y en manejo y procesamiento de la señal. Además, estos proveen una mejor comprensión de algunos aspectos necesarios para entender mejor las especificaciones de la UHDTV, que al final de cuentas, ésta se sigue empleando señales digitales.

Este trabajo de tesis consiste de los siguientes tres capítulos:

**Capítulo 1 Televisión digital:** en este se aborda el desarrollo histórico de la televisión digital, abarcando desde los primeros intentos en Japón y en Europa por crear sistemas analógicos que permitieran una mayor resolución, hasta el desarrollo de un sistema propio de los Estados Unidos que unifica la resolución HD con la tecnología de señales digitales para su transmisión.

Para entender en que consiste la televisión digital, se explica en este mismo capítulo el proceso de digitalización de la señal de televisión, su codificación, compresión y empaquetamiento para su transmisión haciendo uso del estándar MPEG-2. Por la parte de la transmisión, se describen los diferentes estándares de distribución terrestre empleados a nivel mundial (ATSC, DVB, ISDB y DTMB).

**Capítulo 2 Televisión en alta definición:** Con la intención de contrastar la mejora en la imagen del formato UHDTV desde el punto de vista técnico, y como antecedente en la búsqueda de dicha mejora, en este capítulo se muestra una descripción de los parámetros de la imagen y de los equipos capaces de desplegar imágenes en HD, así como también se muestran los formatos empleados para transmisión HDTV. Como parte de los avances tecnológicos que trajo consigo este formato, se describen las diferentes tecnologías empleadas en pantallas que permitieron desplegar imágenes HD con un mayor campo de visión, sin la necesidad de aumentar con esto, el tamaño de los equipos.

**Capítulo 3 Televisión en Ultra Alta Definición:** Con los antecedentes mencionados en los capítulos anteriores, en este apartado se explicará en qué consiste la UHDTV, desde sus parámetros de imagen y el porqué de ellos, mencionando el estado actual tanto en su estandarización, como en el desarrollo tecnológico para producir y transmitir contenidos que cumplan con todos los parámetros propuestos originalmente por NHK y posteriormente estandarizados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) y la Society of Motion Picture & Television Engineers (SMPTE).

Dentro de los avances tecnológicos, se muestran los estándares actualmente en estudio y adecuación, que son potenciales para ser empleados en un futuro como

estándares de transmisión de televisión vía terrestre, así como también las características de los equipos que permiten la visualización de contenido UHDTV.

Con la intención de determinar si es viable transmitir este tipo de contenido a través de la televisión digital terrestre por medio de frecuencias asignadas para dicho propósito, se muestran diversas pruebas realizadas a nivel mundial, donde en cada una de ellas se expone el avance por lograr una transmisión totalmente UHD con todas sus características, y también las limitaciones y retos que implica lograr dicho propósito



## Capítulo 1. TELEVISIÓN DIGITAL

---

La televisión digital ha sido el avance más significativo desde el surgimiento y distribución de la televisión a color. Se le conoce como televisión digital a la transmisión de video con su respectivo audio asociado codificado en forma de bits (1's y 0's).

Este formato ofrece mayores ventajas para su transmisión en comparación con la televisión en formato analógico.

Algunas de las ventajas de este formato de transmisión son:

- Mayor número de canales, gracias al multiplexaje es posible enviar más de una sola señal por una misma frecuencia.
- Mejor calidad en audio y en video, ya que se eliminan ruidos e interferencias y además es posible ver la televisión en formato panorámico 16:9.
- Servicios adicionales, como por ejemplo información acerca del contenido, visión multi cámara y canales de audio alternativos.

Actualmente se utilizan cuatro modalidades principales para la emisión-recepción de televisión digital:

- Terrestre: en esta modalidad la señal de video y audio es transmitida a través de ondas de radio emitidas por estaciones terrestres.
- Cable: este método emplea redes de fibra óptica o cable coaxial para la difusión de contenidos televisivos.
- Satélite: por medio de este sistema de transmisión televisiva, el televidente recibe la señal de un satélite de comunicaciones que se emplea para retransmitir dicha señal proveniente de una estación transmisora en algún punto de la tierra.



- Internet: en este sistema el contenido televisivo se transmite a través de conexiones de banda ancha haciendo uso del protocolo IP [2].

## 1.1. Breve historia del desarrollo de la televisión digital

### 1.1.1. La búsqueda de una mejora en la calidad de imagen. Primeros sistemas de Televisión en Alta Definición (HDTV)

La carrera hacia la transmisión de señales de televisión digital inició en la década de los ochenta en Japón, por Nippon Hoso Kyokai (NHK), pero no precisamente con sistemas digitales. La intención era crear un sistema HDTV, con 1125 líneas (1035 visibles) de resolución y 60 campos por segundo el cual se transmitía de manera analógica. Dicho sistema fue presentado en 1975.

En 1981 NHK realizó la primera demostración de su sistema HDTV conjuntamente con la Society of Motion Picture and Television Engineers (SMPTE), seguida por una demostración con Columbia Broadcasting System (CBS). Posteriormente, en 1982 se llevó a cabo la primera demostración en Europa.

Para el año 1983, NHK diseña un sistema para reducir el ancho de banda utilizado, este sistema se le llamó MUSE término que proviene de “multi sub-Nyquist sampling encoding” (prototipo mostrado en fig. 1). El sistema permitía la reducción del ancho de banda de 30 MHz a 8.1 MHz [3].

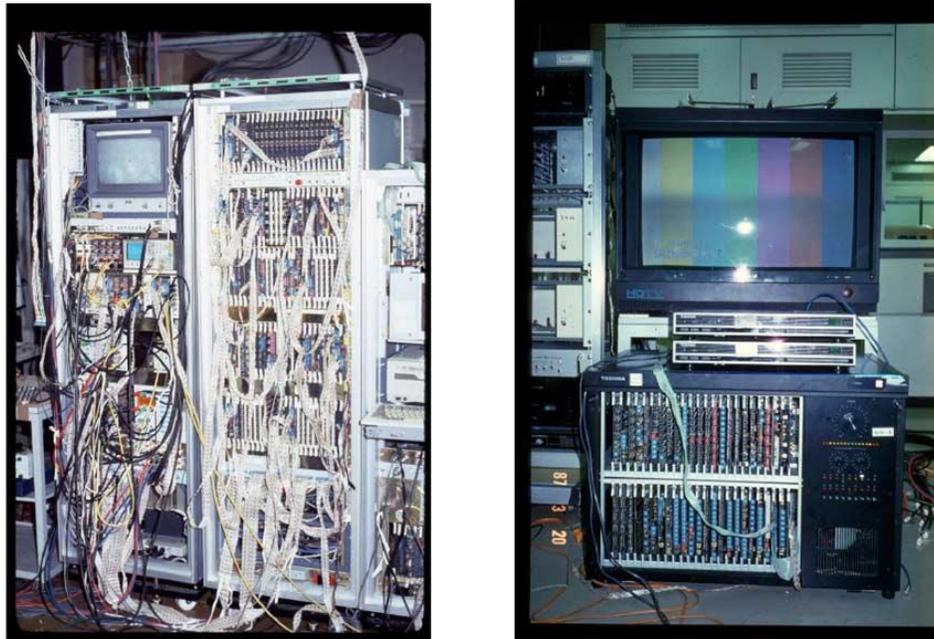


Figura 1. Prototipos de equipo MUSE. Modulador (izquierda) receptor (derecha) [3].

Sin embargo, el desarrollo de la HDTV logrado en Japón motivó a operadores europeos a desarrollar un sistema propio de alta definición analógico, con la intención de preservar la industria electrónica Europea, ya que los Estados Unidos de América apoyaban el sistema japonés para ser adoptado como un sistema a nivel mundial. Además, el migrar a la HDTV se vio como una gran oportunidad para establecer un solo sistema de transmisión en toda la Unión Europea, que desde los años 60 utilizaba dos sistemas para la televisión a color llamados PAL (Phase Alternating Line) y SECAM (Séquentiel Couleur à Mémoire) [75].

Europa presentó su propio sistema en alta definición al transmitirse imágenes de los Juegos Olímpicos de 1992 en Barcelona. Dicho sistema utilizaba una resolución de 1250 líneas (1152 visibles) y 50 campos por segundo, llamado inicialmente proyecto Eureka 95, que posteriormente al escogerse la tecnología Multiplexed Analogue Components para la transmisión, se le llamaría HD-MAC [3].



Paralelamente a estos desarrollos, a finales de los ochenta y principios de los noventa, comenzó la utilización de señales digitales de video en la televisión, pero únicamente dentro del estudio de televisión, por la facilidad en el manejo y la post-producción del video, sobre todo al agregar efectos visuales. Sin embargo estas señales generaban un flujo de datos de aproximadamente 270 Mbits/s con una definición estándar (SD) [31], por lo que al ser un flujo de datos grande no eran prácticas para la transmisión a través de los medios de ese entonces.

Los dos sistemas, MUSE y HD-MAC, al ser analógicos dificultaba transmitir contenidos en canales de televisión terrestre debido al mayor ancho de banda que requerían estos sistemas, por lo fueron utilizados solo para la transmisión vía satélite o por cable en el caso de HD-MAC.

Mientras tanto en los Estado Unidos, en 1982 se creaba el Advanced Television System Committe (ATSC) con la tarea de coordinar el desarrollo de la documentación en relación a los nuevos sistemas de televisión avanzada [14].

### 1.1.2. Primeras investigaciones sobre sistemas HD en EUA y la creación de la televisión digital

En 1987 la Federal Communications Commission (FCC), órgano regulador de las telecomunicaciones en los Estados Unidos de América, lanzó una declaración de réplicas con la intención de que se iniciara un proceso de análisis y evaluación de los nuevos avances tecnológicos en la transmisión de la televisión, por lo que se creó ese mismo año, el Advisory Committee on Advanced Television Service (ACATS), el cual realizaría dicha función [3]. En ese entonces se creía que la HDTV no podía transmitirse por un canal de 6 MHz como la televisión SD, por lo que se consideró que un medio alternativo sería viable para transmitir señales HD.

En 1987 se llevó a cabo el primer congreso sobre HDTV, evento que estimuló al ACATS a lanzar un concurso abierto para diseñar el mejor estándar de televisión



avanzada, sin embargo todos los sistemas que fueron analizados fueron rechazados por la FCC, ya que algunos de estos solo presentaban una mejora dentro de los parámetros del estándar NTSC y los pocos sistemas HDTV estudiados requerían 2 canales de 6 MHz para su transmisión [78]. Por lo anterior la FCC hizo un anuncio el cual se enfocaba en tres puntos a cumplir: 1) El establecimiento de un estándar de transmisión totalmente en HD; 2) Hacer uso de un solo canal de 6 MHz para su transmisión y 3) utilizar la frecuencias establecidas para la transmisión de televisión analógica [3].

En respuesta al anuncio de la FCC, la empresa norteamericana General Instrument mostró la factibilidad de transmitir señales HDTV de forma digital mediante la presentación del primer sistema prototipo de HDTV, llamado DigiCipher en mayo de 1990. Dicho sistema tenía una resolución de 1050i (entrelazado), compresión de video mediante la predicción de movimiento y una modulación digital QAM [79].

Por otra parte, el sistema ideado por General Instrument no era el único es su tipo. Las empresas Zenith Electronics y American Telephone & Telegraph Company (AT & T) trabajaban en su sistema Digital Spectrum Compatible Television, que se caracterizaba por ser el primero en usar la resolución 720p (progresivo) y una modulación de banda lateral vestigial. Además el grupo de trabajo conformado por American Philips, Thomson Consumer Electronics, NBC y el centro de investigación David Sarnoff, se encontraba diseñando un sistema HDTV propio llamado Advanced Digital HDTV, siendo este el pionero en utilizar compresión MPEG. Mientras que el Instituto Tecnológico de Massachusetts, con asistencia de General Instrument se encontraban diseñando el sistema DigiCipher combinando el uso de la resolución 720p y la modulación QAM [3].

Con la intención de seleccionar un solo sistema de transmisión, todos los sistemas propuestos (tanto los sistemas digitales mencionados anteriormente como también algunos sistemas analógicos) se sometieron a pruebas en tres laboratorios independientes y neutros a las instituciones participantes, y se llegó a la conclusión



de que los sistemas digitales superaban a los analógicos, por lo que estos quedaban descartados para su posible elección, sin embargo los sistemas digitales requerían algunas mejoras [3].

El 24 de marzo de 1993 los tres grupos que se encontraban diseñando sus propios sistemas digitales HD, (AT & T y Zenith Electronics; American Philips, Thomson Consumer Electronics y el Centro de Investigación David Sarnoff; el Instituto Tecnológico de Massachusetts y General Instrument) acordaron producir un sistema con lo mejor de cada modelo con el fin de presentarlo como un estándar, dando origen al grupo Digital HDTV Grand Alliance (fig. 2) [14].



**Figura 2. Prototipo del sistema creado por Digital HDTV Grand Alliance y miembros de este grupo [3].**

El resultado de esta alianza fue un sistema HDTV que incluía el uso de las resoluciones 1920 x 1080 entrelazado y 1280 x 720 progresivo con píxeles cuadrados, sonido Dolby AC-3 (Dolby Digital) y modulación 8-VSB [14].

El Advanced Television Systems Committee, ATSC (logo fig. 3) fue la organización responsable por la documentación detallada de las especificaciones del nuevo



estándar de televisión avanzada basado en el sistema diseñado por Grand Alliance, el cual más adelante sería aprobado por los miembros del ATSC como ATSC Digital Television Standard (documento número A/53) el 16 de septiembre de 1995 [14].



Figura 3. ATSC logo [64].

Después del diseño de cada uno de los equipos necesarios para la transmisión de este sistema, y de numerosas pruebas para cumplir con todos los requerimientos solicitados por la FCC, en diciembre de 1996 la FCC propuso formalmente la adopción del estándar ATSC/A53, para la transmisión vía terrestre de señales HDTV y SDTV en formato digital en los Estados Unidos [14]. Para cumplir con lo anterior se proporcionó un canal adicional de 6 MHz a aproximadamente 1600 estaciones televisoras para que éstas pudieran ofrecer la señal digital al mismo tiempo que su señal analógica y con ello permitir a la población que, aun no tuviera una televisión digital, pudiera seguir recibiendo el contenido [78].

Oficialmente el servicio de DTV fue lanzado en los Estados Unidos el 1 de noviembre de 1998 [3].

Actualmente este estándar ha sido adoptado por Canadá, Corea del Sur, México, Honduras [98], El Salvador y República Dominicana como se muestra en la figura 6.



### 1.1.3. Creación de un sistema digital HDTV en Europa

La innovación lograda con el uso de la tecnología digital para la transmisión de señales de TV, obligó más tarde a Europa y Japón a redirigir sus esfuerzos tecnológicos haciendo uso de esta misma tecnología.

En Europa durante el año de 1991, empresas emisoras de televisión y empresas relacionadas en la producción de equipos para TV, discutían como normalizar los trabajos que se habían realizado con respecto a la televisión digital, por lo que se decidió crear un grupo que se encargara de supervisar el desarrollo de la televisión digital en Europa [77].

Esto dió origen a la creación del European Launching Group (ELG), que planeaba incluir a todos grupos de interés del medio, tanto públicos como privados. Después de que se firmara un memorándum de entendimiento en septiembre de 1993 por todos los miembros del ELG, éste cambió su nombre a Digital Video Broadcasting Project DVB [3] (logo fig.4).



Figura 4. DVB logo [77].

La primera etapa de trabajo de DVB inició en 1993, la cual tenía como principales metas la creación de sistemas para la transmisión de TV de manera digital, a través de las vías existentes: satélite, cable y terrestre. Además, estos sistemas deberían



estar adecuados para transmitir señales con definiciones SD, ED (definición mejorada) y HD [77].

Mientras los desarrollos y el interés en la tecnología digital seguían avanzando, se volvía más claro en Europa que sus sistemas MAC tendrían que ceder ante la tecnología digital para las transmisiones satelitales, por lo que los estándares para televisión vía satélite y cable serían los primeros en ser desarrollados [3].

El primer sistema DVB fue el DVB-S (satelital) que se presentó en 1993, el cual fue adoptado en 1994 como European Telecommunications Standard ETS 300 421, ese mismo año se presentó el estándar para la distribución vía cable (DVB-C—ETS 300 429). Con respecto a la transmisión vía terrestre se creó el estándar DVB-T adoptado en el año 1997 en toda Europa [77], y posteriormente por algunos otros países de otros continentes como Colombia, Panamá, Trinidad y Tobago y Bermudas en América. Egipto, Marruecos y Sudáfrica, entre otros países de África. Arabia Saudita, India e Israel, entre otros países de Asia y Australia y Nueva Zelanda en Oceanía [98] como se muestra en la figura 6.

DVB ha trabajado en el desarrollo de otros estándares para la transmisión de televisión digital por diferentes medios, entre los que se encuentran los estándares DVB-MC (transmisión vía microondas), DVB-H (para receptores portátiles) [77].

Actualmente han lanzado estándares de nueva generación para sus sistemas de televisión, estos estándares son: DVB-S2 (satélite), DVB-C2 (cable) y DVB-T2 (terrestre).

#### 1.1.4. El desarrollo de la televisión digital en Asia

En un principio las transmisiones digitales vía satélite en Japón se realizaban con el estándar DVB-S, que fue adoptado en 1996, sin embargo, DVB-S parecía no satisfacer del todo los requerimientos de las emisoras japonesas como NHK.



El principal problema era que el estándar DVB generaba únicamente un flujo de 34 Mbit/s con un solo transponder, lo que significaba que el transponder solo transmitía un solo canal HDTV. Desafortunadamente el satélite NHK solo disponía de 4 transponders. Lo anterior motivó a la Association of Radio Industries and Businesses (ARIB), organismo regulador del uso eficiente del espectro radioeléctrico en Japón, a desarrollar el estándar Integrated Services Digital Broadcasting para transmisiones satelitales, el cual podía transmitir un flujo de datos de hasta 51 Mbit/s, por lo que podía ser posible la transmisión de dos canales HDTV, haciendo uso de un solo transponder [75]. Este esquema de transmisión se convirtió en la recomendación ITU-R BO.1408 bajo el nombre ISDB-S en 1999 y desde ese entonces se volvió estándar internacional, siendo la primera transmisión con este sistema en el año 2000 [3].

Los trabajos de investigación para desarrollar un sistema de transmisión DTV terrestre en Japón, comenzaron en 1986 con el estudio del multiplexaje por división de frecuencias ortogonales (OFDM) [3].

Un punto clave para el desarrollo de un esquema DTV terrestre fueron los diversos estudios que mostraban la factibilidad de la transmisión de señales HDTV usando un sistema digital, por lo que la ARIB organizó diversos grupos de estudio y desarrollo de un esquema digital de transmisión a mediados de los años 90 [3].

El sistema de transmisión terrestre fue presentado a través de un reporte técnico en 1999 y fue aprobado como la recomendación ITU-R BT.1306 (ISDB-T logo fig. 5) en el año 2000 [3].



Figura 5. ISDB-T logo [101].



## Capítulo 1. Televisión Digital.



El sistema ISDB-T comenzó sus transmisiones el 1 de diciembre de 2003 [3], este formato además, soportaba la recepción para dispositivos móviles y ha sido adoptado, como se muestra en la figura 6 en Filipinas, Maldivas, Sri Lanka y por otros Brasil con algunas modificaciones [100].

Por otra parte, en la República Popular de China se desarrollaron dos estándares de transmisión para DTV, estos eran propuestas desarrolladas por separado. El sistema ADTB-T desarrollado por la Universidad de Shanghai Jiao Tong en Shanghai y el sistema DMB-T desarrollado por la Universidad Tsinghua en Beijing, ambas universidades por si solas carecían de los medios y fuerza política para lograr establecer sus sistemas como una tecnología única, por lo tanto se decidió fusionar los dos sistemas para formar el sistema Digital Terrestrial Multimedia Broadcast (DTMB) [3].

El sistema DTMB fue presentado en el año 2006 y fue adoptado como estándar en China en el 2007 esto se muestra en la figura 6. Actualmente ha sido adoptado por Hong Kong, Macao y Cuba [100].





### 1.1.5. La compresión como hecho relevante en el desarrollo de la televisión digital

Hasta antes de la creación de formatos de compresión de video digital, no se tenía mucha certeza de que la HDTV fuera a prosperar, ya que en Estados Unidos uno de los requerimientos de la FCC era que la distribución de contenido HDTV fuera sobre un canal convencional de 6 MHz.

No cabe duda que un hecho clave en el desarrollo de la televisión digital fue el establecimiento del estándar JPEG (Joint Photographic Experts Group), estándar para la compresión de imágenes. El algoritmo utilizado en JPEG se convirtió en la base de los formatos de compresión diseñados por el Motion Picture Experts Group (MPEG): MPEG-1 estandarizado en 1993 y MPEG-2 estandarizado en 1995 [31].

El estándar MPEG-1 originalmente fue diseñado para comprimir el flujo de datos de imágenes en movimiento a 1.44 Mbits/s con una calidad VHS para ser almacenados en discos compactos. Posteriormente el desarrollo de MPEG-2 logró reducir el flujo de datos de imágenes SD de 270 Mbits/s a un rango de 2 a 7 Mbits/s, y en señales HD lo redujo de un rango de entre 1.5 y 3 Gbit/s a un rango de 15 a 20 Mbit/s [31], lo que permitía la transmisión de estas señales en frecuencias de televisión terrestre con anchos de banda de 6 MHz.

En un principio todos los sistemas de transmisión de televisión digital (ATSC, DVB, ISDB) se basaron en el estándar MPEG-2 tanto para la compresión como para el transporte de estos, sin embargo, actualmente estos sistemas pueden emplear el codec MPEG-4 para la compresión.



## 1.2. Digitalización y compresión de la señal de TV

### 1.2.1. La señal de video digital según la norma ITU-BT.R.601

Las señales de video digital se han utilizado en los estudios de televisión desde antes de que estas pudieran ser transmitidas [31]. Estas señales siguen los parámetros que se establecieron en la norma ITU-BT.R.601 *Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios*.

La norma ITU-BT.R.601 dicta los parámetros para el proceso de muestreo y cuantificación de una señal de video por componentes (Y, C<sub>B</sub>, C<sub>R</sub>), en relaciones de aspecto de imagen 4:3 y 16:9 para sistemas con 525 y 625 líneas de despliegue entrelazado [13]. A diferencia de la televisión analógica que transmitía la señal compuesta, en la DTV se transmite la señal por componentes, ya que el digitalizar la señal compuesta de video, no aportaba mucha mejora visual.

El proceso de muestreo y cuantificación es el siguiente: la señal de video se genera en la cámara, la cual separa la luz que capta en tres señales analógicas las cuales son: Red (color rojo), Green (color verde) y Blue (color azul), componentes RGB. De las señales RGB se originan otras tres señales compuestas, las cuales contienen toda la información necesaria de la imagen, estas señales son la componente de luminancia Y (información de brillo) y las componentes de crominancia o diferencia de color C<sub>B</sub> y C<sub>R</sub> (información de color) [31].

Las componentes Y, C<sub>B</sub> y C<sub>R</sub> se forman con la suma y resta de las componentes RGB de la siguiente manera [31]: la componente Y se forma con un 30% de la señal R más un 59% de la señal G y un 11% de la señal B como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Y = (0.30 \cdot R) + (0.59 \cdot G) + (0.11 \cdot B)$$



La componente  $C_B$  se forma con un 56% de resta de la componente B menos la señal Y:

$$C_B = 0.56 \cdot (B - Y)$$

La componente  $C_R$  se forma con un 71% de resta de la componente R menos la señal Y:

$$C_R = 0.71 \cdot (R - Y)$$

Estas señales son limitadas en su ancho de banda pasándolas por un filtro paso bajas. La componente Y se limita a 5.75MHz y las dos componentes de diferencia de color se limitan a 2.75 MHz cada una. Las componentes Y,  $C_B$  y  $C_R$  filtradas se muestrean para ser digitalizadas por medio de un convertidor analógico/digital para cada señal. El convertidor A/D toma muestras de la señal Y, con una frecuencia de 13.5 MHz y las señales  $C_B$  y  $C_R$  son muestreadas a una frecuencia de 6.75 MHz [31].

Cada uno de los convertidores, según la recomendación, puede tener una resolución de 8 (256 niveles de tonalidades de color) o 10 bits (1024 niveles de tonalidad de color) para representar cada nivel de la señal [13], sin embargo sólo se usan cuantificaciones con 8 bits. Con la resolución de 10 bits se puede generar una tasa de bits de 270 Mbits/s mientras que con 8 bits se genera una tasa de 216 Mbits/s [31]. Todo este proceso anteriormente descrito se ilustra en la figura 7.

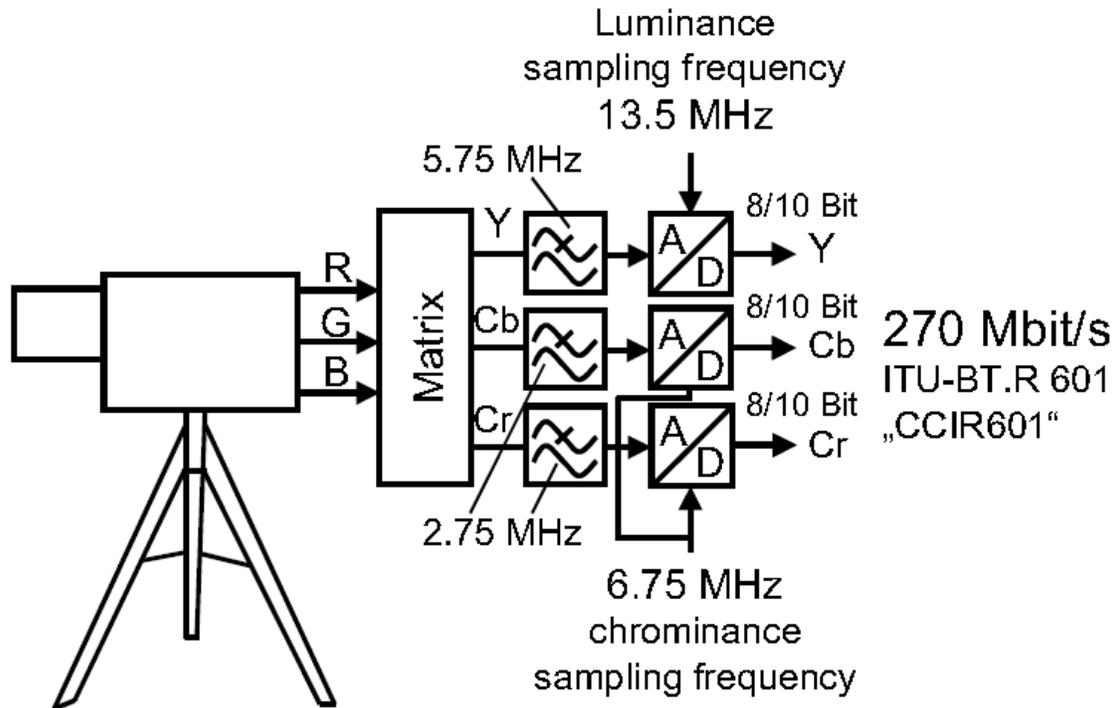


Figura 7. Proceso de captura de la imagen y digitalización de sus componentes [31].

Las muestras una vez cuantificadas son multiplexadas en el siguiente orden [31]:  $C_B Y C_R Y C_B Y \dots$ . Como puede observarse, un muestra  $Y$  se coloca alternadamente con una muestra  $C_B$  o  $C_R$ , de tal forma que hay dos veces más de muestras de la señal  $Y$  que de las señales  $C_B$  y  $C_R$ . Esta forma de muestreo se le llama 4:2:2, es decir que por cada cuatro muestras de la señal  $Y$  hay dos muestras de la señal  $C_B$  y otras dos muestras de la señal  $C_R$  como se muestra en la figura 8. La norma ITU-BT.R.601 también define el modo 4:4:4, el cual utiliza la frecuencia de muestreo de 13.5 MHz para las tres señales de video.

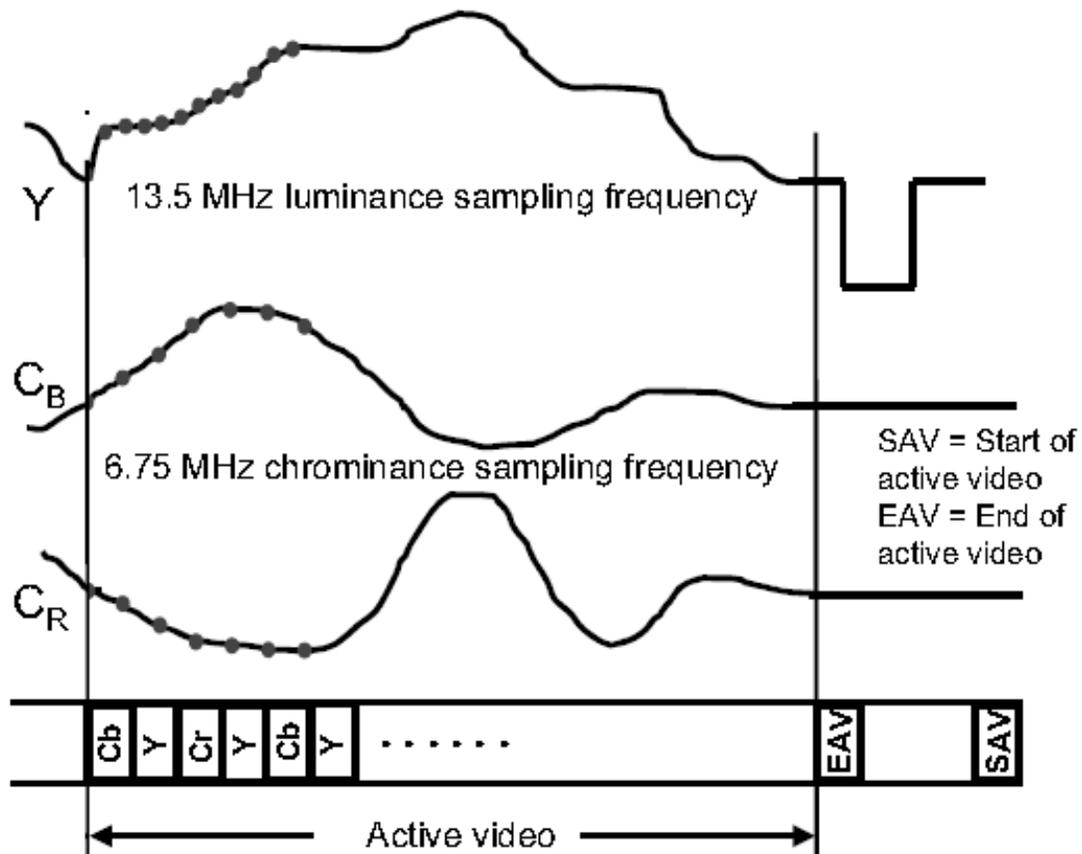


Figura 8. Muestreo de las componentes de video según la norma ITU-BT.R.601 [31].

Al inicio y fin de cada línea activa de video digital se colocan palabras códigos, llamadas SAV (start of active video) y EAV (end of active video) [31], para delimitar cada línea que compone la imagen. Estas palabras código contienen la información relacionada al despliegue de la imagen en la pantalla.

A pesar de que se disponen de 256 niveles de cuantificación al utilizarse 8 bits y 1024 niveles de cuantificación al utilizarse 10 bits, solo se utilizan 90% de los niveles de estos disponibles para representar la amplitud de las señales, el 10% restante se reserva para evitar posibles saturaciones [31].



La componente Y utiliza 220 (8 bits) u 877 (10 bits) niveles a partir de los niveles 16 (8 bits) o 64 (10 bits) que corresponden a los niveles de negro, hasta los niveles 235 (8 bits) o 940 (10 bits) que corresponden el nivel de blanco (fig. 9) [31].

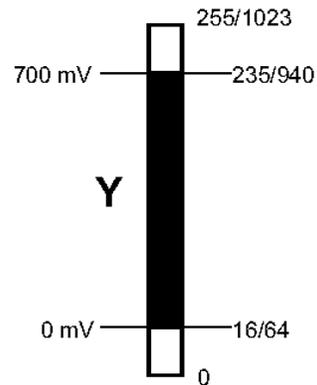


Figura 9. Niveles de voltaje con sus respectivos niveles de cuantificación de la componente Y [31].

Las componentes  $C_B$  y  $C_R$  se utilizan 225 (8 bits) o 897 (10 bits) niveles que se reparten a ambos lados del cero analógico. Los niveles a utilizar van del 16 (8 bits) o 64 (10 bits) hasta los niveles 240 (8 bits) o 960 (10 bits) (fig. 10) [31].

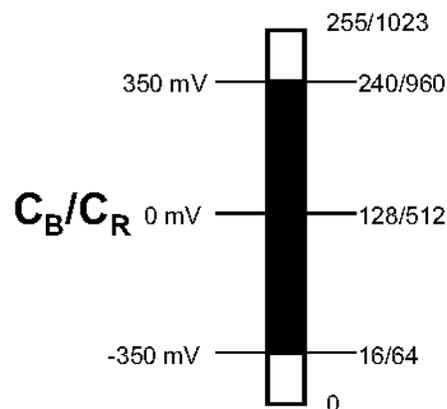


Figura 10. Niveles de voltaje con sus respectivos niveles de cuantificación de las componentes  $C_B$  y  $C_R$  [32].



## 1.2.2. El estándar de compresión creado por el Motion Picture Experts Group MPEG

El estándar MPEG fue desarrollado por el grupo del mismo nombre, con la intención de estudiar la problemática relativa al audio y video digital. En lo que a televisión se refiere, el MPEG tiene como fines establecer los métodos de compresión de imagen y sonido, además de definir las estructuras de transporte de datos.

El flujo de los datos MPEG se conforma de dos capas: la capa de compresión y la capa de transporte [31].

### 1.2.2.1. Capa de compresión de datos

El primer paso de todo el procesamiento del flujo de datos comienza con la compresión de la información. La compresión se realiza eliminando información redundante o irrelevante del flujo de datos. La información redundante es aquella que permanece sin cambios durante mucho tiempo, o que aparece en múltiples ocasiones en el flujo de datos. Por otra parte la información irrelevante es aquella que no puede ser percibida por el ser humano, en el caso del video hay componentes que no puede percibir el ojo humano debido a su anatomía [31].

El estándar más utilizado para la compresión y transporte de datos en los actuales estándares de transmisión en televisión (ATSC, DVB, ISDB y DTMB) es el estándar MPEG-2.

MPEG-2 elimina información redundante aprovechando que la información no cambia mucho de una imagen a otra. El primer paso de este proceso es examinar en cada cuadro los componentes de la imagen para seleccionar la información a eliminar. MPEG define tres tipos de imágenes que se encadenan según el esquema mostrado en la figura 11.

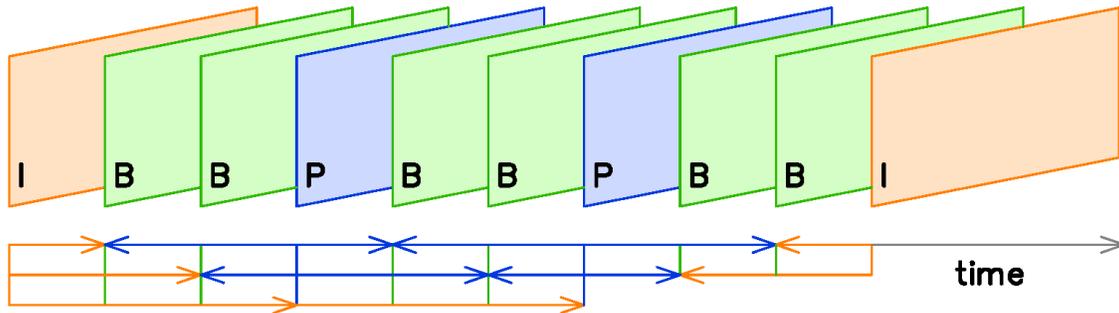


Figura 11. Secuencia de video con imágenes I, P y B [106].

De acuerdo a la figura 1.11 se definen tres tipos de imagen:

I: Intraimágenes.

P: Imágenes predicción.

B: Imágenes bidireccionales.

Las intraimágenes son aquellas que no requieren información adicional para ser decodificadas satisfactoriamente, ya que contiene todos los elementos necesarios para su reconstrucción realizada por el decodificador, y son fundamentales para el acceso a una secuencia. Estas son codificadas sin ninguna referencia a otras imágenes, como en JPEG, por lo que se emplea la DCT (Discrete Cosine Transform) para reducir el número de bits. Este proceso transforma la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, para poder eliminar la mayor cantidad de bits manteniendo una calidad de imagen aceptable [31, 62].

Las imágenes predicción se codifican a partir de intraimágenes o imágenes predicción previas. Estas imágenes, a diferencia de las intraimágenes, contienen mucha menos información, ya que solo contienen la información que cambió con respecto a las imágenes anteriores donde se encuentra la redundancia espacial y temporal (fig. 12 y 13), además se incluye información de la diferencia de los vectores de movimiento entre la imagen actual y la anterior, para que de esta forma



se transmita la menor cantidad de información posible. Los vectores de movimiento describen y predicen la información de desplazamiento de los objetos dentro de la imagen [62].

Las imágenes bidireccionales se generan mediante la interpolación de las imágenes I y P.

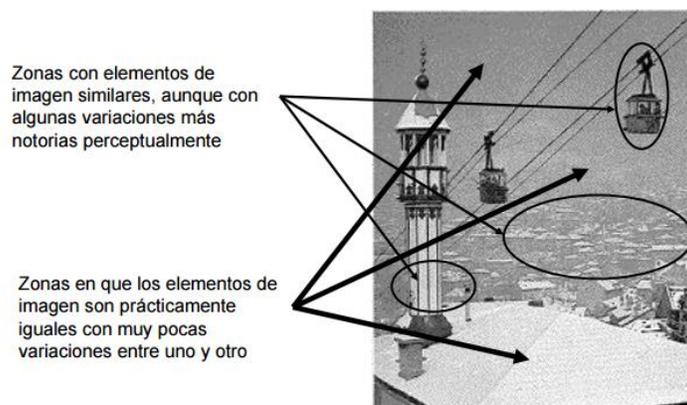


Figura 12. Zonas de la imagen donde se aplica la redundancia espacial [107].

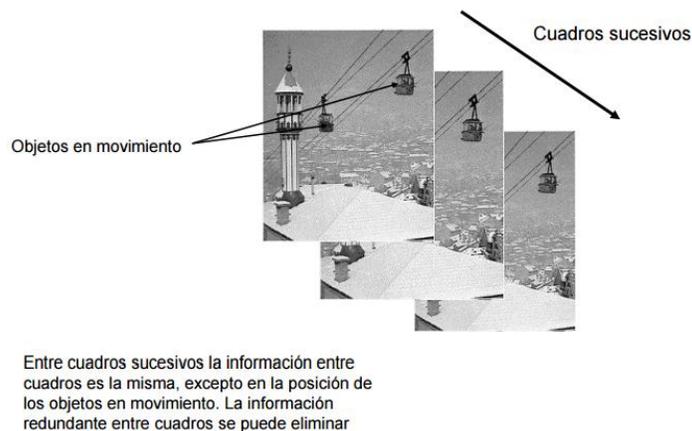


Figura 13. Redundancia temporal [107].



Para lograr la compresión de la imagen, esta es primero separada en muestras de luminancia y muestras de crominancia, a su vez la información es dividida en macrobloques de 16x16 píxeles, para facilitar el manejo de la información, estos también se dividen en bloques de 8x8 píxeles sobre los cuales se hace la compresión y predicción [62].

Con este proceso es posible reducir el flujo de datos de una señal de televisión estándar (SDTV) de 270 Mbits/s a aproximadamente un flujo de 2 a 7 Mbits/s y una señal HDTV con un flujo que puede variar de 1.5 a 3 Gbits/s, esta se puede reducir a un flujo de 15 a 20 Mbits/s. La variación de los flujos ya comprimidos depende del nivel de codificación empleado [31].

La mejora en los estándares MPEG sigue avanzando, prueba de esto es el desarrollo del estándar MPEG-4 el cual es un estándar que consta de muchas versiones, llamadas partes, que se diferencian unas de otras dependiendo la aplicación y el servicio para el que se requiera. El principio de compresión sigue siendo el mismo, eliminar información redundante e irrelevante de una imagen en comparación a otra, sin embargo, las mejoras radican en el proceso de escaneo de las imágenes.

De igual forma que el video, el audio asociado debe ser digitalizado y posteriormente pasar por un proceso de compresión para adecuarse a un proceso de transmisión de televisión. Para ser digitalizado es necesario tomar muestras de la señal de audio, las frecuencias de muestreo empleadas son de 32KHz, 44.1KHz, 48KHz y 92 KHz, las dos últimas frecuencias de muestreo son calidad de estudio, mientras que la frecuencia de 44.1KHz es utilizada para CD's. Una señal muestreada a 48KHz y cuantificada con 16 bits puede generar un flujo de 786 Kbits/s por canal, lo que significa un flujo resultante de aproximadamente 1.5 Mbits/s para una señal estéreo (dos canales de audio) [31]. En la figura 14 se ilustra el proceso anterior.

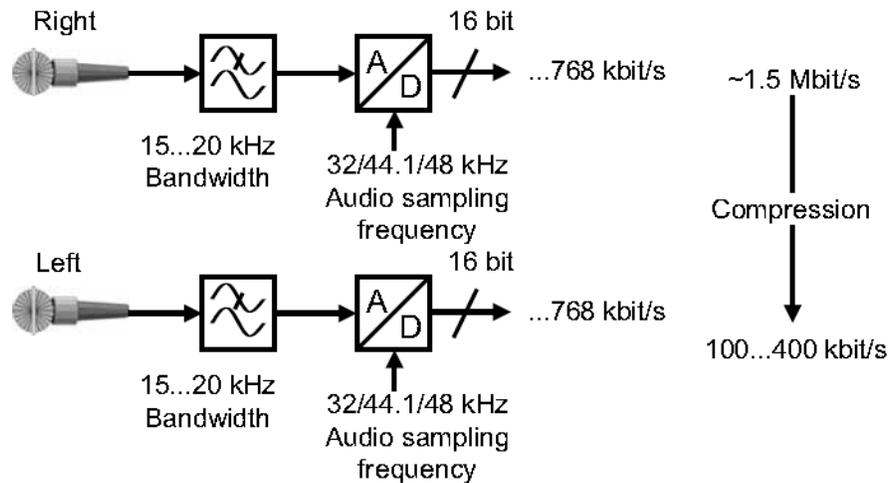


Figura 14. Esquema de digitalización de audio [31].

El objetivo de la compresión es reducir el flujo a una tasa de entre 100 Kbits/s a 400 Kbits/s. Los archivos de audio MP3, muy utilizados actualmente, generan un flujo tan bajo como 32 Kbits/s. Al igual que la compresión de video, el audio pasa por un proceso de eliminación de información redundante e irrelevante. El proceso que utilizan todos los métodos de compresión de audio se basan el modelo Psicoacústico, es decir se hace uso de la “imperfección” del oído humano para eliminar información irrelevante de la señal de audio [31].

El audio asociado a MPEG-2 es Advanced Audio Coding (AAC), éste utiliza un proceso muy similar a MP3, sin embargo AAC ofrece una mayor calidad y además adapta automáticamente el flujo de datos en función de la complejidad del audio transmitido.

El estándar ATSC utiliza un códec de audio diferente, el cual fue diseñado por los laboratorios Dolby, este códec es el Adaptive Transform Coder 3 (AC-3).



### 1.2.2.2. Capa de transporte de datos. MPEG-2 Transport Stream

En lo que respecta a la capa de transporte de datos (Transport Stream TS), ésta se forma con paquetes de 188 bytes de longitud que contienen cadenas elementales de datos formadas una vez comprimida y codificada la información de audio y video.

Para formar el TS primero se forman cadenas elementales con la información de audio y video ya comprimida. Estas cadenas elementales se dividen en paquetes llamados “packetized elementary streams” PES o cadenas elementales en español, con una longitud de hasta 64 bytes [31]. En la figura 15 se muestran las cadenas elementales de video, audio y datos auxiliares.

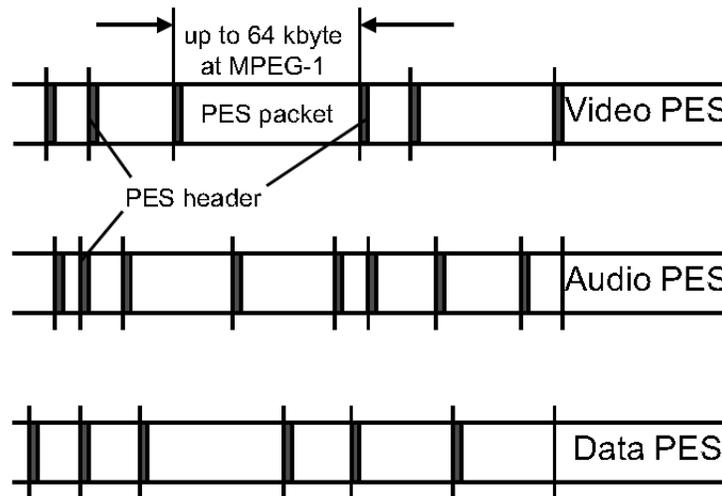


Figura 15. Cadenas elementales MPEG (PES) [31].

Los PES están formados generalmente por un encabezado que indica la longitud del paquete y una carga, la cual contiene las cadenas de audio y video comprimido.

De los PES se toman porciones de datos de una longitud de 184 bytes y se les agregan otros 4 bytes de encabezado formando paquetes con un total de 188 bytes, los cuales se llaman “cadenas de paquetes de transporte” [31] (fig. 16), y que serán después multiplexados con paquetes de otros programas de TV o radio.

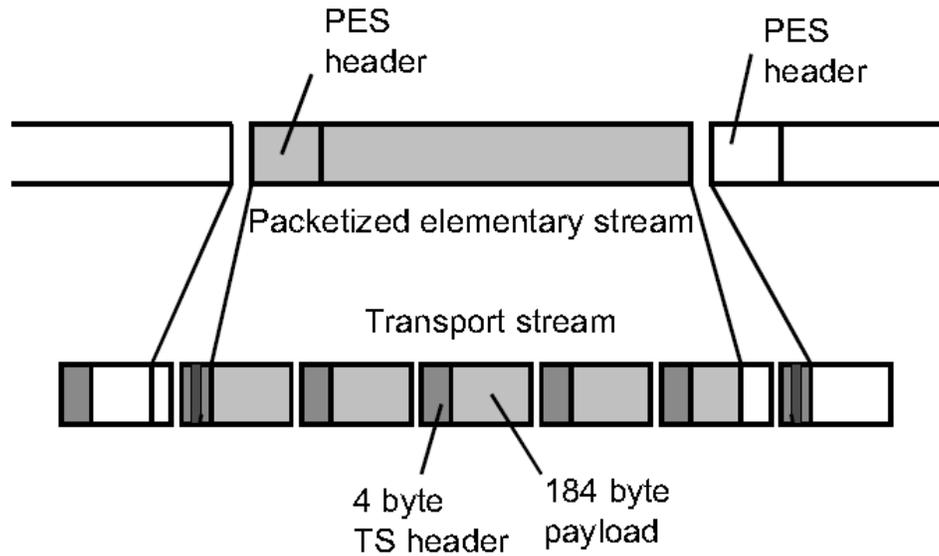


Figura 16. Orden de los paquetes en la cadena de transporte MPEG-2 [31].

El siguiente paso es agregar información para la corrección de errores, en el caso de la televisión, que es un sistema sin retorno, se utiliza el Forward Error Correction (FEC), que básicamente agrega bits de redundancia al flujo de datos para que el decodificador pueda obtener la secuencia de datos original.

Hasta este punto, el procesamiento de la señal es el mismo para los diferentes estándares de transmisión de televisión (ATSC, DVB, ISDB), de aquí en adelante el proceso de modulación de la señal varía dependiendo del estándar a aplicar.

### 1.3. Estándares para la transmisión de televisión vía terrestre

Con los avances logrados en la tecnología digital aplicados a la televisión en la década de los 90, las televisoras y las empresas dedicadas a producir equipos electrónicos, reconocieron la importancia de la migración a la tecnología digital para mejorar tanto la eficiencia del ancho de banda como la estabilidad ante los efectos de propagación haciendo uso de diferentes métodos de protección contra errores.



Varios estándares para DTV fueron diseñados alrededor del mundo con la intención de brindar la mejor experiencia posible al espectador, estos estándares son los mencionados anteriormente (ATSC, DVB, ISDB y DTMB), y en este apartado se hará una breve descripción de la tecnología utilizada en la transmisión de cada sistema

### 1.3.1. Estándar ATSC

Este sistema de transmisión utiliza el códec MPEG-2 para la compresión de video, mientras que para la compresión de audio emplea el sistema Digital Audio Compression (AC-3). Además hace uso del formato MPEG-2 TS-structure para el empaquetamiento del video, audio y la información de los diferentes servicios que se multiplexan dentro de la misma frecuencia [14, 31].

En la figura 17 se muestra un diagrama de los bloques que componen el sistema:

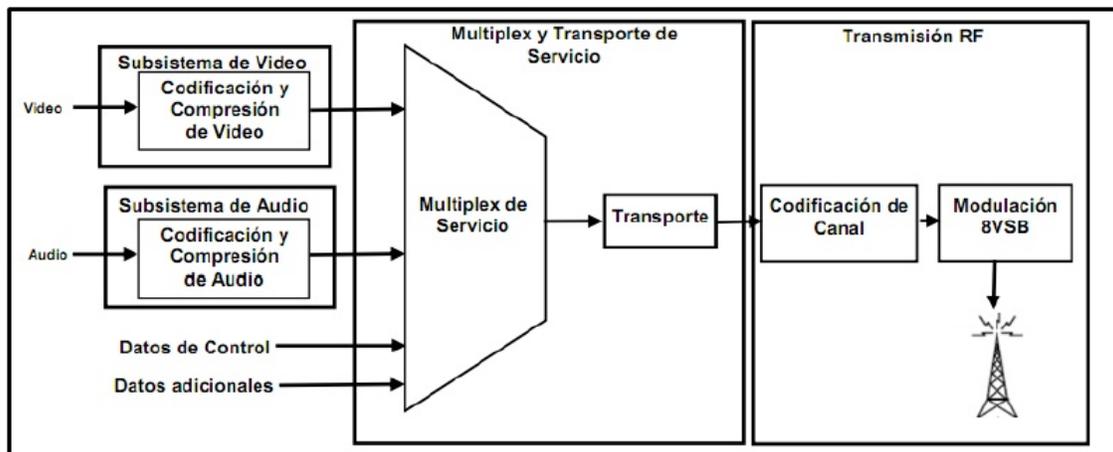


Figura 17. Sistema ATSC [100].

El sistema consta de tres partes. El primer bloque es el de “Compresión y codificación de fuente”, el cual se encarga de reducir la información de audio, video



y datos auxiliares (ancillary data). Los datos auxiliares se refieren a datos de control y datos asociados al audio y video, como pueden ser los subtítulos [1].

El siguiente bloque es el de “Multiplexaje de servicios y transporte”, encargado de dividir el flujo digital de datos en paquetes de información con su respectiva identificación, así como el multiplexaje de los diferentes tipos de flujos de paquetes de audio, video y datos auxiliares, en un solo flujo de datos. Este estándar emplea el protocolo MPEG-2 TS para el empaquetamiento y multiplexaje del audio, video y la información de los diferentes servicios dentro del mismo flujo de bits [1].

El último bloque es el de la “Transmisión RF” el cual consta del codificador de canal y el modulador. El codificador de canal agrega información adicional al flujo de datos, dicha información puede ser empleada por el receptor para reconstruir la información, la cual, debido a las condiciones del medio de transmisión, puede no representar completamente la señal transmitida originalmente. El modulador utiliza el flujo de datos para modular la señal que será transmitida, la modulación empleada es 8-VSB (modulación de Residuo de Banda Lateral de 8 niveles) [1].

Esta modulación permite transmitir información digital con una tasa de transferencia de datos 19.29 Mbits/s (la cual permanece fija) usando los canales actuales de 6 MHz [14, 31].

Este estándar permite transmitir señales en SD combinadas con señales en HD a través de un ancho de banda de 6 MHz.

### 1.3.2. Estándar DVB-T

Durante la década de los 90s el proyecto DVB, desarrolló su primera generación de estándares para la transmisión de señales de televisión digital vía terrestre (DVB-T), cable (DVB-C) y satélite (DVB-S). Dichos sistemas tendrían la capacidad de transmitir señales HD y SD.



Los tres sistemas usan una tecnología similar, la diferencia entre ambos son unas cuantas modificaciones en la codificación del canal dependiendo de las características del medio por el cual será transmitida la señal. En este apartado se hará una descripción general sólo del estándar DVB-T.

El sistema DVB-T se diseñó para transmitir en canales de 8 MHz de ancho de banda, pero puede adecuarse para canales de 6 y 7 MHz, obviamente estas adecuaciones varían el flujo de datos posible para transmitir. La tasa de transmisión posible para un canal de 8 MHz varía entre 4.98 y 31.67 Mbits/s y para los canales de 6 MHz oscila entre 3.73 y 23.05 Mbits/s dependiendo los parámetros de codificación y métodos de modulación empleados (QPSK, 16QAM, 64QAM) [1].

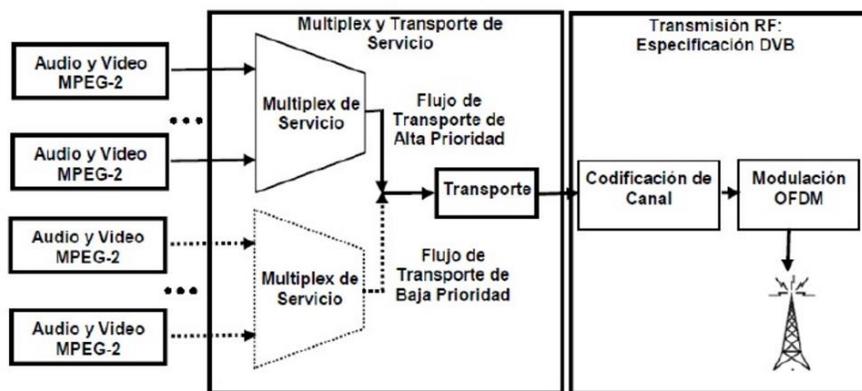


Figura 18. Sistema DVB-T [101].

Como puede verse en la figura 18, DVB-T se conforma de tres bloques al igual que el sistema ATSC: compresión y codificación de fuente, multiplexaje de servicios y transporte y transmisión RF.

Este estándar utiliza MPEG-2 para la compresión de audio y video, multiplexaje y transporte de datos, sin embargo, a diferencia de ATSC, DVB-T permite la transmisión de dos flujos de datos MPEG-TS al mismo tiempo, usando una técnica llamada modulación jerárquica (hierarchical modulation) [1].



En el bloque de transmisión RF se agrega información adicional al flujo de datos la cual será empleada por el receptor para reconstruir la información. Una vez terminado el proceso anterior, la información se modula en una secuencia de símbolos, las modulaciones a utilizar son QPSK, 16-QAM, 64-QAM [1].

A diferencia de ATSC, DVB-T ocupa una modulación multiportadora OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) con modos 2k (1,075 portadoras) y 8k (6,817 portadoras) para la transmisión de la señal [1], dicha modulación permite un mejor desempeño en un canal donde las interferencias por multitrayectorias están presentes.

Otra ventaja de la modulación OFDM es la facilidad con la que se puede aplicar en redes de frecuencia única (SFN).

### 1.3.3. Estándar ISDB-T

ISDB-T tiene ciertas similitudes con los estándares mencionados anteriormente (fig. 20), ya que también emplea MPEG-2 para la compresión de audio y video y para el multiplexaje y transporte de estos, sin embargo el estándar japonés es más complejo, ya que en comparación con otros estándares, ISDB-T utiliza el método COFDM, pero en bandas segmentadas (BST-COFDM), lo que permite que el ancho de banda disponible se pueda repartir en varios servicios que pueden ser de datos, radio y televisión SD o HD (fig. 19). Este sistema se puede adaptar a canales de 6,7 y 8 MHz de ancho de banda [1].

El ancho de banda utilizable es de 13/14 del total disponible, es decir, que para un canal de 6 MHz se utilizan sólo 5.57 MHz, para un canal de 7 MHz se utilizan 6.5 y para un canal de 8 MHz se utilizan 7.42 MHz, el ancho de banda restante sirve de banda de guarda entre canales [31].



# Capítulo 1. Televisión Digital.

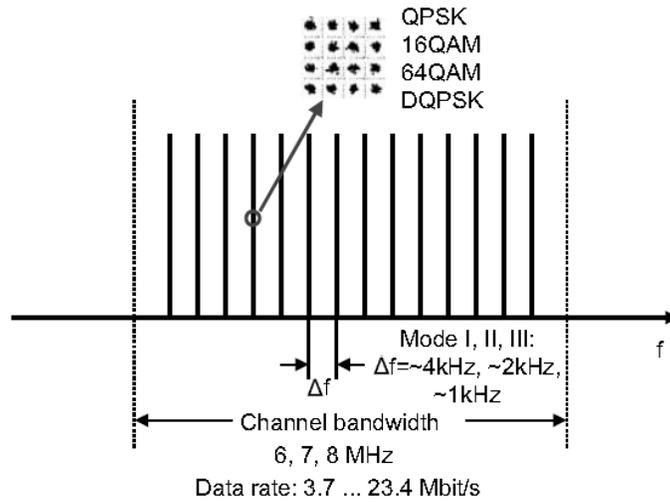


Figura 19. Segmentación del ancho de banda en ISDB-T [31].

El ancho de banda utilizable se subdivide en bandas de 430 KHz, en las cuales se pueden usar modos COFDM de 2k, 4k y 8k que pueden ser modulados en QPSK, 16QAM, 64QAM y DQPSK [1].

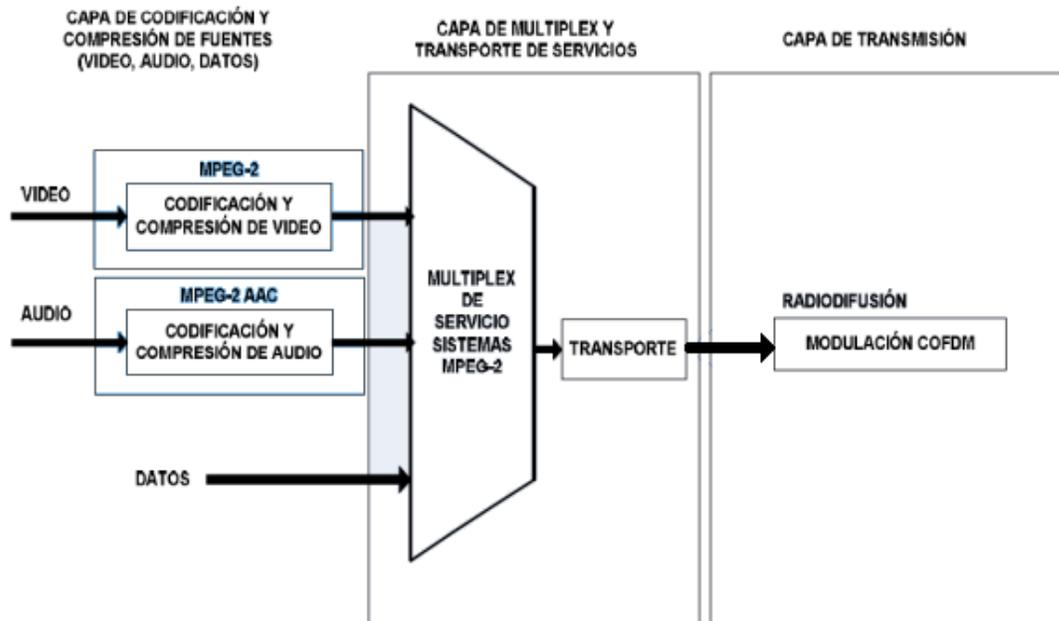


Figura 20. Sistema ISDB [102].



#### 1.3.4. Estándar DTMB

Este estándar desarrollado en China es muy similar a los anteriores, sobre todo al sistema DVB-T, ya que el proceso de la señal que involucra la compresión y transporte de datos es en esencia igual, lo mismo para el proceso de modulación, al hacer uso de la modulación OFDM con portadoras moduladas en BPSK, QPSK y 16-QAM.

La diferencia radica en las tecnologías usadas para la protección contra errores y la separación de portadoras, lo que permite una sincronización más rápida del sistema.

Evidentemente este sistema permite la radiodifusión de señales en HD y SD además de otros servicios multimedia generando una tasa de transmisión que va desde 4.8 Mbit/s hasta 32.5 Mbit/s sobre redes MFN (Multiple Frequency Networks) y SFN [1].



## Capítulo 2. Televisión en Alta Definición (HDTV)

---

Según el reporte ITU-R BT.801 *“The present state of High-Definition Television”*, un sistema de Alta Definición tiene como propósito el mostrar imágenes a una distancia de aproximadamente tres veces la altura de la pantalla, de tal forma que la calidad de reproducción sea prácticamente la misma que percibiría en la escena o acción original un espectador con una agudeza visual elevada. Lo anterior implica una mejora en la reproducción de movimiento y una mejora en la percepción de profundidad, por ende una sensación mayor de inmersión.

En comparación con los sistemas convencionales de definición estándar, las mejoras se ven reflejadas en las siguientes características:

- Visualizar imágenes de aproximadamente tres veces mayor definición que las imágenes de Definición Estándar (SD).
- Mejora en la resolución temporal (campos por segundo).
- Formato de imagen más amplio.

Para lograr esto se establecieron principalmente, los siguientes objetivos que debe de cumplir la imagen:

Ángulo de visión: al tener la pantalla más cerca, ésta cubre un mayor campo de visión, el cual genera un mayor efecto de inmersión cuando el ángulo supera los 20°. Además, se ha tomado como parámetro fijar la resolución angular de 1pixel por minuto de arco (60 pixeles por grado).

Distancia de visión: Al determinarse una distancia de tres veces la altura de la pantalla, se garantiza un ángulo de visión de entre 40° a 30°.



Líneas activas por cuadro: Se ha considerado que un sistema con más de 1000 líneas, su resolución sería favorablemente comparable con las películas en 35 mm, que ha sido considerado como una referencia de alta calidad.

Resolución temporal: Al ampliar el campo de visión es necesario modificar la frecuencia de cuadros, ya que es más notorio el parpadeo de la imagen. Estudios realizados para determinar los parámetros de la HDTV han demostrado que a una frecuencia de 60 Hz, el parpadeo es perceptible pero no molesto.

Formato de imagen: Al tener un formato de imagen más amplio, el interés de los observadores aumenta, por lo que el ampliar el formato de imagen a 16:9 permite centrar toda la acción de la escena en el centro de la imagen, lo que permite una compatibilidad con el formato 4:3. Ambas resoluciones se muestran en la figura 21 [19].

La relación de aspecto de 16:9, implica una pantalla más amplia en comparación con la relación 4:3 usada en la SDTV [31]. Lo anterior implica lo siguiente: la relación 16:9 nos indica que la longitud horizontal contiene 16 unidades mientras que altura de la pantalla debe contener 9 unidades y en el aspecto 4:3 la pantalla tiene una relación de 4 unidades horizontalmente y 3 unidades verticalmente.

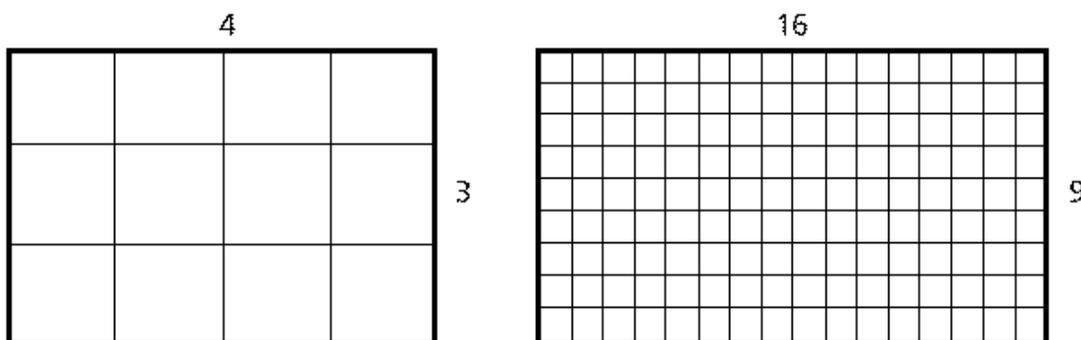


Figura 21. Relaciones de aspecto 4:3 (izquierda) y 16:9 (derecha) [31].



## 2.1. Parámetros de los formatos HDTV

Para dar una mayor sensación de inmersión en la imagen y cumplir con los objetivos mencionados en la introducción de este capítulo, se han estandarizado varios formatos HDTV, sin embargo, actualmente son dos las resoluciones de imagen más comunes para representar imágenes en HDTV:

- **1080i:** Este formato cuenta con una resolución de imagen de 1920 x 1080 y puede desplegar 25 o 30 campos por segundo de forma entrelazada [6] (fig. 22) con un ángulo de visión de 32°.

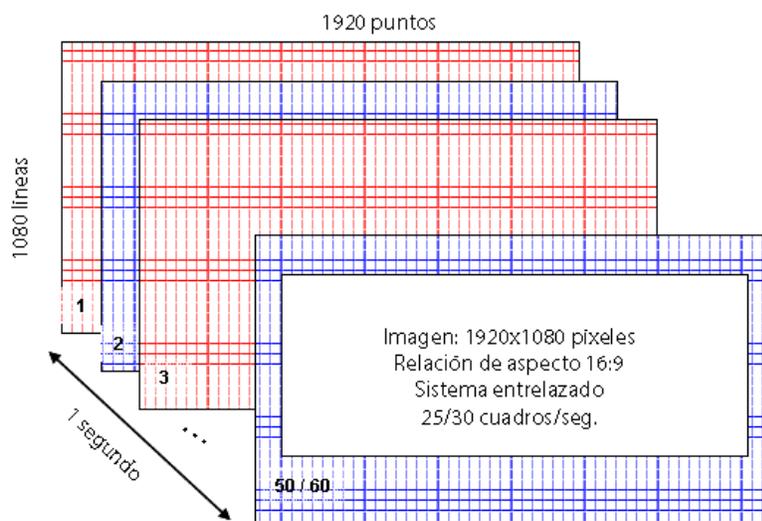
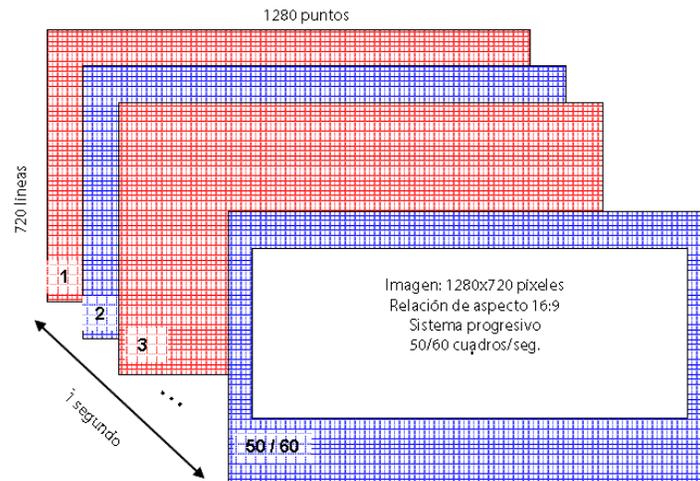


Figura 22. Formato 1080i [6].

- **720p:** Este formato cuenta con una resolución de imagen de 1280 x 720 y puede desplegar 50 o 60 campos por segundo de manera progresiva [6] (fig. 23) con un ángulo de 21°.



## Capítulo 2. Televisión en Alta Definición (HDTV).



**Figura 23. Formato 720p. [6].**

Los dos formatos emplean el mismo espacio de color (gama de colores), el cual es heredado de la anterior generación de televisión [21].

La televisión genera distintos colores mediante la combinación de tres colores primarios (RGB sistema aditivo de color), la cantidad de colores (gama) que puede generar depende del espectro de los colores primarios que se seleccionen. Estos colores se definen como coordenadas X, Y y Z (X, Y color, Z luminancia) en el espacio de color definido por CIE 1931 (fig. 24), el cual está basado en la cantidad de colores que puede percibir el ojo humano.



## Capítulo 2. Televisión en Alta Definición (HDTV).

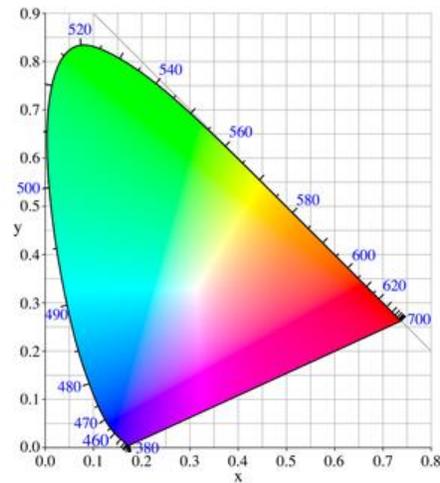


Figura 24. Diagrama del espacio de color CIE 1931 con las longitudes de onda en nanómetros mostradas en la frontera curvada [103].

El espacio de color que es posible lograr con los colores primarios seleccionados se encuentra dentro del triángulo que se forma al unir los puntos que representan los colores primarios, dichas coordenadas se muestran en la tabla 1. En la figura 25 se muestra el espacio de color seleccionado para la HDTV y sus coordenadas en el espacio CIE 1931.

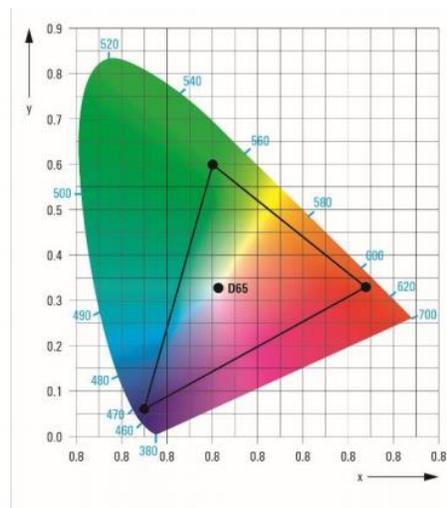


Figura 25. Espacio de color para la HDTV [6].



<b>Colores primarios y blanco de referencia</b>	<b>Coordenadas de cromaticidad (CIE, 1931)</b>	<b>x</b>	<b>y</b>
	Rojo primario (R)	0,640	0,330
	Verde primario (G)	0,300	0,600
	Azul primario (B)	0,150	0,060
	Blanco de referencia (D65)	0,3127	0,3290

Tabla 1. Coordenadas de los colores primarios de las UHDTV [21].

Ambos formatos se encuentran estandarizados por la ITU y SMPTE dentro de los siguientes estándares:

- 1920 pixeles x 1080 líneas activas:
  - ITU-R BT.709-6. *Valores de los parámetros de la norma de TV en Alta Definición para la producción y el intercambio internacional de programas.*
  - SMPTE 274M (1920 x 1080).
- 1280 pixeles x 720 líneas activas:
  - UIT-R BT.1543. *Formato de imagen 1 280 x 720, 16:9 de captura progresiva para la producción e intercambio internacional de programas en el entorno de 60 Hz.*
  - SMPTE 296M (1280 x 720).



Existen múltiples formatos de imagen según la cantidad de campos por segundo y el despliegue de estas imágenes en pantalla, sin embargo, son los formatos 1080i y 720p usados para la transmisión HDTV vía terrestre.

A pesar de que se tienen especificados formatos 1080p dentro de los estándares SMPTE 274M (1920 x 1080) e ITU-R BT.709-6, actualmente este formato no se utiliza para la transmisión empleando los estándares actuales, por el elevado ancho de banda que requiere.

## 2.2. Señal HDTV

Los principios para el manejo de las señales en SD pueden aplicarse al manejo de las señales en HD. El muestreo de la señal HD en principio es el mismo, con la diferencia de que en este caso se manejan señales con mayor ancho de banda y frecuencias de muestreo mayores.

Al igual que en la definición estándar, la señal HD se representa digitalmente por las componentes Y,  $C_r$  y  $C_b$ , las cuales se muestrean y cuantifican de la misma forma que la señal SD mostrada en el capítulo anterior.

La diferencia en el proceso de digitalización, en comparación con señales SD, radica en la frecuencia de muestreo que se utiliza para cada señal. En el caso de la componente Y, la frecuencia de muestreo es de 74.25 MHz y para las componentes  $C_r$  y  $C_b$  la frecuencia de muestreo es de 37.125 MHz [31], la mitad que la frecuencia de muestreo de la señal Y, lo que da como resultado un muestreo 4:2:2.

Previamente las señales son reducidas en su ancho de banda. La señal Y se reduce a 30 MHz y las señales de color se reducen a 15 MHz de ancho de banda [31].

Ya que se utilizan los mismos niveles de cuantificación que en SD (8 y 10 bits), se crean flujos de datos de 1.485 Gbit/s con 10 bits y 1.188 Gbit/s con 8 bits.



En el caso de formatos 1080p 50/60 (campos por segundo) de despliegue progresivo, las frecuencias de muestreo son el doble, siendo de 148.5 MHz para la señal de luminancia y para las señales de crominancia la frecuencias son de 74.25 MHz, por lo que el flujo de datos se eleva a 2.97 Gbit/s con 10 bits de cuantificación y 2.376 Gbit/s con 8 bits de cuantificación [31]. En la figura 26 se muestra el proceso de digitalización de la señal HD.

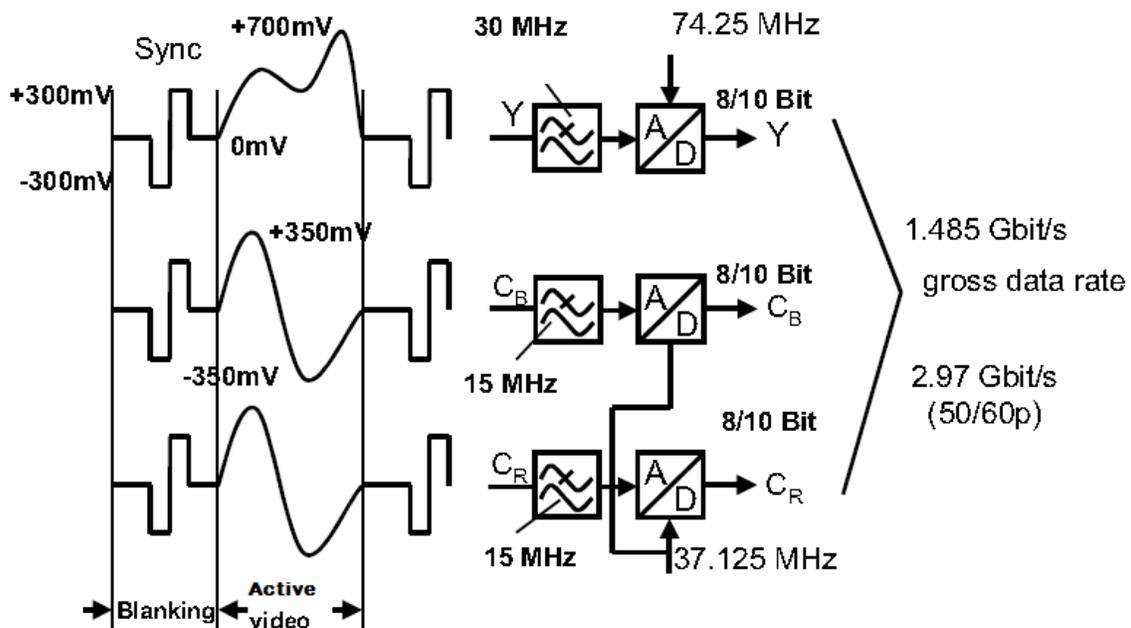


Figura 26. Muestreo de una señal HDTV [31].

### 2.3. Requisitos mínimos para que los equipos desplieguen imágenes HD

En la actualidad existen diversos equipos en el mercado capaces de desplegar imágenes en calidad HD, no obstante estos no poseen las mismas características y para diferenciar los equipos por sus características se representan por logotipos aprobados por EICTA (European Information, Communications and Consumer



Electronics Technology Industry Associations) llamada DigitalEurope desde marzo de 2009. En la tabla 2 se anotan las características de cada etiqueta [31].

<p>Decodificador (STB) Decodificador integrado (iDTV)</p>	 <p>Capaz de decodificar:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• MPEG-4/AVC HP@L4</li><li>• MPEG-2 MP@HL</li><li>• Audio: MPEG-1 Layer II, AC3 Plus/DD Plus</li></ul> <p>Capaz de visualizar:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• HD 720p</li><li>• HD 1080i</li></ul>	 <p>Capaz de decodificar:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• MPEG-4/AVC HP@L4</li><li>• MPEG-2 MP@HL</li><li>• Audio: MPEG-1 Layer II, AC3 Plus/DD Plus,</li><li>• HE-AAC</li></ul> <p>Capaz de visualizar:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• HD 720p</li><li>• HD 1080i</li><li>• HD 1080p</li></ul>
<p>Pantalla TV Pantalla iDTV Proyectores</p>	 <p>Pantalla mayor o igual a 720 líneas y aspecto panorámico 16:9</p> <p>Capaz de visualizar:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• HD 720p</li><li>• HD 1080i</li></ul> <p>Conexiones:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Una conexión analógica YPrPb.</li><li>• Una conexión digital HDMI (o también DVI) con</li></ul>	 <p>Pantalla mayor o igual a 1080 líneas</p> <p>Capaz de visualizar:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• HD 720p</li><li>• HD 1080i</li><li>• HD 1080p</li></ul> <p>Conexiones:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Una conexión analógica YPrPb.</li></ul>



## Capítulo 2. Televisión en Alta Definición (HDTV).

	<p>soporte HDCP, como sistema anticopia.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Las entradas HD especificadas anteriormente (YPrPb, DVI, HDMI) deben soportar los siguientes formatos de vídeo: <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 1280x720 @ 50 y 60 Hz progresivo (720p)</li> <li>➤ 1920x1080 @ 50 y 60Hz entrelazado (1080i).</li> </ul> </li> <li>• El scaler (redimensionado) interno debe ser capaz de adaptar los formatos de definición estándar a la resolución completa de la pantalla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Una conexión digital HDMI (o también DVI) con soporte HDCP, como sistema anticopia.</li> <li>• Las entradas HD especificadas anteriormente (YPrPb, DVI, HDMI) deben soportar los siguientes formatos de vídeo: <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 1280x720 @ 50 y 60 Hz progresivo (720p)</li> <li>➤ 1920x1080 @ 50 y 60Hz entrelazado (1080i).</li> <li>➤ • 1920x1080 @ 24 y 50 Hz progresivos (1080p)</li> </ul> </li> </ul>
--	--	---

Tabla 2. Requerimientos para los equipos HD y HD 1080p [31].

### 2.3.1. Nuevas tecnologías de visualización de imágenes

Además del avance tecnológico en la calidad de imagen y en la forma de transmisión que involucra la Alta Definición, esta nueva tecnología trajo consigo un cambio en los dispositivos que despliegan las imágenes.

La profundidad de una pantalla CRT es casi igual al ancho de la pantalla. Por ejemplo la profundidad de un monitor con relación de aspecto 4:3 de 19 pulgadas (38.6 cm x 30.0 cm) es de 40 cm, por lo que daba como resultado pantallas que ocupaban mucho espacio y muy pesadas [11].



Para solucionar este problema se desarrollaron diversas tecnologías que permiten la visualización de imágenes en pantallas de menor volumen y más ligeras. Estas nuevas tecnologías son conocidas como pantallas planas.

Actualmente las pantallas basadas en la tecnología CRT han sido remplazadas en su mayoría por pantallas planas. Estas nuevas pantallas además de ser más ligeras que las antiguas basadas en CRT, cuentan con un bajo consumo de energía y son fáciles de fabricar en grandes tamaños sin llegar a ser tan pesadas y voluminosas como los monitores CRT. En el otro extremo, al ser livianas y con la posibilidad de fabricarse en tamaños pequeños, ha permitido la portabilidad de estas al ser utilizadas en dispositivos móviles como tabletas electrónicas, teléfonos móviles y laptops. En la figura 27 se muestra una comparativa de la anchura de los monitores CTR y una pantalla plana [11].

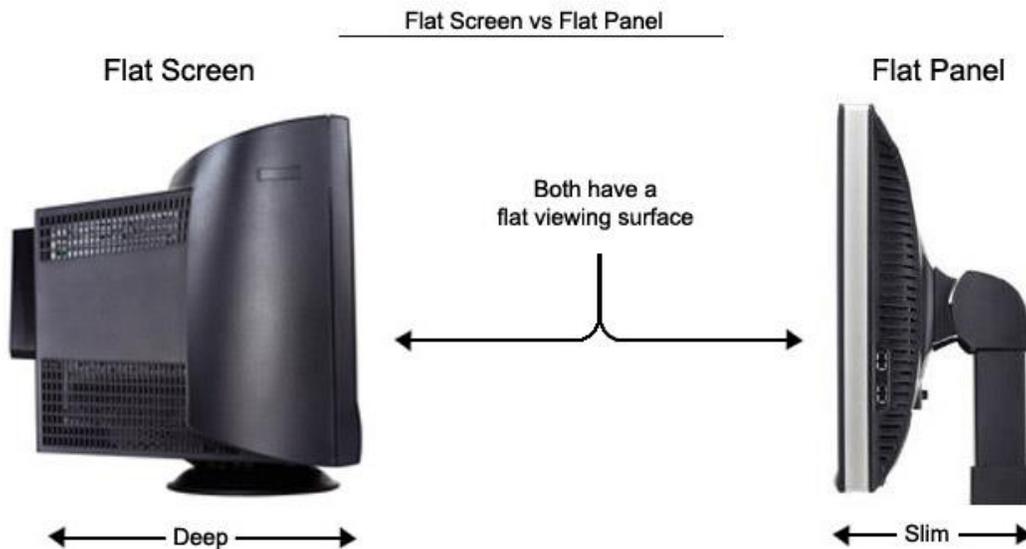


Figura 27. Comparación en anchura de una pantalla CRT y una pantalla plana LCD [108].

En el mercado existen diferentes tipos de pantallas planas, estas se diferencian unas de otras por la tecnología que utilizan para mostrar la imagen. Los tipos de pantallas planas que se fabrican actualmente son: pantallas de cristal líquido (LCD



por sus siglas en inglés), pantallas de plasma, pantallas LED (light emitting diode) y pantallas OLED (organic light emitting diode).

### 2.3.1.1. Pantallas de cristal líquido (Liquid Crystal Display) y pantallas LCD/LED

Las pantallas de cristal líquido o LCD actualmente son las pantallas dominantes en el mercado, tanto en televisores como dispositivos móviles, alcanzando tamaños que van desde 1 pulgada hasta 100 pulgadas en tamaño diagonal [11].

Una pantalla LCD está compuesta por dos paneles delgados de vidrio o cuarzo. En la cara interna de cada panel de cristal se coloca una matriz de electrodos la cual representa cada uno de los píxeles, mientras que en la cara exterior de cada panel se coloca una película polarizada. Las dos capas de vidrio son colocadas extremadamente cerca una de la otra y se sellan con un empaque. Finalmente el aire es removido de entre los paneles de vidrio para ser reemplazado por cristales líquidos [8, 11].

Los cristales líquidos son polímeros orgánicos transparentes que reaccionan cambiando su estructura molecular cuando se les aplica un voltaje. La luz que entra por el primer polarizador sólo permite la luz en polarización horizontal, al pasar por el cristal líquido pueden ocurrir dos casos: el primer caso es cuando un voltaje es aplicado al cristal y su estructura molecular permite el paso de la luz sin modificar su polarización, por lo que al llegar dicha luz al segundo polarizador no pasará a través de este ya que es un polarizador vertical; el segundo caso es cuando no se le aplica un voltaje al cristal y su estructura molecular cambia haciendo que la luz gire hasta  $90^\circ$  cambiando su ángulo de polarización, lo que permite el paso de esta a través del segundo polarizador para que de esta manera el píxel se ilumine. Este proceso se ilustra en la figura 28. Para crear una pantalla a color se adhieren filtros que dan color a las celdas, por lo que una tripleta de celdas, con sus respectivos electrodos, es empleada para formar un píxel a color, esto por los colores primarios,



rojo, verde y azul. La transmisión de luz de cada celda depende del voltaje rms aplicado a esta, es decir que para generar diferentes tonalidades de color se aplican voltajes entre los valores de totalmente encendido y totalmente apagado [5, 8, 9].

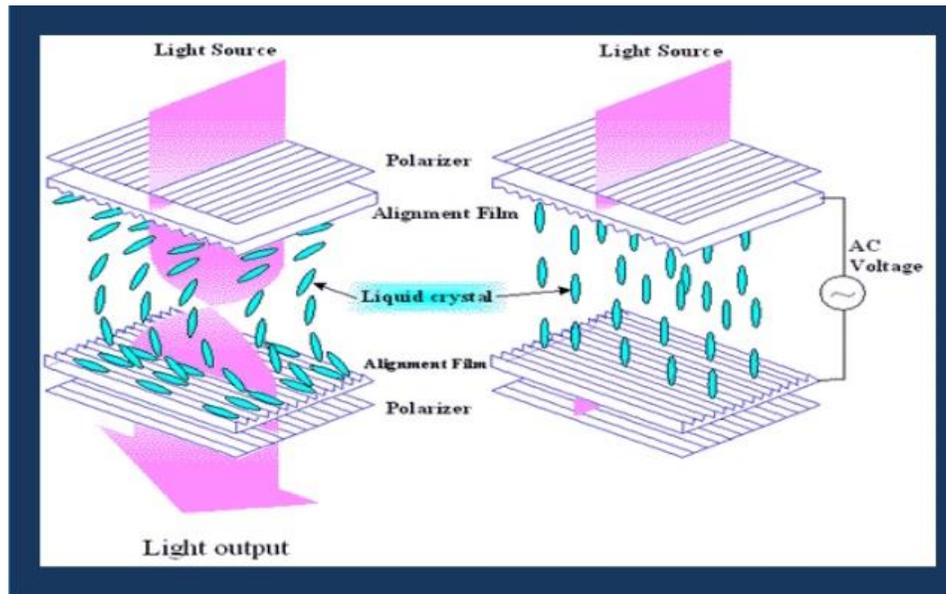


Figura 28. Paso de luz a través del cristal líquido [112].

Las pantallas LCD en esencia no producen luz, por lo que requieren de una fuente de luz externa, la cual es modulada por el cristal líquido. La fuente de luz debe ser lo suficientemente fuerte para crear el brillo deseado para la pantalla, ya que aproximadamente más de la mitad de la luz es absorbida y solo el resto es observado por el usuario. Las pantallas reflexivas emplean la luz presente en el ambiente para iluminar la pantalla (fig. 29). Esto se logra agregando un reflector antes del polarizador trasero. Las pantallas transmisivas utilizan una iluminación trasera ya que no reflejan la luz exterior (fig. 30), la fuente de luz puede ser un panel de luz led (también llamadas pantallas LED) o una lámpara fluorescente de cátodo frío. Las pantallas transreflectivas son una mezcla de ambos tipos de pantallas con una reflexión parcial de la luz exterior y haciendo uso de una luz trasera [7, 12].



## Capítulo 2. Televisión en Alta Definición (HDTV).

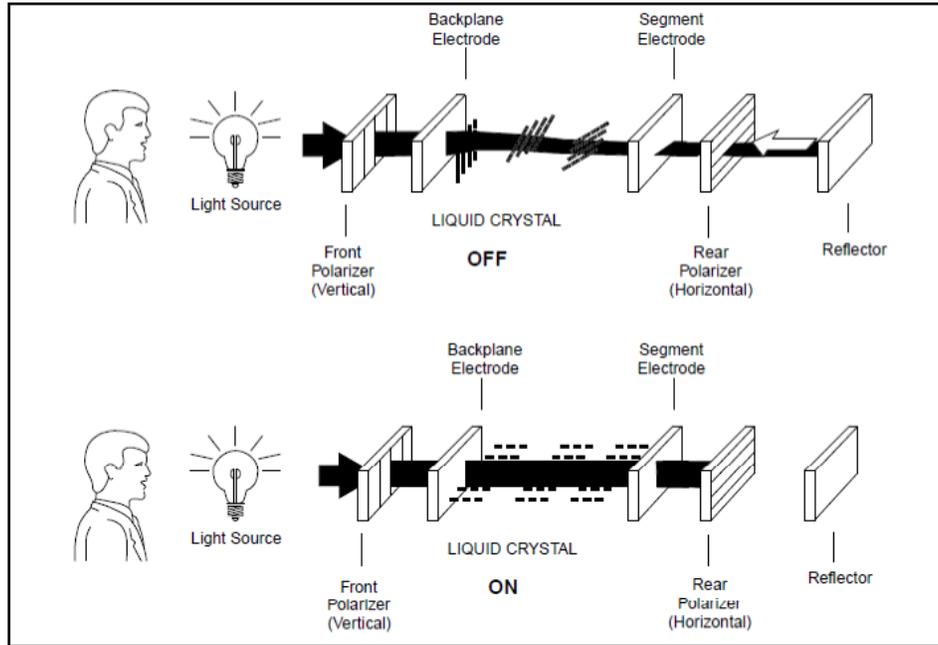


Figura 29. Pantalla LCD reflexiva [111].

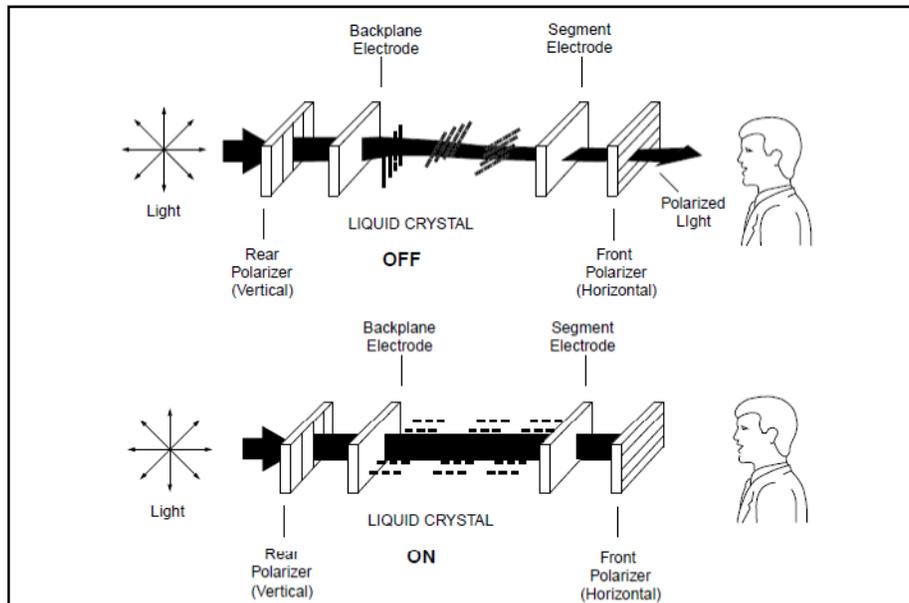


Figura 30. Pantalla LCD transmisiva [111].



Existen dos formas de operación de estas pantallas: forma pasiva y forma activa.

En el modo pasivo, la carga para activar la celda se suministra con una red, por lo que cada elemento de la pantalla tiene contactos eléctricos individuales, sin embargo al aumentar el número de píxeles este tipo de pantalla se vuelve menos apropiada debido a tiempos de respuesta más largos.

Los monitores LCD actuales de alta resolución (HDTV) utilizan una estructura de matriz activa. Para este esquema cada celda tiene su propio switch de activación, el cual es un TFT (Thin Film Transistor), como se puede ver en la figura 31. En este tipo de arreglo las líneas de electrodos de las filas están conectadas a las puertas de los transistores y las líneas de datos de las columnas están conectados a los drenajes de los transistores. Los transistores solo se activan cuando se aplica los voltajes a la puerta y al drenaje simultáneamente. Cuando el pulso de escaneo es aplicado a una fila todos los transistores pueden ser cargados con el voltaje de datos aplicado en su respectiva columna. Todas las demás filas que no reciben el pulso de escaneo permanecen inactivas, evitando así, que erróneamente se activen celdas no deseadas. El transistor lleva conectado en la fuente un capacitor que permite mantener la carga en la celda por un periodo de tiempo [11, 9].

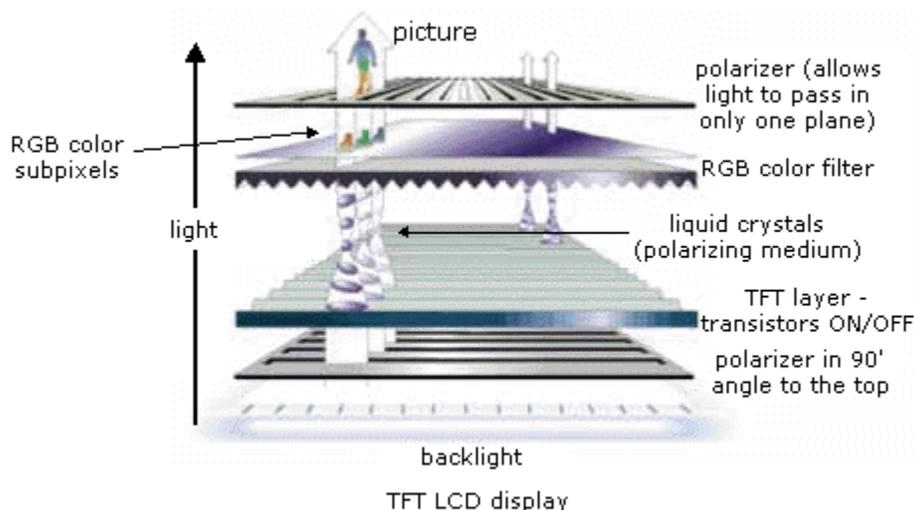


Figura 31. Estructura de una celda LCD TFT [110].



Las pantallas denominadas LED siguen siendo en esencia pantallas LCD con iluminación de fondo tipo led. La iluminación se logra de dos formas: una es distribuyendo LEDs en la parte posterior del panel LDC o sólo alrededor del perímetro de la pantalla, técnica conocida como edge-lit. Los beneficios que aporta este tipo de iluminación comparado con las pantallas LCD de lámparas fluorescentes son: una pantalla ultra-delgada, un menor consumo de energía y lo más importante una mejor relación de contraste [109]. Ya que es posible tener negros más oscuros y blancos más brillantes, debido a que se usan LEDs de alta luminiscencia, mismos que pueden ser desactivados por zonas para generar negros totales. En las figuras 32 y 33 se muestran los tipos de iluminación de las pantallas LCD.

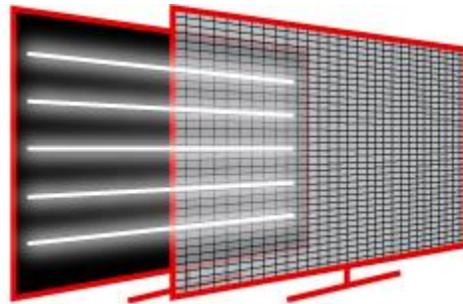


Figura 32. Pantalla LCD iluminada con lámparas fluorescentes [109].

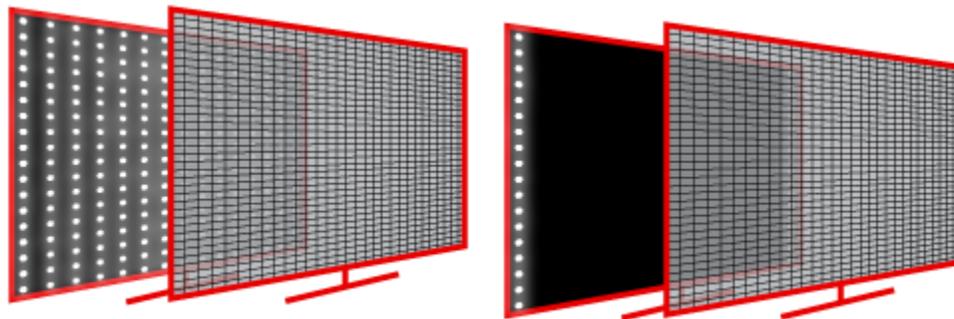


Figura 33. Pantallas LCD iluminada con arreglos de LED. Full array (izquierda), el mejor, edge-lit (derecha) más común [109].



La mayor ventaja técnica de los monitores LCD es su bajo consumo de energía, lo que le ha permitido ser la tecnología dominante en el mercado, sobretodo en el de las computadoras personales y laptops, además de ser más amables a la vista.

### 2.3.1.2. Pantallas de plasma

Una pantalla de plasma es en esencia una matriz de pequeñas lámparas fluorescentes. Al igual que en las pantallas LCD, un pixel se forma con tres celdas de plasma de diferente color (rojo, verde y azul), pero contrariamente a las pantallas LCD, las pantallas de plasma son emisivas [9, 11], es decir, que producen su propia luz, similar a una pantalla CRT.

Este tipo de pantallas está formada por dos paneles de vidrio separadas entre sí una distancia milimétrica y selladas en los bordes. El espacio entre los paneles es llenado con una mezcla de gases nobles (usualmente neón y xenón), a una presión de poco menos de un atmósfera. Paralelamente se colocan en las caras interiores de cada panel, tiras de un material conductor transparente con un grosor de aproximadamente una décima parte de un milímetro, las tiras colocadas en una cara deben de estar perpendiculares con respecto a las de la cara opuesta. Dichas tiras conductoras son los electrodos que se utilizarán para aplicar un voltaje al plasma. Las intersecciones formadas con los electrodos en ambas caras definen las celdas que componen la matriz de plasma. Para evitar que la luz de una celda pase a las contiguas, estas son separadas por medio de barreras que se colocan antes de sellar los paneles en forma de red para individualizar cada elemento de la matriz, a los cuales se les cubre de fósforos de colores rojo, verde o azul [4]. En la figura 34 se muestra una celda de plasma y sus componentes.

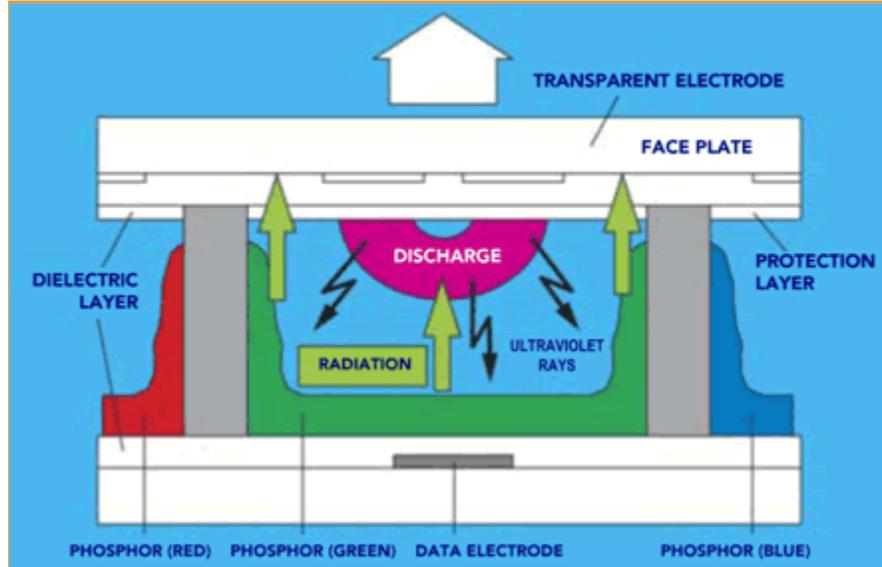


Figura 34. Estructura de una celda de plasma [135].

El plasma es un gas ionizado y es considerado un estado más de la materia. Para que el gas sea ionizado se le aplica una corriente eléctrica a través del gas por medio de los electrodos, de tal forma que los electrones que pasan a través del gas colisionan con sus átomos, los cuales reaccionan emitiendo luz ultravioleta (UV). La radiación UV no puede ser captada por el ojo humano, en este punto es donde los fósforos entran en función, ya que la luz UV se convierte en luz visible al pasar por estos [4, 7].

A diferencia de las pantallas LCD, la intensidad de la luz en cada celda no se logra variando la cantidad de voltaje que se le aplica, ya que las celdas solo pueden tener dos estados, “on” u “off” (prendido o apagado). En su lugar lo que varía es el tiempo en el que la celda permanece en estado on [4]. En la figura 35 se muestra la estructura de una pantalla de plasma.

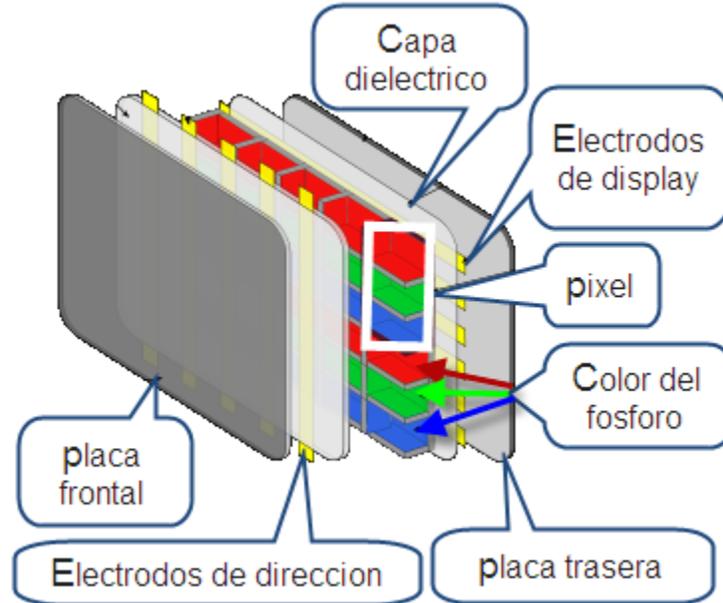


Figura 35. Estructura de una pantalla de plasma [113].

Las pantallas de plasma al ser emisoras ofrecen imágenes de gran brillo y nitidez en entornos con poca iluminación, desplegando una buena saturación de color. Cuentan con un ángulo de visión más amplio, lo que permite una buena visualización desde cualquier punto de una habitación. Además son capaces de mostrar imágenes con mucho movimiento sin dar un efecto borroso lo que se observa al desplegar eventos deportivos. Sin embargo estos televisores suelen ser de gran tamaño de entre 43” y 64” adicionalmente son más pesados que los monitores LCD por lo que no son de gran portabilidad [88].

### 2.3.1.3. Pantallas Organic Light-Emitting Diode (OLED)

Las pantallas OLED usan películas orgánicas basadas en carbono intercaladas entre dos electrodos. Uno es un cátodo metálico y el otro es un ánodo transparente. Un compuesto orgánico es un compuesto químico el cual sus moléculas contienen carbono.



Una pantalla OLED está compuesta de un sustrato que hace de soporte para el OLED; un ánodo; capas orgánicas, las cuales son dos: la capa conductiva se encarga de mandar los electrones hacia el ánodo y la capa emisiva, la cual está hecha de un compuesto orgánico distinto a la capa conductiva, dicha se encarga de transportar los electrones desde el cátodo, aquí es donde se produce la luz; y finalmente se encuentra el cátodo, que inyecta los electrones al aplicar una corriente a través del dispositivo [22] (fig. 36).

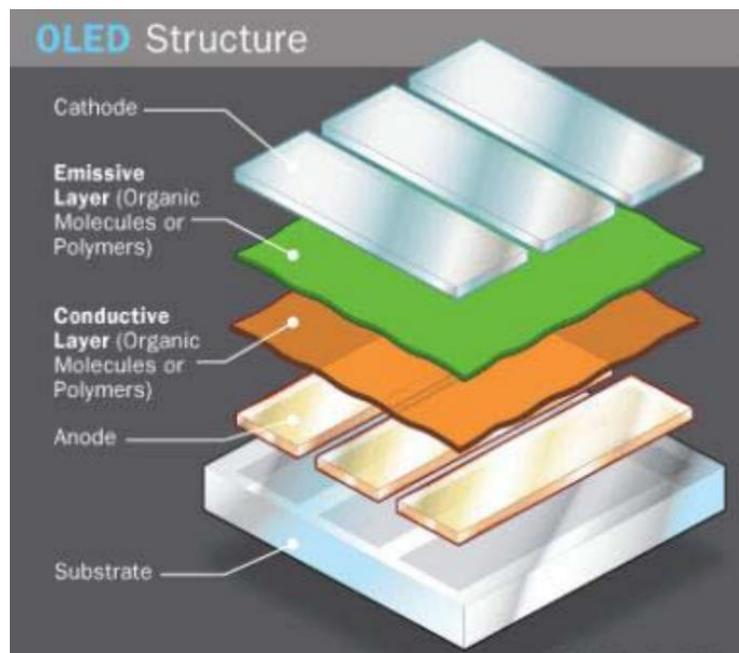


Figura 36. Estructura de una celda OLED [22].

Al igual que el plasma, las pantallas OLED son emisivas, pero su forma de producir luz es diferente al plasma ya que, al igual que un diodo común, la corriente que fluye del cátodo al ánodo proporciona electrones a la capa emisiva y a su vez retira electrones de la capa conductiva dejando huecos en esta. Dichos huecos necesitan ser llenados por los electrones de la capa emisiva, por lo que al pasar un electrón de una capa a la otra, libera energía en forma luminosa. El color de la luz depende



del tipo de moléculas en la capa emisiva y la intensidad de este depende del voltaje que es aplicado al LED [11, 22].

El direccionamiento de la pantalla puede ser pasivo o activo, de la misma forma que en las pantallas LCD.

Las pantallas OLED se posicionan para ser la tecnología dominante del mercado en un futuro, ya que proporcionan múltiples ventajas con respecto a otras tecnologías. Al ser emisivas proporcionan una mejor saturación de color, incluso mejor que el plasma, adicionalmente generan una mejor relación de contraste ya que al desactivarse el OLED se generan negros reales. Cuentan con un rápido tiempo de respuesta y un amplio ángulo de visión, pero las dos grandes ventajas de esta tecnología son muy bajo consumo de energía y su delgadez de pocos milímetros ya que no requiere de las capas de cristal que se emplean en otro tipo de pantallas. Sin embargo es una tecnología reciente que se encuentra aún en desarrollo y mejora, por lo que aún son muy caras si se compara con otras tecnologías [89].

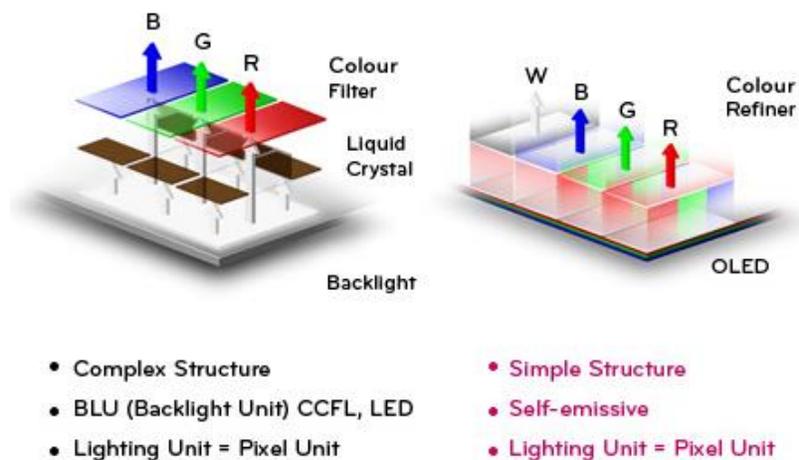


Figura 37. Comparación de la estructura de un pixel LCD (izquierda) y uno OLED (derecha) [114].



### 2.3.1.4. Comparación entre tecnologías

Desde la adopción de la televisión HD a lo largo del mundo, las tecnologías antes mencionadas han competido por ganar un lugar en el mercado. Ya se ha mencionado que las mayores ventajas de las pantallas planas con respecto a las pantallas CRT son el tamaño y la estética, además del menor consumo de energía y la facilidad con que es posible mostrar imágenes con una relación de aspecto más ancha, pero ¿qué ventajas representa cada una de estas con respecto a las otras?.

A continuación se muestran los pros y los contras de cada una de estas tecnologías.

<b>Plasma</b>	
<b>Pros</b>	<b>Contras</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Mejor rendimiento en cuartos oscuros.</li><li>➤ Mayor ángulo de visión.</li><li>➤ Precisión en color superior.</li><li>➤ Ciclos de actualización de pantalla más rápidos.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Mayor consumo de energía que las pantallas LCD.</li><li>➤ Las pantallas son propensas a sufrir de imagen persistente (screen burn).</li><li>➤ Más pesadas en comparación con pantallas LCD del mismo tamaño.</li><li>➤ El rendimiento del nivel de negro puede degradarse con el tiempo.</li></ul>

Tabla 3. Plasma pros y contras.



<b>LCD</b>	
<b>Pros</b>	<b>Contras</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Mejor rendimiento en cuartos iluminados.</li><li>➤ Bajo consumo de energía</li><li>➤ No tiende a sufrir de imagen persistente.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Bajo tiempo de respuesta.</li><li>➤ Puede presentar motion blur.</li><li>➤ Angulo de visión menor comparado con pantallas de plasma.</li></ul>

Tabla 4. LCD Pros y Contras.

<b>LED TV</b>	
<b>Pros</b>	<b>Contras</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Ciclos de actualización de pantalla más rápidos que en pantallas LCD de lámparas fluorescentes.</li><li>➤ Mejor relación de contraste que pantallas LCD de lámparas fluorescentes.</li><li>➤ Negros y blancos reales.</li><li>➤ Pantallas más delgadas.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Más caras que pantallas LCD de lámparas fluorescentes.</li><li>➤ Angulo de visión menor comparado con pantallas de plasma.</li></ul>

Tabla 5. LED TV Pros y Contras.



<b>OLED</b>	
<b>Pros</b>	<b>Contras</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Mejor calidad de imagen.</li><li>➤ Pantallas muy delgadas.</li><li>➤ Alta relación de contraste.</li><li>➤ Muy bajo consumo de energía.</li><li>➤ Amplio ángulo de visión.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Muy caras.</li></ul>

Tabla 6. OLED pros y contras.

No cabe duda que los televisores CRT han sido desplazados por las pantallas planas, sin embargo, a pesar de las grandes mejoras que ofrecen estas recientes tecnologías, la gran innovación que permitió la amplia aceptación de estos dispositivos por los consumidores ha sido su apariencia estética y el poco espacio que utilizan.

La pauta empleada mayormente por los consumidores a la hora de comprar una pantalla plana, es el precio, ya que a primera vista no es tan fácil apreciar la diferencia en la imagen que ofrece cada tipo de pantalla, a menos que se observen la misma secuencia de imágenes al mismo tiempo en las diferentes tecnologías y bajo las mismas condiciones y configuración de imagen. Por lo que además del precio, deben de ser tomados en cuenta otros factores como el tamaño, si es que se desea montar en la pared para dar un efecto de pantalla de cine (plasma) o se desea un monitor con una mejor portabilidad (LED/LCD). También se debe considerar las condiciones luminosas del ambiente donde se visualizará el dispositivo (OLED, plasma) y por supuesto, el diseño, si es que se desea una forma ultra delgada (OLED, LED/LCD).



## Capítulo 3. Televisión en Ultra Alta Definición (UHDTV)

---

Como se ha mostrado a lo largo del desarrollo de este trabajo, la búsqueda por generar una mayor inmersión en la imagen, ha traído consigo cambios en favor de una experiencia lo más parecida a la realidad, tomando como referencia estudios en la percepción de calidad. Sin embargo, las expectativas de calidad en las personas aumenta con el paso del tiempo, lo cual es parte de la naturaleza humana, es decir que al surgir un aumento en calidad, con el paso del tiempo nos acostumbramos a esta y por lo tanto, es menos aceptado un menor nivel.

Ahora, el siguiente paso para mejorar la experiencia visual es alcanzar una experiencia de inmersión total ofreciendo sensaciones visuales y auditivas realistas de tal forma que la audiencia tenga la sensación de estar presente en la escena. Para lograr este objetivo se ha desarrollado un nuevo sistema de despliegues de imágenes en movimiento sucesor a la HD. Este nuevo desarrollo actualmente es denominado Televisión en Ultra Alta Definición o UHDTV por sus siglas en inglés.

En este capítulo se dará una descripción del avance hasta el momento de esta tecnología y del progreso en cuanto a una posible implementación para su transmisión vía terrestre.

### 3.1 ¿Qué es la UHDTV?

La UHDTV es un formato televisivo creado por NHK Science & Technology Research Laboratories y con colaboraciones de R&D branch of Japan's public broadcaster y la radiodifusora British Broadcasting Corporation (BBC) [34]. Esta tecnología se desarrolló bajo el nombre de Super Hi-vision, la cual provee imágenes con una mayor definición que la alta definición y un sonido 3D con un arreglo



multicanal 22.2. Fue hasta su estandarización por la UIT de este sistema, que pasó a ser llamado UHDTV [16].

La UHDTV también es conocida popularmente solo con el término 4K, sin embargo es necesario aclarar que el formato 4K es un estándar de producción cinematográfica profesional, mientras que UHD es un estándar para pantallas de consumo y difusión masiva de contenidos. El término 4K proviene de un estándar propuesto por el consorcio de productoras cinematográficas Digital Cinema Initiatives (DCI).

Desde los inicios de su estandarización se propusieron las siguientes resoluciones de imagen:

- 3,840 líneas horizontales x 2,160 pixeles en cada línea (también llamado formato “4k” con 4 veces la resolución HD).
- 7,680 líneas horizontales x 4,320 pixeles en cada línea (también llamado formato “8k” con 16 veces la resolución HD) (fig. 38).

Originalmente Super Hi-Vision se desarrolló bajo la resolución UHD 8k, sin embargo, los primeros prototipos desarrollados fueron con la resolución UHD 4k, debido a que la tecnología de aquel entonces complicaba la construcción de un equipo 8k.

Subsecuentemente estas resoluciones fueron estandarizadas por la Union Internacional de Telecomunicaciones (UIT o ITU por sus siglas en inglés) y por SMPTE como UHDTV.

Mientras que la UIT asigna el término UHDTV para ambas resoluciones, SMPTE hace una diferencia entre estas designando como UHDTV-1 a la resolución de 3,840 x 2,160 y como UHDTV-2 a la resolución de 7,680 x 4,320.

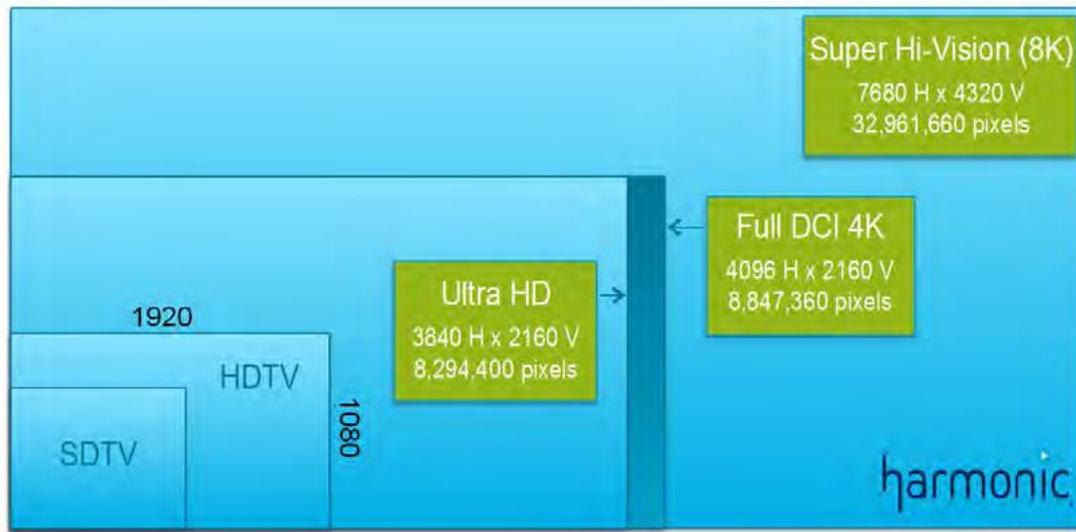


Figura 38. Resoluciones de imagen de la televisión, desde SDTV hasta UHDV 8K [30].

### 3.2. Determinación de los parámetros de la UHDTV

Para cumplir con el objetivo principal de crear una sensación totalmente inmersiva, no basta solamente con hacer la pantalla más grande, ya que el agrandar la imagen se tendría que modificar otros parámetros involucrados en la representación de movimiento que afectarían la percepción humana y que además es necesario modificarlos para proporcionar una sensación más realista.

Por lo tanto, la imagen mostrada por la UHDTV se sustenta en 5 pilares: resolución espacial, resolución temporal, profundidad de color, espacio de color y margen dinámico [25], ilustrados en la figura 39.



Figura 39. Pilares de la UHD [63].

Adicionalmente se contempla la mejora del audio con un sistema de audio envolvente.

### 3.2.1. Resolución espacial.

El primer aspecto que se tomó en cuenta para dar una mayor sensación de realismo, es el campo visual que debe de ser cubierto por la pantalla.

Para la determinación del campo de visión para la UHDTV, NHK tomó en cuenta la experiencia anterior en el desarrollo de la HDTV y otros estudios más recientes, además realizó nuevos estudios para determinar los parámetros de la UHDTV.

Acerca de la sensación de inmersión en la imagen y su relación con el campo de visión que genera la pantalla se realizó el estudio “Research on Human Factors in Ultra High Definition” [28], en el cual fueron mostradas diferentes imágenes (fig.40) con distintos campos de visión a 200 personas, las cuales evaluaban la sensación de estar presentes en la escena.



Los resultados concluyen que la sensación de inmersión aumenta con el incremento del campo de visión, sin embargo esta se estabiliza de entre los 80° - 100° de campo visual (fig. 41). Por lo tanto se pensó que el campo de visión de la UHDTV debe de situarse dentro de ese rango.

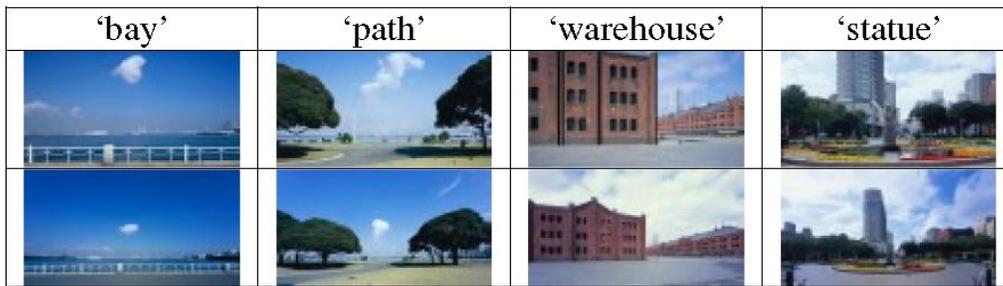


Figura 40. Imágenes utilizadas en los experimentos [28].

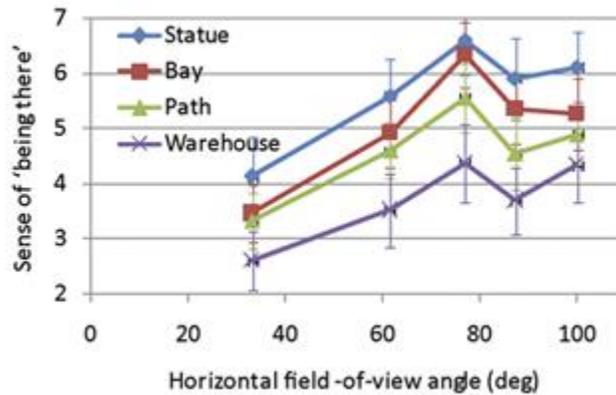


Figura 41. Gráfica de los resultados del estudio realizado [28].

Finalmente, basándose en los resultados obtenidos, lo que se seleccionó fue un campo visual de 100° para la UHDTV.

Para que la cuadrícula formada por los pixeles no puedan ser discernibles por el espectador es necesario definir una resolución angular adecuada. De igual forma



que campo de visión, la resolución angular juega un a papel importante en la sensación de realismo en la imagen.

En un principio se seleccionó una resolución angular de 30 ciclos por grado (cpd), la misma que en HD [19].

Por lo tanto, para poder determinar la cantidad de pixeles por línea en UHDTV es necesario explicar el porqué de este valor para HD. Este valor se basa en la distancia (D) a la cual debe de ser vista la pantalla para no percibir los pixeles. Para determinar D se toma en cuenta una visión normal del espectador de 20/20 [25]. A dicha distancia D una letra, como por ejemplo la letra E, puede ser identificada cuando de arriba a abajo subtiende un ángulo de 5 minutos de arco (fig. 42). Lo anterior corresponde a un minuto de arco por línea que forma la letra (tres líneas y dos espacios). Esto también corresponde a un cambio de línea oscura a línea brillante cada dos minutos de arco. El cambio de una línea oscura a brillante se le denomina ciclo [32].

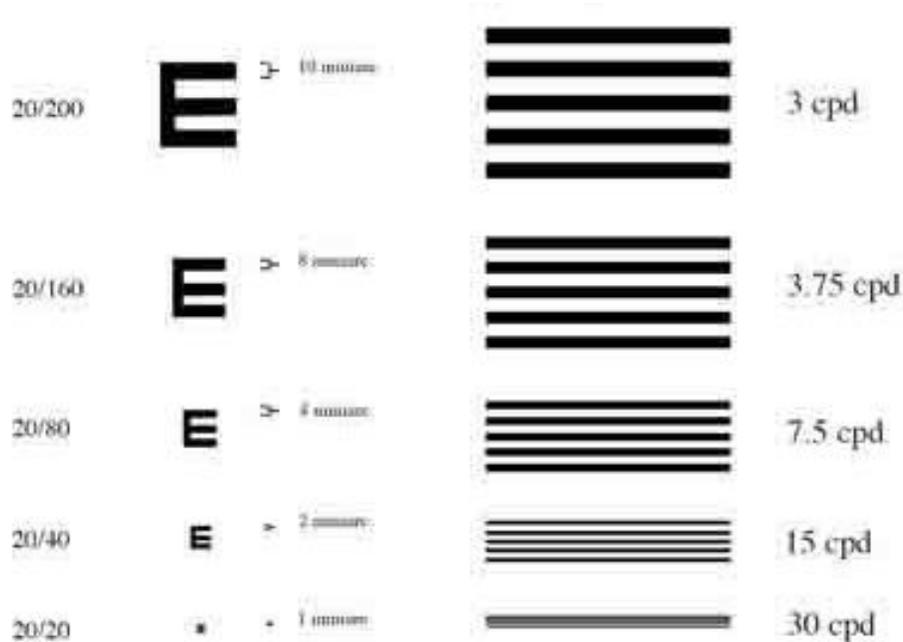


Figura 42. Relación entre la frecuencia espacial en cpd y el tamaño de una letra [115].



El cambio de una línea oscura a una brillante cada dos minutos de arco es igual a una resolución angular de 30 cpg. Dado que cada línea de la letra es representada por un minuto de arco y además una línea es la unidad mínima que puede percibir el ojo humano a la distancia  $D$  de la pantalla, se asigna un pixel por cada minuto de arco, por lo tanto por cada grado existen 60 pixeles (30 cpd) [91].

Retomando el campo de visión que genera la HDTV de  $32^\circ$  y la resolución angular de 30 cpd, es posible determinar la cantidad de pixeles por línea, la cual se obtiene multiplicando la cantidad de pixeles en cada grado por los grados del campo de visión. Como resultado se tienen 1920 pixeles por línea.

De igual manera que en la HDTV, se determinaría la cantidad de pixeles por línea para la UHDTV con respecto al campo de visión que cubriría, en este caso es de  $100^\circ$ , sin embargo se tomó en cuenta que algunas personas tienen una mejor visión que con respecto a la visión normal de 20/20, por lo que se decidió cambiar la resolución angular de 30 cpg a 40 cpg (80 pixeles por grado) [25]. Siguiendo el procedimiento antes mencionado se obtiene la cantidad de 8000 pixeles por línea.

.Aunque de acuerdo con la recomendación ITU-R BT.1201 “Extremely high resolution imagery” [106], la cual sugiere que para el diseño formatos futuros de imagen de muy alta resolución se utilicen múltiplos de la resolución HD para facilitar el escalamiento de imágenes de un formato a otro. Por lo que la cantidad de pixeles a utilizar para la UHDTV se estableció en 7680, ya que esta es exactamente 4 veces la cantidad de pixeles por línea empleada en la HDTV. El campo de visión fue modificado al hacer este ajuste, dejándolo en  $96^\circ$ , aun así es muy cercano a los  $100^\circ$  propuestos originalmente y la distancia de visionado establecida es de 1.6 H (H altura de la pantalla).

Para determinar la cantidad de líneas que tendría la UHDTV de igual forma se tomó en cuenta la compatibilidad con la HDTV, y se optó por la relación de aspecto 16:9,



por lo que la cantidad de líneas del formato se determinó en 4320. Resultando el formato 8K (7680x4320).

### 3.2.2. Resolución temporal

La resolución temporal se refiere a la cantidad de imágenes que son desplegadas en pantalla cada segundo. El ampliar el campo de visión también afecta en la representación del movimiento de la imagen en pantalla y es posible que se genere desenfoque por movimiento y/o parpadeo de la imagen.

El desenfoque por movimiento se aprecia como un rastro en la imagen dejado por un objeto, como se muestra en la imagen 43. Este efecto depende de la velocidad del objeto, por lo que al aumentar el campo de visión, la velocidad de movimiento de los objetos tiende a aumentar [25, 91].



Figura 43. Desenfoque por movimiento [117].

Por otra parte el parpadeo se genera en toda o solo una parte de la pantalla debido a una baja cantidad de campos por segundo. El aumentar el campo de visión en la



pantalla podría afectar a la visión periférica humana, ya que esta es más sensible a este fenómeno.

Diversos estudios se han realizado para determinar una resolución temporal correcta de tal forma que no sean percibidos (o casi no) los efectos antes mencionados. Durante el estudio "Subjective Evaluation of Motion Jerkiness for Various Frame Rates and Aperture Ratios", se presentaron imágenes en movimiento (fig. 44) a diferentes resoluciones temporales con la intención de determinar cuál sería un desenfoque por movimiento aceptable para el observador sin causar un efecto de parpadeo [25, 91].



Runner



Stadium



Tennis



Pitcher

**Figura 44. Material mostrado en el experimento [25].**

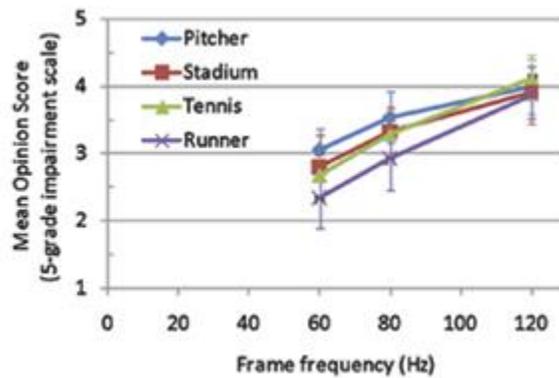


Figura 45. Calidad de la imagen a diferentes resoluciones temporales [25].

Como se puede ver en la gráfica de la figura 45, los resultados sugieren que para una calidad aceptable se requiere una frecuencia de 100 Hz como mínimo.

Anteriormente se mencionó, la visión periférica es más propensa a detectar el efecto de parpadeo en la imagen, por lo que se realizó el estudio “Critical Fusion Frequency for Bright and Wide Field-of-View Image Display”, para determinar que tanto debe de aumentar la frecuencia dependiendo del campo de visión que cubre la imagen [25].

Durante el experimento se mostraron un conjunto de tramas de frecuencias críticas de fusión a diferentes niveles de luminancias, para dos diferentes campos de visión a un 30% de tiempo de abertura. Los resultados se muestran en la gráfica de la figura 46.

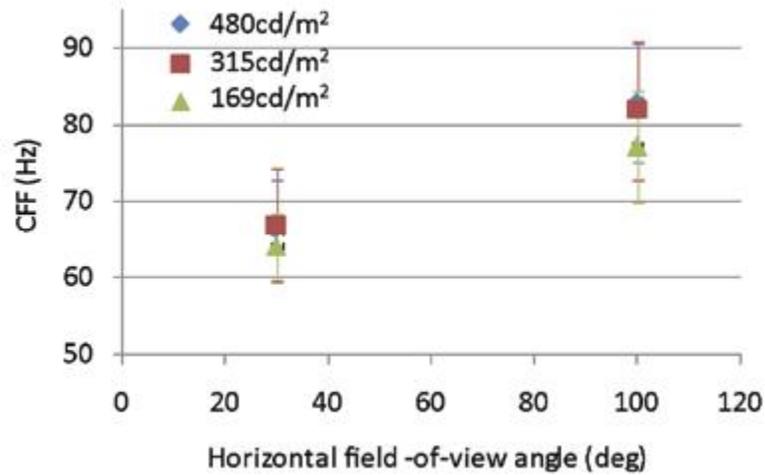


Figura 46. Frecuencias críticas de fusión vs campo de visión horizontal [25].

Basándose en los resultados anteriores, se confirmó que una frecuencia mayor a 80 Hz es requerida para un campo de visión muy amplio.

Tomando en cuenta los estudios anteriores y para una fácil escalabilidad de imágenes con el formato HD, se decidió establecer una frecuencia de campos para la UHDTV de 120 Hz o 120/1.001 Hz como la límite de este parámetro. Esto debido a que esta frecuencia es el doble de la frecuencia para HD (60 Hz) y además de que sobrepasan los límites aceptables mostrados en los estudios antes mencionados [25].

Además se ha propuesto agregar una frecuencia de 100 Hz debido a que en algunos lugares la frecuencia a la que se suministra la luz eléctrica es de 50 Hz. Esto podría causar problemas al momento de grabar en locaciones donde el radiodifusor no tenga control sobre el tipo de iluminación que se utiliza y se empleen cámaras que capturen a 120 Hz o 120/1.001 Hz, generando la sensación de parpadeo en la imagen.



### 3.2.3. Espacio de color en UHDTV, Wide Color Gammut

Como ya se mencionó anteriormente en el capítulo 2, el espacio de color o la gama de colores se forma mediante la combinación de tres colores primarios RGB. Por lo tanto, si se desea generar una experiencia lo más cercana posible a la realidad con la UHDTV, es necesario ampliar la gama de colores que puede ser representada en pantalla con respecto a la HDTV.

En un principio se buscaba diseñar un espacio de colores para la UHDTV que cubriera toda la superficie de colores que el ojo humano es capaz de captar en condiciones normales (colores reales) con una buena eficiencia.

Al comienzo del desarrollo de la UHDTV, se propusieron dos conjuntos de colores primarios RGB, que cubrirían la mayor parte de los colores reales [25].

Estos conjuntos coincidían en la longitud de onda del color azul primario, la cual es de 467 nm, sin embargo diferían en las longitudes de onda de los colores rojo y verde primarios.

El primer espacio de color propuesto por Corea asignó las longitudes de onda del color rojo primario en 625 nm y en 531 nm para el color verde primario. Mientras que Japón propuso las longitudes de onda de los colores rojo y verde primarios en 635 nm y 532 nm respectivamente.

Las razones de las diferencias en las longitudes de onda para el rojo y verde de ambos sistemas radica en que las longitudes de onda de 531 nm para el color verde y 625 nm para el rojo se encuentran dentro del alcance de las tecnologías actuales de las pantallas planas (LCD-LED, OLED). Sin embargo la longitud de onda de 635 nm para el rojo se encuentra fuera de las capacidades de estas tecnologías.

Por otra parte las longitudes de onda de 532 nm para el verde y 635 nm para el rojo se encuentran dentro de las capacidades de la tecnología láser actual, pero en el presente es muy complicado fabricar pantallas láser que cubran las longitudes de onda de 531 nm y 625 nm.



Finalmente para seleccionar una de las propuestas anteriores, se analizaron los matices y las características visuales que rodean cada uno de los rojos primarios de ambos sistemas. Además fue analizada una longitud de onda más en 630 nm. La conclusión de estos análisis muestra que la longitud de onda de 630 nm puede reflejar las características de color de ambos rojos primarios, por lo que esta es la mejor opción.

En cuanto al verde primario la diferencia es insignificante por lo que cualquiera de las dos longitudes de onda podía ser seleccionada. Al final el sistema seleccionado fue el japonés con las características mostradas en la tabla 7.

<b>Colores primarios y blanco de referencia</b>	<b>Coordenadas de cromaticidad (CIE, 1931)</b>			<b>Longitud de onda. (nm)</b>
		<b>x</b>	<b>y</b>	
	Rojo primario (R)	0,708	0,292	630
	Verde primario (G)	0,170	0,797	532
	Azul primario (B)	0,131	0,046	467
Blanco de referencia (D65)	0,3127	0,3290	-	

Tabla 7. Espacio de color UHDTV [25].

En la figura 47 se muestra una comparación de los espacios de color HD y UHD.

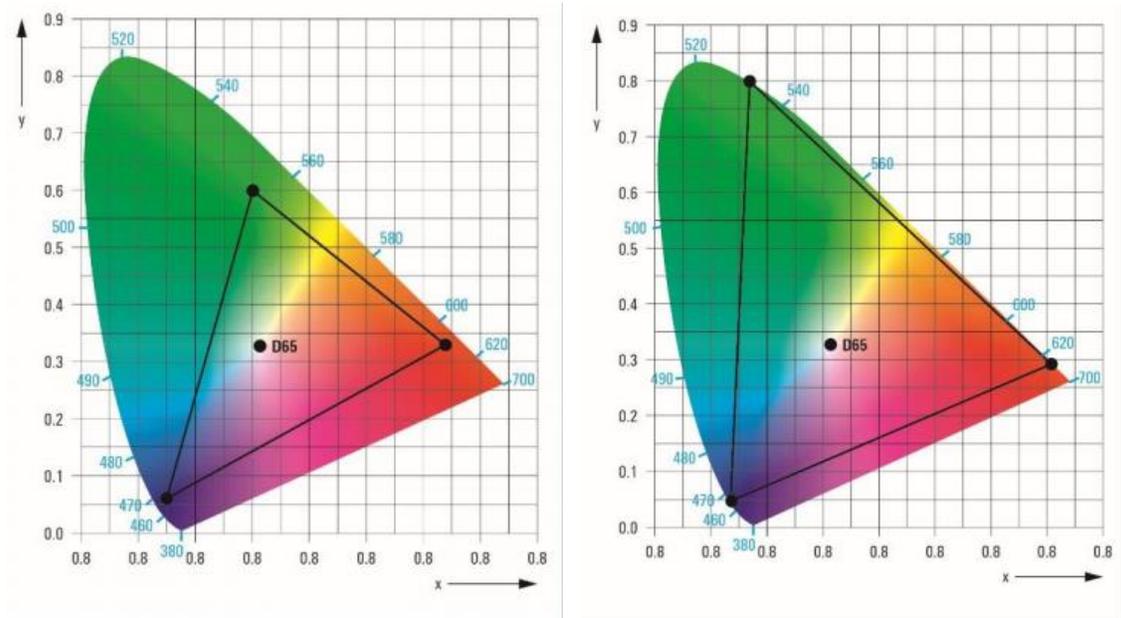


Figura 47. Espacio de color HD (izquierdo) vs UHD (derecho) [39].

Como se puede observar en las figuras, el nuevo espacio de color definido para la UHDTV es capaz de desplegar más colores que los definidos para las recomendaciones anteriores (Rec 601 y 709). La nueva gama de colores cubre aproximadamente un 75.8% del espectro de color CIE 1931 en comparación la recomendación 709 que solo cubre un 35.9% [25].

Sin embargo, a la fecha de realización de este trabajo, aún no se han puesto a la venta pantallas capaces de desplegar imágenes dentro del espacio de color definido para la UHDTV, por lo que las pantallas con Wide Color Gammut (WCG) o gama de colores amplia que actualmente se comercializan emplean el espacio definido por la norma DCI P3, que si bien no se compara con la gama de colores propuesta, si representa una mejora notable con respecto a la recomendación 709.



### 3.2.4. Profundidad de color

La profundidad de color indica los niveles de cuantificación utilizados para codificar la señal de video al momento de ser digitalizada, es decir cuantos bits se asignan para describir la información de cada pixel. Mientras mayor sea la cantidad de bits por pixel, mayor será la calidad de la imagen [63].

Como ya se mostró anteriormente, en la televisión digital SD y HD, la profundidad de color es representada con 8 bits por muestra, sin embargo estas emplean un espacio de color menor al actualmente recomendado para la UHDTV, por lo que al emplear 8 bits para representar los colores en UHD, es posible que aparezca el efecto *banding*, el cual es la aparición de bandas de diferentes tonalidades del mismo color como se muestra en la siguiente figura 48.



Figura 48. Efecto banding [33].

Para evitar este efecto se tomó como referencia el estudio “Constant Sensitivity Experiment to Determine the Bit Depth for Digital Cinema” [118], realizado por el SMPTE Color ad hoc group, para determinar la sensibilidad a cambios en el contraste con el fin de determinar la cantidad de bits a utilizar al codificar una imagen para el formato Digital Cinema Distribution Master.



Durante el estudio se le mostraron a grupos de personas (personas involucradas en la producción cinematográfica, estudiantes y personas que pasaban afuera de las instalaciones donde se llevó a cabo el estudio), en diferentes sesiones imágenes con ciertas variaciones de contraste codificadas a 10 y 12 bits. Este estudio concluyó que el efecto banding fue percibido mayormente con una codificación de 10 bits y solo unas cuantas personas fueron capaces de percibir el efecto con 12 bits.

En conclusión, se decidió agregar el parámetro de 12 bits a la codificación en UHDTV, como nivel máximo y 10 bits como mínimo. Con 10 bits por muestra es posible producir 1.07 millones de millones de colores diferentes, en comparación con una profundidad de color de 8 bits que sólo permite alrededor de 16.78 millones de colores diferentes y con 12 bits se pueden reproducir 68.7 millones de millones de colores [118]. En la figura 49 se muestra la profundidad de color a diferentes niveles de cuantificación.

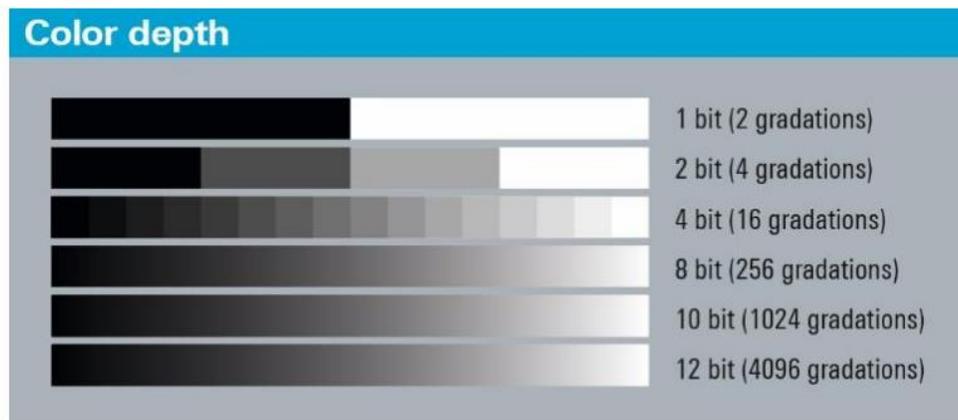


Figura 49. Diferentes tonalidades dependiendo el número de bits empleados por muestra [33].



### 3.2.5. Margen dinámico

El margen dinámico es el rango de diferencia tonal entre la parte más clara y la más oscura de una imagen. Otra forma de definir el margen dinámico el rango e que varían los niveles de luminancia en la señal de video [47, 48].

Los dos conceptos que hay que tener en mente al momento de hablar del margen dinámico son el contraste y el color.

El contraste es uno de los factores más importantes a considerar al momento de definir que tan bien luce una imagen de TV, este concepto hace referencia a la diferencia entre luz y oscuridad, es decir a variaciones en la luminancia; al ser más grande esta diferencia más grande es el contraste.

Hay dos puntos importantes a considerar en el contraste, uno de estos es el pico o nivel más alto de brillo, el cual indica que tanta luminosidad puede desplegar una pantalla de TV. El segundo punto es el nivel de negro, similar al anterior, este punto indica que tan oscuro es el negro que puede mostrar una pantalla. Las unidades de medida de brillo son los “nits” es decir candelas sobre metro cuadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) [30, 50].

En la naturaleza se encuentra presente una mayor gama de colores y una mayor intensidad de brillo de la que es posible transmitir y despegar actualmente en las pantallas de televisión HD, así como lo muestra la figura 50.

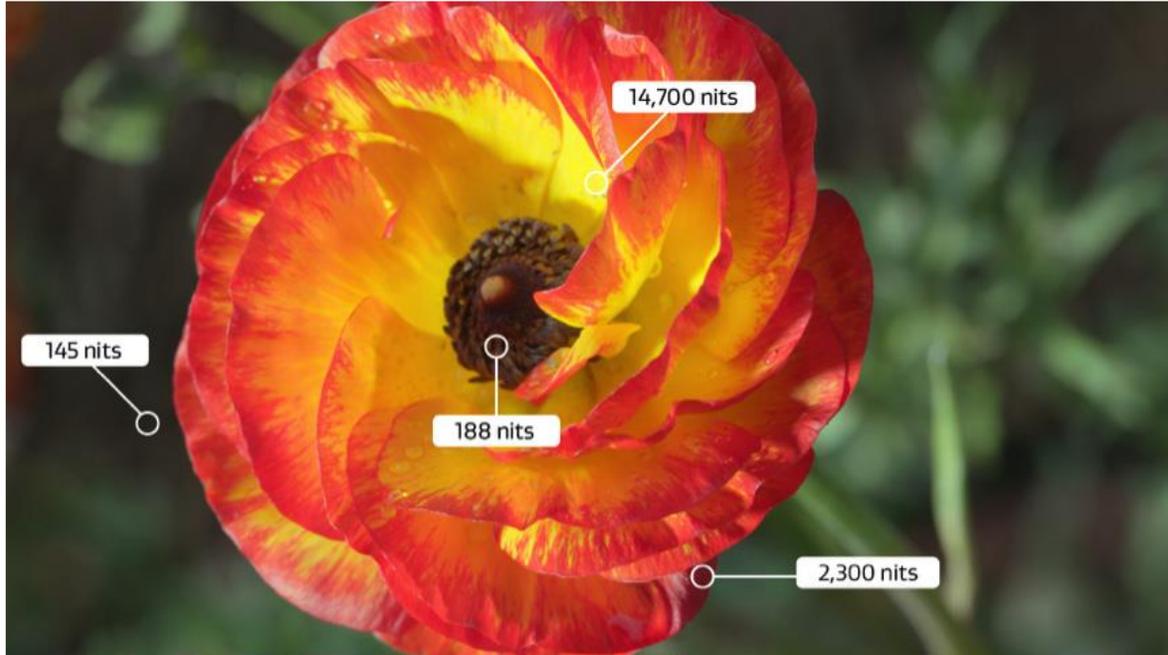


Figura 50. Ejemplo de las intensidades de brillo presentes en la naturaleza [50].

Los estándares actuales de televisión y tecnologías de almacenamiento y distribución de contenidos como el Blu-ray, limitan el máximo brillo a 100 nits y el mínimo a 0.117 nits, además limitan la gama de colores que pueden ser desplegados en pantalla [50]. Estas limitaciones en las pantallas modernas HD fueron heredadas de la tecnología de tubo de rayos catódicos, que fue empleada en televisión durante una buena parte del siglo XX, ya que esta tecnología se encontraba limitada por el pico de brillo máximo.

El limitar el brillo máximo al nivel que actualmente utilizan las pantallas HD convencionales, genera un inconveniente al intentar desplegar toda la gama de colores propuesta anteriormente. Tomando en cuenta que la pantalla de televisión es un sistema de color aditivo, es decir que emplea los tres colores primarios (rojo, verde y azul) para generar todos los colores, lo que significa que cuando el pixel alcanza su brillo máximo este se vuelve blanco, por lo tanto entre más brillante es un color, más blanco se torna y más rápido se vuelve menos saturado el color [30].



Aquí es donde entra en juego una de las mejoras más significativas de la UHDTV, llamada: High Dynamic Range (HDR) que como su nombre lo indica, es el uso de un margen dinámico más amplio, con el cual es posible crear blancos más brillantes, negros más oscuros y colores más brillantes permitiendo mayor detalle en zonas brillosas [48]. Las pantallas sin HDR no son capaces de alcanzar una mayor pureza de los colores y sobre todo no es posible representar toda la gama amplia de colores, en específico aquellos colores que son más claros y más cercanos al punto blanco de referencia. Esto disminuye la cantidad de detalle que puede ser representado a los alrededores de los puntos de mayor luminosidad y los detalles dentro de zonas más oscuras, en comparación con el margen dinámico estándar (SDR) como se muestra en la siguiente imagen.



**Figura 51. SDR (izquierda) y simulación HDR (derecha), se nota un mayor detalle en zonas brillosas y oscuras [81].**

Para poder convertir los valores de voltaje a intensidades luminosas en pantalla, se emplea una Función de Transferencia Electrónica a Óptica (EOTF), la cual es una función matemática que describe la conversión de información eléctrica en luz visible, también conocida como curva de gamma. La EOTF utilizada en las pantallas



HD estaba basada en la función de transferencia de las televisiones de tubo de rayos catódico. Además de esta función, existen otras dos funciones involucradas en los sistemas televisivos, estas son: la Función de Transferencia Óptica a Electrónica (OETF) y la Función de Transferencia de Óptica a Óptica (OOTF). La OETF es la función matemática que describe la conversión de la luz captada por la cámara en información eléctrica, mientras que la OOTF trata de compensar la diferencia tonal entre el ambiente captado por la cámara y la información mostrada en la pantalla [26, 47].

Dentro de las normas para la UHDTV, en julio de 2016 la UIT lanzó la siguiente recomendación: *ITU-R BT.2100 Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme Exchange* [26], la cual especifica los parámetros y características de nuevas funciones de transferencia que recomienda para el despliegue en pantallas de imágenes con HDR. Las funciones de transferencia son llamadas: Perceptual Quantization (PQ) e Hybrid Log-Gamma (HLG).

La decisión de recomendar el uso de estas dos tecnologías por parte de la UIT radica en que la tecnología PQ ha demostrado que ofrece mayores niveles de brillo diseñado para empatar con el sistema visual humano. Mientras que la tecnología HLG ofrece un grado de compatibilidad con las televisiones que manejan un SDR.

#### 3.2.5.1. Perceptual Quantization (PQ) [26]

Perceptual Quantization (PQ) es un método que emplea un grupo funciones de transferencia creadas por los laboratorios Dolby y han sido estandarizadas en el documento SMPTE ST-2084. Estas permiten la conversión de valores lineares de luz a niveles de video y viceversa. Usando Perceptual Quantization es posible cubrir valores de 0.0001 nits hasta 10,000 nits con 10 y 12 bits aunque se ha limitado a solo 4,000 nits debido al límite que alcanzan los televisores UHD actuales [50].



Los valores mínimos y máximos de brillo fueron determinados por el equipo de investigación en imagen de Dolby, mediante la realización de experimentos con observadores ordinarios para determinar sus preferencias en diferentes niveles de brillo. Los resultados mostraron que un sistema que reprodujera un rango de 0 a 10,000 nits satisfacía el 90% de los espectadores.

Funciones de transferencia usadas por el método PQ:

EOTF:

La señal de entrada de esta función es un valor no lineal en código PQ.

$$F_D = \text{EOTF}[E'] = 10000 Y$$

$$Y = \left( \frac{\max\left[(E'^{1/m_2} - c_1), 0\right]}{c_2 - c_3 E'^{1/m_2}} \right)^{1/m_1}$$

Donde:

$E'$  indica el valor no lineal de color  $\{R', G', B'\}$  o  $\{L', M', S'\}$  dentro del espacio PQ  $[0,1]$ .

$R', G', B'$  luminancia no constante       $L', M', S'$  Intensidad constante

$$\{R', G', B'\} = \text{EOTF}^{-1}(F_D)$$

$$\{L', M', S'\} = \text{EOTF}^{-1}(F_D)$$

$$F_D = \{R_D, G_D, B_D\}$$

$$F_D = \{L_D, M_D, S_D\}$$

$F_D$  es la luminancia de una componente lineal desplegada en la pantalla  $\{R_D, G_D, B_D\}$  en nits ( $\text{cd/m}^2$ ).

$R'=G'=B'$  cuando esto ocurre el pixel no muestra color.

$Y$  indica el valor el valor lineal normalizado de color en el rango  $[0:1]$ .

$$m_1 = 2610/16384 = 0.1593017578125.$$

$$m_2 = 2523/4096 \times 128 = 78.84375.$$



$$c_1 = 3424/4096 = 0.8359375 = c_3 - c_2 + 1.$$

$$c_2 = 2413/4096 \times 32 = 18.8515625.$$

$$c_3 = 2392/4096 \times 32 = 18.6875.$$

OETF:

La señal de entrada de esta función es la luz lineal de la escena.

$$E' = \text{OETF}[E] = \text{EOTF}^{-1}[\text{OOTF}[E]] = \text{EOTF}^{-1}[F_D]$$

Donde:

$$\text{EOTF}^{-1}[F_D] = \left( \frac{c_1 + c_2 Y^{m_1}}{1 + c_3 Y^{m_1}} \right)^{m_2}$$

$$Y = F_D / 10000$$

$E'$  es la señal no lineal resultante normalizada de las componentes a luminancia no constante en el rango [0:1].

$F_D$ ,  $E$ , son como las especificadas en la OOTF.

$m_1$ ,  $m_2$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  son como las especificadas en la EOTF.

OOTF:

La señal de entrada de esta función es la luz lineal de la escena.

$$F_D = \text{OOTF}[E] = G_{1886} [G_{709}[E]]$$

Donde:

$E$  es la señal determinada por la luz de la escena escalada por la cámara  $\{R_S, G_S, B_S; Y_S; o I_S\}$ .

$E'$  es una representación no lineal de  $E$ .



$F_D$  es la luminancia de una componente lineal mostrada en pantalla.

Los valores  $R_s, G_s, B_s; Y_s; I_s$  están en el rango [0:1].

$$F_D = G_{1886} [G_{709}[E]] = G_{1886} E'$$

$$E' = G_{709}[E] = 1.099 (59.5208 E)^{0.45} - 0.099 \text{ para } 1 > E > 0.0003024$$

$$= 267.84 E \text{ para } 0.0003024 \geq E \geq 0$$

$$FD = G_{1886}[E'] = 100 E' 2.4$$

PQ no es solamente una función de transferencia como la empleada en televisores HD, ya que esta nueva función hace uso de metadatos para convertir correctamente los valores de la curva PQ a intensidades luminosas en pantalla. Estos metadatos se llaman MaxCLL que indica a que palabra código se le asigna el mayor brillo y MaxFALL que indica el nivel de luz promedio en cada imagen. Estos metadatos permiten el despliegue de imágenes con un margen tonal aceptable dependiendo de las capacidades luminiscentes de cada pantalla. Además maneja otros tipos de metadatos para poder desplegar imágenes HDR con un margen dinámico reducido, es decir SDR siempre y cuando el monitor sea compatible con PQ [81].

### 3.2.5.2. Hybrid Log-Gamma (HLG) [26]

Hybrid Log-Gamma (HLG) es un formato HDR desarrollado por la BBC en conjunto con NHK y ha sido estandarizado como *ARIB STD-B67 Essential Parameter Values for Extended Image Dynamic Range Television* por la Association of Radio Industries and Businesses (ARIB) de Japón. Este método emplea dos curvas, una es una curva de gamma idéntica a la usada en televisores HD para codificar y/o decodificar niveles de brillo bajos y la otra es una curva logarítmica para codificar y/o decodificar niveles de brillo altos en imágenes con HDR. Lo anterior debido a que en niveles de brillo alto es más fácil percibir los niveles de cuantificación y una función logarítmica podría proveer el máximo margen dinámico para una



profundidad de bit dada. Sin embargo en niveles de brillo bajos es más difícil percibir el efecto de banding, por lo que la función gama utilizada para SDR es suficiente para codificar niveles de brillo bajos.

HLG emplea la palabra código intermedia para representar un nivel de blanco de referencia. Típicamente el rango de codificación de HLG va de los 0.001 nits a los 1000 nits.

Las funciones de transferencia usadas por el método HLG son:

OETF:

La señal de entrada de esta función es luz lineal de la escena.

$$E' = \text{OETF}[E] = \begin{cases} \sqrt{E}/2 & 0 \leq E \leq 1 \\ a \cdot \ln(E - b) + c & 1 < E \end{cases}$$

Donde:

$E$  es la señal para cada componente de color proporcional a la luz lineal de la escena escalada por la cámara y normalizada en el rango [0:12].

$E'$  es la señal no lineal resultante (en luminancia no constante) en el rango [0:1].

$a = 0.17883277$ ,  $b = 0.28466892$ ,  $c = 0.55991073$ .

Nota: si  $E$  es normalizada en el rango [0,1] la ecuación equivalente de la OETF es

$$E' = \text{OETF}[E] = \begin{cases} \sqrt{3E} & 0 \leq E \leq 1/12 \\ a \cdot \ln(E - b) + c & 1/12 < E \end{cases}$$

Con  $a = 0.17883277$ ,  $b = 0.02372241$ ,  $c = 1.00429347$

EOTF:

La señal de entrada de esta función son valores no lineales en código HLG.



$$F_D = \text{OOTF}[E] = \text{OOTF}[\text{OETF}^{-1}[E']]$$

De esta forma:

$$R_D = \alpha Y_S^{\gamma-1} R_S + \beta$$

$$G_D = \alpha Y_S^{\gamma-1} G_S + \beta$$

$$B_D = \alpha Y_S^{\gamma-1} B_S + \beta$$

Donde:

$R_S$ ,  $G_S$ ,  $B_S$  son las señales lineales de luz,  $E$ , para cada componente de color normalizadas en el rango [0:12].

$$E = \text{OETF}^{-1}[E'] = \begin{cases} 4E'^2 & 0 \leq E' \leq \frac{1}{2} \\ \exp((E' - c)/a) + b & \frac{1}{2} < E' \end{cases}$$

$$Y_S = 0.2627R_S + 0.6780G_S + 0.0593B_S$$

$$\alpha = (L_W - L_B)/12^\gamma$$

$$\beta = L_B$$

$F_D$  es la luminancia de una componente lineal de color desplegada en la pantalla en nits ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ).

$E'$  es la señal no lineal resultante en el rango [0:1].

$R_D$ ,  $G_D$ ,  $B_D$  representan la luz desplegada en pantalla por cada componente de color en nits ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ).

Los valores de los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$  son como los definidos en la OETF.



$LW$  es el valor pico de luminancia en  $\text{cd/m}^2$ .

$LB$  es el valor de luminancia para el negro en  $\text{cd/m}^2$ .

Nota: si  $E$  es normalizada en el rango  $[0:1]$  la ecuación equivalente de la EOTF es

$$E = \text{OETF}^{-1}[E'] = \begin{cases} E'^2/3 & 0 \leq E' \leq 1/2 \\ \exp((E' - c)/a) + b & 1/2 < E' \end{cases}$$

Con  $a = 0.17883277$ ,  $b = 0.02372241$ ,  $c = 1.00429347$

OOTF:

$$\begin{aligned} F_D &= \text{OOTF}[E] = \alpha Y_S^{\gamma-1} E + \beta \\ R_D &= \alpha Y_S^{\gamma-1} R_S + \beta \\ G_D &= \alpha Y_S^{\gamma-1} G_S + \beta \\ B_D &= \alpha Y_S^{\gamma-1} B_S + \beta \\ Y_S &= 0.2627R_S + 0.6780G_S + 0.0593B_S \end{aligned}$$

Donde:

$F_D$  es la luminancia de una componente lineal de color desplegada en la pantalla en nits ( $\text{cd/m}^2$ ).

$E$  es la señal para cada componente de color proporcional a la luz lineal de la escena escalada por la cámara y normalizada en el rango  $[0:12]$ .

$Y_S$  es la luminancia lineal normalizada de la escena.

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  están definidas en la EOTF.



Una de las mayores ventajas de HLG es que no hace uso de metadatos por lo que puede desplegar imágenes con SDR en pantallas que no contengan la característica HDR, y además es posible transmitir las versiones SDR y HDR en un solo flujo de datos, en comparación con PQ, con el que es necesario hacer uso simulcast para transmitir las versiones SDR y HDR del mismo contenido si este es una transmisión de un evento en vivo [80, 81].

### 3.2.6. Audio

Para completar una mayor inmersión es necesario acompañar la UHDTV con un formato de audio que armonice con la mejora visual que representa este sistema. Un formato de audio multicanal es la solución ideal para mejorar la experiencia y cumplir con la mayor inmersión, sin embargo sistemas de audio multicanal actuales como el 5.1 priorizan el audio frontal a expensas del audio trasero. Por lo tanto, para lograr la sensación de inmersión en UHDTV, el sistema de sonido tiene que generar un campo de sonido que rodee al espectador con varias fuentes de sonido.

Con el fin de lograr dicho formato envolvente, el sistema de sonido debe cumplir con las siguientes características [16]:

- Localizar establemente sonidos frontales sobre toda el área de la pantalla.
- Reproducir sonido en todas las direcciones alrededor de del espectador incluyendo la elevación, dependiendo de la imagen que se muestra en pantalla.
- Reproducir una impresión espacial tridimensional.
- Generar un área amplia donde pueda ser escuchado con una excepcional calidad.
- Ser compatible con los sistemas multicanales actuales.

Para satisfacer estas condiciones se desarrolló el sistema multicanal 22.2, que se muestra en la figura 52.

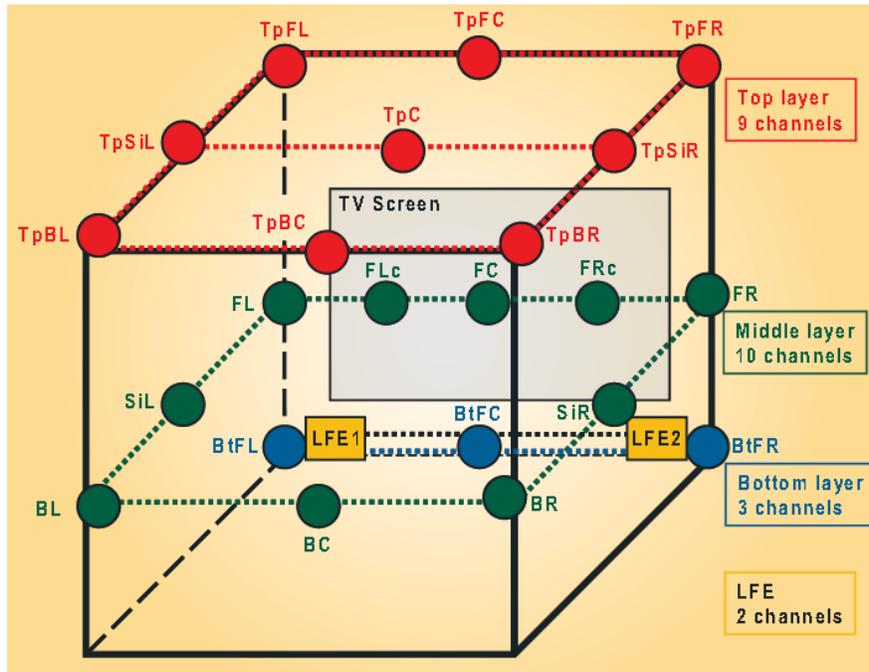


Figura 52. Sistema multicanal 22.2 [16].

El sistema consta de altavoces con una capa superior (top layer) de nueve canales, una capa media (middle layer) de 10 canales y una capa inferior (bottom layer) de tres canales regulares y dos canales para los tonos bajos (LFE).

Se realizaron evaluaciones de este sistema en conjunto con formatos de 2 canales estéreo y 5.1 surround. Los resultados de dicha evaluación mostraron que un sistema 22.2 puede producir una mejor sensación espacial, realismo y presencia en una mayor área que los sistemas 5.1 y 2.0 [16].

### 3.3. Tecnologías para la transmisión y despliegue de imágenes en UHDTV

Las tecnologías actuales para la transmisión de televisión digital no permiten la distribución de contenidos en UHD a través de la televisión terrestre, ya que el flujo



de datos que se genera en 4k es muy superior al flujo de datos que es posible transmitir por medio de los estándares de transmisión actuales.

En este apartado se describirán las nuevas tecnologías que han hecho posible transmitir y visualizar contenidos UHD haciendo uso de canales asignados a la televisión terrestre.

### 3.3.1. High Efficiency Video Coding

High Efficiency Video Coding (HEVC) es el más reciente estándar de compresión de video creado por ITU-T Video Coding Experts Group en conjunto con ISO/IEC Moving Picture Experts Group. El principal objetivo de este nuevo estándar de compresión de datos, es mejorar el rendimiento de compresión con respecto a otros formatos existentes, en un rango de un 50% en la tasa de datos. Este formato también es llamado H.265 o MPEG-H part 2 y en sí su funcionamiento es muy parecido a otros codecs previos, más bien solo son una serie de mejoras en comparación con su antecesor H.264 [44, 45].

La gran ventaja que permite una mayor compresión de la información es el modo de partición de las imágenes. HEVC utiliza una estructura llamada unidad de codificación de árbol (CTU por sus siglas en ingles), la cual sirve de remplazo de los macrobloques usados en formatos anteriores. Una CTU es una partición lógica de una imagen, estas pueden tener tamaños de 64x64, 32x32 o 16x16 (fig. 53). Dicha medida es seleccionada por el propio códec [27, 44, 66].

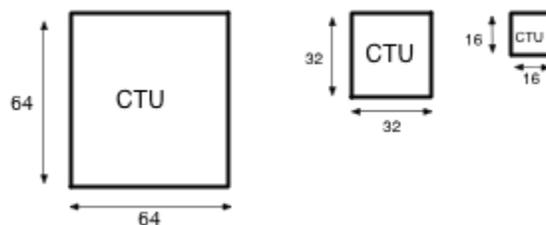


Figura 53. Tamaños de los CTUs [66].



Los bloques CTU de mayor tamaño se emplean para realizar la compresión en zonas donde la información entre píxeles no varía mucho, mientras que los bloques de menor tamaño se emplean en zonas donde hay más detalle [44].

Cada CTU se conforma de tres Coding Tree Blocks (CTB), un CTB para luminancia y dos CTBs correspondientes a la crominancia. A su vez cada CTB se divide en Coding Blocks (CB), de tamaño máximo a un CTU y un tamaño mínimo de 8x8 [27, 44, 66].

Un CB de luminancia y dos CBs de crominancia forman un Coding Unit (CU). La estructura de división de datos empleada para formar CUs a partir de CTUs se le llama Quadtree Coding Structure, mostrada en la fig. 54. Esta es una estructura de datos en la cual cada nodo interno tiene exactamente cuatro ramificaciones [44, 66].

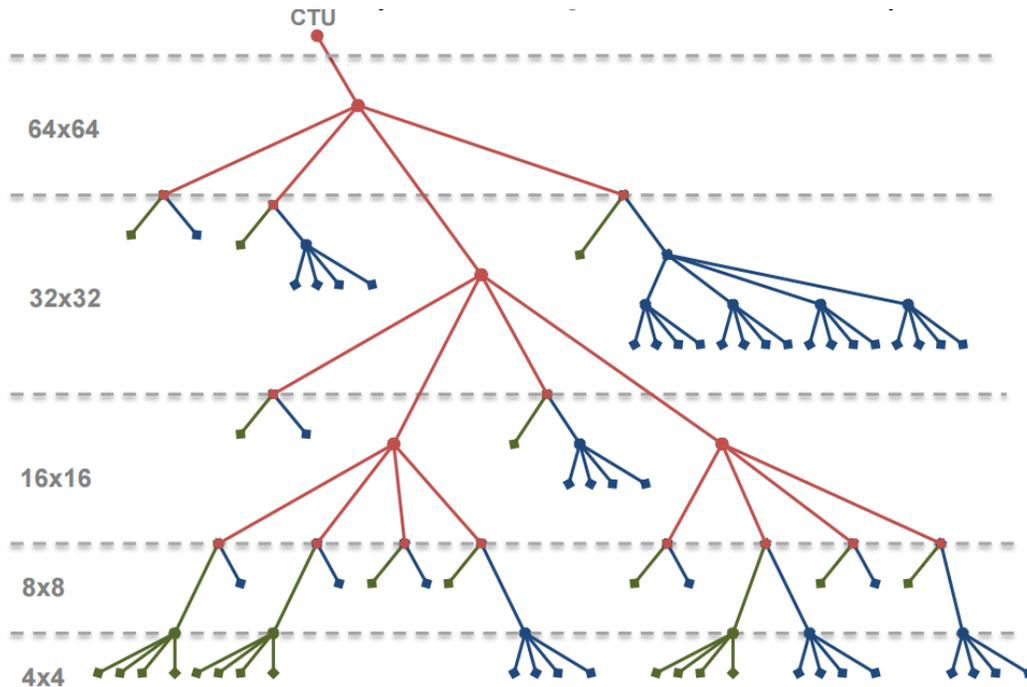


Figura 54. Quadtree Coding Structure [136].



Figura 55. Ejemplo de una imagen dividida en CUs [136].

Un CU puede dividirse en otros bloques llamados Prediction Unit (PU). La función de los PUs es indicar el modo de predicción a utilizar, intra o inter. Su tamaño puede variar de 64x64 hasta 4x4 y pueden ser bloques simétricos o asimétricos, sin embargo si la predicción es intra, solo es posible dividir en bloques simétricos y el bloque no puede tener un tamaño de 4x4 [27, 44, 66].

Al igual que en otros codecs, HEVC emplea la DCT, esta se aplica en los bloques llamados Transform Unit (TU). El tamaño de estos va desde 32x32 hasta 4x4 y solo en forma simétrica.

La predicción intra, HEVC especifica 35 modos de predicción diferentes para muestras de luminancia. Tanto en el codificador como en el decodificador, para la predicción se utiliza la primer fila de arriba abajo y la primer columna de pixeles de la derecha. El modo de predicción especifica en que forma la primera fila y la primera columna del bloque deben de ser usados para generar la predicción [44].



Para realizar la codificación, el codificador debe comprobar todos los modos de predicción posibles en todos los tamaños de bloque para seleccionar la mejor combinación entre tamaño de bloque y modo de predicción [44].

La decisión del modo de predicción se basa en la optimización de la tasa de distorsión, es decir, el códec mide los valores de la distorsión y los tasa para los 35 modos disponibles y selecciona el modo que proporciona la menor tasa de distorsión. En la codificación offline o de contenido grabado, HEVC realiza las mediciones en todos los bloques con los 35 modos, sin embargo una codificación en tiempo real para una transmisión en vivo emplea un algoritmo para suponer los valores de la distorsión en todos los modos para no tener que realizar todas las mediciones, lo que supondría un tiempo más prolongado [44].

Las tasas de datos para UHDTV 3840 x 2160 sin compresión, sin HDR y con una cuantificación de 10 y 12 bits por muestra se muestran en la tabla 8.

	Líneas	Píxels	Frames por segundo	10b 4:2:0 (Gbps)	10b 4:2:2 (Gbps)	10b 4:4:4 (Gbps)	12b 4:2:0 (Gbps)	12b 4:2:2 (Gbps)	12b 4:4:4 (Gbps)
UHDTV2 / 8K	4320	UHD2 7680	120	60	80	120	72	95,5	144
			60	30	40	60	36	48	72
			50	25	33	50	30	40	60
		8K 8192	30	25	20	30	18	24	36
			25	12,4	16,6	25	15	20	30
			24	12	16	24	14,4	19	29
UHDTV1 / 4K	2160	UHD1 3840	120	15	20	30	18	23	36
			60	7,5	10	15	9	12	18
			50	6	8	12	7,5	10	15
		4K 4096	30	3,7	5	7,5	4,5	6	9
			25	3,1	4,2	6,2	3,7	5	7,5
			24	3	4	6	3,6	4,8	7,2

Tabla 8.Bitrates UHD 4k/8k 10 y 12 bits [61].

Se estima que al agregar la característica HDR se aumenta un 30% la tasa de bits.



La norma ITU-R BT.2073-0 *Use of the high efficiency video coding (HEVC) standard for UHDTV and HDTV broadcasting* [27], especifica el uso del estándar High Efficiency Video Coding (HEVC) para la radiodifusión de UHDTV y HDTV.

Los parámetros que especifica esta recomendación se muestran en la tabla 9.

Formato de video		Nivel	Perfil	Tier	Máximo flujo de bits para la transmisión (Mbit/s)
Resolución espacial	Velocidad de cuadro (Hz)				
7680 x 4320	120, 119.88, 100	6.2	Main 10	Main	90-120
	60, 59.94, 50	6.1	Main 10	Main	80.100
3840 x 2160	120, 119.88, 100	5.2	Main 10	Main	35-50
	60, 59.94, 50	5.1	Main 10	Main	30-40
1920 x 1080	60, 59.94, 50	4.1	Main 10 o Main	Main	10-15
	30, 29.97, 25 (entrelazado)	4.1	Main 10 o Main	Main	10-15

**Tabla 9. Flujos máximos de bits para cada resolución dependiendo el perfil de compresión [27].**

Esta norma aun no contempla el flujo máximo de bits de estas características al incluir HDR ya que aún se encuentran en fases de pruebas diferentes estándares HDR, los cuales se mostraran más adelante en este capítulo.

### 3.3.2. Estándar de transmisión DVB-T2

Este estándar representa la segunda generación del estándar DVB-T. DVB-T2 permite un flujo de datos mayor de por lo menos un 30% a un 50% en comparación con la primera versión.

Al igual que la primera generación, esta ocupa una modulación OFDM y es compatible con canales 8, 7 y 6 MHz de ancho de banda.

Entre las mejoras con respecto a su antecesor se encuentran un mayor número de modulaciones QPSK, 16 QAM, 64 QAM y 256 QAM; el incremento de modos en la



modulación OFDM 1k, 2k, 4k, 16k y 32k y una mayor eficiencia en los métodos empleados en la codificación de canal.

Por otra parte, en lo respecta a la codificación de canal, se hace uso de códigos LDPC convidado con BCH, en comparación con DVB-T que emplea un código convolucional y Reed-Solomon.

Un nuevo concepto que se agrega a este sistema de transmisión es el uso de multiple Physical Layer Pipes, cada PLP puede tener su propia modulación, Fec code rate e intercalado. Todas la PLPs en conjunto son transmitidas en la misma frecuencia.

Un ejemplo en el uso de las PLP podría ser que en una PLP se transmita contenido UHD/HD para recibirse por medio de una antena de techo, en otra PLP transmitir contenido SD para recepción indoor y una tercera PLP con contenido TV móvil o de radio; solo por mencionar un ejemplo.

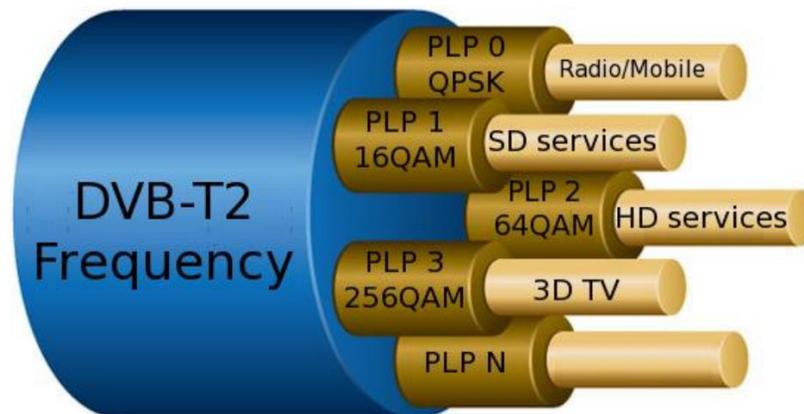


Figura 56. Múltiple PLP DVB-T2 [137].

El uso de PLPs en DVB-T2 permite ahorrar energía por parte del receptor, por medio solo decodificar un solo servicio en vez de todos los servicios multiplexados.

Las mejoras más sobresalientes de este estándar se mencionan en la tabla 10.



	DVB-T	DVB-T2 (new/improved options in bold)
FEC	Convolutional Coding+Reed Solomon 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	LDPC + BCH 1/2, <b>3/5</b> , 2/3, 3/4, <b>4/5</b> , 5/6
Modes	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, <b>256QAM</b>
Guard Interval	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, <b>19/128</b> , 1/8, <b>19/256</b> , 1/16, 1/32, <b>1/128</b>
FFT Size	2k, 8k	<b>1k, 2k, 4k, 8k, 16k, 32k</b>
Bandwidth	6, 7, 8 MHz	<b>1.7, 5, 6, 7, 8, 10 MHz</b>
Typical data rate (UK)	24 Mbit/s	<b>40 Mbit/s</b>
Max. data rate (@20 dB C/N)	31.7 Mbit/s (using 8 MHz)	<b>45.5 Mbit/s</b> (using 8 MHz)
Required C/N ratio (@24 Mbit/s)	16.7 dB	<b>10.8 dB</b>

Tabla 10. Comparación entre DVB-T y DVB-T2 [137].

### 3.3.3. Estándar de transmisión ATSC 3.0.

ATSC 3.0 (logo fig. 57) promete revolucionar la industria de la radiodifusión, siendo una de sus principales características el soporte a la difusión de contenido en UHD.



Figura 57. ATSC 3.0 logo [64].

Este estándar ha sido desarrollado bajo la supervisión del Technology Standards Group (Technology Group) conocido como TG3, el cual cuenta con varios grupos de especialistas (Specialist Group) encargados de desarrollar cada una de las partes que compone el estándar ATSC 3.0, estos grupos son los siguientes [35]:

- TG3/S31 – Specialist Group on System Requirements and Program Management
- TG3/S32 – Specialist Group on Physical Layer for ATSC 3.0



- TG3/S33 – Specialist Group on Management and Protocols
- TG3/S34 – Specialist Group on Applications and Presentations for ATSC 3.0
- TG3/S35 – Specialist Group on ATSC 3.0 Ecosystem
- TG3/S36 – Specialist Group on ATSC 3.0 Security

A su vez cada grupo tiene sub-grupos (Ad-Hoc Group) a los cuales se les ha asignado el desarrollo de partes específicas del estándar. El estándar consta en su totalidad de 20 documentos.

En la figura 58 se muestra la jerarquía del TG3 y de los grupos que tiene a su cargo.

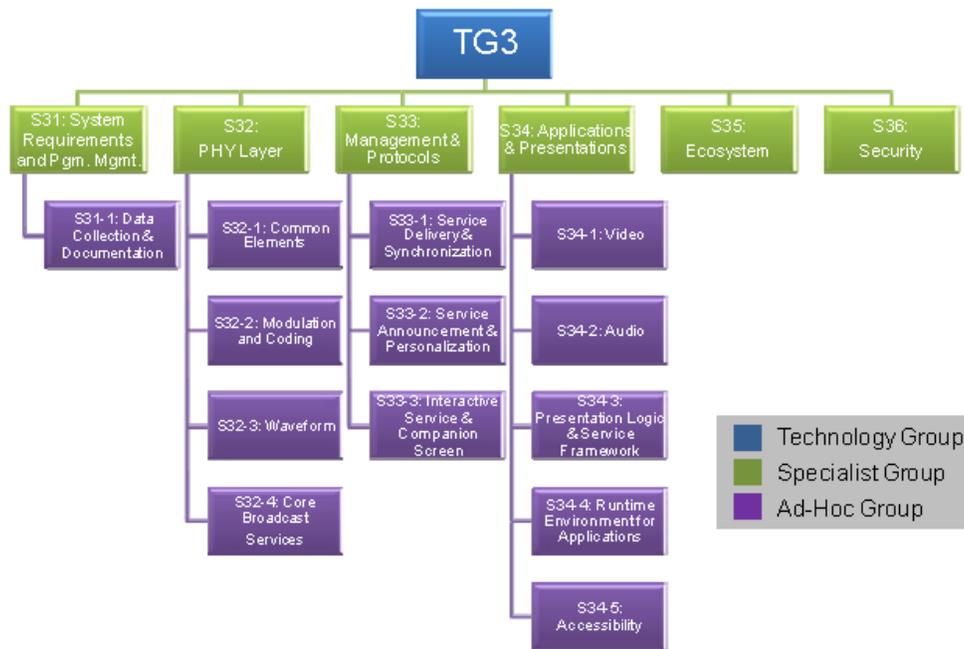


Figura 58. Jerarquía del TG3 [35].

ATSC 3.0 ha sido diseñado para soportar inicialmente [35]:

- UHD (4K) 3840 x 2160 y 8k 7680 x 4320 a 60 fps.
- HDR 1080p a 60 fps.



- Robustez de servicios para dispositivos móviles (tabletas y teléfonos inteligentes).
- High Efficiency Video Compression (HEVC/H.265).
- Segundas pantallas (interacción de tabletas o teléfonos inteligentes con la televisión).
- Conectividad de banda ancha.
- Modulación OFDM con capacidad desde 1 Mb/s hasta 57 Mb/s en un canal de 6 MHz.

La principal intención de la creación de este nuevo estándar es el unir la televisión con el internet, con la intención de lograr una televisión interactiva para que el usuario sea libre de seleccionar el contenido que brinda la radiodifusora, (diferentes tomas de un mismo programa, audios alternativos, subtítulos etc), de este modo los radiodifusores podrán brindar servicios de video on demand, publicidad de acuerdo a gustos y preferencias del espectador y una mejor medición de la audiencia [64].

ATSC ha tomado en cuenta que no es posible predecir las futuras aplicaciones que los consumidores adoptarán, por lo que han diseñado el estándar ATSC 3.0 asegurándose de su flexibilidad para la adaptación a nuevas tecnologías y servicios de manera sencilla en el futuro, como transmisión de contenido UHD con HDR y el espacio de color recomendado por la norma 2020 además del audio inmersivo [35, 64].

Dos conceptos que se utiliza por primera vez en ATSC es el uso de redes de frecuencia única (SFN) para su implementación y el uso de Physical Layer Pipes (PLP). En ATSC 3.0, múltiples PLP's pueden combinarse dentro de un solo canal de transmisión RF (hasta 62 PLP) para la transmisión de múltiples servicios (móvil, SD, HD, UHD, HDR y alertas de emergencia EAS), por otra parte es posible la combinación de múltiples PLP's [35], como en el siguiente ejemplo con 4 PLP's para la difusión de un solo servicio: PLP0=video, PLP1=audio, PLP2=metadatos, PLP3=ESG. La figura 59 muestra un ejemplo del uso de los PLP's:

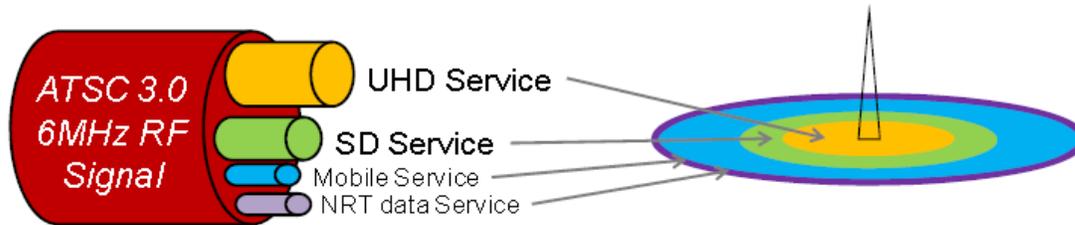


Figura 59. PLP's en ATSC 3.0 [35].

Lo que le permite a ATSC 3.0 ser tan flexible son las combinaciones de corrección de errores y ModCod que pueden ser asignadas a cada PLP. ModCod proviene de Modulación y Coding rate (información no redundante). En la tabla 3.5 se muestran las combinaciones de modulación y coding rate que permite el sistema ATSC 3.0.

Code Rate/ Constellation	2/ 15	3/ 15	4/ 15	5/ 15	6/ 15	7/ 15	8/ 15	9/ 15	10/ 15	11/ 15	12/ 15	13/ 15
QPSK	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
16QAM			✓	✓		✓	✓	✓		✓		
64QAM		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
256QAM			✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1024QAM				✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4096QAM						✓		✓		✓	✓	✓

Tabla 11. Code rates y constelaciones con LDPC = 64000 bits [35].

Code Rate/ Constellation	2/ 15	3/ 15	4/ 15	5/ 15	6/ 15	7/ 15	8/ 15	9/ 15	10/ 15	11/ 15	12/ 15	13/ 15
QPSK	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
16QAM				✓	✓	✓	✓			✓		
64QAM				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
256QAM				✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla 12. Code rates y constelaciones con LDPC 16000 bits [35].



Utilizando el ejemplo de la página anterior con 4 PLPs, una de las configuraciones posibles del sistema ATSC 3.0 se muestra en las tablas 13 y 14.

Service	PLP#	FFT	GI	Mod	Cod	Outer FEC	Inner FEC	Frame
UHD	PLP1	32k	148 $\mu$ S	256 QAM	13/15	BCH	64800	250mS
SD	PLP2	32k	148 $\mu$ S	64 QAM	10/15	BCH	64800	250mS
Mobile	PLP3	8k	148 $\mu$ S	QPSK	5/15	BCH	16200	100mS
NRT	PLP4	8k	148 $\mu$ S	QPSK	3/15	BCH	16200	100mS

Tabla 13. Parámetros de modulación en ATSC 3.0 para el ejemplo de la página anterior [35].

Service	PLP#	% Channel	PLP Capacity	SNR
UHD	PLP1	45%	17.3Mb/s	22.2 dB
SD	PLP2	25%	5.5Mb/s	12.9dB
Mobile	PLP3	20%	0.58Mb/s	-1.3dB
NRT	PLP4	10%	0.17Mb/s	-3.7dB
<b>Total</b>		100%	23.6Mb/s	

Tabla 14. Flujos de datos y niveles de SNR en ATSC 3.0 para el ejemplo de la página anterior [35].

Con diferentes ModCod es posible alcanzar una mayor capacidad del sistema pero a expensas de un SNR más alto. Cada radiodifusor tendrá que evaluar sus requerimientos para ajustar el sistema y así satisfacer sus demandas.

Otra de las novedades de ATSC 3.0 es el uso del protocolo IP para el empaquetamiento de datos, sustituyendo el uso de MPEG-2 TS usado en ATSC 1.0 y en otros estándares de televisión digital utilizados en la actualidad, lo que mejora la distribución de diversos servicios a través de una misma frecuencia [35, 36, 64]. Por lo tanto este estándar no es compatible con los sistemas que actualmente usan el sistema ATSC 1.0.

La mayor diferencia entre ATSC 3.0 y ATSC 1.0 es que ATSC 3.0 no tiene un flujo de datos fijo de 19.39 Mb/s, en cambio los flujos de datos que maneja ATSC 3.0



varía de 1.5 Mbits/s con una relación C/N de aproximadamente -5dB, hasta 57 Mbits/s con una relación C/N por arriba de 30dB para un canal de 6 MHz [35].

Dado el uso de PLPs para proveer una variedad de servicios, que quedan a disposición de las radiodifusoras, la robustez de cada PLP depende de la modulación. Por lo tanto entre más complejo es el esquema de modulación, más grande es la capacidad de transporte de datos, sin embargo el nivel de robustez decrece ya que se requiere una relación C/N mayor.

Otra variable que influye en la capacidad del sistema es el FEC que se le aplique. Entre más FEC se aplica, mayor es la robustez, pero esto disminuye la capacidad del sistema.

En la tabla 15 se muestran seis tipos de operación que fueron diseñados por un grupo de ingenieros en radiodifusión modelando casos seleccionados por radiodifusoras.



Capítulo 3. Televisión en Ultra Alta Definición (UHDTV).

Potential Configuration	Opportunity	Multiplex Capacity	Targeted Receivers	Service Assignments	Channel Loading (BCN On)	PLP Capacity (Mbps)
1	UHD from Single Stick TDM	Lots more HD/SD services space available	Fixed	1 UHD + 1-2 HD or 1 UHD + 3-6 SD	PLP1: 32K FFT; 148 usec GI, 64QAM, 64800 LDPC, 11/15 FEC, 250 msec Frame	20.03
	Audio Services		(similar to today)		PLP2: 32K FFT; 148 usec GI, QPSK, 64800 LDPC, 5/15 FEC, 250 msec Frame	0.66
2	Multicast HD/SD From single stick TDM	5-12	Fixed	2-4 HD or 8-10 SD in a single video stat mux pool	PLP1: 32K FFT; 148 usec GI, 64QAM, 64800 LDPC, 11/15 FEC, 250 msec Frame	17.59
	Audio Services		(similar to today)		PLP2: 32K FFT; 148 usec GI, QPSK, 64800 LDPC, 5/15 FEC, 250 msec Frame	1.03
3	UHD + Mobile HD	2-5	Fixed	1 UHD (+ audio)	PLP1: 32K FFT; 148 usec GI, 256QAM, 64800 LDPC, 11/15 FEC, 250 msec Frame	20.80
			Mobile & Indoor	4 SD or qHD Mobile (+ audio)	PLP2: 8K FFT; 148 usec GI, 16QAM, 64800 LDPC, 5/15 FEC, 250 msec Frame	2.23
4	Multicast HD/SD Robust Core SFN	5-7	Fixed	2 HD in video stat mux pool	PLP1: 16 K FFT, 148 usec GI, 64QAM, 64800 LDPC, 11/15 FEC, 250 msec Frame	8.70
	Audio Services		+ Robust Services	+3-5 SD in video stat mux pool	PLP2: 16 K FFT, 148 usec GI, 16QAM, 64800 LDPC, 5/15 FEC, 250 msec Frame	2.97
				+ audio	PLP3: 16K FFT; 148 usec GI, QPSK, 64800 LDPC, 5/15 FEC, 250 msec Frame	0.66
5	Deep indoor HD Core + Mobile single Stick	6-8	Fixed + portable deep indoor receivers	2 HD in video stat mux pool (+ audio)	PLP1: 16 K FFT, 148 usec GI, 64QAM, 64800 LDPC, 7/15 FEC, 250 msec Frame	5.38
				4-6 SD in video stat mux pool (+ audio)	PLP2: 16 K FFT, 148 usec GI, QPSK, 64800 LDPC, 7/15 FEC, 250 msec Frame	2.13
				+audio	PLP3: 16K FFT; 148 usec GI, QPSK, 64800 LDPC, 5/15 FEC, 250 msec Frame	0.66
6	Deep indoor & Mobile SFN TDM	Roughly 5	Portable receivers indoor and High Speed Mobile	4-5 SD or qHD in a video stat mux pool (+ audio)	PLP: 8 K FFT, 222 usec GI, 16QAM, 64800 LDPC, 5/15 FEC, 250 msec Frame	5.74

Tabla 15. Seis casos de modo de operación [119].



### 3.3.4. Tecnologías HDR

El transmitir señales de UHDTV con HDR se ha convertido en el gran reto a superar en este nuevo proceso evolutivo de la televisión digital, sin embargo la gran dificultad no es la captura y el despliegue de la imagen, son los estándares para la codificación, almacenamiento y transmisión de contenidos con HDR los que aún se encuentran en desarrollo o solo como propuestas que esperan ser tomadas en cuenta por las diversas organizaciones a nivel mundial (ATSC, DVB, ARIB).

Actualmente diversas organizaciones han propuesto tecnologías para el almacenamiento y transmisión de contenidos con HDR, estas son Dolby, SMPTE, Phillips, Technicolor y la BBC en conjunto con NHK.

Tecnologías Perceptual Quantizer: Dolby Vision hace uso de la función de transferencia Perceptual Quantizer al igual que el formato HDR10. Dolby Vision puede contener mayor información de imagen de la que actualmente las pantallas pueden desplegar, con un brillo de hasta 10000 nits, mientras que el formato HDR10 solo puede desplegar 1000 nits ya que solo cuantifica con 10 bits en comparación con la mayor definición de Dolby Vision que emplea 12, aunque puede funcionar también con solo 10 bits, pero no se logra el máximo de este sistema [48, 50].

La otra gran diferencia entre ambos sistemas es el uso de los metadatos, HDR10 emplea metadatos estáticos y la tecnología de Dolby utiliza metadatos dinámicos. Una gran ventaja de estos sistemas es que una televisión con Dolby Vision puede desplegar imágenes HDR10 (debido al uso de la misma función de transferencia), sin embargo esto no sucede en el caso opuesto [48, 50, 80, 81].

Dolby Vision es compatible con los codecs HEVC y AVC, por lo que es posible transmitir la señal de dos formas [50]: una es mediante un solo flujo de datos HEVC main-10 o como dos flujos de datos AVC-8 o HEVC-8 o HEVC-10. El primer método, también llamado single layer, mostrado en la figura 60, emplea un perfil de 10 bits para codificar contenido HDR en tiempo real. Este método utiliza un solo



decodificador HEVC y mediante un proceso posterior, un módulo Dolby Vision se producen metadatos para poder reproducir el rango completo equivalente a una señal Dolby Vision de 12 bits, este método es empleado para transmisiones en vivo y solo es posible transmitir contenido en HDR. Si se desea transmitir una versión del mismo contenido en SDR, es necesario generar otro flujo de datos que solo contenga dicha información y se transmitirá aparte.

### Decoder and Composer: Single Layer

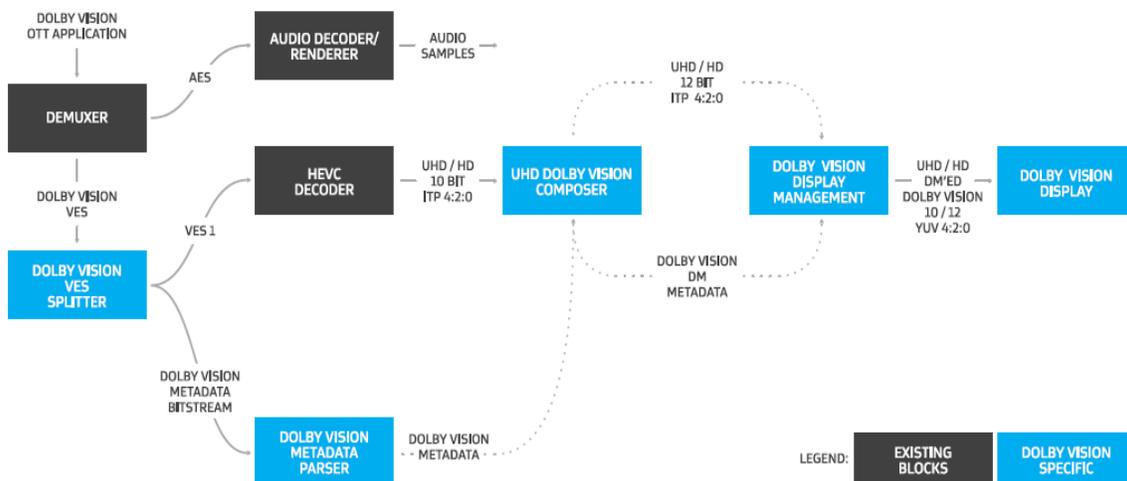


Figura 60. Decodificación Single Layer Dolby Vision [50].

En el segundo método llamado dual layer, ilustrado en la figura 61 ACV o HECV, el flujo de datos que entra al decodificador es separado en los dos flujos (HEVC o AVC) que lo componen, flujo base y flujo de mejora, y estos son comprimidos por separado. Para reproducir el contenido, el flujo base puede ser simplemente descomprimido y decodificado para formar imágenes en SDR o la señal puede ser re ensamblada con el flujo de mejora para formar la imagen HDR.



Decoder and Composer: Dual Layer

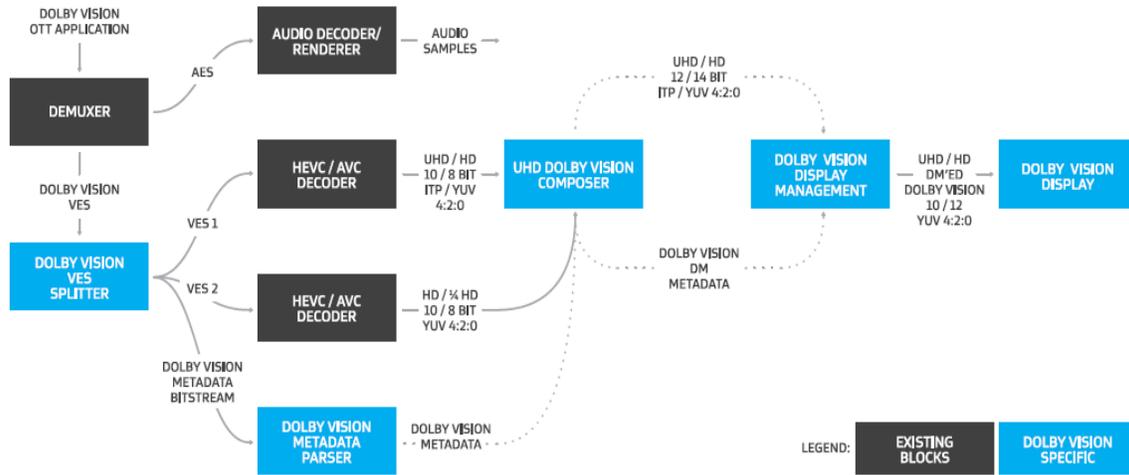


Figura 61. Decodificación Dual Layer Dolby Vision [50].

De acuerdo con los laboratorios dolby se pueden alcanzar diferentes tasas de bits dependiendo el perfil de codificación, si es single o dual layer y campos por segundo y si se codifica con HECV y AVC. En la tabla 62 se muestran las tasas de bits máximas con HDR Dolby Visión.

Example maximum resolution × frame rate (fps)	Maximum bit rates (base layer and enhancement layer combined)	
	Main tier (Mbps)	High tier (Mbps)
3840 × 2160 × 24	25	130
3840 × 2160 × 30	25	130
3840 × 2160 × 48	40	130
3840 × 2160 × 60	40	130

Figura 62. Tasas de bits máximas y mínimas para UHD con HDR Dolby Vision [50].



Métodos HDR de Technicolor [120]: El primer método HDR de Technicolor, que se ilustra en la figura 63, funciona de la siguiente manera: primero se toma una señal de video de una cámara que entrega una señal HDR de 10 bits, posteriormente se convierte a una señal de SDR de 8 bits y genera un solo flujo de datos que incluye campo por campo metadatos para la conversión a HDR.

Cuando es reconstruida la imagen en una pantalla SDR, el dispositivo puede ignorar los metadatos extra y reproducir el video SDR.

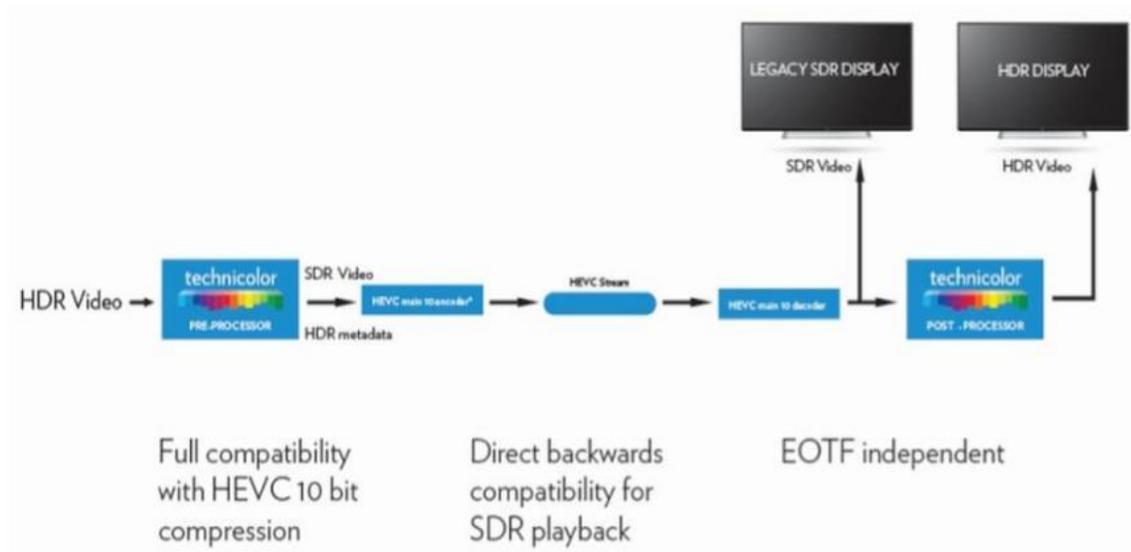


Figura 63. Flujo de trabajo HDR de Technicolor [120].

El segundo método HDR de Technicolor es llamado Intelligent Tone Management, el cual permite convertir video SDR en video HDR con la intención de ampliar el contenido disponible para pantallas HDR.

Hybrid Log-Gamma de BBC y NHK: este método se mencionó previamente en el apartado de margen dinámico.



### 3.3.5. Tecnologías en pantallas UHDTV

Al igual que en HDTV, se emplean pantallas planas en televisores para uso doméstico debido a que, como ya se mencionó anteriormente, ocupan un menor espacio y son más livianas comparadas con monitores CRT, incluso en grandes tamaños.

Sin embargo las tecnologías predominantes en las pantallas UHD son OLED y LED LCD, descartando completamente las pantallas de plasma.

La principal razón por la cual no se producen pantallas UHD de plasma es por la complejidad que involucra fabricar este tipo de pantallas [95], para explicar esto es necesario recordar la composición de este tipo de pantallas.

Como ya se mencionó en un capítulo anterior, la pantalla está compuesta por diminutas celdas de plasma que se encuentran entre dos láminas de vidrio; dichas celdas tienen una distancia de separación entre sí, a esta distancia medida entre el centro de un pixel al centro de un pixel adyacente, se le conoce como pixel pitch o distancia entre pixeles. Todas las celdas se encuentran separadas por una barrera descrita en la imagen 64 como barrier rib.

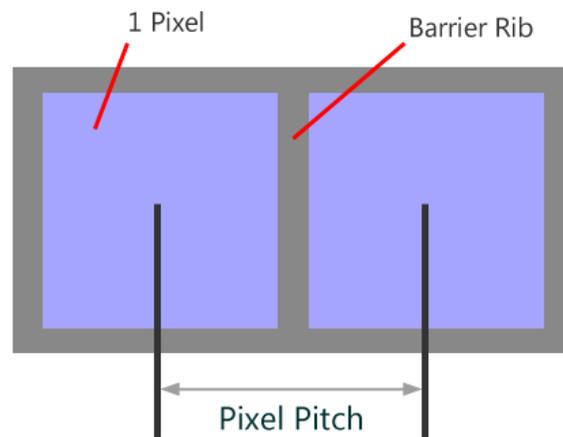


Figura 64. Separación de píxeles plasma [95].



En una pantalla full HD de plasma de 65 pulgadas, la separación entre píxeles es de 0.747 mm. La separación entre píxeles más corta que se haya logrado en una pantalla de plasma es de 0.48 mm, dicha distancia es la que se encuentra en pantallas full HD de 44 pulgadas. Como las pantallas UHDTV duplican la cantidad de píxeles tanto horizontal como verticalmente; al querer lograr esto en una pantalla de 65 pulgadas, la distancia entre los píxeles tiene que ser de 0.32 mm, la cual es un 33% más corta que la distancia de las pantallas de plasma full HD de 44 pulgadas [95].

Las complicaciones que conlleva reducir el tamaño de una celda es que al ser esta más pequeña, incrementaría la cantidad de átomos ionizados en las paredes de la celda, lo que reduce la eficiencia luminosa de la luz UV que excita a los fósforos. Para mantener la misma intensidad de brillo, se tendría que aumentar el voltaje para energizar el gas dentro de la celda, lo que aumentaría la cantidad de energía de consumo. Además la presión dentro de la celda tendría que ser aumentada al doble de la presión atmosférica para mantener la estabilidad de la descarga.

En lo correspondiente a las tecnologías OLED y LED LCD, ambas se utilizan en la actualidad para desplegar imágenes en 4k, sin embargo las pantallas OLED presentan mayores ventajas que las pantallas LED LCD.

Debido a la composición de estas pantallas (mencionado en el capítulo 2), las pantallas OLED presentan una mejor representación de color y mejores negros y escala de grises; en contraparte a esto las pantallas LED LCD presentan una mejor intensidad de brillo por la iluminación trasera (backlight) que ilumina las celdas de cristal líquido, sin embargo este tipo de iluminación al estar prendida todo el tiempo o al ser por zonas, no permite una buena uniformidad en el brillo. Tal vez las mayores desventajas del OLED con respecto al LCD, sean el precio y el tiempo de vida, aunque al ser la tecnología OLED nueva, se espera que conforme pasen los años el precio baje, además de que será posible conocer los problemas que afecten el tiempo de vida de dichas pantallas.



Aparte de estas tecnologías que actualmente se encuentran disponibles al alcance del consumidor, existe la tecnología laser display que actualmente sigue en proceso de mejora y desarrollo.

Las pantallas laser, a diferencia de otras tecnologías, despliegan la imagen haciendo uso de un proyector. Los láseres remplazan las lámparas de mercurio que requerían de un gran consumo de energía además de generar altas temperaturas durante su funcionamiento.

Existen dos tipos de proyectores laser: RGB laser y Laser Phosphor. El primer tipo emplea tres láseres para generar luz (rojo, verde y azul), la cual pasa a través de por los dispositivos que permiten que se muestre la imagen, estos dispositivos pueden ser DMD (Digital Micromirror Device) o micropantallas LCD y finalmente la imagen compuesta por sus tres componentes de color es proyectada haciendo uso de un lente. Actualmente el uso de este tipo de proyectores se encuentra reservado solo para cinemas o aplicaciones comerciales de alto rendimiento, como parques temáticos, debido a su alto costo y la alta luminosidad que producen [23, 97, 98, 99].

Los proyectores laser phosphor emplean láseres de color azul para generar luz azul e iluminar un disco que contiene fosforo, que al pasar la luz a través de él se genera luz blanca. Dicha luz blanca es dividida, por medio de un prisma o tres espejos, en tres haz de luz: rojo, verde y azul para posteriormente pasar a través de chips DMD (fig. 66), estos son fusionados por medio de un prisma para mostrar una sola imagen totalmente a color [23, 97].

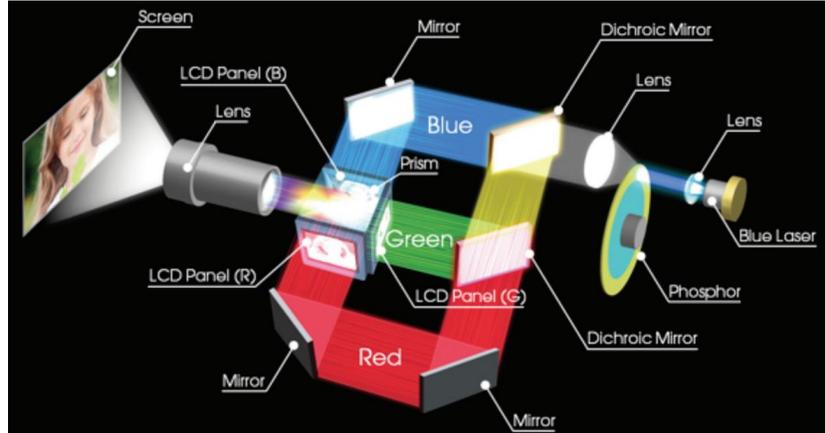


Figura 65. Proyector láser con tres micropantallas LCD [98].

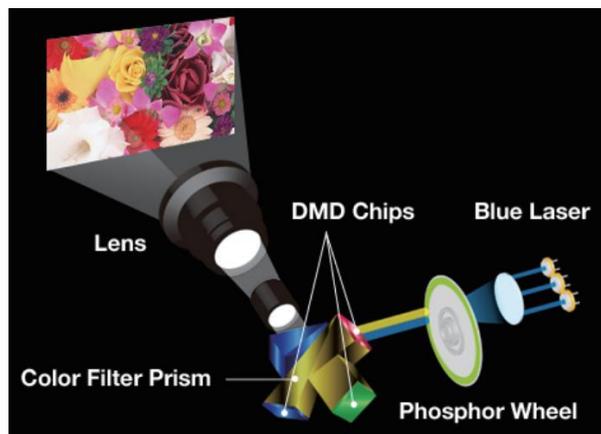


Figura 66. Proyector láser con tres DMD [23].

Las ventajas de utilizar proyectores laser son una mejor saturación de color comparable con las pantallas LCD y por supuesto un mucho menor consumo de energía si se compara con proyectores de lámpara de mercurio. Actualmente se han puesto a la venta proyectores de corta distancia lo que reduce el espacio entre el proyector y la superficie a proyectar (fig. 67). Las empresas que actualmente han puesto a la venta este tipo de proyectores son Sony, LG e Hisense, siendo esta última la primera en lanzar a la venta un proyector de tiro corto.

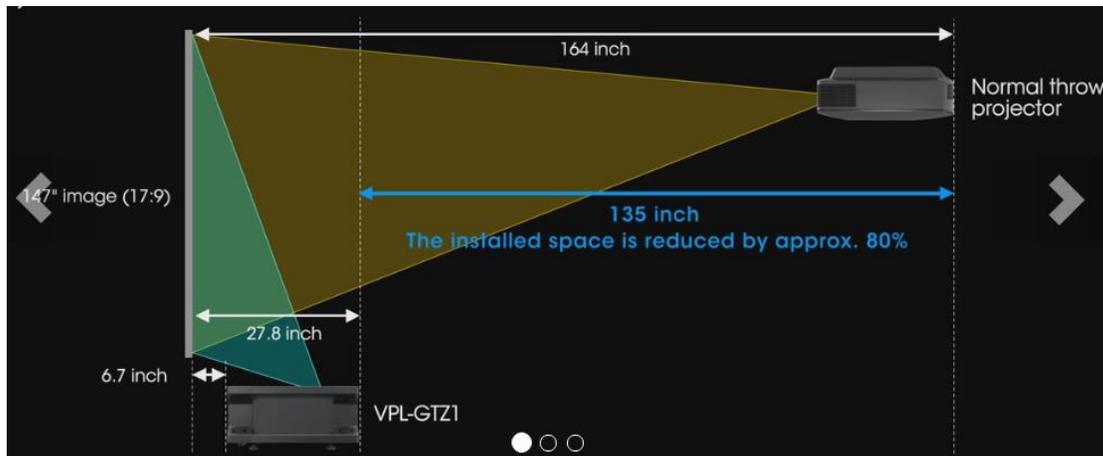


Figura 67. Comparación de las distancias de proyección de un proyector de tiro corto y un proyector convencional [121].

A la fecha de realización de este trabajo no existe comercialmente un televisor que permita un despliegue de imágenes de con el espacio de color de la recomendación 2020, sin embargo se sabe que en un futuro será posible lograr este espacio de color con las tecnologías OLED, LED LCD y Proyectores laser. Actualmente solo algunos proyectores laser son capaces de aproximarse a esta gama de colores.

### 3.4. Estandarización de la UHDTV para la distribución de contenidos alrededor del mundo

El interés en la UHDTV (3,840 x 2,160) ha venido creciendo desde 2013, tanto en la producción de contenidos como en el desarrollo de equipos y estándares para la distribución de contenidos en UHD (3,840 x 2,160).

Como ya se mencionó anteriormente, la intención es que la UHDTV mejore las siguientes áreas con respecto a la actual HDTV:



- Resolución espacial (3,840 x 2,160 y en el futuro 7,680 x 4,320).
- Margen dinámico (HDR).
- Gama de colores (ITU-R BT.2020).
- Profundidad de color (12 bits).
- Resolución temporal (120 fps).

Actualmente las ventas de televisores UHD están aumentando a un ritmo acelerado en comparación con la producción de contenidos y la estandarización para la distribución de estos, por lo que diversas compañías tratan de sacar ventaja en el mercado con el lanzamiento de pantallas UHD con diferentes características intentando atraer la atención del consumidor.

Para evitar una posible incompatibilidad de equipos y pantallas, diversos grupos reguladores de las telecomunicaciones y dispositivos electrónicos trabajan en conjunto para dictar las características que debe de cumplir la señal y como debe de ser transmitida con el fin de alcanzar las metas antes mencionadas.

#### 3.4.1. Estandarización UIT

- Por parte de la UIT, ha definido la UHDTV en la norma ITU-R BT.1769 *“Parameter values for an expanded hierarchy of LSDI image formats for production and international programme exchange”* [122] con las características mostradas en la tabla 16.



Parámetros	Valores	
	Sistema 3,840 x 2,160	Sistema 7,680 x 4,320
Formato de imagen	16:9	
Muestras por línea activa	3,840	7,680
Líneas activas por imagen	2,160	4,320
Muestreo reticular	Ortogonal	
Orden de las muestras	De izquierda a derecha y de arriba abajo	
Formato de imagen del píxel	1:1 (píxeles cuadrados)	
Estructura de muestreo	4:2:0, 4:2:2, 4:4:4	
Velocidad de cuadro (Hz)	24, 24/1001, 25, 30, 30/1001, 50, 60, 60/1001	
Estructura de la imagen	Progresiva	
Bit/píxel	10, 12	

Tabla 16. Parámetros de la UHDTV definidos en la recomendación ITU-R BT.1769.

- Otra norma de la UIT con relación a la UHDTV es la norma ITU-R BT.2020 *“Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange”* [123], la cual especifica las características de la imagen para UHDTV (incluidas en la norma ITU-R BT 1769) y la gama de colores a utilizar, donde se especifica las coordenadas de los colores primarios en el espacio CIE 1931 mostradas en la página 68.

El resto de colores puede determinarse basado en la combinación de los colores primarios RGB y el blanco de referencia.

- La norma ITU-R BT.2073-0 *Use of the high efficiency video coding (HEVC) standard for UHDTV and HDTV broadcasting* [27], especifica el uso del estándar High Efficiency Video Coding (HEVC) para la radiodifusión de UHDTV y HDTV.

Los parámetros que especifica el estándar se muestran en la tabla 17.



Formato de video		Nivel	Perfil	Tier	Máximo flujo de bits para la transmisión (Mbit/s)
Resolución espacial	Velocidad de cuadro (Hz)				
7680 x 4320	120, 119.88, 100	6.2	Main 10	Main	90-120
	60, 59.94, 50	6.1	Main 10	Main	80.100
3840 x 2160	120, 119.88, 100	5.2	Main 10	Main	35-50
	60, 59.94, 50	5.1	Main 10	Main	30-40
1920 x 1080	60, 59.94, 50	4.1	Main 10 o Main	Main	10-15
	30, 29.97, 25 (entrelazado)	4.1	Main 10 o Main	Main	10-15

Tabla 17. Flujo máximo de bits para la transmisión con HEVC [27].

Los flujos de bits pueden ser menores a los mostrados a la tabla, ya que es posible utilizar otras configuraciones del códec HECV que han sido diseñadas o mejoradas con el transcurso del tiempo.

- La norma más recientemente publicada por la UIT es la ITU-R BT.2100 “*Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme Exchange*” [26], la cual, como ya se mencionó anteriormente, recomienda el uso de dos grupos funciones de transferencia para desplegar imágenes con un margen dinámico alto. Los métodos Perceptual Quantization (PQ) e Hybrid Log-Gamma (HLG), a su vez han sido estandarizados como SMPTE ST-2084 *Dynamic Range Electro-Optical Transfer Function of Mastering Reference Displays* y ARIB STD-B67 *Essential Parameter Values for Extended Image Dynamic Range Television* respectivamente.
- La recomendación ITU-R BS.2051 “*Advanced sound system for programme production*” [124] especifica y estandariza un sistema de audio de nueva generación (New Generation Audio), el cual emplea datos referentes al audio en combinación de metadatos para describir una escena de audio y esta pueda ser transmitida adecuadamente. Dado que el formato que



acompaña la UHDTV es el sistema 22.2, los metadatos también permiten que un equipo de audio de menor capacidad (2.0 o 5.1) sea capaz de adecuar el audio a sus capacidades sin que se pierdan sonidos y reduzca la calidad del audio.

### 3.4.2. Estandarización SMPTE

SMPTE ha publicado los siguientes estándares con respecto a la UHDTV [125]:

- Estándar ST 2036-1 clasifica UHDTV en dos tipos la UHDTV-1 con la resolución 3840x2160 y la UHDTV-2 con la resolución 7680x4320, con una relación de aspecto de 16:9 y con una codificación digital RGB o Y, C<sub>B</sub>, C<sub>R</sub>. Esta recomendación se basa en los parámetros de la recomendación ITU-R BT.2020, además permite el uso de los parámetros de la recomendación ITU-R BT-709 para alta definición.
- Estándar ST 2036-2:2008 especifica las características del audio digital para la producción y distribución de contenidos en la UHDTV, además muestra las características del sonido multicanal 22.2 para la producción de la UHDTV.
- Estándar SMPTE ST-2084 Dynamic Range Electro-Optical Transfer Function of Mastering Reference Displays y ARIB STD-B67 Essential Parameter Values for Extended Image Dynamic Range Television, ya mencionado anteriormente.
- Estándar ST 2086 que especifica los metadatos estáticos que requiere las funciones de transferencias descritas en el estándar anterior.



### 3.4.3. Estandarización en Europa UHDTV

En Europa, DVB es quien se encarga del desarrollo de estándares para la distribución de contenido de TV. Por otra parte la Unión Europea de Radiodifusión (EBU por sus siglas en inglés) es una organización de radiodifusoras europeas de servicio público, la cual una de sus funciones es participar en el desarrollo y la aprobación de estándares para la difusión de contenidos en Europa.

Para la UHDTV DVB ha definido tres etapas para la distribución de contenido en Europa [30, 53, 61, 126] tomando en cuenta las recomendaciones planteadas por la UIT: UHDTV-1 fase 1, UHDTV-1 fase 2 y finalmente UHDTV-2. De las cuales la EBU ha aprobado las fases 1 y 2.

La primera fase cuenta con las siguientes características:

- Resolución: 3,840 x 2,160
- Submuestreo de croma: 4:2:0
- Profundidad de color: 8 - 10 bits
- Despliegue de imagen: progresivo
- Campos por segundo: 50/60 fps
- Gama de colores: Normas ITU-R BT.709
- Margen dinámico: SDR
- Audio: 5.1
- Codec: HEVC Main 10
- Años de implantación: 2014/2015

Esta fase fue aprobada en 2014.

De acuerdo a las características de imagen correspondiente a la fase 1 la única mejora con respecto a la HDTV es la resolución espacial y el códec a utilizar (HEVC). Actualmente existen canales de televisión vía satélite que transmiten contenido en UHD con estas características, siendo Directv la primera en



transmitir con esta resolución a finales de 2014. Además de que se han realizado pruebas de campo de transmisiones UHDTV vía terrestre para esta fase.

La fase dos contempla la inclusión de las siguientes características:

- Resolución: 3,840 x 2,160
- Submuestreo de croma: 4:2:0, 4:2:2 y 4:4:4
- Profundidad de color: 10 – 12 bits
- Despliegue de imagen: progresivo
- Campos por segundo: 100/120 fps
- Gama de colores: Norma Rec. ITU-R BT.2020
- Margen dinámico: HDR
- Audio: Next Generation Audio (NGA)
- Codec: HEVC Main 10
- Años de implantación: a partir de 2017.

Esta fase fue aprobada a finales de 2016.

Existen diferentes miembros de DVB, los cuales planean diferentes tiempos para la implantación de las mejoras que implica la fase 2. Por una parte se pretende que la característica HDR se empiece a distribuir en el 2017 y posteriormente se agregue la característica HFR (High Frame Rate) para 2019 debido a que la producción de receptores capaces de procesar tal característica tomara un tiempo.

Para la producción de contenidos HRD, la fase 2 permite el uso de las tecnologías recomendadas por la UIT (HLG10 y PQ).

Un aspecto importante para implantar totalmente las características que contempla esta fase tiene que ver con el desarrollo tecnológico de equipos capaces de desplegar y procesar imágenes con dichas características. Actualmente DVB se encuentra trabajando con las empresas encargadas de producir y comercializar los



equipos, con la intención de llegar a acuerdos en las especificaciones de dichos equipos para que posteriormente se inicie fabricación y comercialización de estos.

Con lo que respecta a la fase 3 se tiene la idea de llegar al proceso final de la transición de la UHDTV, al incluir la resolución 8K a las características ya antes mencionadas, sin embargo aún no se tiene contemplado cuando exactamente se empezará a trabajar en el diseño de esta y su futura implantación.

En cuanto a otros estándares, en marzo de 2015 el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI por sus siglas en inglés) publicó el estándar DVB TS 101 154 V2.1.1 'Specification for the use of Video and Audio Coding in Broadcasting Applications based on the MPEG-2 Transport Stream' [127], el cual plantea las directrices para la transmisión de audio y video codificado a través de sistemas vía satélite, cable y difusión terrestre que utilicen el sistema MPEG-2 en la capa de transporte. Este documento cubre la primera fase de la UHDTV propuesta por DVB para su correcta decodificación al ser transmitida.

Este estándar indica:

- Las especificaciones de codificación de la capa del sistema de MPEG-2 para el bitstream en el sistema DVB para su correcta decodificación.
- Directrices para la codificación de video en los siguientes formatos: MPEG-2 video, o H.264/AVC video, o HEVC video, o VC-1 video para sistemas DVB.
- Directrices para la codificación de audio en los siguientes formatos MPEG-1 or MPEG-2 Layer II backward compatible audio, o AC-3 audio, o Enhanced AC-3 audio, o DTS audio, o DTS-HD audio, o MPEG-4 AAC audio, o MPEG-4 HE AAC audio, o MPEG-4 HE AAC v2 audio, o combinaciones of MPEG Surround audio con MPEG-1 Layer II, MPEG-4 AAC audio, o MPEG-4 HE AAC audio, o MPEG-4 HE AAC v2 audio.



### 3.4.5. Estandarización y desarrollo en Asia

Association of Radio Industries and Businesses ARIB:

Actualmente entre los estándares ARIB que ha publicado con respecto a la transmisión de la UHDTV son [128]:

- STD-B56 UHDTV System Parameters for Programme Production.  
Este estándar especifica los parámetros del sistema UHDTV para la producción de programas el cual es un subconjunto de los parámetros mostrados en la recomendación ITU-R BT.2020.
- STD-B58 Interface for UHDTV Production Systems.  
Este estándar especifica la interfaz óptica y sus características para equipo UHDTV que cumpla con los parámetros especificados en el estándar STD-B56.
- STD-B62 Multimedia Coding Specification for Digital Broadcasting (Second Generation).  
Este estándar especifica los nuevos esquemas de codificación, (incluida la UHDTV) conocidos como segunda generación para la transmisión digital.
- ARIB STD-B67 ESSENTIAL PARAMETER VALUES FOR THE EXTENDED IMAGE DYNAMIC RANGE TELEVISION (EIDRTV) SYSTEM FOR PROGRAMME PRODUCTION.  
Este estándar especifica las funciones de transferencia (mencionadas en el apartado de margen dinámico) para la producción y despliegue de imágenes con HDR.

Nippon Hoso Kyokai (Japan Broadcasting Corporation) NHK [70]:

Dentro de esta organización se encuentra la división NHK Science & Technology Research Laboratories, la cual se encarga de realizar investigaciones en el campo de la tecnología para la difusión de contenidos tipo broadcast.



Actualmente realiza investigaciones con respecto a la UHDTV 8K a la que ellos llaman Super Hi-Vision (SHV). En estas investigaciones han estudiado la forma de aplicar High Dynamic Range (HDR) a SHV y han propuesto un método a la UIT para su estandarización. También han desarrollado dispositivos y cables multi-fibras multi-modo compatibles con el estándar STD-B58 para la transmisión de televisión en UHD. Además han contribuido a la estandarización de un esquema de multiplexado por división de longitud de onda para distancias largas y un método para multiplexar audio en esta interfaz.

Otras investigaciones realizadas por estos laboratorios han sido en el desarrollo de cámaras para definición 8K y soporte 120 y 60 Hz de frecuencia de muestreo de imágenes.

En su tecnología SHV se utiliza una versión mejorada por ellos del MPEG-H High Efficiency Video Coding (HEVC), el cual requiere que el tramo de video sea dividido en cuatro porciones verticales para la codificación. Han desarrollado también un codificador de video que es capaz de convertir video 4K/12-bits en video 2K/8-bit y transmitirlo en tiempo real.

En cuanto las transmisiones vía satélite, han diseñado un esquema de transmisión en la banda de 12 GHz el cual es capaz de transmitir un flujo de 100 Mbps sobre un solo canal de un transponder y fue adoptado como un estándar por la ARIB. Otra contribución de estos laboratorios es en el desarrollo del esquema MPEG Media Transport (MMT) y de igual manera este fue adoptado como un estándar por la ARIB para el multiplexado de transmisiones UHDTV.

Con respecto a la transmisión de SHV vía terrestre han estudiado distintos parámetros de transmisión incluidos la frecuencia de transmisión, ancho de banda, corrección de errores, señal piloto y la longitud de trama OFDM.



Y por supuesto cabe mencionar el desarrollo del formato Hybrid Log-Gamma (mencionado en el apartado de margen dinámico) en conjunto de la BBC de Londres.

Telecommunications Technology Association TTA [129]:

En Corea la autoridad responsable de la estandarización en tecnologías de comunicación es la TTA la cual ha publicado los siguientes estándares con respecto a la UHDTV.

- TTAR-07.0011: A Study on the UHDTV Service Scenarios and its Considerations (Technical Report).

Este reporte describe las tecnologías relacionadas con 4K/UHDTV en términos de compresión. Además describe los posibles escenarios, los formatos de señal disponibles y las consideraciones para cada escenario.

- TTAR-07.0013: Terrestrial 4K UHDTV Broadcasting Service

Este reporte contiene las tecnologías para el servicio de UHDTV vía terrestre. El documento trata la codificación de video con formato HEVC y la codificación de audio basado en Dolby AC-3 y ISO/IEC 14496-3(AAC), así como también el multiplexado de las señales usando el protocolo MPEG-2 TS y explica el sistema de difusión terrestre de contenido en 4K-UHDTV basado en el sistema DVB-T2.

- TTAI.KO-07.0123: Transmission and Reception for Terrestrial UHDTV Broadcasting Service.

Este es un estándar provisional que contiene las mismas características que el estándar antes mencionado.



### 3.4.6. Parámetros que deben cumplir los equipos para ser considerados UHD según diferentes asociaciones empresariales para la producción de equipos y contenidos en UHD

#### 3.4.6.1. Ultra HD Premium de la UHD Alliance

UHD Alliance (logo fig. 68) es una alianza formada por empresas productoras de equipos electrónicos (audiovisuales) y de contenidos como Netflix y algunos estudios cinematográficos de Hollywood, con la intención de definir la siguiente generación de televisión, a través de la especificación de las características que deben cumplir tanto los contenidos como los equipos para ser considerados de UHD, con el fin de que el espectador pueda disfrutar de una completa experiencia Ultra HD [68, 72].

Ultra HD Premium es una etiqueta que se le otorga a los equipos (pantallas, proyectores, reproductores Blu-ray) que cumplan con las siguientes características como mínimo [68]:

- Resolución: 3840 x 2160
- Profundidad de color: 10 bits
- Gama de colores: Señal de entrada BT.2020
- Reproducción en pantalla: Más del 93% del espectro de color de la norma DCI P3
- HDR: SMPTE ST2084 EOTF (Electro-Optical Transfer Function)
- Picos de brillo y profundidad de negros: Mas de 1000 nits para brillo y menor a 0.5 nits para negros o 540 nits para brillo y menor a 0.0005 nits de nivel de negro.

Para la producción de contenidos ha establecido las siguientes características [68]:

- Resolución: 3840 x 2160
- Profundidad de color: mínimo 10 bits



- Gama de colores: BT.2020
- HDR: SMPTE ST2084 EOTF (Electro-Optical Transfer Function)
- Para las pantallas usadas en la producción se recomienda exceder los 1000 nits para brillo y menos de 0.03. nits para negros y por lo menos desplegar el espacio de color DCI P3.

Para la distribución de contenidos ha establecido las siguientes características [68]:

- Resolución: 3840 x 2160
- Profundidad de color: mínimo 10 bits
- Gama de colores: BT.2020
- HDR: SMPTE ST2084 EOTF (Electro-Optical Transfer Function)



Figura 68. Logo Ultra HD premium [72].

#### 3.4.6.2. Consumer Technology Association

En los Estados Unidos la Consumer Technology Association (CTA) provee una plataforma que une a los líderes de la tecnología para colaborar conjuntamente en el diseño de los nuevos avances en la tecnología.

Esta asociación ha establecido los siguientes parámetros que deben de soportar las pantallas para ser consideradas de UHD, las cuales reciben el logo mostrado en la figura 69 [130]:



- Resolución: 3840 x 2160
- Relación de aspecto: 16:9
- Profundidad de color: mínimo 8 bits
- Gama de colores: BT.709 o espacios de colores más amplios
- Frame rate: 24p, 30p y 60p
- Entrada digital: uno o más puertos HDMI con soporte HDCP 2.2



Figura 69. Logo 4K Ultra HD otorgado por la CTA [130].

### 3.4.6.3. DigitalEurope

DigitalEurope representa industria de la tecnología digital en Europa y de igual manera que la CTA, ha establecido algunos parámetros que deben soportar los equipos para ser considerados UHD y se les otorgue el logo Ultra HD (fig. 70), estos parámetros son [131]:

- Resolución: 3840 x 2160
- Relación de aspecto: 16:9
- Profundidad de color: mínimo 8 bits
- Gama de colores: BT.709 mínimo
- Muestreo de la señal: 4:2:0 para 50p y 60p; 4:2:2 para 24p, 25p y 30p
- Frame rate: 24p, 25, 30p, 50p y 60p
- Entrada digital: uno o más puertos HDMI con soporte HDCP 2.2
- Audio: PCM 2.0 Estéreo



Figura 70. Logo Ultra HD otorgado por la DigitalEurope [131].

#### 3.4.6.4. Ultra HD Forum

El Ultra HD fórum es un foro abierto donde participan empresas del medio del cine y la televisión, tanto creadores de contenido, distribuidores, fabricantes de electrónicos de consumo, fabricantes de equipo profesional y compañías del ámbito tecnológico con la intención de crear un consenso en la industria dentro de los estándares técnicos [132].

En el NABSHOW (National Association of broadcasters Show) 2016 el Ultra HD Forum dio a conocer su primera fase para la difusión de contenidos en vivo o grabados en UHD.

La fase A propuesta por esta organización de la UHD considera los siguientes parámetros para la distribución [132]:

- Resolución espacial: 1080p o 2160p.
- Gama de colores: BT.709, BT.2020.
- Profundidad de color: 10 bits.
- Rango dinámico: SD, PQ, HLG.
- Codec de video: HEVC, Main 10, Level 5.1.
- Canales de audio: Estéreo o 5.1.



### 3.5. Pruebas de campo UHDTV vía terrestre

En este apartado se muestran algunas de las pruebas más relevantes UHDTV vía terrestre a nivel mundial.

#### 3.5.1. Pruebas de campo en Corea del Sur [24]

-Fase de pruebas 1: Septiembre 1 – Diciembre 31 de 2012.

Korean Broadcasting System (KBS) realizó la primera transmisión en 4K-UHDTV vía terrestre a 30 fps con un bit rate de aproximadamente de 32 a 35 Mb/s. La transmisión se realizó en Kwan-Ak al sur de Corea.

Para esta fase las pruebas de campo se llevaron a cabo en 15 puntos con una distancia radial casi idéntica de 5 Km del sitio de transmisión. El sistema empleado en esta primera fase se muestra en la figura 71.

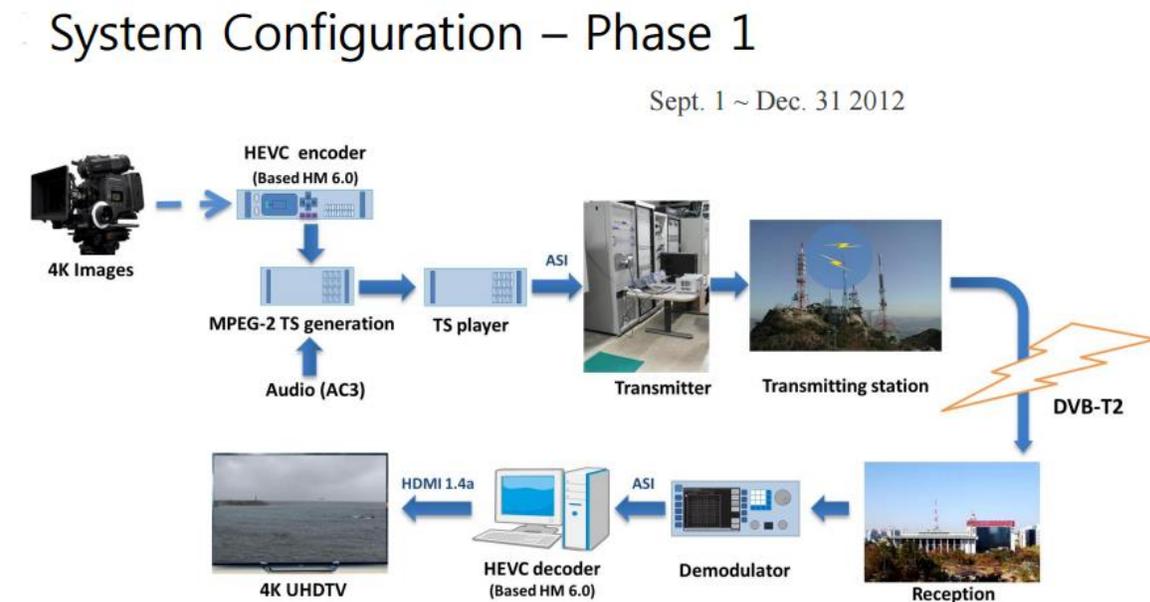


Figura 71. Configuración del sistema de la fase 1 [24].



-Fase de pruebas 2: Mayo 10 – Octubre 15 de 2013.

En estas pruebas KBS aumento el frame rate de 30 a 60 fps con una tasa de transmisión de 26 a 34 Mb/s. La transmisión siguió siendo en Kwan-Ak.

En esta fase las pruebas de campo se llevaron a cabo en 10 puntos a una distancia de 10 Km a 52 Km del sitio de la transmisión.

El objetivo durante estas pruebas fue confirmar la factibilidad de distribuir contenido en 4K vía terrestre usando solamente canales con un ancho de banda de 6 MHz. Se utilizaron el códec HEVC y el estándar DVB-T2 durante dichas pruebas.

Las especificaciones de transmisión se muestran la tabla 18.

	Phase 1			Phase 2	
Transmitter site	Kwan-Ak Mountain				
Covering	The Metropolitan area of Seoul				
Nominal power (Antenna gain)	100 W (6.01 dBi)				
DTT System	DVB-T2				
Transmission mode	32k, extended mode, $GI = 1/128$ , PP7				
Modulation	256 QAM			64 QAM	256 QAM
Number of FEC blocks in interleaving frame	163			123	165
FEC code rate	3/4	4/5	5/6	4/5	5/6
Multiplexing capacity	32.8 Mb/s	35.0 Mb/s	36.5 Mb/s	26.5 Mb/s	36.9 Mb/s
Signal bit rate	32.0 ~ 35.0 Mb/s			26.0 ~ 34.0 Mb/s	
Video encoding standard	HEVC				
Picture standard	3 840×2 160p, 8 bits/pixel 30 fps			3 840×2 160p, 8 bits/pixel 60 fps	
Frequency used	785 MHz (Ch 66 in Korea)				

Tabla 18. Especificaciones de las transmisiones [24].



## System Configuration – Phase 2

May. 10 ~ Oct. 15 2013

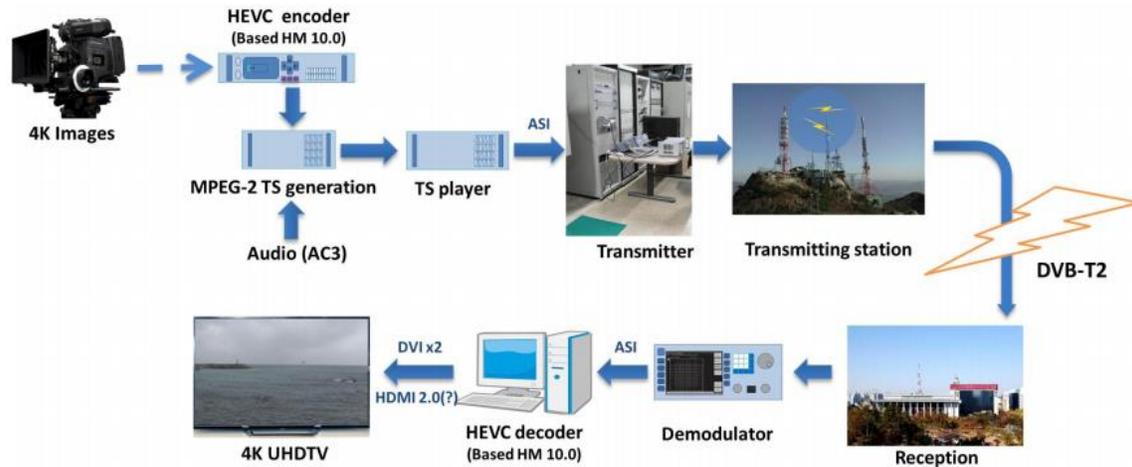


Figura 72. Configuración del sistema de la fase 2 [24].

-Fase de pruebas 3: Marzo 24 de 2014 – Marzo 15 de 2015.

En esta fase además de KBS, MSIP le permitió a MBC y SBS hacer transmisiones de prueba. KBS y SBS desarrollaron una red de frecuencia única (SFN) para transmisiones 4K-UHDTV en vivo. Las potencias y los canales usados en los experimentos se muestran en la tabla 19.

Frecuencia central (Canal)	KBS 713 MHz (Ch 54)	MBC 701 MHz (Ch 52)	SBS 707 MHz (Ch 53)
Montaña Kwan-Ak	5 kW	2.5 kW	5 kW
Montaña Nam	600 W	–	–
Montaña Yong-Moon	–	–	1 kW

Tabla 19. Potencias y canales empleados en las pruebas [24]



La característica principal de esta fase es la transmisión de contenido 4K-UHDTV en vivo usando una red de frecuencia única. Esto fue posible debido al desarrollo de un decodificador de contenido 4K-UHDTV en tiempo real.

Por lo tanto KBS fue el primero en el mundo en transmitir contenido en 4K-UHDTV en vivo vía terrestre sobre una red de frecuencia única, este evento fue la final de la liga de básquetbol Coreana (KBL) en el 2014.

Durante este evento se estableció un evento público en la estación de Seúl, donde la gente pudo observar dicha transmisión en 4K.

Los televisores UHD contaban con un sintonizador DVB-T2 con un decodificador HEVC, el cual permitió la recepción directa de la señal terrestre 4K.

-En un intento de dar mayor publicidad a la transmisión terrestre 4K-UHDTV, se transmitieron desde Brasil, vía satélite, 3 partidos de la copa mundial de futbol 2014 en vivo

-En septiembre de 2015 se dio a conocer que Seoul Broadcasting System (SBS) en conjunto con LG, realizaron la primera transmisión en vivo 4K Ultra HD over-the-air (OTA) en Seúl empleando la tecnología ATSC 3.0.

Durante las pruebas se transmitieron y recibieron de manera móvil una señal con contenido UHD y otra HD simultáneamente en un solo canal de 6 MHz.

-En febrero de 2016 se realizó en Corea del Sur, la primera transmisión en vivo end-to-end 4K ultra HD, usando el estándar de nueva generación ATSC 3.0.

La transmisión se llevó a cabo desde un estudio del grupo SBS, donde una cámara tomaba imágenes en vivo las cuales eran enviadas a través de IP a un transmisor de la televisora ubicado en la montaña Gwanak.

Las señales 4K sobre IP fueron transmitidas en el aire usando el canal 53 y posteriormente recibidas con una simple antena y decodificadas con un receptor 4K Ultra HD ATSC 3.0, diseñado por LG Electronics.



### 3.5.2. Pruebas de campo en Francia [24]

-El objetivo de este experimento fue implementar una plataforma experimental para la transmisión lineal de contenido UHDTV desde la torre Eiffel con un flujo de datos de 40.215 Mb/s, con ayuda de nuevas tecnologías como son el códec HEVC y el estándar DVB-T2.

Para maximizar el throughput durante el experimento se transmitió una señal DVB-T2 multiplex sobre una red de frecuencia múltiple (MFN) con un GI=1/128.

La recepción de la señal era posible en cualquier punto dentro del radio de cobertura (25 Km de la antena transmisora), con un receptor tipo rake, una pantalla equipada con un sintonizador DVB-T2 y un chip decodificador HEVC.

Los parámetros y área de cobertura se muestran en la tabla 20.

Topología de red	MFN (DTTB)
Método de modulación	OFDM
Ancho de banda del canal/ Ancho de banda ocupado	8 / 7.77 MHz
Frecuencia de transmisión	514.167 MHz (UHF ch26)
Potencia de transmisión	100 W, ERP: 1000 W
Modo de transmisión	SISO
Modulación de la portadora	256-QAM
C/N (for Rician channel)	19.7 dB
FFT size (número de portadoras radiadas)	32k (22,465)
Intervalo de guarda (duración del intervalo)	1/128 (28 $\mu$ s)
Pilot profile	PP7
# de simbolos OFDM	60
Error-correcting code	Inner: LDPC, code rate = 2/3 Outer: BCH
Data rate	40.215 Mb/s
Video coding	HEVC (2160p(1) UHD-1 fase 1, 8 bit, 50 fps)
Estación transmisora	Eiffel Tower
Altura de la antena transmisora	313 m
Altera de la antena receptora	10 m
Radio de cobertura	(25 km)
Minimum median field strength	55 dB $\mu$ V/m at 10 m
UHDTV fase1 (3,840x2,160)	

Tabla 20. Parámetros de las pruebas en Francia [24].



-Transmisión en vivo del “Abierto de Francia” en 4K-UHDTV vía terrestre.

Durante el experimento se realizaron transmisiones en vivo y grabadas, aquí solo se mencionan las transmisiones en vivo del “Abierto de Francia”.

Para las transmisiones del “Abierto de Francia” se crearon dos Programas de transmisión UHD:

- Programa UHD 1: 22.5 Mb/s con codificación en tiempo real para transmisión en vivo.
- Programa UHD 2: 17.5 Mb/s con contenido pregrabado con codificación offline.

Ambos programas fueron a 50 fps.

Los bitrates se definieron por las siguientes razones:

- 17.5 Mb/s representa la calidad de dos canales UHDTV en una SFN T2 multiplex de 36 Mb/s.
- 22.5 Mb/s fue escogido para mostrar el impacto de agregar 5Mb/s a la calidad UHDTV

Este experimento fue un importante paso para la introducción de la UHDTV en Francia y muy probablemente sea el sucesor de la HD.

### 3.5.3. Pruebas de campo España

-La Corporación de Radio y Televisión Española (RTVE) junto con la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y otras importantes compañías Españolas se emprendieron una prueba UHDTV en 2014 [24], durante la cual se transmitió un documental acerca del museo Prado producido por la RTVE completamente en 4K.

Las primeras pruebas se basaron en el códec AVC/H.264 y a un frame rate de 25 fps. Posteriormente se utilizó el códec HEVC/H.265 a 50 fps. Diferentes bitrates



fueron empleados, desde 20 Mb/s hasta 35 Mb/s en todos los casos se utilizó el estándar DVB-T2. El área de cobertura de la transmisión cubrió el área de la Ciudad Universitaria desde un transmisor situado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la UPM

Los parámetros de la prueba, realizada el 24 de Junio de 2014 fueron los mostrados en la tabla 21.

Estándar de transmisión	DVB-T2
Ancho de banda	8 MHz
Frecuencia	754 MHz (Ch. 56 en región 1; frecuencia central)
Potencia	ERP: 125 W (H)
Modulación de la portadora	64 QAM
FFT size	32k extended
Intervalo de guarda (duración del intervalo)	1/128
DVB-T2 FEC	5/6
Pilot pattern	PP7
Capacidad teórica	36.72 Mb/s
Video coding	HEVC/H.265
Audio coding	E-AC-3 5.1
Bitrate usado en total	35 Mb/s
Estación transmisora.	ETSI de Telecomunicación (UPM).

Tabla 21. Parámetros de las pruebas realizadas en España [24].

-El 5 y 6 de noviembre de 2015 se llevó a cabo en la 4K World Submit de Sevilla España, la primera transmisión a nivel mundial UHD con HDR, WCG y sonido Dolby AC-4 sobre DVB-T2 [133].



La transmisión se realizó desde el centro emisor de Valencia de la Concepción en el Aljarafe sevillano, con una potencia de 500 W usando el estándar DVB-T2 a través del canal 36 de UHF.

Fue posible transmitir un flujo de datos de hasta 34 Mbit/s, haciendo uso de Dolby Vision para HDR codificado con HEVC.

#### 3.5.4. Pruebas de campo en Suecia [24]

-La transmisión fue principalmente realizada por TV-Plus el 23 de enero de 2014. Dos streams codificadas fueron transmitidas alternadamente durante la duración de las pruebas, los parámetros se muestran en la tabla 22.

Lugar de la transmisión	Estocolmo
Área de cobertura	Ciudad de Estocolmo
Potencia	35 kW
Sistema DTT	DVB-T2
Ancho de banda del canal	8 MHz
Modo de transmisión	32k, Modo extendido, GI = 19/256, 256QAM, FEC 3/5, PP4
Capacidad de multiplexado	31.7 Mb/s
Bit rate	24 Mb/s
Codec	HEVC
Estándar de la imagen	3 840x2 160p 29.97 frames/s 8 bits/pixel
Frecuencia usada	618 MHz (Ch 39 en Región 1)

Tabla 22. Parámetros de las pruebas en Suecia [24].

GI=Intervalo de guarda



### 3.5.5. Pruebas en Reino Unido

-La BBC realizó una serie de pruebas UHD durante las cuales se transmitió eventos de la copa mundial de futbol 2014 y los juegos de la mancomunidad 2014.

Las especificaciones de las pruebas se muestran en la tabla 23.

Lugar de transmisión	Área de cobertura	ERP	Modo de transmisión	Multiplex capacity	Bit rate	Resolución de imagen	Frecuencia
Crystal Palace	Gran Londres	40 KW	32K, modo extendido, GI=1/128, 256 QAM, FEC 2/3, PP7	40.2 Mbit/s	Variable (algunas pruebas a 35 Mbit/s)	Mescla de 3,840x2,160p a 50 fps y	586 MHz (ch 35 en región 1)
Winter Hill	Noreste de Inglaterra incluyendo Manchester y Liverpool	22.5 KW				3,840x2,160p a 59.94 fps	602 MHz (ch 37 en región 1)
Black Hill	Centro de Escocia incluido Glasgow y Edimburgo	39 KW				La mayoría de las pruebas a 8 bits por pixel, algunas a 10 bits.	586 MHz (ch 35 en región 1)

Tabla 23. Parámetros de las pruebas en el Reino Unido [24].

### 3.5.6. Pruebas de campo en Estados Unidos

-En octubre de 2014 Sinclair y Technicolor anunciaron el despliegue con éxito de la primera plataforma de prueba 4K Ultra HD ATSC 3.0, a través de la cual se realizó una transmisión over-the-air [82].

La plataforma utilizó HEVC escalable, MPEG-H audio y MPEG-MMT transport para transmitir contenido UHD en vivo y fue integrada dentro del sistema experimental OFDM de Sinclair en Baltimore.



-En abril de 2015 Sinclair y Technicolor realizaron con éxito la primera transmisión over-the-air a nivel mundial 4K Ultra HD ATSC 3.0 con contenido en alto rango dinámico y en vivo [85].

La transmisión se realizó desde la misma plataforma de prueba 4K Ultra HD ATSC 3.0 en el sistema OFDM de Sinclair. Dicha transmisión entregaba contenido con HDR en resoluciones HD y UHD totalmente compatible con equipos SDR. Además se realizaron pruebas de recepción en equipos móviles.

De igual forma que en las pruebas anteriores de este grupo de trabajo, se emplearon estándares MPEG (HEVC, SHVC, audio 3D de MPEG-H) para la compresión de la información.

-El 29 de junio de 2016 se puso en operación la primera estación de TV comercial con licencia que emplea el estándar ATSC 3.0 para transmitir contenido en 4K UHD HDR [134].

El canal estadounidense WRAL-T de Capitol Broadcasting, en Carolina del Norte, se convirtió en pionera al transmitir su noticiero nocturno en 4K UHD HDR. Las transmisiones iniciaron con la emisión del documental “Take me out to the bulls’ game” producido totalmente en UHD HDR. Al término de este se transmitió el noticiero totalmente en vivo.

Las transmisiones se realizaron en el canal 39 bajo una licencia experimental otorgada por la FCC.

### 3.5.7. Pruebas de campo Japón (8k) [24]

Pruebas de campo 8K en la ciudad de Hitoyoshi:

-Japón instaló una estación experimental de transmisión en la ciudad de Hitoyoshi, en estas pruebas se utilizaron tecnologías de doble polarización MIMO y ultra-



multilevel OFDM. El objetivo de las dos pruebas era hacer un test de transmisión y hacer mediciones en 52 puntos alrededor de Hitoyoshi.

En la tabla 24 se muestran las especificaciones de las pruebas de campo en 8K.

Método de Modulación	OFDM
Ancho de banda ocupado	5.57 MHz
Frecuencia de transmisión	671.142857 MHz (UHF ch46)
Potencia de transmisión	Ondas con polarización Horizontal : 10 W, ERP: 140 W Ondas con polarización Vertical : 10 W, ERP: 135 W
Portadora	4096-QAM
FFT size (número de portadoras radiadas)	32k (22,465)
Intervalo de guarda (duración del intervalo)	1/32 (126 $\mu$ s)
Error-correcting code	Inner: LDPC, code rate = 3/4 Outer: BCH
Capacidad de transmisión	91.8 Mb/s
Video coding	MPEG-4 AVC/H.264 (reemplazado por HEVC)
Audio coding	MPEG-4 AAC
Estación transmisora	Establecida en la estación retransmisora de NHK en Hitoyoshi
Altura de la antena transmisora	632 m sobre el nivel del mar (21 m sobre el nivel del piso)
Estación receptora	Centro Nousonkankyokaizen, Pueblo de Yunomae Prefectura de Kumamoto – approx. 27 km de la estación transmisora de prueba
Altura de la antena receptora	211 m sobre el nivel del mar (10 m sobre el nivel del piso)

Tabla 24. Especificaciones de las pruebas 8K en Japón [24].

LDPC: low density parity check

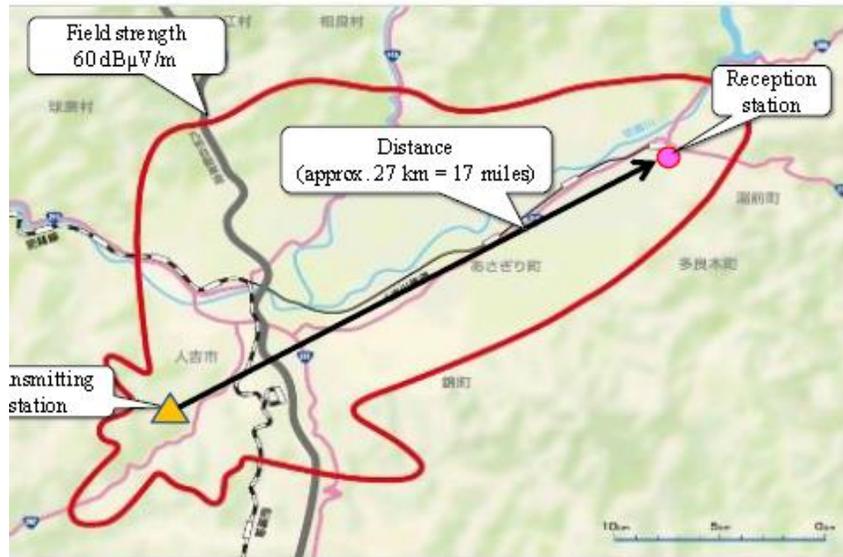


Figura 73. Área de las pruebas 8K [24].

El proceso de transmisión fue el siguiente:

La señal de entrada es codificada en códigos BCH y low density parity check (LDPC) cada bit se entrelaza y se mapea en la constelación. Después la señal es dividida en dos, una para la polarización vertical y otra para la polarización horizontal. Las señales son transformadas en el dominio del tiempo con el uso de la transformada inversa rápida de Fourier y se le agregan los intervalos de guarda.

Las señales del modulador son convertidas en señales de RF de la misma frecuencia usando up-converters. Posteriormente la señal es amplificada en potencia y se transmite con una antena de doble polarización.

Las señales son recibidas con una antena Yagi de doble polarización. Cada una de las señales se hace pasar por un filtro paso banda. Para su amplificación se utilizan amplificadores de bajo ruido (LNA) y se convierten en señales de frecuencia intermedia con un down-converter. Las señales de salida pasan al demodulador.



En el demodulador las señales son convertidas al dominio de la frecuencia y finalmente se decodifican.

Las señales fueron transmitidas en un canal de la banda UHF de 6 MHz de ancho de banda. La distancia entre la estación transmisora y la estación receptora fue de 27 Km.

El ambiente de propagación fue clasificado en cuatro categorías: línea de vista (LoS), sin línea de vista (NLoS) con una fuerte intensidad de campo (por encima de 60 dB $\mu$ V/m), NLoS con moderada intensidad de campo (40-60 dB $\mu$ V/m) y NLoS con débil intensidad de campo (por debajo de 40 dB $\mu$ V/m).

Las conclusiones del experimento muestran que las cualidades de propagación MIMO empeoran empezando con LoS seguido por NLoS con una fuerte intensidad de campo, NLoS con moderada intensidad de campo y con los resultados menos favorables NLoS con débil intensidad de campo. El orden se atribuye al incremento del cruce de los componentes de la onda polarizada.

-Pruebas de campo 8K-UHDTV en la ciudad de Hitoyoshi usando un sistema SFN (2x2 MIMO STC-SFN transmission system)

En febrero de 2015 Japón realizaron pruebas 8K-UHDTV en una red de frecuencia única (SFN) usando dos estaciones transmisoras para formar un sistema 2x2 MIMO Space Time Coding (STC)-SFN. El método STC fue utilizado para mejorar la confiabilidad de una transmisión con un alto flujo de datos.

El sistema estaba conformado por dos estaciones experimentales, una en Hitoyoshi y otra en Mizukami. La distancia entre ambas estaciones era de 38 Km. Las dos estaciones emplearon MIMO space division multiplexing (SDM) de doble polarización.

Los parámetros de la transmisión se muestran en la tabla 25.



Método de modulación	OFDM
Ancho de banda ocupado	5.57 MHz
Modulación de la portadora	4096-QAM
FFT size (número de portadoras radiadas)	32K (22,465)
Intervalo de guarda (duración del intervalo)	1/32 (126 $\mu$ s)
Error-correcting code	Inner code: LDPC, coding rate $R = 3/4$ Outer code: BCH
Capacidad de transmisión	91.8 Mbps

Tabla 25. Pruebas 8K realizadas en Japón en un sistema SFN [24].

Especificaciones para las estaciones transmisoras de Hitoyoshi y Mizukami:

	Estación de Hitoyoshi	Estación de Mizukami
Frecuencia de transmisión	671.142857 MHz (UHF ch46 en Japón)	
Potencia de transmisión	Horizontal: 10 W Vertical: 10 W	Horizontal: 3 W Vertical: 3 W
Potencia radiada aparente (ERP)	Horizontal: 140 W Vertical: 135 W	Horizontal: 25 W Vertical: 25 W
Altura de la antena transmisora	632 m sobre el nivel del mar	1080 m sobre el nivel del mar

Tabla 26. Especificaciones de las estaciones transmisiones 8K en Japón [24].



Capítulo 3. Televisión en Ultra Alta Definición (UHDTV).

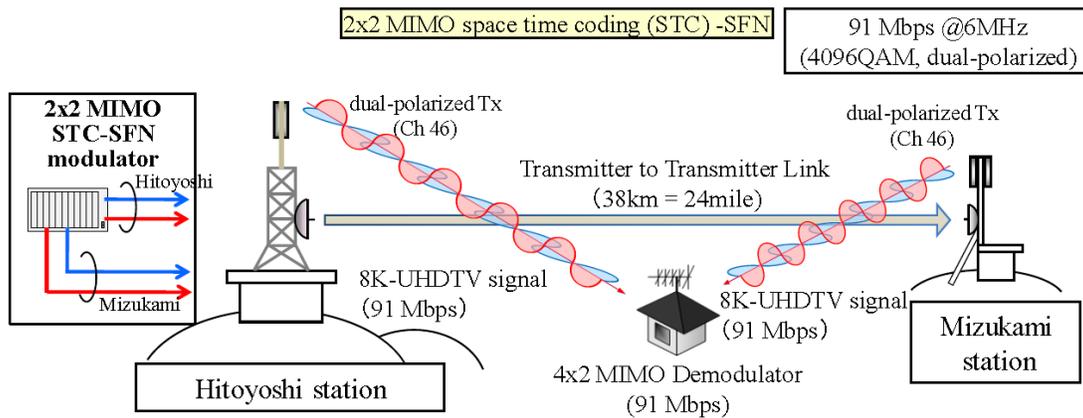


Figura 74. Diagrama del sistema 2x2 MIMO STC-SFN [24].

Las mediciones se realizaron en 3 puntos dentro del área de traslape cubierta por las dos estaciones transmisoras.

Estas pruebas mostraron severas mejoras sobre sistemas SFN convencionales tanto en el espectro recibido como en el incremento de la potencia de hasta 3dB en algunos puntos de recepción.

Como es posible observar, cada prueba que se ha realizado cuenta con parámetros diferentes, tanto en las características de la imagen UHD (HDR, WCG, bits por muestra y cuadros por segundo), como en tecnología empleada para su transmisión. Esta diversidad de pruebas demuestra principalmente dos aspectos: una tecnología que aún se encuentra en vías de desarrollo con las limitaciones que esto implica y, la falta de un conceso a nivel mundial para entregar contenido en UHD.

Sin embargo esta competencia por lograr mejorar y preservar la tecnología de cada región, brinda opciones donde es posible analizar las ventajas y desventajas de cada sistema con fin de mejorar la experiencia del televidente. Además con estas pruebas logra llamar la atención para seguir apostando por la televisión digital terrestre.



### Capítulo 3. Televisión en Ultra Alta Definición (UHDTV).



Dentro de estas pruebas los aspectos positivos más destacados que vale la pena mencionar son: en primer lugar, el interés de la industria de las telecomunicaciones por apoyar y mejorar uno de los medios de comunicación electrónica más longevo y en segundo lugar, el lograr la transmisión de contenido UHD en un solo canal de televisión terrestre (6 u 8 MHz) incluso aún con contenido HDR.

## Conclusiones.

---

La principal ventaja que ofrece la UHDTV es una mayor calidad en la imagen, lo que permite una mejor y más inmersiva experiencia. Aunque es posible pensar que el mirar o no un programa de televisión recae únicamente en la calidad o el interés que genera este en el espectador, sin embargo la calidad de la imagen juega un papel importante al tomar esta decisión.

La forma en que la calidad en la imagen afecta la relación que tiene el espectador con el contenido radica en los siguientes aspectos: al incrementar la calidad de la imagen, el nivel estrés que experimenta el espectador disminuye; además la percepción en la duración del programa también disminuye y finalmente el espectador se involucra más con el contenido mientras la calidad aumenta. Todo esto sumado a que el momento en que se cambia de canal o de programa tiende a prolongarse por más tiempo, lo cual se traduce en que el espectador verá por más tiempo el programa.

Por tales motivos, la tecnología UHD o también conocida como 4K, es actualmente muy atractiva debido a que permite una visualización de la imagen con una alta resolución a una corta distancia, sin la deformación de la imagen, imitando una experiencia muy parecida a la cinematográfica. Conforme pasa el tiempo es más fácil encontrar televisores capaces de desplegar imágenes en 4K. Esto en gran parte debido al esfuerzo en el desarrollo de mejoras para la distribución y creación de contenidos que fue motivado por el lanzamiento del códec HEVC en el 2013.

Si bien esta es una tecnología que se encuentra aún en desarrollo, los avances en la producción de equipo UHD demuestran el gran interés por que este sea el sucesor del despliegue de contenidos audiovisuales así como ahora la HD ha superado en gran medida a la SD.

La intención de este trabajo era mostrar una descripción las características que engloban el término UHDTV y el avance actual en el proceso de desarrollo y despliegue de esta en el mundo de las comunicaciones, para poder concluir si era posible la transmisión de este formato a través de la televisión terrestre. Para poder determinar si existen evidencias de dicha transición, es necesario tomar en cuenta los pros y contras que involucra la UHDTV actualmente.

Al ser esta una tecnología que emplea una mayor cantidad de información, una de las principales limitantes en la distribución de esta es el ancho de banda requerido, sin embargo las mejoras y adecuaciones que se han implementado en el códec HEVC, han contribuido en la reducción del flujo de bits considerablemente, siendo esto lo que dirigió los esfuerzos en hacer posible la transmisión de contenido en este formato, haciendo uso del ancho de banda asignado para un canal de televisión abierta.

En este trabajo se mostraron los avances en la UHDTV, logrados hasta el momento, en el campo de la radiodifusión. Sin duda alguna, el estándar ATSC 3.0 se coloca como la opción más prometedora para distribuir contenidos en UHD, debido al desarrollo de este dirigido a dispositivos fijos y móviles, además de tomar en cuenta todos los parámetros del formato UHDTV. Sin embargo no hay que demeritar las pruebas realizadas, principalmente en Europa, con el estándar DVB-T2. Los resultados de esta competencia entre estándares, se ven reflejados en la mejora de la factibilidad y calidad de cada sistema, brindando múltiples opciones que se adecuan a las necesidades y requerimientos de cada país.

Desafortunadamente, el avance en cuanto a hardware UHD, ha sido desproporcionado en comparación a la cantidad de contenidos en 4K actualmente disponibles y no solo eso, los medios actuales por los cuales es posible tener acceso a estos, es vía streaming y vía satélite, lo que implica que aparte de un televisor UHD, es necesario una conexión a internet de por lo menos 25 Mbits/s o un receptor satelital, ambas opciones implican un costo mayor que debe realizar el consumidor.

Una complicación que actualmente enfrentan las radiodifusoras es el incremento de los servicios de streaming. Estos han aumentado en las preferencias de los consumidores, gracias a las facilidades en acceso a contenidos que otorga, generando una pérdida de audiencia para las radiodifusoras a nivel mundial, lo cual podría marcar el comienzo de una revolución en la forma en la que se ve la televisión, lo que resalta aún más la atención por el estándar ATSC 3.0 por ser un sistema que desde el principio de su desarrollo, fue concebido tomando en cuenta las necesidades y la forma en que actualmente el público busca y accede a contenidos, dicho avance podría contribuir a una mejor transición en esta revolución.

Hay que tomar en cuenta que el cambio de transmisión de señales HD a UHD tomará un buen tiempo todavía, ya que el cambio de SD a HD aún no se ha logrado del todo a nivel mundial. Haciendo una analogía con el proceso de transición a transmisiones en HD que comenzó a principios de los noventa, con las demostraciones de los primeros sistemas de transmisión de señales HD totalmente digitales en canales de 6 MHz y la aprobación en 1996 del primer estándar de transmisión terrestre de televisión digital HD y SD en el mundo; hasta el despegue de su popularidad gracias a una mayor cantidad de contenidos ofrecidos por más canales HD disponibles a nivel mundial, a partir de mediados de la década de los 2000. Proceso que duró aproximadamente 15 años. Tomando en cuenta los avances en cuestión de tecnología, estandarización y las transmisiones de prueba, es posible decir que la UHD TV está despegando, por lo que el proceso de una posible transición podría no tomar más de 15 años. Aunque, se tienen intenciones de que antes de pasar al 4K, primero se pase a la transmisión full HD (1080p) con la adición de HDR.

No obstante, la discusión que genera este nuevo formato demuestra la atención tanto de los distribuidores y organizaciones reguladoras como de los espectadores por, en un futuro visualizar imágenes UHD de forma cotidiana.

## Referencias.

---

- [1] M. El-Hajjar, L. Hanzo. A Survey of Digital Television Broadcast Transmission Techniques. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 15, No. 4, Fourth Quarter 2013.
- [2] L. A. Albornoz, M. T. García Leiva. La televisión digital terrestre Experiencias nacionales y diversidad en Europa, América y Asia. La Crujia Ediciones 2012.
- [3] Y. Wu, S. Hirakawa, U. Reimers, J. Whitaker. Overview of Digital Television Development Worldwide. Proceedings of the IEEE, Vol. 94, No. 1, January 2006.
- [4] Richard Salmon. The changing world of TV displays. EBU Technical Review, April 2004.
- [5] Fundamentals of Liquid Crystal Displays – How They Work and What They Do. Fujitsu Microelectronics America, Inc, 2006.
- [6] R. Melendreras, I. Sarabia, A. Cano. Guía Para El Usuario de La Televisión en Alta Definición. Digital Audiovisual Communication Research Group. HD Forum Italia. Universidad Católica San Antonio de Murcia. 2008.
- [7] D. Mentley, State of Flat-Panel Display Technology and Future Trends. Proceedings of the IEEE, Vol. 90, No. 4, April 2002.
- [8] B. Milne, J. Burroughes, T. Clapp, R. Miller, B. Taylor. Flat panel displays in South Korea – present and future. Cambridge University, Engineering Department. UK Department of Trade and Industry. December 2003.
- [9] P. Putman. Flat Panel Displays. A comprehensive look at today's leading formats – Plasma and LCD. Panasonic. 2007.
- [10] R. Chernock, D. Gómez-Barquero. ATSC 3.0 Next Generation Digital TV Standard-An Overview and Preview of the Issue. IEEE Transactions on Broadcasting. Vol 62, No 1. March 2016.
- [11] J. Lee, L. N. Liu, S. Wu. Introduction to Flat Panel Displays. JohnWiley & Sons Ltd. 2008.

- [12] M. A. Klompenhouwer. Flat Panel Display Signal Processing. Analysis and Algorithms for Improved Static and Dynamic Resolution. Royal Philips N.V. 2006.
- [13] ITU-R BT.601-7. Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios. International Telecommunications Union. 2011.
- [14] ATSC Digital Television Standard, Part 1 – Digital Television System. Advanced Television Systems Committee. 2013.
- [15] SMPTE 296M. 1280 x 720 Progressive Image Sample Structure — Analog and Digital Representation and Analog Interface. Society of Motion Picture & Television Engineers. 2001.
- [16] M. Sugawara, Super Hi-Vision- research on a future ultra-HDTV system. NHK, EBU Technical Review. 2008.
- [17] Video System Requirements for UHD TV and an Advanced 1080p Television Format. EBU Technical Report. Geneva. 2016.
- [18] SMPTE 274M. 1920 x 1080 Scanning and Analog and Parallel Digital Interfaces for Multiple Picture Rates. Society of Motion Picture & Television Engineers. 2001.
- [19] ITU- R-REP-BT.801-4. Situación actual de la Televisión de Alta Definición. International Telecommunications Union. 1990.
- [20] ITU-R BT.1120-8. Digital interfaces for HDTV studio signals. International Telecommunications Union. 2012.
- [21] ITU-R BT.709-6. Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange. International Telecommunications Union. 2015.
- [22] NEC. OLED: An emerging display technology. Nippon Electric Company. 2007.
- [23] Panasonic. Are all Laser Projectors Created Equal? Panasonic Corporation 2016.

- [24] ITU-R BT.2343-1. Collection of field trials of UHD TV over DTT networks. International Telecommunications Union. 2016.
- [25] ITU-R BT.2246-5. The present state of ultra-high definition television. International Telecommunications Union. 2015.
- [26] ITU-R BT.2100-0. Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange. International Telecommunications Union. 2016.
- [27] ITU-R BT.2073-0. Use of the high efficiency video coding (HEVC) standard for UHD TV and HDTV broadcasting. International Telecommunications Union. 2015.
- [28] M. Sugawara, K. Masaoka, M Emoto, Y. Matsuo, Y. Nojiri. Research on Human Factors in Ultra-Uigh-definition Television to Determine its Specifications. NHK Science and Technical Research Laboratories. October 2007.
- [29] K. Masaoka, T. Niidab, M. Murakamib, K. Suzukib, M. Sugawaraa, Y. Nojiria. Perceptual limit to display resolution of images as per visual acuity. NHK Science and Technical Research Laboratories. February 2008.
- [30] The Complete Guidebook – a Reference Tool for Next-Generation Video. Dolby, Harmonic, the Diffusion Group. 2015.
- [31] W. Fischer. Digital Video and Audio Broadcasting Technology. A Practical Engineering Guide. Springer. 2010.
- [32] M. Nilsson. Ultra High Definition Video Formats and Standardization. BT Media and Broadcast. April 2015.
- [33] UHD TV Ecosystem Study. Group Report. Society of Motion Picture & Television Engineers. March 2014.
- [34] White Book Beyond HD. Working Group “Devices and Connectivity” of the German TV Platform. February 2014.
- [35] ATSC 3.0 Overview. Comark Communications, Hitachi. April. 2016.

- [36] ATSC Standard: A/321, System Discovery and Signaling. Advanced Television Systems Committee. March 2016.
- [37] The UHD TV Quality of Experience. Society of Motion Picture & Television Engineers. 2015.
- [38] UHD TV Ecosystem Reference Diagram. Society of Motion Picture & Television Engineers. 2014.
- [39] K. Masaoka, T. Yamashita, Y. Nishida, M. Sugawara. Color Management for Wide-Color-Gamut UHD TV Production. Society of Motion Picture & Television Engineers. July 2016.
- [40] UHD 4K end-to-end broadcasting over DVB-T2. Rohde & Schwarz. 2015.
- [41] ITU-R BT.1127. Relative quality requirements of television broadcast systems. International Telecommunications Union. 1994.
- [42] M. Sugawara, M. Emotoer, K. Masaoka, Y. Nishida, Y. Shishikui. SUPER Hi-VISION for the Next Generation Television. ITE Transactions on Media Technology and Applications (MTA) Vol. 1, No. 1. 2013.
- [43] Y. Dong, P. Nasiopoulos, M. T. Pourazad. HDR Video Compression Using High Efficiency Video Coding (HEVC). The Sixth International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies. 2012.
- [44] G. Cox. An Introduction to Ultra HDTV and HEVC. ATEME. July 2013.
- [45] G. J. Sullivan, J. Ohm, W. Han, T. Wiegand. Overview of the High Efficiency Video Coding.
- [46] (HEVC) Standard. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, VOL. 22, NO. 12. December 2012.
- [47] ITU-R BT.2390-0. High dynamic range television for production and international programme exchange. International Telecommunications Union. 2016.
- [48] T. Schulte, J. Barsotti. HDR Demystified Emerging UHD TV Systems. SpectraCal. 2016.

- [49] Dolby Vision profiles and levels. Dolby Laboratories. April 2016.
- [50] Dolby Vision. Dolby Laboratories. 2016.
- [51] T. Borer, A. Cotton. A “Display Independent” High Dynamic Range Television System. BBC Research & Development. September 2015.
- [52] Understanding DVB-T2. Key technical, business, & regulatory implications. The Digital Terrestrial Television Action Group. 2009.
- [53] UHD for Broadcast and The DVB Ultra HD-1 Phase 2 Standard. Harmonic Inc. 2016.
- [54] TV Programme Accommodation in a DVB-T2 Multiplex for (U)HDTV with HEVC Video Coding. European Broadcasting Union. March 2016.
- [55] Second Generation Terrestrial. The World’s Digital Terrestrial TV Standard. Digital Video Broadcast. August 2016.
- [56] L. Fay, L. Michael, D. Gómez-Barquero, N. Ammar, M. W. Caldwell. An Overview of the ATSC 3.0
- [57] Physical Layer Specification. IEEE Transactions on Broadcasting. 2016.
- [58] S. Hahm, Z. Yim, B. Kim, S. Jeon, I. Cho. Application of HEVC and DVB-T2 to Terrestrial 4K.
- [59] UHD TV Broadcast Over-the-air Trials. Technical Research Institute, KBS (Korean Broadcasting System). 2013.
- [60] Understanding ultra-high definition television. Ericsson. April 2015.
- [61] V. Pla, J. de la Torre. UHD TV ¿4K? Nos Interesa. TM Broadcast. 2014.
- [62] A Guide to MPEG Fundamentals and Protocol Analysis (Including DVB and ATSC). Tektronix. September 2002.
- [63] L. Ochoa, F. Utray. Guía 4K 709. 709 MediaRoom. Junio 2015.

## Referencias electrónicas.

---

- [64] <http://www.atsc.org>.
- [65] <http://papel.revistafibra.info/formato-4k-ultra-hd/>
- [66] <http://tilanotv.es/general/nueve-herramientas-usadas-en-el-codec-hevc-i/>
- [67] <https://www.adslzone.net/2015/05/21/probada-con-exito-la-tdt-en-uhd/>
- [68] <http://4k.com/news/a-closer-look-at-the-new-ultra-hd-premium-standard-of-the-uhd-alliance-12072/>
- [69] <http://www.audioholics.com/hdtv-formats/atsc-3.0>
- [70] <https://www.nhk.or.jp/str/vision/r1/r1-e.htm>
- [71] <https://www.revolvy.com/main/index.php?s=Ultra-high-definition%20television>
- [72] <https://www.cnet.com/news/what-is-uhd-alliance-premium-certified/>
- [73] <http://4k.com/high-dynamic-range-4k-tvs-everything-need-know-hdr-contrast-wide-color-gamut-tvs-content-offer/>
- [74] <https://www.avforums.com/article/what-is-hdr.11039>
- [75] <http://www.nhk.or.jp/str/aboutstr/evolution-of-tv-en/p19.html>
- [76] <http://www.liquisearch.com/isdb/isdb-s/history>
- [77] <https://www.dvb.org/about/history>
- [78] [https://www.benton.org/initiatives/obligations/charting\\_the\\_digital\\_broadcasting\\_future/sec1](https://www.benton.org/initiatives/obligations/charting_the_digital_broadcasting_future/sec1)
- [79] <http://www.nytimes.com/1991/12/03/business/a-milestone-in-high-definition-tv.html?pagewanted=all>

- [80] <http://www.ctoic.net/blog/the-state-of-hdr-in-broadcast-and-ott-at-year-end-2015/>
- [81] <https://www.lightillusion.com/uhd-tv.html>
- [82] <http://www.tvtechnology.com/resources/0006/coming-soon-atsc-30/278850>
- [83] <http://www.tvtechnology.com/atsc3/0031/report-south-korea-adopts-atsc-30/279108>
- [84] <http://www.tvtechnology.com/news/0002/sinclair-demos-hdr-4ktv-over-atsc-30-in-vegas/277546>
- [85] <http://www.tvtechnology.com/news/0002/technicolor-and-sinclair-demo-hdr-uhd-live-over-the-air-broadcast/275489>
- [86] <http://www.tvtechnology.com/news/0002/atsc-30-tested-with-4k-mobile-in-korea-by-lg-sbs/277031>
- [87] <http://www.technicolor.com/en/who-we-are/press-news-center/press-releases/technicolor-and-sinclair-broadcast-group-demonstrate-world-s-first-high-dynamic-range-ultra-hd-live-over-air-broadcast>
- [88] <http://whatis.techtarget.com/definition/Flat-panel-TV-Guide>
- [89] <https://www.digitaltrends.com/home-theater/oled-vs-led-which-is-the-better-tv-technology/>
- [90] <https://news.samsung.com/global/the-picture-quality-to-look-for-in-uhd-tvs>
- [91] <http://informationdisplay.org/IDArchive/2012/NovemberDecember/FrontlineTechnologySuperHiVisionasNextGen.aspx>
- [92] <http://minnesota.cbslocal.com/2014/10/16/good-question-when-will-we-see-broadcasts-in-4k/>
- [93] <http://www.tvtechnology.com/atsc3/0031/getting-from-here-to-atsc-30/280299>
- [94] <https://lcdtvbuyingguide.com/4k-tv-reviews/oled-vs-4k.html>

- [95] <http://www.hdtvtest.co.uk/news/4k-plasma-201311133417.htm>
- [96] <https://www.thebroadcastbridge.com/content/entry/5458/germany-kicks-off-dvb-t2-now-that-hevc-coding-available>
- [97] <https://www.christiedigital.com/en-us/display-technology/laser-projection/laser-phosphor-projection>
- [98] <https://www.cnet.com/news/why-lasers-are-the-future-of-projectors/>
- [99] <https://www.avinteractive.com/features/technology/laser-special-a-colour-consultation-09-02-2016/>
- [100] <http://es.dtvstatus.net/>
- [101] <https://www.dibeg.org/>
- [102] <https://es.slideshare.net/javierconj1/formatos-de-televisin-digital>
- [103] [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdent1/pagina\\_4.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdent1/pagina_4.asp)
- [104] <http://slideplayer.es/slide/8362777/>
- [105] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/cie.html>
- [106] <https://www.videoedicion.org/documentacion/article/la-compresion-del-video-digital/>
- [107] <http://slideplayer.es/slide/10190077/>
- [108] <http://www.racketboy.com/forum/viewtopic.php?p=204314>
- [109] <http://www.rtings.com/tv/learn/lcd-vs-led-vs-plasma/how-they-work>
- [110] <http://www.maxi-pedia.com/TFT+LCD+display+monitor+panel>
- [111] [https://www.swarthmore.edu/NatSci/echeeve1/Class/e91/Lectures/E91\(9\)LCD.pdf](https://www.swarthmore.edu/NatSci/echeeve1/Class/e91/Lectures/E91(9)LCD.pdf)
- [112] <http://www.marcelpatek.com/lcd.html>

- [113] <http://yoreparo.com/tv/televisores/lcd/preguntas/1512852/necesito-el-esquema-electrico-de-tv-plasma-lg-50pn4500-urgen>
- [114] <http://4k.com/oled-4k-tvs-vs-lcd-4k-tvs-the-comparison-across-8-key-points-12320-2/>
- [115] <http://www.imagenoptica.com.mx/pdf/revista37/cuando.htm>
- [116] [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.1201-1-200403-W!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.1201-1-200403-W!!PDF-E.pdf)
- [117] <http://www.digital-photo-secrets.com/tip/2556/creating-movement-by-adding-motion-blur/>
- [118] <http://car.france3.mars.free.fr/Formation%20INA%20HD/HDTV/HDTV%20%202007%20v35/SMPTE%20normes%20et%20confs/Contrastm.pdf>
- [119] <https://www.atsc.org/newsletter/transition-deployment-guide-helps-broadcasters-plan-next-gen-tv/>
- [120] <https://www.cnet.com/news/technicolor-enters-race-for-high-dynamic-range/>
- [121] <https://www.sony.com/electronics/projector/vpl-gtz1>
- [122] [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.1769-0-200607-W!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.1769-0-200607-W!!PDF-E.pdf)
- [123] [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2020-2-201510-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2020-2-201510-I!!PDF-E.pdf)
- [124] [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.2051-0-201402-S!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.2051-0-201402-S!!PDF-E.pdf)
- [125] <http://ieeexplore.ieee.org/browse/standards/number/smpte/?reload=true>
- [126] [https://www.dvb.org/resources/public/factsheets/dvb\\_-\\_phasing\\_in\\_uhd.pdf](https://www.dvb.org/resources/public/factsheets/dvb_-_phasing_in_uhd.pdf)
- [127] [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/101100\\_101199/101154/01.09.01\\_60/ts\\_101154v010901p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/101100_101199/101154/01.09.01_60/ts_101154v010901p.pdf)

- [128] [https://www.arib.or.jp/english/std\\_tr/broadcasting/sb\\_ej.html](https://www.arib.or.jp/english/std_tr/broadcasting/sb_ej.html)
- [129] [http://www.tta.or.kr/English/new/main/news\\_list.jsp?submenu\\_kind=8](http://www.tta.or.kr/English/new/main/news_list.jsp?submenu_kind=8)
- [130] <https://www.cta.tech/Consumer-Resources/Guides/4K-Ultra-HD.aspx>
- [131] <http://www.digitaleurope.org/Services/High-Definition-Logos/UHD>
- [132] <https://ultrahdforum.org/resources/phasea-guidelines-description/>
- [133] <http://www.panoramaaudiovisual.com/2015/11/09/concluye-con-exito-la-primera-emision-mundial-de-4k-en-dvb-t2-con-hdr-wcg-y-dolby-ac-4-llevada-a-cabo-por-cellnex-telecom/>
- [134] <https://www.atsc.org/newsletter/capitol-broadcasting-launches-atsc-3-0-television-station/>
- [135] <http://www.nab.org/xert/scitech/2009/TVTechCheck/tv022309.asp>
- [136] <https://es.slideshare.net/mwalendo/h-hevc>
- [137] <https://www.dvb.org/news/delivering-regional-dvb-t2-services>

# Índice de figuras

---

Figura 1. Prototipos de equipo MUSE. Modulador (izquierda) receptor (derecha) .....	3
Figura 2. Prototipo del sistema creado por Digital HDTV Grand Alliance y miembros de este grupo .....	6
Figura 3. ATSC logo .....	7
Figura 4. DVB logo .....	8
Figura 5. ISDB-T logo .....	100
Figura 6. Distribución de los sistemas digitales de TV en el mundo .....	12
Figura 7. Proceso de captura de la imagen y digitalización de sus componentes .....	166
Figura 8. Muestreo de las componentes de video según la norma ITU-BT.R.601 .....	177
Figura 9. Niveles de voltaje con sus respectivos niveles de cuantificación de la componente Y .....	188
Figura 10. Niveles de voltaje con sus respectivos niveles de cuantificación de las componentes CB y CR .....	18
Figura 11. Secuencia de video con imágenes I, P y B.....	20
Figura 12. Zonas de la imagen donde se aplica la redundancia espacial .....	211
Figura 13. Redundancia temporal .....	21
Figura 14. Esquema de digitalización de audio .....	233
Figura 15. Cadenas elementales MPEG (PES) .....	244
Figura 16. Orden de los paquetes en la cadena de transporte MPEG-2 .....	255
Figura 17. Sistema ATSC .....	26
Figura 18. Sistema DVB-T .....	28
Figura 19. Segmentación del ancho de banda en ISDB-T .....	30
Figura 20. Sistema ISDB .....	30
Figura 21. Relaciones de aspecto 4:3 (izquierda) y 16:9 (derecha) .....	33
Figura 22. Formato 1080i .....	34
Figura 23. Formato 720p. ....	35
Figura 24. Diagrama del espacio de color CIE 1931 con las longitudes de onda en nanómetros mostradas en la frontera curvada .....	36
Figura 25. Espacio de color para la HDTV .....	36
Figura 26. Muestreo de una señal HDTV .....	39
Figura 27. Comparación en anchura de una pantalla CRT y una pantalla plana LCD .....	42
Figura 28. Paso de luz a través del cristal líquido.....	44
Figura 29. Pantalla LCD reflexiva .....	45
Figura 30. Pantalla LCD transmisiva .....	45
Figura 31. Estructura de una celda LCD TFT .....	46
Figura 32. Pantalla LCD iluminada con lámparas fluorescentes .....	47
Figura 33. Pantallas LCD iluminada con arreglos de LED. Full array (izquierda), el mejor, edge-lit (derecha) más común .....	47
Figura 34. Estructura de una celda de plasma .....	49
Figura 35. Estructura de una pantalla de plasma .....	50
Figura 36. Estructura de una celda OLED .....	51
Figura 37. Comparación de la estructura de un pixel LCD (izquierda) y uno OLED (derecha) .....	52
Figura 38. Resoluciones de imagen de la televisión, desde SDTV hasta UHDV 8K .....	58
Figura 39. Pilares de la UHD .....	59
Figura 40. Imágenes utilizadas en los experimentos .....	60
Figura 41. Gráfica de los resultados del estudio realizado .....	60
Figura 42. Relación entre la frecuencia espacial en cpd y el tamaño de una letra .....	61
Figura 43. Desenfoque por movimiento .....	63
Figura 44. Material mostrado en el experimento .....	64

Figura 45. Calidad de la imagen a diferentes resoluciones temporales .....	65
Figura 46. Frecuencias críticas de fusión vs campo de visión horizontal .....	66
Figura 47. Espacio de color HD (izquierdo) vs UHD (derecho).....	69
Figura 48. Efecto banding.....	70
Figura 49. Diferentes tonalidades dependiendo el número de bits empleados por muestra.....	71
Figura 50. Ejemplo de las intensidades de brillo presentes en la naturaleza .....	73
Figura 51. SDR (izquierda) y simulación HDR (derecha), se nota un mayor detalle en zonas brillosas y obscuras .....	74
Figura 52. Sistema multicanal 22.2 .....	83
Figura 53. Tamaños de los CTUs .....	84
Figura 54. Quadtree Coding Structure.....	85
Figura 55. Ejemplo de una imagen dividida en CUs.....	86
Figura 56. Multiple PLP DVB-T2.....	89
Figura 57. ATSC 3.0 logo .....	90
Figura 58. Jerarquía del TG3 .....	91
Figura 59. PLP's en ATSC 3.0 .....	93
Figura 60. Decodificación Single Layer Dolby Vision .....	98
Figura 61. Decodificación Dual Layer Dolby Vision .....	99
Figura 62. Tasas de bits máximas y mínimas para UHD con HDR Dolby Vision .....	99
Figura 63. Flujo de trabajo HDR de Technicolor .....	100
Figura 64. Separación de pixeles plasma .....	101
Figura 65. Proyector láser con tres micropantallas LCD .....	104
Figura 66. Proyector láser con tres DMD.....	104
Figura 67. Comparación de las distancias de proyección de un proyector de tiro corto y un proyector convencional .....	105
Figura 68. Logo Ultra HD premium .....	117
Figura 69. Logo 4K Ultra HD otorgado por la CTA .....	118
Figura 70. Logo Ultra HD otorgado por la DigitalEurope .....	1199
Figura 71. Configuración del sistema de la fase 1 .....	120
Figura 72. Configuración del sistema de la fase 2 .....	122
Figura 73. Área de las pruebas 8K .....	131
Figura 74. Diagrama del sistema 2x2 MIMO STC-SFN .....	134

# Índice de tablas.

---

Tabla 1. Coordenadas de los colores primarios de las UHDTV .....	37
Tabla 2. Requerimientos para los equipos HD y HD 1080p.....	41
Tabla 3. Plasma pros y contras.....	53
Tabla 4. LCD Pros y Contras. ....	54
Tabla 5. LED TV Pros y Contas. ....	54
Tabla 6. OLED pros y contras.....	55
Tabla 7. Espacio de color UHDTV .....	68
Tabla 8.Bitrates UHD 4k/8k 10 y 12 bits. ....	87
Tabla 9. Flujos máximos de bits para cada resolución dependiendo el perfil de compresión.....	88
Tabla 10. Comparación entre DVB-T y DVB-T2. ....	90
Tabla 11. Code rates y constelaciones con LDPC = 64000 bits .....	93
Tabla 12. Code rates y constelaciones con LDPC 16000 bits .....	93
Tabla 13. Parámetros de modulación en ATSC 3.0 para el ejemplo de la página anterior .....	94
Tabla 14. Flujos de datos y niveles de SNR en ATSC 3.0 para el ejemplo de la página anterior .....	94
Tabla 15. Seis casos de modo de operación .....	96
Tabla 16. Parámetros de la UHDTV definidos en la recomendación ITU-R BT.1769.....	107
Tabla 17. Flujo máximo de bits para la transmisión con HEVC .....	108
Tabla 18. Especificaciones de las transmisiones .....	121
Tabla 19. Potencias y canales empleados en las pruebas .....	122
Tabla 20. Parámetros de las pruebas en Francia .....	124
Tabla 21. Parámetros de las pruebas realizadas en España .....	126
Tabla 22. Parámetros de las pruebas en Suecia .....	127
Tabla 23. Parámetros de las pruebas en el Reino Unido.....	128
Tabla 24. Especificaciones de las pruebas 8K en Japón .....	130
Tabla 25. Pruebas 8K realizadas en Japón en un sistema SFN.....	133
Tabla 26. Especificaciones de las estaciones transmisiones 8K en Japón .....	133