

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura

MÁXIMAS TASAS DE TRANSFERENCIA DE DATOS DE UNA RED HFC

Tesis para optar al título de Magister en Sistemas y Redes de
Telecomunicaciones

ABEL ALEJANDRO GRELA

Director: Jorge Emilio Monzón

2018

A mi esposa e hijos.

ÍNDICE

Índice de tablas	iv
Índice de figuras	v
Resumen	vi
Abstract	vii
Objetivos	viii
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Evolución de redes de una vía a dos vías HFC	4
1.2.1 La fibra óptica en las redes HFC	6
1.2.2 Limitaciones y especificaciones de la planta HFC	11
2. Normas DOCSIS, protocolos de señalización y aplicaciones	14
2.1 Norma DOCSIS	14
2.2 Evolución de DOCSIS y capacidades de servicio	23
2.2.1 DOCSIS 2.0	25
2.2.2 DOCSIS 3.0	27
2.2.3 DOCSIS 3.1	28
2.3 Estado actual	30
3. Esquema de red	32
4. Espectros de frecuencias de Downstream y Upstream	37
4.1 Antecedentes	37
4.2 Espectro para la transmisión de datos	39
5. Método de acceso y modulación en Downstream y Upstream	43
5.1 Downstream	43
5.2 Upstream	45
6. Cálculo de tasas de transferencia	47
6.1 Tasas en Downstream	47
6.2 Tasas en Upstream	50
7. Requerimientos de calidad de señal	52
8. Discusión de resultados	54
9. Conclusiones	58
10. Futuras líneas de trabajo	62
Bibliografía	63
Glosario	68

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	PÁGINA
1. Especificaciones de Downstream.	12
2. Especificaciones de Upstream.	13
3. Tasa de datos Downstream para canales de 6 MHz.	17
4. Tasas de datos Upstream QPSK.	17
5. Tasas de datos Upstream para modulación 16 QAM.	18
6. Comandos de estado de CM Cisco.	20
7. Especificación genérica de CM.	21
8. Comparación de las características de RF de CM hasta DOCSIS 2.0.	26
9. Capacidades Actuales y Futuras - DOCSIS 3.0 y 3.1.	30
10. Rendimiento eléctrico de cable coaxial RG6.	41
11. Rendimiento de directa y retorno, nodo óptico Cisco GS7000.	42
12. Parámetros de la señal de Downstream OFDM.	44
13. Parámetros de la señal de Upstream OFDMA.	46
14. Parámetros de la señal OFDM en Downstream de DOCSIS 3.1.	48
15. Tasa en Downstream (bits por segundo).	49
16. Parámetros de la señal OFDM en Upstream de DOCSIS 3.1.	50
17. Tasa en Upstream (bits por segundo).	51
18. SNR necesaria en Downstream para cada modulación.	52
19. SNR para distintas modulaciones QAM en Upstream.	53
20. Umbral CNR (en entrada CMTS) necesario para admitir diferentes órdenes de modulación Upstream.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1. Red de cable unidireccional “árbol y rama”.	2
2. Red HFC.	4
3. Red HFC anillo.	5
4. FTTx en HFC.	9
5. Tráfico IP transparente a través de DOCSIS.	14
6. Comparación de Capas de Protocolos del modelo OSI y de DOCSIS.	16
7. Red HFC Típica.	23
8. Channel Bonding en DOCSIS 3.0.	27
9. Los distintos sistemas físicos e inalámbricos de acceso de datos.	32
10. Topología de red HFC que utiliza el estándar DOCSIS.	33
11. Reducción de activos en la red HFC.	35
12. Red HFC propuesta en configuración nodo más 0.	36
13. Planes de frecuencia.	40
14. Cantidad de cablemodems operando a diferentes SNR.	54
15. Perfiles de modulación según SNR.	55
16. Tasas de transferencia en Downstream según SNR.	56

Resumen

Las redes de acceso actuales necesitan transmitir datos con tasas cada vez más altas. Las redes HFC ofrecen capacidad de crecimiento, con la implementación de los últimos estándares disponibles y modificaciones en sus diseños.

Para obtener las máximas tasas de transferencia, se propone liberar el espectro de 500 MHz que actualmente se destina a la transmisión de televisión analógica e incluso digital, para convertir a las redes HFC en redes enteramente de datos, utilizando los primeros 200 MHz del espectro total para la utilización en Upstream y desde 258 MHz y hasta 1.8 GHz para Downstream.

Las arquitecturas de redes HFC deben disminuir la cantidad de activos (amplificadores), por lo que se decide utilizar un diseño de N+0, lo que permite atender áreas de servicio más pequeñas y disminuir los índices de ruido y distorsiones.

La norma DOCSIS 3.1 emplea el sistema OFDM para la transmisión en Downstream y OFDMA en Upstream, utilizando esquemas de múltiples sub-portadoras, cada una de las cuales se modula con hasta 16K QAM en Downstream y hasta 4K QAM en Upstream; disponiendo, según la calidad del canal, múltiples perfiles de modulación (MMP). Se utiliza FEC LDPC como método de corrección de errores. Se estima que la norma DOCSIS 3.1 es la más adecuada para la obtención de altas tasas de transferencia de datos.

La máxima tasa de transferencia calculada en Downstream es de 16.9 Gbps y en Upstream de 1.86 Gbps. Para lograrlas es necesario mantener una SNR superior a 40 dB en la red HFC.

Las redes actuales igualmente podrían ofrecer velocidades considerables, en el orden de 10 Gbps en Downstream, con SNR cercanas a los 37 dB.

De esta manera las redes HFC se presentan como una alternativa válida para atender las demandas de tasas de transferencia a corto y mediano plazo.

Palabras Clave

HFC, DOCSIS, Tasas, Datos, Coaxial, Fibra óptica.

Abstract

The current access networks need to transmit data with increasingly higher rates. HFC networks offer growth capacity, with the implementation of the latest available standards and modifications to their designs.

To obtain the maximum transfer rates, it is proposed to release the 500 MHz spectrum that is currently destined to the transmission of analog and even digital television, to convert HFC networks into entirely data networks, using the first 200 MHz of the total spectrum for use in Upstream and from 258 MHz and up to 1.8 GHz for Downstream.

The architectures of HFC networks must decrease the amount of active amplifiers, so it is decided to use an N + 0 design, which allows serving smaller service areas and decreasing the noise and distortion indexes.

The DOCSIS 3.1 standard uses the OFDM system for transmission in Downstream and OFDMA for Upstream, employing multiple sub-carrier schemes, each of which is modulated with up to 16K QAM in Downstream and up to 4K QAM in Upstream. Multiple modulation profiles (MMP) are associated to the quality of the channel. FEC LDPC is used for error correction.

The maximum transfer rate calculated in Downstream is 16.9 Gbps and in Upstream it is 1.86 Gbps. To achieve these values, it is necessary to maintain a SNR higher than 40 dB in the HFC network.

The current networks could also exhibit considerable speeds, in the order of 10 Gbps in Downstream, with SNR close to 37 dB.

In this way, HFC networks are presented as a valid alternative to meet the demands of transfer rates in the short and medium term.

Objetivos

El objetivo del presente trabajo es determinar las máximas tasas de transmisión de datos en las redes Híbridas de Fibra y Coaxial-HFC (Hybrid Fiber Coaxial), con vigencia en el corto y mediano plazo, utilizando los estándares disponibles, e introduciendo nuevas consideraciones acerca de los diseños de las redes, restricción de otros servicios y requerimientos de calidad de señal necesarias.

Las redes HFC, desde su comienzo como redes meramente coaxiales, hasta los sistemas híbridos actuales, nacieron como redes para la transmisión de señales de televisión, y a pesar de su evolución, aún hoy sigue siendo éste, uno de los principales servicios brindados.

Se plantea la transformación de la red HFC en una red enteramente de datos, dejando de transmitir señales de televisión tradicionales, sobre todo las señales analógicas, que actualmente ocupan 500 MHz del espectro utilizado en el cable coaxial, liberando este espacio para lograr las mayores tasas de transferencias de datos.

Otro objetivo es determinar parámetros de calidad de señal, como ser la SNR, necesarios para obtener las mayores tasas de transferencia.

En función de los requerimientos de SNR se debe elegir un esquema de red adecuado para la obtención de las mayores tasas de transferencia de datos.

Las redes HFC actuales en general no superan 1 GHz como ancho de banda, si bien se fabrica equipamiento que alcanza los 1.2 GHz. Con el objetivo de alcanzar mayores tasas de transferencia se deben seleccionar los espectros de frecuencias más apropiados en la vía de directa y de retorno. Otro punto de importancia radica en la selección de los métodos de acceso y modulación de señal, con máximo aprovechamiento de los mejores esquemas disponibles en la actualidad.

Con la determinación de las consideraciones anteriores se podrán calcular las tasas de transferencia en directa y retorno.

Las tasas de transferencia máximas calculadas requerirán parámetros de calidad de señal difíciles de obtener en sistemas actuales, por lo que se establece como objetivo, analizar las posibilidades de implementación práctica en estas redes HFC.

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Los sistemas de Televisión por Antena Comunitaria-CATV (Community Antenna Television) nacieron originalmente como redes enteramente de cable coaxial y con una disposición unidireccional. Al principio eran sistemas que transportaban señales de televisión analógica a poblaciones alejadas de las plantas transmisoras. El equipamiento de recepción (antenas, receptores) y acondicionamiento de señal (convertidores de norma, moduladores) se encontraba en la cabecera del sistema. A todas las señales entrantes, independientemente de su origen, se les aplicaba Multiplexación por División de Frecuencias-FDM (Frequency Division Multiplexing), se amplificaban, y se transmitían en sentido descendente para distribución en la red de cable (Cisco, 2009). Con el tiempo se fue aumentando el ancho de banda de las redes desde los 220 MHz a 330 MHz, luego a 450 MHz y finalmente a 550 MHz. Estas redes tenían en principio una disposición “árbol y rama” (Figura 1), que consistía de una red troncal formada por un cable coaxial de gran diámetro (para reducir las atenuaciones propias de la geometría del cable) y una cascada de amplificadores para compensar la pérdida intrínseca de la señal en el cable coaxial, desde la cual se derivaban las redes de distribución formadas por amplificadores de mayor ganancia y los pasivos tales como divisores, acopladores y taps o derivadores desde donde se conectaban los usuarios a través de cables de acometida, en general coaxiales flexibles.

Además de ser unidireccionales, las largas cascadas de amplificadores resultaron en sistemas con un alto ruido que los hacía poco fiables y propensos a fallas, además de susceptibles a la caída de rayos y vulnerables al ingreso de ruido de señales de radiofrecuencias externas.

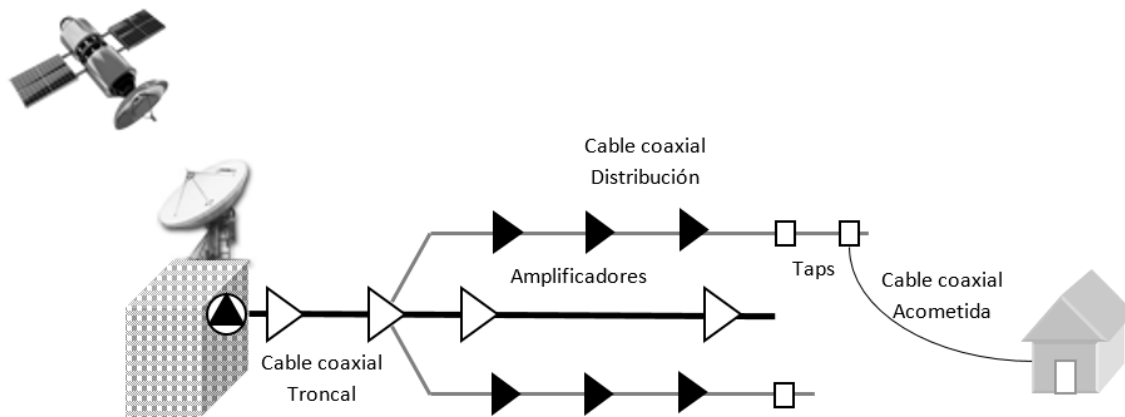


Figura 1. Red de cable unidireccional “árbol y rama” con red troncal de cable coaxial de gran diámetro y una cascada de amplificadores, derivaciones a las redes de distribución con amplificadores de mayor ganancia y taps de conexión de usuarios a través de cables coaxiales flexibles.

En los años 80 se comenzaron a utilizar –en la red troncal– amplificadores de retorno, con el objeto de transmitir señales de video desde distintos sectores de la red hacia la cabecera. Sin embargo, y principalmente debido a la sumatoria de ruido que generaba la propia topología, tales redes de árbol y rama no fueron totalmente bidireccionales sino hasta la llegada de las redes Híbridas de Fibra y Coaxial-HFC (Hybrid Fiber Coaxial).

Durante la década de 1990, con la introducción de la transmisión directa por satélite y la Línea de Abonado Digital-DSL (Digital Subscriber Line), los operadores de cable experimentaron un serio desafío a su existencia por las tecnologías competidoras, que amenazaban erosionar la cuota de mercado de su único producto. Esto llevó a la conversión de las redes unidireccionales en bidireccionales.

Ante la necesidad de ofrecer servicios avanzados de manera de que el sistema permaneciera económicamente viable, los Operadores de Sistemas Múltiples-MSO (Multiple System Operator) de América del Norte se agruparon en el Multimedia Cable Network Partners System (MCNS), posteriormente denominado CableLabs. Con el propósito de definir una norma y un sistema capaz de proporcionar datos y servicios futuros

sobre las plantas de CATV, MCNS propuso una solución basada en paquetes del Protocolo de Internet-IP (Internet Protocol), descartando el Modo de Transferencia Asíncrona-ATM (Asynchronous Transfer Mode) (Ciciora, 2004).

La Especificación de Interfaz para Servicios de Datos por Cable-DOCSIS versión 1.0- (Data Over Cable Service Interface Specification) resultó del esfuerzo de la MCNS y fue aceptada por unanimidad como el estándar para América del Norte. También fue adoptada por la Sociedad de Ingenieros de Telecomunicaciones por Cable-SCTE (Society of Cable Telecommunications Engineers) y luego por el Instituto Nacional Americano de Normas-ANSI (American National Standards Institute) (Ciciora, 2004).

Los MSO definieron programas de actualización y de construcción para aumentar el ancho de banda de sus plantas y para proporcionar la funcionalidad de dos vías.

El estándar DOCSIS 1.0 prescribe la interoperabilidad de múltiples proveedores y promueve un modelo de cliente de Módem de Cable-CM (Cable Modem). Para garantizar la interacción entre múltiples proveedores, CableLabs sometió a pruebas rigurosas a todos los productos ofrecidos. Superaron la prueba el Sistema de Terminación de Módem de Cable-CMTS (Cable Modem Termination System) de cabecera, y los módems de cable (cablemodems).

El estándar DOCSIS 1.0 demostró ser un éxito universal con implementaciones en funcionamiento en todo el mundo.

CableLabs, en conjunto con las comunidades de proveedores y usuarios, definió luego DOCSIS 1.1 con el propósito de incluir el Voz sobre Protocolo de Internet-VoIP (Voice over Internet Protocol), y seguridad avanzada en la transmisión de paquetes, allanando también el camino para futuros servicios multimedia avanzados.

Las versiones posteriores de DOCSIS, 2.0, 3.0 y 3.1, fueron introduciendo mejoras tanto en seguridad, como también en velocidades de transmisión de datos, avanzando en el último caso (versión 3.1) a tasas comparables con las de fibra al hogar (FTTH).

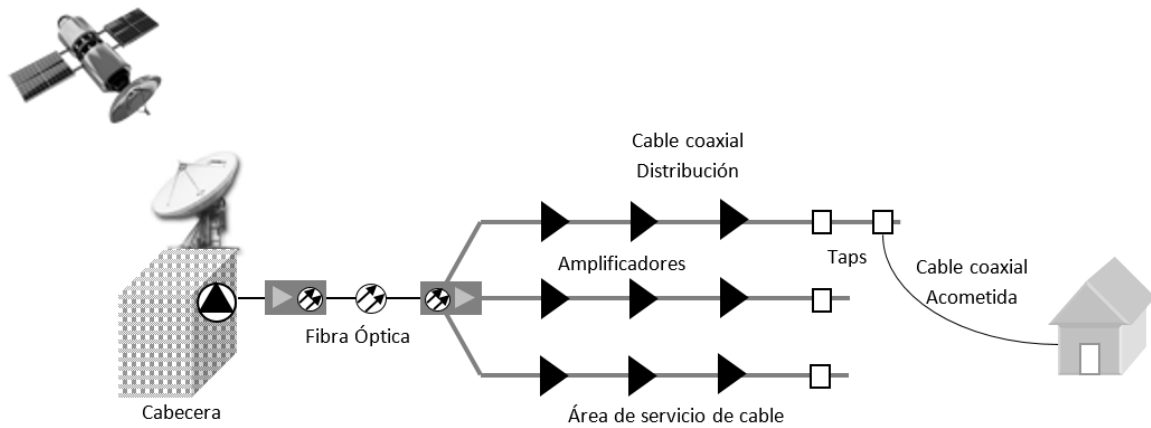


Figura 2. Red HFC, Híbrida de Fibra y Coaxial, la red troncal de cable coaxial (véase Fig. 1) se reemplaza por enlaces de Fibra Óptica y se reduce el tamaño de las áreas de servicio.

1.2 Evolución de redes de una vía a dos vías HFC

La primera mejora importante a la planta de CATV fue la introducción de la tecnología de fibra óptica y el advenimiento de la planta HFC, como ilustra la Figura 2.

Las porciones del cable coaxial y los elementos de soporte de amplificación troncal se reemplazan con cable óptico multifibra desde la cabecera. La señal de RF se utiliza para modular un láser de directa, que transmite la señal óptica a un nodo óptico, que a su vez la convierte en una señal eléctrica. A continuación, se puede propagar aguas abajo en el área de usuarios. Se puede ver fácilmente que la introducción de la fibra puede reducir significativamente el número de amplificadores en cascada, y en consecuencia mejorar la fiabilidad del sistema, la Relación Señal a Ruido-SNR (Signal to Noise Ratio) de la señal de vídeo, y el ancho de banda potencial del sistema. Además, esto hace que el sistema esté listo para el siguiente paso: el funcionamiento de dos vías (Cisco, 2009).

El funcionamiento bidireccional o de dos vías, se consigue mediante el agregado de los amplificadores de retorno necesarios, en la carcasa de los amplificadores unidireccionales. Además, se agrega un láser de retorno de banda estrecha en el nodo óptico, una fibra dedicada de retorno y en la cabecera, un receptor óptico compatible para

convertir la información en una señal eléctrica. Cuando todo está en su lugar, se requieren componentes de alineación de la trayectoria de retorno adecuada.

Incorporando una topología de anillo óptico como se ilustra en la Figura 3, la red de cable adquiere mayor fiabilidad al brindar caminos alternativos para el transporte de la información. La red HFC y la topología indicada, se convierten en los elementos básicos para el acceso a las capacidades de transporte, que necesitan los MSO para competir en el entorno de la comunicación dinámica.

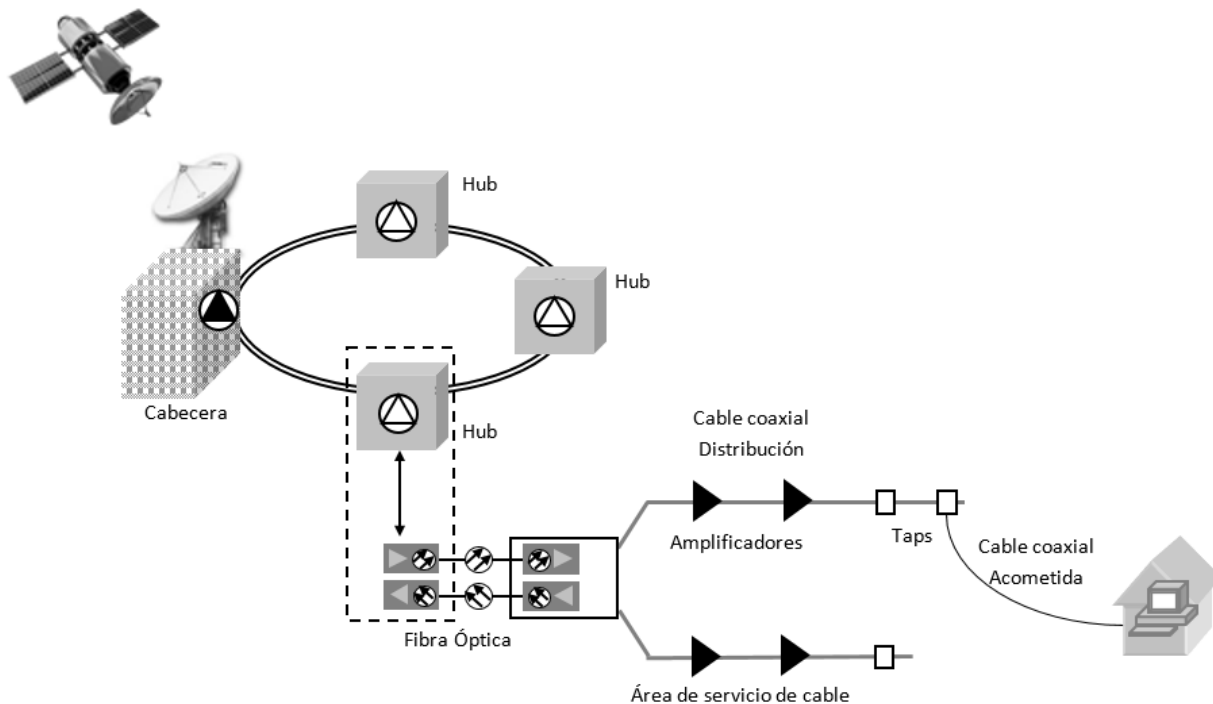


Figura 3. Red HFC anillo, proporciona mayor flexibilidad y confiabilidad para brindar servicios de doble vía y gran ancho de banda.

1.2.1 La fibra óptica en las redes HFC

La utilización de la fibra óptica en la distribución en principio de señales de televisión, y luego para la transmisión de datos, ha sido posible gracias al desarrollo de láseres con características de linealidad suficientes para producir distorsiones mínimas en las señales con Modulación de Amplitud con Banda Lateral Vestigial-AM VSB (Amplitude Modulation Vestigial Side Band) a transportar.

Las redes HFC, al incorporar la transmisión por fibra óptica en la red de acceso, minimizan las distorsiones, principalmente las coherentes, introducidas por las cadenas de amplificadores.

La atenuación de la fibra es mucho menor que la del cable coaxial, lo que permite que se prolonguen sin amplificadores las distancias a cubrir, pudiendo alcanzar distancias del orden de 100 km, en la red de transporte. En la red de acceso, la fibra óptica, posibilita realizar diseños con mayor cobertura desde la cabecera, reduciéndose el tamaño de las áreas de distribución, con la consiguiente disminución de la cantidad de amplificadores y de los efectos indeseados que estos introducen, como ser el ruido y las interferencias.

Los beneficios de la utilización de la fibra óptica favorecen el aprovechamiento del ancho de banda del cable coaxial hasta llegar al orden de 1 GHz. Este límite podría ser llevado hasta 1.2 y aún a 1.8 MHz.

El grado de utilización de la fibra óptica en la red HFC puede variar según la configuración. En la denominada Fiber to the Bridger, la fibra llega hasta el amplificador troncal del que parten ramales de distribución. Un paso siguiente es la sustitución de todos los amplificadores de distribución por Terminaciones de Red Óptica-ONT (Optical Network Terminations), dando lugar a la configuración denominada Fiber to the Last Amplifier/Active o Fiber to the Line Extender.

La fibra puede extenderse aún más, llegando hasta la derivación (o tap) con una ONT que sirva a un número limitado de abonados (típicamente 8), configuración que se conoce como Fiber to the Curb (Multimedia Connect, 2012).

En última instancia, cabría la posibilidad de llevar fibra óptica hasta el abonado (Fiber to the Home), si bien en este caso ya no se trataría de un sistema híbrido, como se puede observar en la Figura 4.

Una ventaja adicional del uso de la fibra óptica a incrementar el ancho de banda para la distribución en directa, e inclusive las redes HFC han hecho posible la transmisión de datos desde el usuario hacia la cabecera. Esto se consigue por división en frecuencia, convirtiendo los amplificadores del coaxial en bidireccionales, dedicando la parte baja del espectro (de 5 a 42 MHz típicamente) en transmisión en sentido ascendente (del usuario a la cabecera).

En una red totalmente coaxial las perturbaciones en este canal de retorno es la suma de las provenientes de todos los usuarios del sistema, convirtiéndolo en inviable, salvo en el caso de redes muy pequeñas. Sin embargo, en las redes HFC los dominios de interferencia quedan reducidos a los tramos donde se mantiene la utilización del cable coaxial, de manera que sólo comparten ancho de banda usuarios servidos por cada tramo.

El hecho de convertir la red HFC en un medio bidireccional, teniendo en cuenta los anchos de banda disponibles en ambos sentidos, y el número de usuarios en un tramo de coaxial, permite desplegar redes de telecomunicación multiservicio (telefonía, datos, TV) efectivas.

Normalmente, las redes troncales son redes ópticas con una topología a dos niveles, lo que permite la cobertura de una gran área.

Las cabeceras (o Headends) se comunican a través de fibra óptica con los nodos primarios (o Hubs), generalmente distantes de la misma y que alimentan áreas que atienden entre miles y decenas de miles de usuarios.

Los hubs amplifican y distribuyen la señal hasta las ONT, dónde se realiza la conversión a la señal eléctrica que alimenta los cables coaxiales, conocidos usualmente como nodos ópticos, con uno o más receptores ópticos para la señal de directa, y uno o más transmisores ópticos para la señal de retorno.

Los nodos ópticos cubren áreas típicamente de 500 usuarios, aunque en sistemas con gran penetración de fibra el número se puede reducir a 100 e incluso a unas pocas decenas.

En el primer nivel de la red troncal, se emplea un sistema de transmisión redundante punto a punto entre la cabecera y el hub, desplegado sobre un sistema de canalizaciones en anillo.

Desde la cabecera hasta el hub superior se dispone una fibra punto a punto a través de una canalización directa entre los nodos. Una segunda fibra, también punto a punto, discurre a través de canalizaciones que pasan por el nodo primario inferior, pero sin tener conexión con él. Esta estructura también se suele repetir en el segundo nivel troncal.

Los sistemas ópticos troncales pueden trabajar en la segunda (1330 nm) o tercera (1550 nm) ventana óptica. Los sistemas en tercera ventana tienen la ventaja de tener alcances mayores debido a que la atenuación de la fibra a estas longitudes de onda es mínima.

La cobertura de estos sistemas se puede aumentar con amplificación puramente óptica, motivo por el cual los nodos primarios se implementan con Amplificadores Ópticos de Fibra Dopada con Erbio-EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifiers) de gran linealidad. Se consigue así permanecer en el dominio óptico desde la cabecera hasta los nodos ópticos.

Otra opción es la inserción a nivel óptico, usando multiplexación en longitud de onda, que resulta hoy en día más cara. Por estas y otras razones de costo de despliegue, existen sistemas de tercera ventana en el primer nivel troncal y de segunda ventana en el segundo nivel.

En lo que respecta a los trayectos de transmisión de usuario a cabecera en la red troncal, una primera solución consiste en mantener los dominios de compartición del ancho de banda ascendente, y consecuentemente los dominios de colisión, circunscriptos a cada área atendida por la red de cable coaxial, es decir, al área atendida por un nodo óptico. El canal descendente, que es el de mayor ancho de banda potencial, se comparte entre todos los usuarios de la red. Esta sencilla configuración solamente requiere instalar un transmisor óptico en sentido ascendente en el nodo óptico, un amplificador en los nodos primarios y tendidos de fibra punto a punto entre cada nodo y la cabecera. Sin embargo, esta solución sólo es aceptable en redes muy pequeñas, ya que la compartición de la capacidad de bajada entre todos los usuarios de la red, con hasta cientos de miles de usuarios en redes grandes, no proporciona los anchos de banda requeridos.

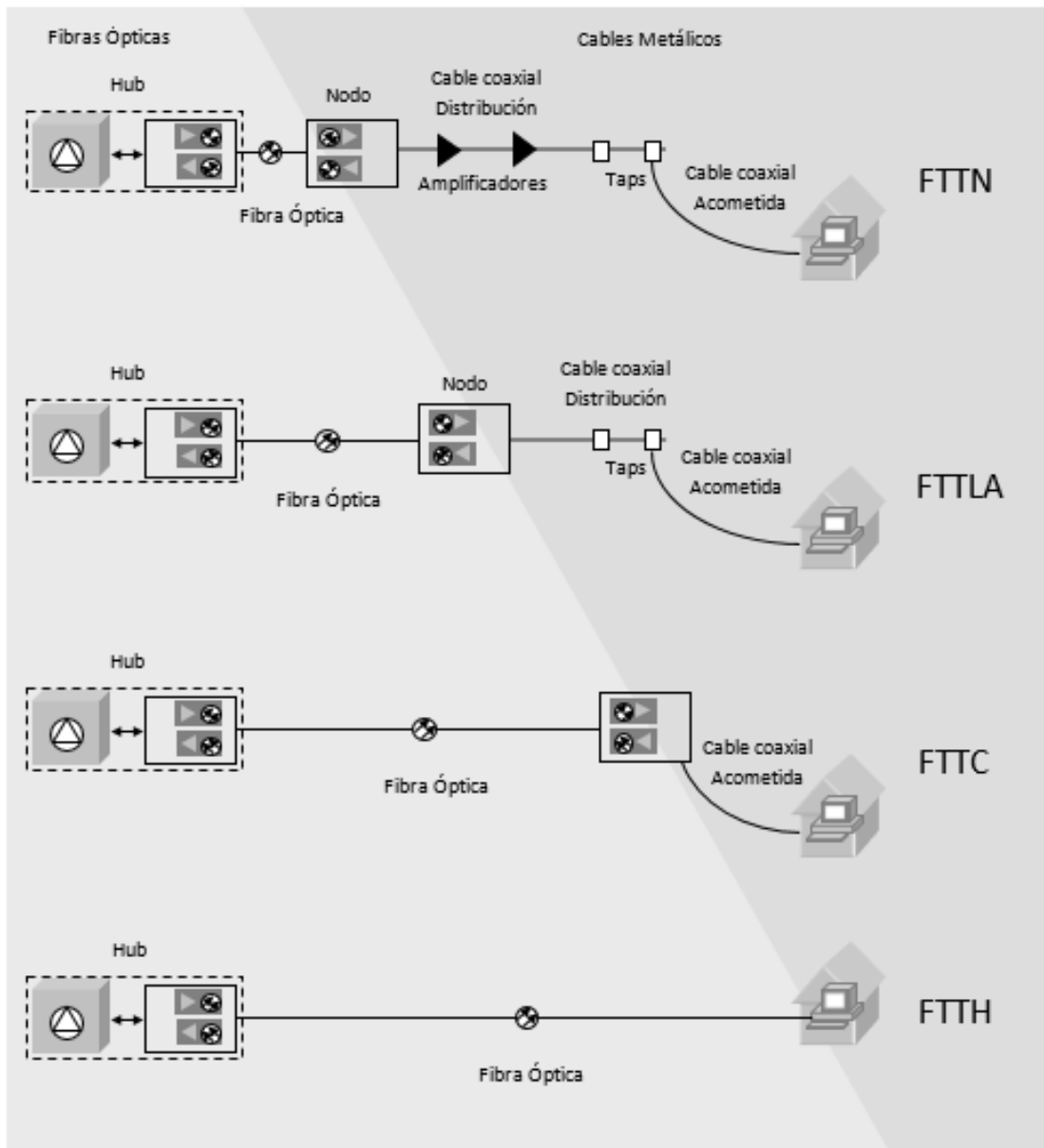


Figura 4. FTTx en HFC, en FTTN la fibra llega hasta el nodo (Node), en FTTLA hasta el último activo (Last Active), en FTTC hasta la derivación y en FTTH hasta el hogar (Home), en este caso ya no se trataría de un sistema híbrido.

En caso de que los hubs atiendan a miles o decenas de miles de usuarios, la solución más adecuada y extendida en la actualidad consiste en utilizar sistemas de terminación de módems de cable (CMTS) en cada hub, accediendo a ellos a través de una red de transmisión convencional, tal la de Jerarquía Digital Síncrona-SDH (Synchronous Digital Hierarchy) sobre fibra óptica, manteniendo los servidores en la cabecera. En esta

solución, el dominio de compartición de ancho de banda ascendente sigue siendo el nodo óptico, o más precisamente, cada transmisor óptico dentro del nodo.

En sentido descendente, el dominio de compartición se establece por cada nodo óptico, o en su defecto, por cada uno de los receptores ópticos con los que cuenta el nodo, que pueden llegar a 4.

La utilización del sistema SDH también reduce el número de fibras requeridas entre los hubs y la cabecera, modalidad adoptada actualmente por la mayoría de los operadores. Otra topología podría ser la ubicación de funciones CMTS en la cabecera (head-end consolidation), utilizando técnicas de Multiplexado compacto por División en Longitudes de Onda-DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) en sentido descendente, y el Sistema de Apilamiento de Frecuencia-FSS (Frequency Stacking System) en sentido ascendente. En esencia, se trata de enviar desde la cabecera el caudal descendente de servicios interactivos en una longitud de onda. De esta manera, la información contenida en esa longitud de onda, combinada con los otros servicios, se envía a un nodo óptico o a un grupo de nodos ópticos, dependiendo de la penetración de los servicios. En sentido ascendente, cada banda de 5-42 MHz de los distintos transmisores ópticos se desplaza en frecuencia, señal que se puede usar para modular una longitud de onda, utilizando Multiplexación por División de Longitud de Onda-WDM (Wavelength Division Multiplexing).

Cabe señalar que, en la práctica, suelen utilizarse mecanismos de redundancia como los expuestos anteriormente para los anillos de distribución, sobre todo a nivel de la red de que une la cabecera principal con los hubs.

1.2.2 Limitaciones y especificaciones de la planta HFC

La red HFC tiene el potencial de ofrecer gran ancho de banda en la dirección de directa (Downstream). Dependiendo de la extensión de la actualización de la planta, el ancho de banda podría ser de 54 a 1002 MHz. El ancho de banda del canal descendente se determina por los estándares de transmisión de vídeo de cada país, variando usualmente entre 6 y 8 MHz (Cisco, 2009).

Inicialmente, las asignaciones de canales de video broadcast históricos limitan el sentido ascendente o inversa (Upstream) al espectro de 5 a 42 MHz. Este espectro en sentido ascendente es a menudo muy ruidoso, debido a la entrada de señales de interferencia externa como banda ciudadana o radioafición, entre otras emisiones legítimas de radiofrecuencia. Un sistema DOCSIS debe proporcionar más del 99 por ciento de disponibilidad al enviar los paquetes de 1500 bytes en la tasa de al menos 100 paquetes por segundo.

El diseño, la ingeniería y las buenas prácticas de mantenimiento para las instalaciones de HFC, garantizan que las especificaciones se puedan cumplir y mantener. La principal preocupación, sin embargo, se refiere al nivel de señal y al ruido.

La Tabla 1 resume las especificaciones de CableLabs para las señales en sentido descendente o directa (Downstream) (CableLabs, 2017).

Tabla 1. Especificaciones de Downstream. (CableLabs, 2017)

Downstream	Se considera un canal de 6 MHz
Espaciado de canales de RF (BW)	6 MHz
Relación C/I para la potencia total	No menor a 35 dentro del BW designado
CNR en la banda de 6-MHz	No menor a 35 dB (nivel de video analógico)
Retraso de tránsito, desde el CMTS al usuario más distante	Menor o igual a 0.800 ms
Triple batido compuesto para portadoras moduladas analógicamente	No mayor a -50 dBc dentro del BW designado
Distorsión compuesta de Segundo orden para portadoras moduladas analógicamente	No mayor a -50 dBc dentro del BW designado
Nivel de modulación cruzada	No mayor a -40 dBc dentro del BW designado
Modulación de zumbido de portadora	No mayor a -26 dBc (5 %)
Ripple de retardo de grupo en el espectro ocupado por el CMTS	75 ns dentro del BW designado
Ripple de amplitud	0.5 dB dentro del BW designado
Ruido de ráfaga	No menor 25 ms a 10 Hz de tasa promedio
Micro-reflecciones para el eco dominante	-10 dBc a menos o igual a 0.5 ms
	-15 dBc a menos o igual a 1.0 ms
	-20 dBc a menos o igual a 1.5 ms
	-30 dBc a menos o igual a 1.5 ms
Nivel de portadora de video analógica máxima en la entrada del CM, incluidas las variaciones de nivel de señal anteriores	17 dBmV
Pendiente de nivel de señal(50 to 750 MHz)	16 dB
Variación de nivel de señal estacional y diurna	8 dB
Nivel de portadora de video analógica más bajo en la entrada del CM, incluidas las variaciones de nivel de señal anteriores	-5 dBmV

El ancho de banda ascendente limitado debe a menudo ser compartido con otros servicios, que van desde visión por pago por impulso-IPPV (Impulse Pay Per View), la telemetría y la recolección de alarmas e información de los elementos activos en la planta

de cable. También debe competir con las señales de interferencia que irradian en el rango de frecuencia más baja.

Debido al ancho de banda ascendente limitado y a menudo muy ruidoso, el diseño del hardware debe implementar diversas contramedidas para mitigar los efectos perjudiciales, tanto del ruido permanente como del impulsivo. Se debe tener en cuenta, además, el ancho de banda necesario para el despliegue de DOCSIS.

La Tabla 2 muestra las especificaciones de Upstream (CableLabs, 2017).

Tabla 2. Especificaciones de Upstream. (CableLabs, 2017)

Upstream	Asume todas las condiciones presentes concurrentemente
Rango de frecuencia	5 a 42 MHz, extreme a extremo
Relación portadora a potencia de ingreso (la suma de señales de ingreso discretas y de banda ancha)	No menor a 25 dB
Relación portadora a ruido	No menor a 25 dB
Retraso de tránsito del CM mas lejano al CM más cercano al CMTS	Menor o igual a 0.800 ms
Ruido de ráfaga	No mas largo que 10 ms a 1 kHz de tasa promedio para la mayoría de los casos
Modulación de zumbido de portadora	No mayor a -23 dBc (7 %)
Ripple de retardo de grupo	200 ns/MHz (5 - 42 MHz)
Ripple de amplitud	0.5 dB/MHz (5 - 42 MHz)
Micro-reflecciones: eco simple	-10 dBc menor o igual a 0.5 ms -20 dBc menor o igual a 1.0 ms
Relación portadora a interferencia (la suma de ruido, distorsión, distorsión de camino común y modulación cruzada)	No menor a 25 dB
Variación de nivel de señal estacional y diurna	No mayor a 8 dB min a max

2. Normas DOCSIS, protocolos de señalización y aplicaciones

2.1 Norma DOCSIS

Las especificaciones de la interfaz DOCSIS permitieron el desarrollo y el despliegue de datos por cable en un sistema no propietario, de múltiples proveedores, base interoperable para la transferencia bidireccional transparente de Internet (Cisco, 2009). El tráfico de protocolo IP entre la cabecera del sistema de cable y los usuarios se realiza mediante una red híbrida de fibra y coaxial, como lo ilustra la Figura 5 (CableLabs, 2014). El sistema consta de un CMTS situado en la cabecera, un medio HFC, y un CM situado en las instalaciones del usuario final, en combinación con las capas DOCSIS definidas que admiten la interoperabilidad y posibilidades funcionales que permiten futuros servicios de valor agregado.

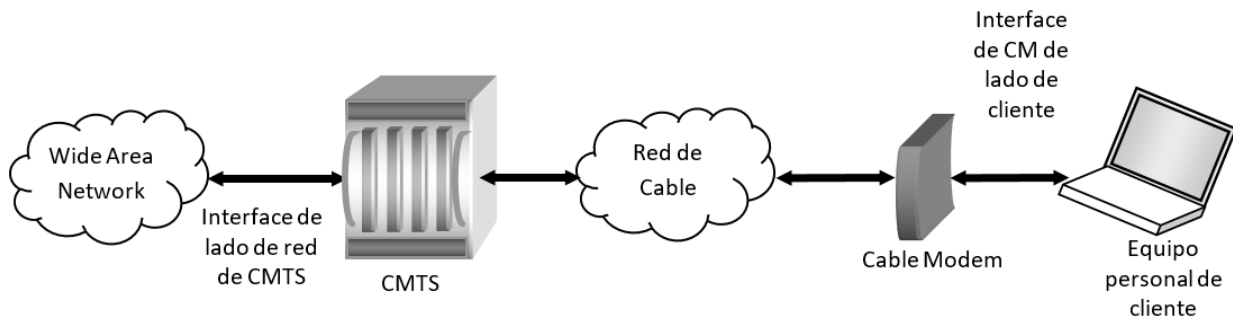


Figura 5. Tráfico IP transparente a través de DOCSIS utilizando un CMTS situado en la cabecera, un medio HFC, y un CM en las instalaciones del usuario. (redibujada, CableLabs, 2014)

Si se comparan las capas del Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos-OSI (Open System Interconexión) con las capas del Sistema DOCSIS, como lo establecen las normas de CableLabs (2017), se observan las siguientes particularidades, resumidas en la Figura 6:

- 1) Capa de red IP
- 2) Capa de enlace de datos compuesta por:
 - a) Subcapa de Control de Enlace Lógico-LLC (Logical Link Control) conforme a los estándares de Ethernet.
 - b) Subcapa enlace de seguridad para la privacidad básica, autorización y autenticación.
 - c) Subcapa Control de Acceso al Medio-MAC (Media Access Control), para la operación de soporte de longitud variable de Unidades de Datos de Protocolo-PDU (Protocol Data Unit) y que incluyen:
 - i) Control de CMTS de oportunidades de transmisión de contención y reserva una ráfaga de mini ranuras en el sentido ascendente.
 - ii) La eficiencia de ancho de banda a través de paquetes de longitud variable.
 - iii) Extensiones para el futuro apoyo de modo de transferencia asíncrono (ATM) u otros tipos de PDU.
 - iv) Soporte para múltiples grados de servicio y una amplia gama de velocidades de datos.
- 3) Nivel físico (PHY) compuesto por:
 - a) Capa de convergencia Downstream conforme a Grupo de Expertos de Imágenes en Movimiento-MPEG-2 (Moving Pictures Experts Group).
 - b) Subcapa Física Dependiente del Medio-PDM (Physical Medium Dependent) para:
 - i) Aguas abajo, ya sea con Modulación de Amplitud y fase en Cuadratura-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) de 64 o 256 símbolos, concatenación de

Reed-Solomon y Corrección de Errores Hacia Adelante-FEC (Forward Error Correction) Trellis, además de intercalado de profundidad variable.

- ii) Aguas arriba, empleando: modulación por desplazamiento de fase en cuadratura-QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16 QAM (o actualmente 64 QAM).
- iii) Soporte para múltiples velocidades de símbolos CM controlada y programable desde el CMTS agilidad de frecuencia.
- iv) Apoyo al marco fijo y formatos PDU de longitud variable.
- v) Acceso Múltiple por División de Tiempo-TDMA (Time Division Multiple Access).
- vi) Originalmente FEC Reed-Solomon programable.
- vii) Capacidad para soportar futuras tecnologías de capa física.

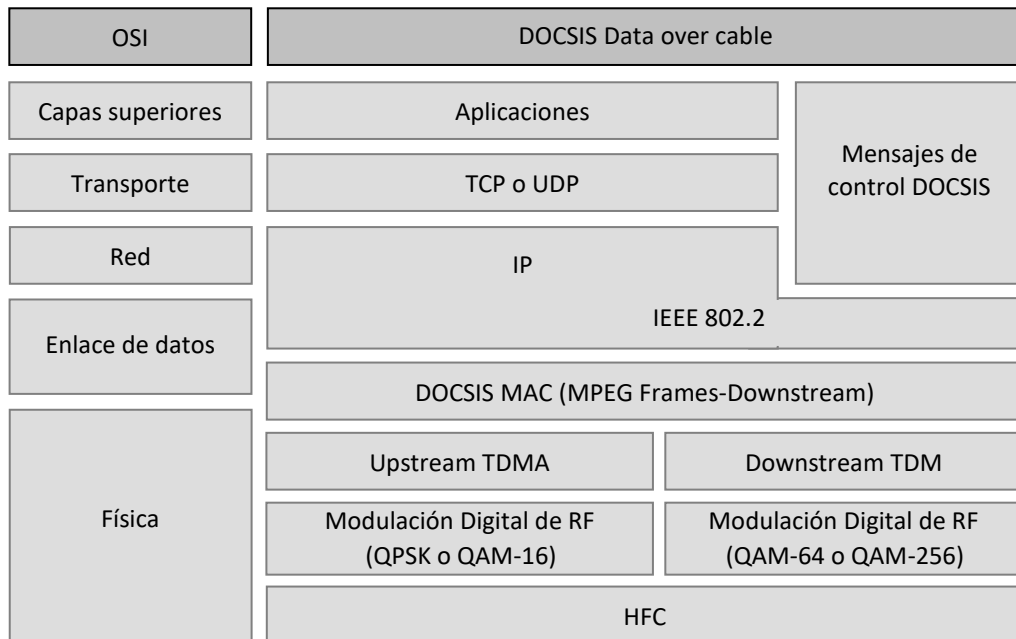


Figura 6. Comparación de Capas de Protocolos del modelo OSI y del sistema DOCSIS utilizado en HFC. (Cisco, 2009)

Además, la especificación define medios por los cuales un CM puede auto-descubrir las frecuencias apropiadas aguas arriba y aguas abajo, tasas de bits, formato de

modulación, de corrección de errores, y niveles de potencia. Para mantener niveles de servicio equitativo, a los CM individuales no se les permite transmitir, excepto bajo condiciones definidas y controladas. Las capas DOCSIS están representados por la Figura 6 donde las mismas se comparan con las clásicas capas OSI. La capa física DOCSIS permite una flexibilidad considerable para garantizar la transmisión en plantas de cable de calidad variable. Son de importancia los anchos de banda de canal aguas arriba y las opciones de modulación disponibles tanto para los flujos de señal aguas arriba y aguas abajo.

En base a las opciones de ancho de banda y modulación, además de velocidades de símbolo DOCSIS especificadas. En la Tabla 3 se resumen las velocidades de datos de Downstream de instalaciones DOCSIS (Cisco, 2009).

Tabla 3. Tasa de datos Downstream para canales de 6 MHz.
(Cisco, 2009)

Tipo de modulación	64 QAM	256 QAM
Tasa de símbolos (MSs)	5.057	5.360
Tasa de datos total (Mbps)	30.34	42.9
Tasa de datos Efectiva (Mbps)	27	38

Las tasas de datos de Upstream se muestran en la Tabla 4 (Cisco, 2009), para la modulación de desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK), y para los distintos anchos de banda de canal.

Tabla 4. Tasas de datos Upstream QPSK. (Cisco, 2009)

Ancho de banda (KHz)	200	400	800	1600	3200
Tasa de símbolos (MSs)	0.16	0.32	0.64	1.28	2.56
Tasa de datos total (Mbps)	0.32	0.64	1.28	2.56	5.12
Tasa de datos efectiva (Mbps)	0.3	0.6	1.2	2.3	4.6

De manera análoga, la Tabla 5 ilustra la modulación de amplitud y fase en cuadratura (QAM) de 16 símbolos (Cisco, 2009).

Tabla 5. Tasas de datos Upstream para modulación 16 QAM. (Cisco, 2009)

Ancho de banda (KHz)	200	400	800	1600	3200
Tasa de símbolos (MSs)	0.16	0.32	0.64	1.28	2.56
Tasa de datos total (Mbps)	0.64	1.28	2.56	5.12	10.24
Tasa de datos efectiva (Mbps)	0.6	1.2	2.3	4.5	9

La carga generada por la ineficiencia que representa el FEC ocasiona las diferencias entre las respectivas tasas DOCSIS. Además, para que un sistema funcione, los servidores obligatorios funcionales y operacionales deben interconectar los servicios entre el CMTS y CM.

El servidor de Protocolo de Configuración Dinámica de Cliente-DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol), ofrece las direcciones IP necesarias, tanto para el CM como para los dispositivos PC posteriores.

Por su parte, el servidor Hora del Día-TOD (Time of Day), acota el tiempo operativo de eventos del sistema.

Finalmente, el servidor de Protocolo de Transferencia de Archivos Trivial-TFTP (Trivial File Transfer Protocol), registra y descarga archivos de configuración del CM para el servicio al usuario. Estas configuraciones del CM podrían incluir, sucesivamente, parámetros de calidad de servicio-QoS (Quality of Service), la implementación de Interfaz de Línea de Base de Privacidad-BPI (Baseline Privacy Interface), las asignaciones de frecuencia, el número de dispositivos de acogida, entre otros.

Para despliegues a gran escala, y para asegurar una respuesta rápida del sistema y la escalabilidad, se recomienda que estos servidores cuenten con el apoyo de plataformas de hardware dedicado.

Las especificaciones DOCSIS dictan un proceso de registro del CM.

En un ambiente equipado con CMTS y apoyado por los servidores necesarios, cuando un CM se enciende por primera vez, escanea el espectro descendente, para

encontrar un canal compatible de transporte de datos de RF con características de la capa física de DOCSIS. El CMTS emite periódicamente un Descriptor de Canal Ascendente-UCD (Upstream Channel Descriptor) a lo largo del canal de directa, y el CM aprende su frecuencia operativa asignada.

El CMTS transmite en forma periódica mapas de asignación de ancho de banda aguas arriba, denominadas MAP (Bandwidth Allocation Map), en intervalos de tiempo compartido en la dirección de directa.

El CMTS asigna un identificador de servicio temporal (típicamente igual a 0) al CM, que comienza con un incremento de potencia (R1 mediante incrementos de 3 dB) y el tiempo de proceso de sincronización entre el mismo y el CMTS sobre una base de contención usando ranuras de tiempo compartido.

El CMTS envía periódicamente mensajes de actividad para verificar la continuidad de los vínculos con todas las unidades de CM en el mismo dominio. Cuando un CM recibe su primer mensaje de “supervivencia” (keepalive), vuelve a incrementar la potencia a R2, utilizando incrementos de 0.25 dB.

Finalizado el proceso de R2, un CM se considera que ha establecido un enlace entre sí mismo y el CMTS, pero el enlace se rompe si se pierden 16 mensajes de actividad consecutivos.

Sobre una base de contención en ranuras de tiempo compartido, usando un SID temporal, un cablemodem envía una solicitud de ancho de banda al CMTS, que a su vez le remite una asignación, lo que le permite enviar información en sentido ascendente en ranuras de tiempo asignadas. Posteriormente el CM hace un descubrimiento DHCP seguido por una petición DHCP. El CMTS envía una confirmación DHCP del servidor DHCP que contiene una dirección IP, una puerta de enlace predeterminada, las direcciones de servidores TFTP y TOD, y un nombre de archivo de configuración TFTP.

Luego, el cablemodem inicia el proceso de TOD y TFTP. Desde el servidor TFTP, el CM recibe un archivo de configuración que contiene QoS, seguridad, las asignaciones de frecuencias aplicables, y las nuevas imágenes de software.

El CM envía este archivo de configuración hacia el CMTS e inicia una solicitud de registro. Si la configuración de archivo es válida, el CMTS asigna al cablemodem un SID permanente y registra el CM al estado en línea.

Tras el registro, opcionalmente el CM inicia la activación del algoritmo estándar de cifrado de datos-DES (Data Encryption Standard) de 56 bits, para proporcionar seguridad entre el CMTS y sí mismo, sobre la planta de cable.

El estado individual de los CM puede ser controlado de forma remota a través de comandos de acceso a los CMTS, descritos en la Tabla 6 (Cisco, 2009).

Tabla 6. Comandos de estado de CM Cisco. (Cisco, 2009)

Mensaje	Definición del Mensaje
Offline	Modem se considera offline
init(r1)	Modem envía ranging inicial
init(r2)	Modem realiza ranking
init(rc)	Ranging completo
init(d)	Se recibió petición de DHCP
init(i)	Se recibió respuesta de DHCP; se asignó dirección IP
init(t)	Se recibió petición TOD
init(o)	Se recibió petición TFTP
Online	El Modem está registrado y disponible para datos
online(d)	El Modem está registrado, pero el acceso a la red está deshabilitado para el CM
online(pk)	El Modem está registrado, BPI está habilitado, y KEK, asignado
online(pt)	El Modem está registrado, BPI está habilitado, y TEK, asignado
reject(m)	El Modem intentó registrarse, el registro fue rechazado debido a una mala MIC
reject(c)	El Modem intentó registrarse, el registro fue rechazado debido a una mala COS
reject(pk)	La asignación de llave KEK de Modem fue rechazada
reject(pt)	La asignación de llave TEK de Modem fue rechazada

DOCSIS establece que los datos de reenvío a través de los CMTS pueden realizarse de modo puente transparente o, como alternativa, se puede emplear enrutamiento de capa de red o de conmutación IP. También especifica que el reenvío de datos a través del CM es puente transparente en la capa de enlace, con modificaciones que permiten el apoyo de múltiples capas de red.

Además, DOCSIS define CMTS genéricos y especificaciones de hardware de CM, para asegurar múltiples proveedores e interoperabilidad en los despliegues de campo.

Para que los criterios de disponibilidad DOCSIS puedan obtenerse o se superen, el hardware debe ser compatible con las medidas para mitigar el ruido y tener propiedades para operar en el ruidoso camino de retorno. En sentido ascendente, los operadores utilizaron inicialmente esquemas QPSK, y luego QAM, que permiten el funcionamiento con una Relación Portadora a Ruido-CNR (Carrier to Noise Ratio) degradada, pero con eficiencia espectral reducida. La Tabla 7 muestra la especificación genérica de un CM (Cisco, 2009).

Tabla 7. Especificación genérica de CM. (Cisco, 2009)

Parámetro	Característica
Rango de potencia del CM:	QPSK: 8 a 58 dBmV
Salida	16 QAM: 8 a 55 dBmV
Entrada	-15 a 15 dBmV
Nivel de transmisión	-6 a -10 dBc

Además, la corrección de errores hacia delante (FEC) se puede configurar opcionalmente para reducir la cantidad de datos corrompidos por ruido. Como agregado, un Ancho de Banda-BW (Bandwidth) óptimo aguas arriba puede ser seleccionado por el operador, para adaptarse a canales de datos ruidosos o espectro asignado a otros

servicios. La última contramedida disponible es un concepto de gestión del espectro, en la que la selección de frecuencia, modulación, y el ancho de banda del canal, pueden ser alterados para garantizar la transmisión fiable entre el CMTS y el CM, en caso de períodos transitorios de ruido.

Con base en esta información, y con el conocimiento de las características de las actuales plantas de cable, el operador puede ahora considerar el despliegue de hardware para desarrollar una red.

2.2 Evolución de DOCSIS y capacidades de servicio

Una posibilidad de topología de HFC se muestra en la Figura 7. En una planta de HFC, el CMTS podría desplegarse tanto en el hub como en la cabecera (Headend). Un enrutador de banda ancha universal puede tener la capacidad de manejar varios CMTS, con puertos disponibles aguas abajo y aguas arriba. Además, el router de banda ancha universal puede ser equipado para conectividad de red troncal de una gran selección de adaptadores de puerto, que incluyen T1/E1 de serie para paquetes a través de Red Óptica Síncrona/Paquetes sobre Sonet-SONET/POS (Synchronous Optical Network/ Packet Over Sonet), de Transporte Dinámico de Paquetes-DPT (Dynamic Packet Transport) y Ethernet.

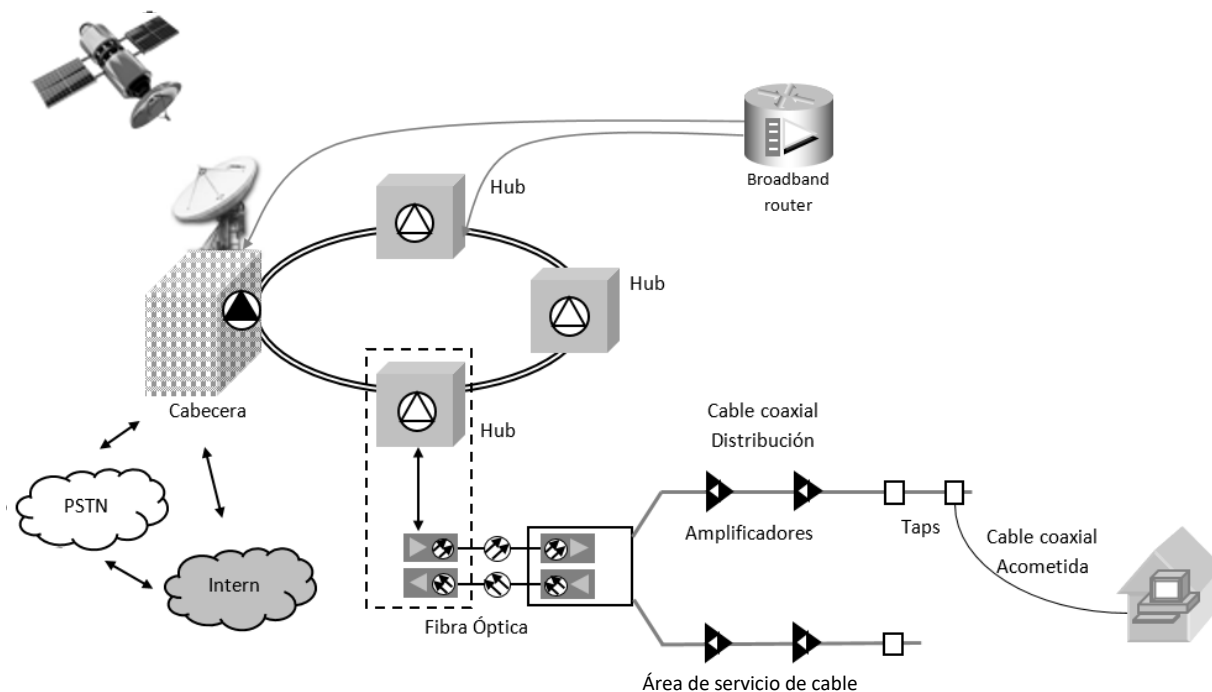


Figura 7. Red HFC Típica, con transmisión de señales desde un cabezal (Headend) hacia los Hubs con anillos de fibra óptica, y luego hacia los nodos, donde se transforma la señal dividiendo el espectro en bandas de directa y retorno.

Al seleccionar la opción de conexión troncal, se debe evaluar el tráfico total y el medio disponible. Para brindar servicios de acceso telefónico, Internet, o servicio de datos de retorno Telco, se requiere conectividad a la Red Telefónica Pública Conmutada-PSTN (Public Switched Telephone Network). El retorno Telco, si está disponible desde el MSO, se implementa como una oferta de servicio provisorio, porque su topología de planta no ha sido totalmente actualizada a la operación de dos vías. En tales aplicaciones, se establece una conexión descendente de alta velocidad sobre la planta HFC, mientras que la conexión ascendente se establece a través de un Protocolo Punto a Punto (PPP).

La conexión PPP por la red telefónica, se realizaba con un módem de acceso telefónico en las instalaciones del usuario, y un acceso servidor situado eléctricamente antes de conectarse a Internet. En principio esto describe la definición 1.0 de DOCSIS, producto destinado a apoyar la transmisión de datos a alta velocidad a través de un cable red.

La norma DOCSIS evolucionó a las versiones 1.1, 2.0, 3.0 y 3.1, para aportar servicios adicionales y aplicaciones futuras, versiones coincidentes con las mejoras del producto para satisfacer las necesidades del mercado, garantizar la confiabilidad de la red, y lograr una mayor disponibilidad del sistema.

Los servicios y aplicaciones actuales de las redes HFC incluyen a la telefonía basada en voz sobre protocolo de Internet (VoIP) y al video sobre IP utilizando el formato de trama MPEG, con calidad de servicio (QoS) y definiciones de seguridad mejoradas. Para soportar estos y otros servicios, se dispone de decodificadores denominados STB (Set Top Box) y CM.

2.2.1 DOCSIS 2.0

La especificación DOCSIS 2.0 trajo a la industria del cable una mejora en la tasa de transmisión de datos aguas arriba, hasta un máximo a 30,72 Mbps por canal (el triple de la norma anterior) (Hranac, 2006).

Las funcionalidades en la vía de directa permanecieron prácticamente sin cambios, conservando la capacidad de 64 y 256 QAM. DOCSIS 2.0 define el uso de 8-QAM, 32-QAM y adicionalmente 64-QAM en retorno, y los formatos de modulación de DOCSIS 1.x. Opcionalmente soporta modulación 128-QAM codificada por Acceso Múltiple por División de Código Sincrónica-S-CDMA (Synchronous-Code Division Multiple Access), incorporando espectro ensanchado (spread spectrum).

El mayor rendimiento de retorno por canal de datos disponible con la tecnología DOCSIS 2.0, se lleva a cabo utilizando órdenes superiores de modulación y el aumento de ancho de banda de canal de RF. Los órdenes de modulación más altos a QPSK y 16-QAM requieren una transmisión de datos sustancialmente más robusta. Esto es especialmente necesario en el limitado y hostil espectro inverso de RF utilizado en la mayoría de las redes de cable.

Para facilitar la transmisión más robusta de datos en sentido ascendente, DOCSIS 2.0 introdujo una serie de características llamadas PHY avanzada. A pesar de las mejoras que se han producido en la evolución de DOCSIS, las tasas máximas de datos hacia y desde los módems, tienen límites similares a las anteriores versiones, como se verifica en las comparaciones de la Tabla 8 (CableLabs 2014). La posibilidad de nuevos servicios exige un mayor rendimiento de las redes DOCSIS, que podría lograrse con órdenes de modulación superiores a 64 o 256 QAM, como por ejemplo 1024-QAM en directa. Sin embargo, la velocidad máxima de datos en bruto hacia o desde los cablemodem está limitada por la capacidad en directa de un único canal de 6 MHz, o por el límite de 6.4 MHz de una campana en retorno.

Tabla 8. Comparación de las características de RF de CM hasta DOCSIS 2.0.
(CableLabs 2014)

Parámetro	DOCSIS 1.0	DOCSIS 1.1	DOCSIS 2.0
Downstream			
Frecuencia (MHz)		91-857	
Modulación		64 QAM, 256 QAM	
Filtro (cada extremo)		$\alpha = 18\%$ raíz de coseno alzado (64 QAM)	
		$\alpha = 12\%$ raíz de coseno alzado (256 QAM)	
Tasa de símbolos (Mbaud)		5.0569541 (64 QAM)	
		5.360537 (256 QAM)	
Tasa de bit correspondiente (Mb/s)		30.342 (64 QAM)	
		42.884 (256 QAM)	
Upstream			
Frecuencia (MHz)	5 - 42 MHz (65 MHz máximo, EuroDOCSIS)		
Modulación	QPSK (16 QAM opcional, raramente implementado)	QPSK, 16 QAM	Lo mismo que DOCSIS 1.1 más 8 QAM, * 32 QAM, * 64 QAM (S-CDMA y TDMA, 128 QAM (S-CDMA) solamente)
Filtro	$\alpha = 25\%$ raíz de coseno alzado		
Tasa de símbolo modo TDMA (kbaud)	160, 320, 640, 1280, 2560		Lo mismo que DOCSIS 1.1 más 5120
Tasa de símbolo modo S-CDMA (kbaud)		No aplicable	1280, 2560, 5120
Ancho de canal(kHz) @-30 dB	200, 400, 800, 1200, 3200		Lo mismo que DOCSIS 1.1 más 6400
Data rates (kb/s)	320, 640, 1280, 2560, 5120 (QPSK)	Same as DOCSIS 1.0 plus 10240 (16 QAM)	Same as DOCSIS 1.1 plus up to 30.72 Mb/s in advanced modes
Pre-equalización de Upstream	No	8 taps (opc.)	24 taps

2.2.2 DOCSIS 3.0

Mientras que DOCSIS 1.0, 1.1 y 2.0, utilizan un único canal para transportar datos de directa y otro para los datos de retorno, la especificación DOCSIS 3.0 incluye la unión de canales (channel bonding) en ambas vías, y una serie de mejoras, como el soporte a IPv6 (Hranac, 2006).

La unión de canales proporciona a los operadores de cable una forma flexible para aumentar el rendimiento a los usuarios, con velocidades de datos que potencialmente están en el orden de los gigabits por segundo. En pocas palabras, la unión de canales significa que los datos se transmiten desde o hacia los módems por múltiples canales de RF, en lugar de un solo canal, como se ilustra en la Figura 8 (Al-Banna, 2009).

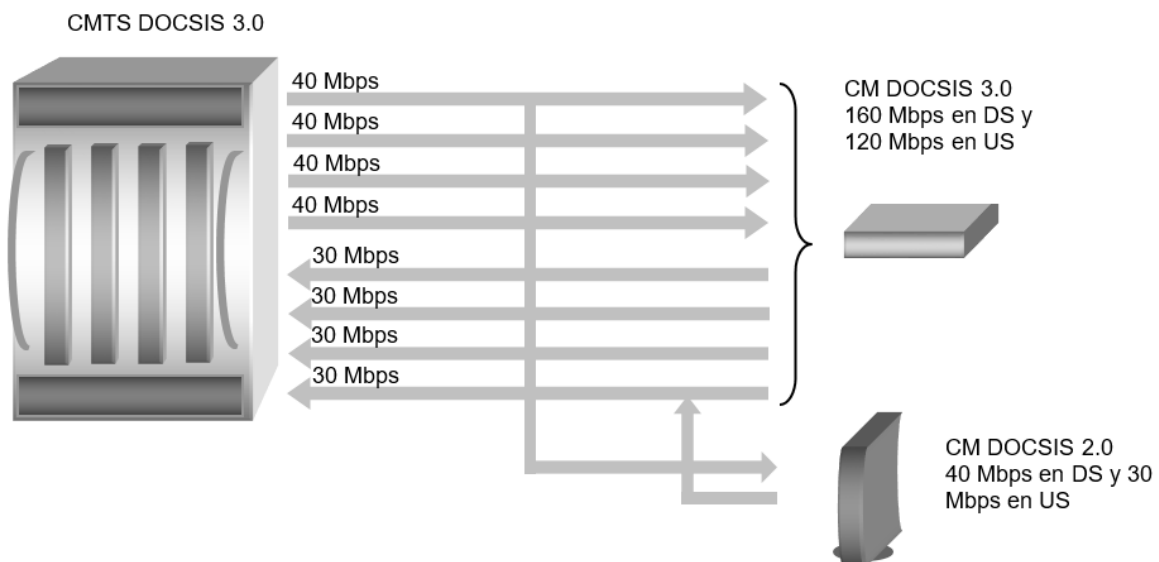


Figura 8. Channel Bonding en DOCSIS 3.0 comparado con versiones anteriores, agrupando canales se logran mayores tasas de transferencia de datos. (redibujada, Al-Banna, 2009)

La unión es lógica, puesto que los canales mantienen su independencia física. Si se desea aumentar la velocidad de datos aguas abajo entre el CMTS y los módems, el único límite es el canal de 6 MHz de ancho de 42,88 Mbps. Si se distribuye la carga útil de datos de bajada a través de cuatro canales de 6 MHz, la velocidad de datos combinada utilizando 256-QAM en cada canal sería $42.88 \text{ Mbps} \times 4 = 171.52 \text{ Mbps}$. Un módem DOCSIS 3.0 incorpora un sintonizador especial capaz de recibir simultáneamente datos de los cuatro canales. Para el módem, los cuatro canales son el equivalente lógico de una gran canal de servicio, a pesar de que se utilizan cuatro canales separados físicamente. Estos canales no necesitan ser adyacentes. Consecuentemente, con 10 canales se producirán $42.88 \text{ Mbps} \times 10 = 428.8 \text{ Mbps}$. Y con la unión de 24 canales, se logran $24 \times 42.88 \text{ Mbps} = 1029.12 \text{ Mbps}$, o un poco más de 1 Gbps (Hranac, 2006).

El mismo concepto de unión de canales es aplicable al retorno, con lo que se supera el límite de 30.72 Mbps establecido por DOCSIS 2.0.

Además del aumento de la eficiencia y de la eficacia en la distribución de la red, DOCSIS 3.0 permite mejorar el protocolo de seguridad (BPI) y agregar canales de Upstream y de Downstream.

Para la versión 3.0 y anteriores es muy importante el mantenimiento de la red, sobre todo en el espectro de retorno, donde se deben minimizar el ingreso de ruido y la generación de distorsiones, que atentan contra la transmisión de los datos. Para reducir las distorsiones lineales, como lo son el retardo de grupo y las micro-reflexiones, se utilizan sistemas de pre-equalización de la señal, que modifican la señal de retorno para adaptarla a las alinealidades del canal de comunicación.

2.2.3 DOCSIS 3.1

Para obtener mayor eficiencia espectral, DOCSIS 3.1 trabaja con modulaciones de mayor orden, que aunque son más eficientes, resultan más vulnerables al ruido e interferencia (García Bish, 2014).

Para mejorar la robustez se trabaja con Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) y además se implementa la corrección de errores por Comprobación de Paridad de Baja Densidad-LDPC (Low Density Parity Check), la que muestra un gran potencial como reemplazo de la Reed Solomon (Zhou y colaboradores, 2008). En este sentido se utilizan múltiples sub-portadoras espaciadas de 20 KHz a 50 KHz. Cada sub-portadora se controla en forma independiente, pudiendo encenderse o apagarse, controlar su nivel y cambiar el orden de modulación. Con ello se logra mayor eficiencia espectral que con channel bonding y se puede superar la restricción de 6 MHz para el ancho del canal, heredada de la TV analógica, y operar con canales de hasta 192 MHz.

La corrección de errores LDPC, al ser una técnica más eficiente, permite mejorar en casi 3 dB la ganancia de codificación, comparada con la codificación Reed Solomon utilizada en las versiones anteriores de la norma DOCSIS, aún con relaciones señal-ruido no tan exigentes (Chen y colaboradores, 2005).

Inicialmente, OFDM surgió para la transmisión simultánea de mensajes a través de un canal lineal limitado en banda (Chang, 1966). Luego se incorporó el concepto de Transformada Discreta de Fourier (DFT) para el desarrollo de la modulación y demodulación en banda base (Weinstein y Ebert, 1971). Para combatir la Interferencia entre Símbolos (ISI), se utilizó un espacio de guarda entre símbolos con un filtro de coseno alzado en el dominio temporal. Para la interferencia entre canales (ICI) se utilizó la ortogonalidad de sub-canales. Posteriormente se introdujo el concepto de prefijo cíclico (CP) o extensión cíclica. Para resolver el problema de la ortogonalidad en este caso, se completa el espacio de guarda vacío con una extensión cíclica del símbolo (Peled y Ruiz, 1980).

OFDM envía la información modulando en QAM una serie de sub-portadoras de distintas frecuencias, aprovechando las diferentes condiciones de cada porción del canal en cuanto a ruido y distorsiones se refiere, a fin de lograr una mejor tasa de transferencia. Es un proceso relativamente fácil de implementar utilizando técnicas de FFT (Fast Fourier Transform: Transformada Rápida de Fourier), que se utiliza en variados sistemas de comunicaciones, sobre todo inalámbricos.

2.3 Estado actual

Las redes de difusión coaxial históricas cuentan con limitaciones propias a su arquitectura en cuanto a la calidad de la señal de directa, prácticamente impidiendo la transmisión en doble vía. El espectro de menor frecuencia comúnmente usado para el retorno sufre las consecuencias del ruido, las distorsiones y la sumatoria de usuarios de toda la red.

Los sistemas HFC brindan la posibilidad de construir redes bidireccionales, en función de la utilización de la fibra óptica y la reducción de las áreas de servicio, y otorgan beneficios capaces de soportar la conectividad de datos de alta velocidad.

El estándar DOCSIS, formulado por CableLabs, es el más utilizado a nivel global, y junto a protocolos de señalización, servidores necesarios, y especificaciones de los productos genéricos permiten una utilización eficaz de la planta HFC.

La evolución de DOCSIS permite ampliar las capacidades actuales a niveles superiores en el futuro, las que están resumidas en la Tabla 9 (García Bish, 2014).

Tabla 9. Capacidades Actuales y Futuras - DOCSIS 3.0 y 3.1. (García Bish, 2014)

	Actual	Futuro 1	Futuro 2	Futuro 3
Versión de DOCSIS	3.0	3.0	3.0	3.1
Rango de Downstream	54 - 860	54 - 1002	80 - 1002	300 - 1200
	256	256	256	≥1024
Modulación de Downstream				
Downstream Bonding	4	24	32	64
	160			
Capacidad Downstream	Mbps	1 Gbps	1.25 Gbps	3.8 Gbps
Rango Upstream	5 - 42	5 - 42	5 - 65	5 - 230
	16	64	64	≥256
Modulación de Upstream				
Upstream Bonding	2	4	8	32
Capacidad Upstream	40 Mbps	100 Mbps	240 Mbps	1.25 Gbps

CableLabs establece un conjunto de requisitos para consensuar un nuevo dispositivo que facilite la evolución hacia una arquitectura de acceso a la red convergente, llamado Plataforma de Acceso de Cable Convergente-CCAP (Converged Cable Access Plataform) (Martínez, 2011). Este nuevo equipo integra las funciones de QAM de broadcast y narrowcast, como así también las interfaces de Upstream y Downstream. También se prevé la inclusión del soporte de terminales de Redes PON (Passive Optical Network: Redes Pasivas Ópticas) en el mismo chasis.

La utilización de las nuevas versiones de DOCSIS tiene aún un campo para desarrollarse, sobre todo mientras los costos y las limitaciones prácticas de implementación de los sistemas enteramente ópticos sean superiores a los de las redes HFC.

En este sentido, la red HFC logra un compromiso entre el costo y las prestaciones, limitando el uso de la fibra óptica hasta un nodo óptico, que atiende a varios usuarios, y accede a los mismos a través de un medio de transmisión más económico, pero con un suficiente ancho de banda para la mayoría de las necesidades de tasas de transferencia de datos, actuales y futuras.

Con la desaparición de la transmisión de señales de televisión analógica que se van produciendo en diversos países, se abren nuevas posibilidades para las redes híbridas, que heredaron una gran ocupación de ancho de banda para este fin.

La liberación de unos 500 MHz de ancho de banda permitirá su utilización en la transmisión de datos que se requieren en los nuevos sistemas, basados en las últimas versiones de DOCSIS.

3. Esquema de red

Los diferentes sistemas de acceso de datos pueden agruparse, según sugieren Şahin y colaboradores (2009) en: a) cableados (redes físicas) y b) no cableados (redes inalámbricas), como se ilustra en la Figura 9.

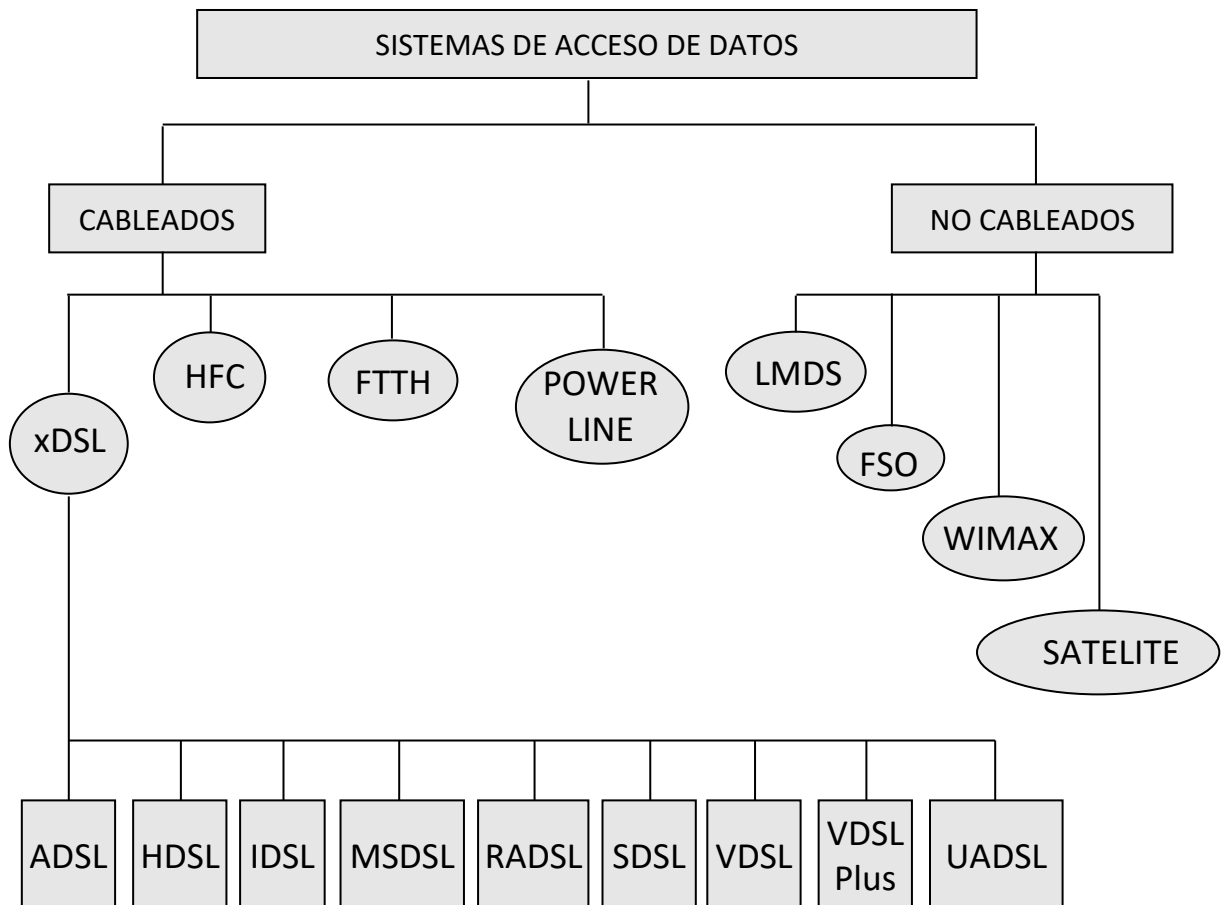


Figura 9. Los distintos sistemas físicos e inalámbricos de acceso de datos. (redibujada, Şahin y colaboradores, 2009)

Las redes cableadas incluyen a las de par de cobre (xDSL), a las híbridas de cable coaxial y fibra óptica (HFC), a las de fibra óptica directa al hogar (FTTH) y a las que acceden a través de las líneas de distribución eléctricas (Power Line), como lo han detallado Martín y colaboradores (2011).

La idea original de reemplazar las líneas telefónicas de cobre con fibra, no ha podido llevarse a la práctica aún en su totalidad, representando una demora en la introducción generalizada del acceso de banda ancha, como se preveía en los inicios del desarrollo de la fibra óptica. No obstante, existe una gran variedad de arquitecturas de Fibra Profunda-Fiber Deep (Rice, 2015), en las que el extremo de la fibra se encuentra más cerca del usuario final. Una de estas arquitecturas, es la línea de abonado digital de muy alta velocidad (VDSL) a base de fibra para el nodo en los sistemas derivados de la red telefónica. Otra arquitectura es la de datos sobre la especificación de la interfaz de servicio de cable-DOCSIS sobre red HFC. El desarrollo evolutivo de estas arquitecturas concluiría en la utilización de redes pasivas-PON (Passive Optical Network) (Effenberger, 2016).

Una propuesta de red HFC que utiliza el estándar DOCSIS es la presentada por Zhang y colaboradores (2010) que se muestra en la Figura 10.

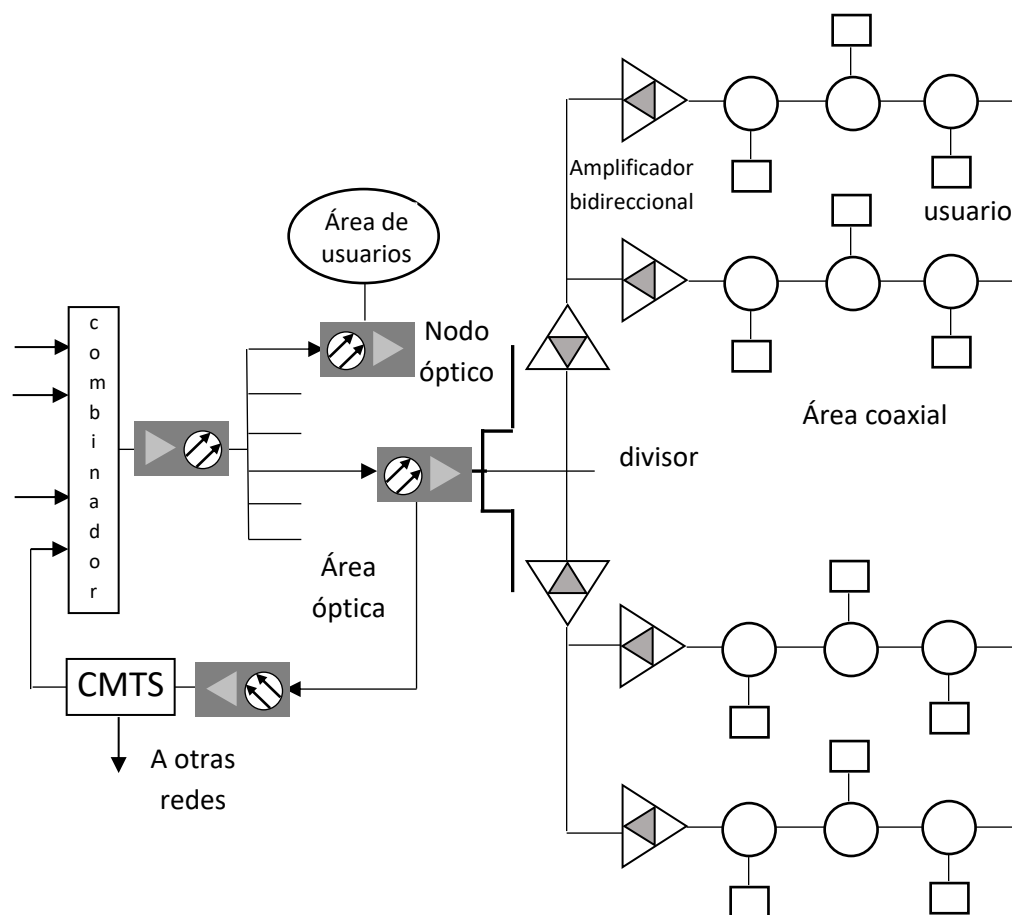


Figura 10. Topología de red HFC que utiliza el estándar DOCSIS. (redibujada, Zhang y colaboradores, 2010)

Del análisis del espectro de frecuencias disponibles en los componentes de las redes híbridas de fibra y cable coaxial, surge claramente que el cable coaxial es el que presenta mayores limitaciones para altas tasas de transmisión de datos, por lo que se estudian nuevos esquemas de transmisión, combinando métodos de acceso y sistemas de modulación, a fin de aprovechar al máximo sus posibilidades (Hamzeh, 2016).

Desde el punto de vista práctico, siempre es más fácil y económico utilizar cable coaxial antes que fibra óptica, sobre todo en lugares donde se requieren muchas conexiones y no se puede asegurar un adecuado tratamiento como el requerido en mayor medida por la fibra óptica. Ésta es la ventaja de utilización de cable coaxial en los últimos tramos de las redes, donde la mayoría de las tasas de transmisión de datos actuales y las previstas en el mediano plazo son viables (Martín y colaboradores, 2011). El uso de la fibra óptica se reserva para recorrer los primeros tramos de la red, en donde se reúnen varios flujos de datos y se recorren largas distancias, aspectos en los que la fibra óptica es la mejor opción disponible.

La evolución de la especificación DOCSIS ha afectado ocasionalmente a la conocida red HFC. La versión DOCSIS 1.1 no tuvo ningún impacto porque la incorporación de QoS utilizando flujos de servicio mejoró el aprovechamiento del ancho de banda existente. La versión DOCSIS 2.0, por otro lado, agregó un formato de modulación de orden superior y canales más amplios. Aunque se aumentó la robustez a través de FEC mejorado y entrelazado, el inevitable aumento en la carga de canales exigió una revisión de la red aguas arriba. Los láseres de Fabry-Perot, por ejemplo, cayeron en desuso. El aumento significativo del rendimiento producido con la unión de canales en la versión 3.0 de DOCSIS, tuvo poca incidencia en la red HFC, porque si bien hubo una utilización mejorada del ancho de banda existente, se continuó con los canales de 6 MHz heredados del sistema de televisión NTSC (Ping y colaboradores, 2013). El paso evolutivo más reciente a DOCSIS 3.1 obligó revisar HFC debido a los nuevos formatos de modulación y ancho de banda ampliada (CableLabs, 2016). Los grados de modulación más altos exigen una mayor relación portadora a ruido (CNR). Los cambios de ancho de banda requieren una adecuación de la potencia por canal (He y colaboradores, 2016).

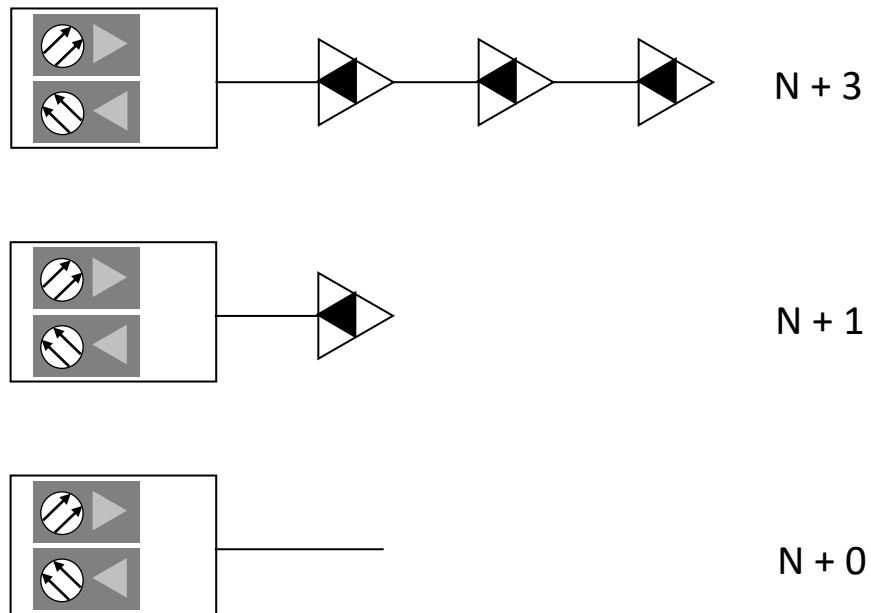


Figura 11. Reducción de activos en la red HFC, desde la típica configuración con 3 amplificadores hasta Fiber Deep sin amplificadores.

Para lograr mejores parámetros de CNR, y así poder utilizar esquemas de modulación más elevados, se requiere disminuir la cascada de amplificadores tanto como sea posible (Figura 11). Ello se logra con un sistema de Nodo óptico pasivo, o sea sin amplificadores, conocido habitualmente como Nodo más cero (N+0) o de fibra profunda (Fiber Deep). La Figura 12 muestra la topología que proponemos para evaluar las máximas tasas de transferencia de datos. En las próximas secciones discutimos en detalle sus características.

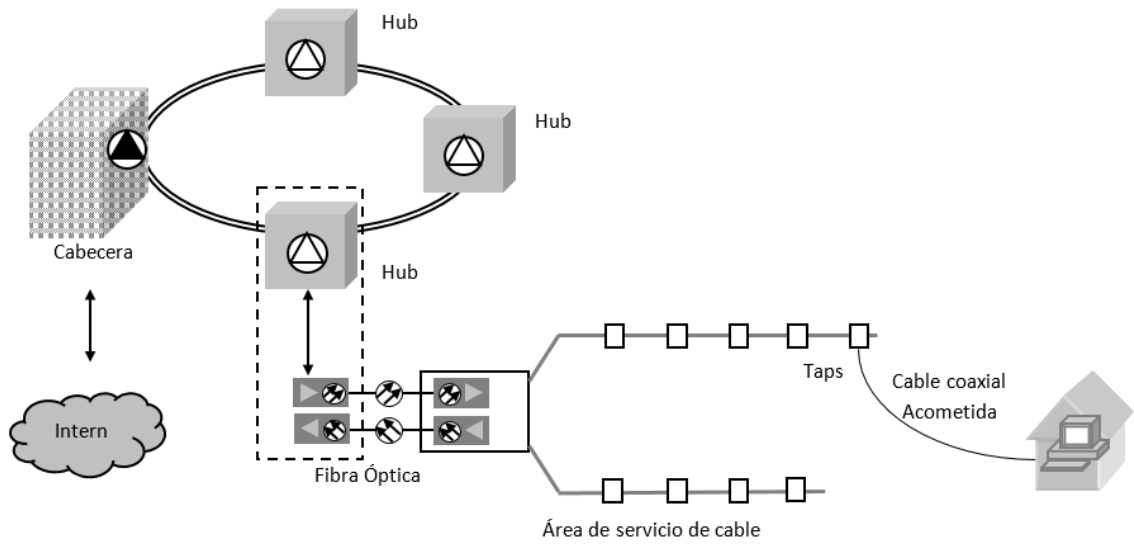


Figura 12. Red HFC propuesta en configuración nodo más 0 (N+0).

4. Espectros de frecuencias de Downstream y Upstream

4.1 Antecedentes

Las redes de cable coaxial originalmente unidireccionales utilizaban Multiplexación por División de Frecuencia-FDM (Frequency Division Multiplexing) para las señales de directa (Downstream). Estas señales se amplificaban, y se transmitían en sentido descendente para su distribución (Freeman, 2005). Como se mencionó anteriormente, con el tiempo y a los fines de sumar canales, los anchos de banda de las redes pasaron de 220 MHz a 330 MHz, a 450 MHz y finalmente a 550 MHz. Estas redes tenían en principio una disposición “árbol y rama”, que consistía en una red troncal formada por cable coaxial de gran diámetro, para reducir las atenuaciones propias del cable, y una cascada de amplificadores para compensar la pérdida de potencia de la señal (Lee, 2011). Desde la red troncal se derivaban las redes de distribución formadas por amplificadores de mayor ganancia y los elementos pasivos, como divisores, acopladores y los taps o derivadores. Estos últimos permitían la conexión a los usuarios a través de cables coaxiales flexibles. Estas redes, además de ser unidireccionales, poseen largas cascadas de amplificadores que ocasionan ruido y son inherentemente poco fiables y propensas a fallas.

También se mencionó en otras secciones que la incorporación de la fibra óptica, y en consecuencia el advenimiento de red HFC, representó la primera mejora importante a la planta de CATV. Desde la cabecera, un cable óptico multifibra reemplaza porciones del cable coaxial y los elementos de soporte de amplificación troncal. Un láser de directa, modulado por la señal de RF, transmite la señal óptica a un nodo, en donde se convierte nuevamente en señal eléctrica, la que se propaga aguas abajo en el área de usuarios. Se advierte que la introducción de la fibra puede reducir el número de amplificadores en cascada. Esta reducción significativa de la cantidad de amplificadores produce una mejora de la fiabilidad del sistema, de la Relación Señal a Ruido-SNR de la señal de video (Ying y Li, 2015), y del ancho de banda potencial del mismo.

El funcionamiento bidireccional de las redes se consigue mediante la adición de los amplificadores de retorno, además de un láser de retorno de banda estrecha en el nodo

óptico, una fibra dedicada y, en la cabecera, un receptor óptico compatible para convertir las señales ópticas en eléctricas.

La utilización en principio de la fibra óptica en la distribución de señales de televisión, y luego para la transmisión de datos, ha sido posible gracias al desarrollo de láseres con características de linealidad suficientes para producir distorsiones mínimas en las señales AM-VSB (Ciciora, 2004).

Las redes HFC, al introducir la transmisión por fibra óptica en la red de acceso, minimizan las distorsiones introducidas por las cadenas de amplificadores. La atenuación de la fibra es mucho menor que la del cable coaxial, lo que permite que se aumenten las distancias a cubrir.

La posibilidad de transmitir datos desde el usuario hacia la cabecera es una ventaja de las redes HFC. Esto se consigue por división en frecuencia, dedicando la parte baja del espectro, de 5 a 42 MHz típicamente, para esta transmisión (Nokia, 2016).

Para estos trayectos de transmisión hacia la cabecera en la red troncal, una primera opción consiste en mantener los dominios de compartición del ancho de banda ascendente, y en consecuencia los dominios de colisión, circunscriptos a cada área atendida por la red de cable coaxial, o sea al área atendida por un nodo óptico (César y Vasant, 2010). El canal descendente, que es el de mayor ancho de banda potencial, se comparte por todos los usuarios.

La transmisión de datos se logra con sistemas de terminación de módems de cable (CMTS) en cada hub (Plevyak, 2010), utilizando alguna de las versiones del estándar DOCSIS.

La versión 3.0 de DOCSIS introduce el concepto de compartición de canales (Channel Bonding) a fin de incrementar los anchos de banda en directa, hasta 32 canales de 6 MHz, y en retorno (Al-Banna, 2012).

La última versión, la 3.1, otorga nuevas herramientas que posibilitan un aumento importante en las tasas de transmisión de datos (Hamzeh, 2016), equiparándose en algunos casos a velocidades brindadas únicamente por la fibra óptica. Se introduce la técnica de transmisión OFDM en canales de directa de hasta 192 MHz, lo que lleva las tasas de transmisión a valores del orden de giga bits por segundo (Effenberger, 2016).

En el retorno se utiliza el Método de Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales-OFDMA (Orthogonal Frequency Division by Multiple Access). También se puede incrementar el ancho de banda hasta los 200 MHz (Toy, 2015).

4.2 Espectro para la transmisión de datos

En este trabajo, proponemos utilizar el espectro disponible, sólo para la transmisión de datos.

Esto modifica el uso actual, en el que las redes HFC comparten el espectro con datos en directa y con servicios de televisión analógica y digital (Stoneback, 2011).

En los últimos años se expandió el uso de redes con un ancho de banda de 900 MHz para la transmisión directa. Debe mencionarse, sin embargo, que en la actualidad ya se construyen algunas redes a 1,2 GHz (He y colaboradores, 2016). El estándar DOCSIS 3.1 propone un espectro de directa que llega hasta 1,8 GHz (CableLabs, 2014). Con este estándar se lograría prácticamente una duplicación del espectro utilizado en la actualidad, a costa de una disminución en las distancias a cubrir, por la atenuación propia del cable en altas frecuencias, como se ilustra en la Figura 13.

Se obtienen velocidades de transmisión de datos más elevadas en Downstream si se elige un ancho de banda de frecuencia inferior 258 MHz y superior de 1794 MHz. Se logra así contar con 8 canales de 192 MHz, considerando que sólo se utilizará este espectro para la transmisión de datos digitales.

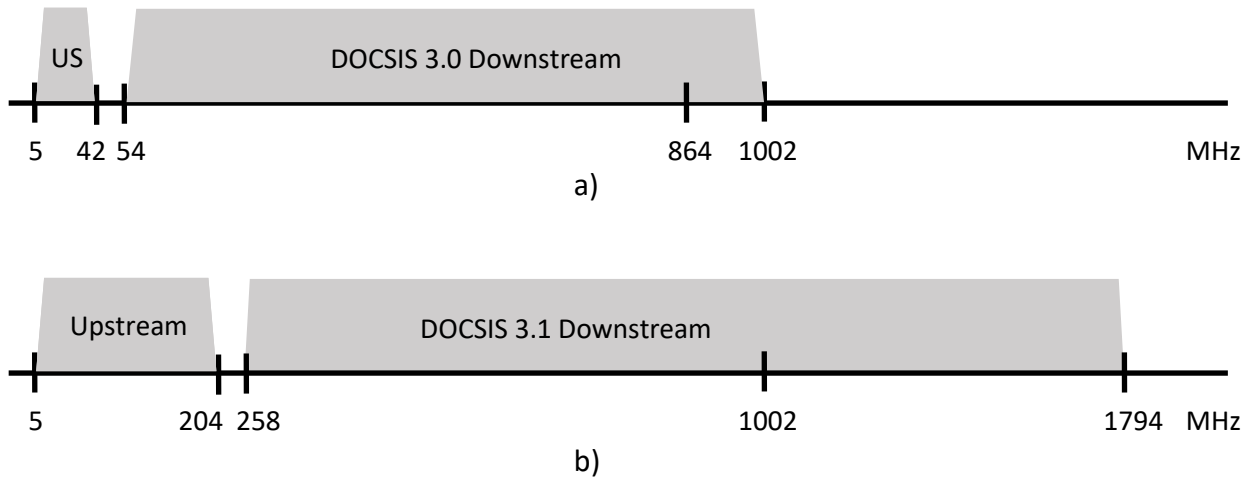


Figura 13. Planes de frecuencia a) actual y b) propuesto, donde se observa la extensión del espectro de retorno desde los 5 y hasta los 204 MHz y de directa desde los 258 y hasta los 1794 MHz.

En Upstream, con una frecuencia inferior es de 5 MHz y un límite superior de 204 MHz se obtienen 2 canales de 96 MHz.

Debido al nuevo límite superior del espectro de 1794 MHz, para compensar las pérdidas se deberán considerar mayores niveles de salida de señal desde el nodo.

En la Tabla 10 se listan las atenuaciones a diferentes frecuencias del cable coaxial RG6, de uso general en las acometidas domiciliarias, medidas a una temperatura ambiente de 20°C y en dB cada 100 metros (Commscope, 2018).

Tabla 10. Rendimiento eléctrico de cable coaxial RG6. (Commscope, 2018)

Frecuencia (MHz)	Atenuación (dB/100 m)	Atenuación (dB/100 ft)
5	1.90	0.58
55	5.25	1.60
83	6.40	1.95
85	6.46	1.97
187	9.35	2.85
204	9.84	3.00
211	10.00	3.05
250	10.82	3.30
300	11.64	3.55
350	12.63	3.85
400	13.61	4.15
450	14.43	4.40
500	15.29	4.66
550	16.08	4.90
600	16.73	5.10
750	18.54	5.65
865	20.01	6.10
1000	21.49	6.55
1218	23.66	7.21
1300	24.71	7.53
1400	25.71	7.84
1500	26.68	8.13
1600	27.63	8.42
1700	28.54	8.70
1794	29.39	8.96
1800	29.44	8.97

Las atenuaciones del cable RG6 y del cable coaxial rígido de red pueden compensarse utilizando nodos ópticos, que ofrecen niveles de salida de hasta 64 dBmV. La Tabla 11 ilustra las características del nodo óptico GS7000, mostrando sus rendimientos de directa y retorno (Cisco, 2017).

Tabla 11. Rendimiento de directa y retorno, nodo óptico Cisco GS7000.
(Cisco, 2017)

Rendimiento de directa 5-85/102 Split	Unidades	
Tipo de amplificador	-	GaN
Ganancia Operacional (mínima)	dB	42
Respuesta en frecuencia...		
105 a 1002 MHz	dB	±0.5
1003 a 1218 MHz	dB	±0.7
Pendiente interna (±1 dB)	dB	21
Aislación Puerto a Puerto con segmentación completa	dB	N/A
Aislación Puerto a Puerto con segmentación derecha e izquierda	dB	N/A
Ruido a: 54 MHz	dB	14.0
1218 MHz		13.0
Niveles de referencia de salida a 1218 MHz	dBmV	64
(equivalente analógico): 1002 MHz		59.9
870 MHz		57.4
750 MHz		55.2
650 MHz		53.3
550 MHz		51.4
105 MHz		43
Pendiente de referencia de salida (55 a 1218 MHz)	dB	21
78 Canales NTSC (CW) con Digital		
Triple batido compuesto	dB	60
Batido compuesto de Segundo orden (canal alto)	dB	62
CCN	dB	50
Toda modulación de amplitud en cuadratura (QAM)		
CCN	dB	51

5. Método de acceso y modulación en Downstream y Upstream

5.1 Downstream

La especificación DOCSIS 3.1 introduce OFDM en Downstream con esquemas de modulación de hasta 16K QAM. Se definen dos modos de operación para el flujo descendente: modos 4K FFT y 8K FFT para una tasa de muestreo de 204.8 MHz.

En Downstream se utiliza una frecuencia de reloj maestro de 10.24 MHz. El canal de RF puede ocupar un ancho de banda que va desde 24 hasta 192 MHz. El tamaño de la IDFT es de 4096 en el modo 4K y de 8192 en el modo 8K, con un espaciado de sub-portadoras de 50 y 25 KHz respectivamente.

La duración del símbolo útil (T_u) es de 20 μ s en el modo 4K y de 40 μ s en el modo 8K. La cantidad de sub-portadoras activas para un canal de 192 MHz, del cual se utilizan efectivamente 190 MHz, resulta ser de 3800 en el modo 4K y de 7600 para el caso de 8K.

El prefijo cíclico ocupa tiempos que van desde los 0.9375 μ s hasta los 5 μ s.

La Tabla 12 resume los valores numéricos de los parámetros de la señal OFDM en sentido descendente (CableLabs, 2014).

Anchos de banda mayores que 192 MHz se logran valorando por cero las sub-portadoras antes de la IDFT, es decir, ajustando el número equivalente de sub-portadoras activas, mientras se mantiene el mismo espaciado de sub-portadora de 25 kHz o 50 kHz.

Tabla 12. Parámetros de la señal de Downstream OFDM. (CableLabs, 2014)

Parámetro	Modo 4K	Modo 8K
Frecuencia de reloj maestro de Downstream	10.24 MHz	
Tasa de muestreo de Downstream (fs)	204.8 MHz	
Periodo de muestreo en Downstream (Tsd)	1/(204.8 MHz)	
Ancho de banda de canal	24 MHz ... 192 MHz	
Tamaño de IDFT	4096	8192
Espaciamiento de sub-portadoras	50 kHz	25 kHz
Duración de FFT (duración de símbolo útil)(Tu)	20 μ s	40 μ s
Número máximo de sub-portadoras activas en la señal (canal de 192 MHz) Valores referidos a 190 MHz de sub-portadoras usadas.	3800	7600
Máximo espaciamiento entre la primera y última sub-portadora activa	190 MHz	
Prefijo Cíclico	0.9375 μ s (192 . Tsd)	
	1.25 μ s (256 . Tsd)	
	2.5 μ s (512 . Tsd)	
	3.75 μ s (768 . Tsd)	
	5 μ s (1024 . Tsd)	
Enventanado	Enventanado de coseno alzado, embebido en el prefijo cíclico	
	0 μ s (0 . Tsd)	
	0.3125 μ s (64 . Tsd)	
	0.625 μ s (128 . Tsd)	
	0.9375 μ s (192 . Tsd)	
	1.25 μ s (256 . Tsd)	

5.2 Upstream

DOCSIS 3.1 utiliza el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA) y esquemas de hasta 4096 QAM para la modulación ascendente. OFDMA es una versión multiusuario de OFDM y asigna subconjuntos de sub-portadoras a CM individuales. Los parámetros de OFDMA en sentido ascendente se derivan de los parámetros de sentido descendente.

De manera análoga al Downstream, se definen dos modos de operación para el flujo ascendente: modos 2K FFT y 4K FFT para una tasa de muestreo de 102.4 MHz.

El canal de RF puede ocupar un ancho de banda que va desde 10 MHz hasta los 90 MHz efectivos. El tamaño de la IDFT es de 2048 en el modo 2K y de 4096 en el modo 4K, con un espaciado de sub-portadoras de 50 y 25 KHz respectivamente.

La duración del símbolo útil (T_u) es de 20 μ s en el modo 2K y de 40 μ s en el modo 4K. La cantidad de sub-portadoras activas para un canal de 96 MHz, del cual se utilizan 95 MHz efectivamente, resulta ser de 1900 en el modo 2K y de 3800 para el caso de 4K.

El prefijo cíclico ocupa tiempos que van desde los 0,9375 μ s hasta los 6,25 μ s.

En la Tabla 13 se exponen los parámetros de la señal OFDMA en sentido ascendente (CableLabs, 2016).

Tabla 13. Parámetros de la señal de Upstream OFDMA. (CableLabs, 2016)

Parámetro	Modo 2K	Modo 4K
Tasa de muestreo de Upstream (fsu)	102.4 MHz	
Período de muestreo en Upstream (Tsu)	1/(102.4 MHz)	
Anchos de banda	10 MHz, ..., 95 MHz	6.4 MHz, ..., 95 MHz
Tamaño de IDFT	2048	4096
(dependiendo del ancho de banda de canal)	50 kHz	25 kHz
Duración de FFT (duración del símbolo útil)(Tu)	20 μ s	40 μ s
Número máximo de sub-portadoras activas en la señal, valores referidos a las sub-portadoras activas en 95 MHz.	1900	3800
Prefijo cíclico de Upstream	0.9375 μ s	(96 . Tsu)
	1.25 μ s	(128 . Tsu)
	1.5625 μ s	(160 . Tsu)
	1.875 μ s	(192 . Tsu)
	2.1875 μ s	(224 . Tsu)
	2.5 μ s	(256 . Tsu)
	3.125 μ s	(320 . Tsu)
	3.75 μ s	(384 . Tsu)
	5 μ s	(512 . Tsu)
	6.25 μ s	(640 . Tsu)
Tamaño de ventana de Upstream	Enventanado de coseno alzado, embebido en el prefijo cíclico	
	0 μ s	(0 . Tsu)
	0.3125 μ s	(32 . Tsu)
	0.625 μ s	(64 . Tsu)
	0.9375 μ s	(96 . Tsu)
	1.25 μ s	(128 . Tsu)
	1.5625 μ s	(160 . Tsu)
	1.875 μ s	(192 . Tsu)
	2.1875 μ s	(224 . Tsu)

6. Cálculo de tasas de transferencia

6.1 Tasas en Downstream

Como se mencionó, el máximo ancho de canal activo en Downstream es de 190 MHz. La cantidad de sub-portadoras activas en el caso del modo 8K son 7600.

El sistema OFDM posee ciertos parámetros necesarios para poder establecer y mantener una comunicación efectiva de los datos. Los pilotos Downstream son sub-portadoras simples (SC) moduladas, en este caso por el CMTS, con un patrón de modulación pre-definido, conocido por todos los cablemodems, para permitir la interoperabilidad. Estos pilotos tienen 6 dB más de nivel de señal que las demás subportadoras.

Los pilotos son de dos tipos: continuos y dispersos. Los pilotos continuos se encuentran en la misma ubicación de frecuencia en cada símbolo OFDM, y se utilizan para sincronización de frecuencia y fase, aunque no transportan datos de carga útil. Los pilotos dispersos aparecen en diferentes frecuencias en diferentes símbolos, a excepción de la banda del PLC (PHY Link Channel) y de las zonas de exclusión. El propósito principal de los pilotos dispersos es calcular la respuesta en frecuencia. Existe un patrón de pilotos dispersos para 4K FFT y otro para 8K FFT. El PLC transmite parámetros de capa física desde el CMTS hasta el cablemodem, parámetros que son críticos para la decodificación de las señales. En una señal OFDM el prefijo cíclico es una copia del final de un símbolo, que se agrega al comienzo del mismo símbolo, con el fin de ayudar a mitigar los efectos de las micro-reflexiones y otros efectos indeseados. Un símbolo OFDM puede contener más de una palabra de código (CodeWord), y esta palabra puede requerir más de un símbolo OFDM. Detectar dónde comienza la siguiente palabra de código, en un símbolo OFDM, puede ser difícil. Los NCP (Next Codeword Pointer) son bloques de mensajes utilizados para identificar el comienzo de las CodeWords. Las subportadoras NCP se modulan usando QPSK, 16QAM o 64QAM. El PLC especifica la modulación utilizada por los NCP.

Este sistema OFDM, utiliza 88 pilotos continuos y 60 dispersos para el modo 8K y 30 dispersos para el modo 4K. Las sub-portadoras PLC son 16 en el modo 8K y 8 en el modo 4K. En ambos modos, la duración del prefijo cíclico CP es de 2.5 μ s y las sub-portadoras NCP son 48. La tasa de código FEC efectiva se estima en 0.8785. Estos valores se resumen en la tabla 14 (Al-Banna y Cloonan, 2014).

Tabla 14. Parámetros de la señal OFDM en Downstream de DOCSIS 3.1. (Al-Banna y Cloonan, 2014)

Parámetro	Valor	
Tamaño de canal	192 MHz con 190 MHz de espectro activo	
Separación de Sub-portadoras	25 kHz	50 kHz
Tamaño de la FFT	8K (8192)	4K (4096)
Duración de la FFT	40 μ s	20 μ s
Sub-portadoras en 192 MHz	7680	3840
Sub-portadoras activas en 190 MHz	7600	3800
Banda de guarda (2MHz total)	80 sub-portadoras	40 sub-portadoras
Pilotos continuos	88	88
Pilotos dispersos	60	30
Sub-portadoras PLC	16	8
Duración de CP	2.5 μ s	
Sub-portadoras NCP	48	
Tasa de código FEC efectiva	0.8785	

Con los parámetros de la Tabla 14 se puede calcular la eficiencia espectral de DOCSIS 3.1 para los canales asincrónicos con tamaño FFT de 8K, expresada en Símbolos por Segundo por Hertz (Sps/Hz).

Así, de 7680 sub-portadoras totales en un canal de 192 MHz se restan: 80 subportadoras correspondientes a las bandas de guardas de 2 MHz (1 MHz al comienzo del canal y 1 MHz al final), los 88 pilotos continuos, los 60 pilotos dispersos, y las 48 sub-portadoras NCP. Luego esta diferencia se divide por el total de sub-portadoras originales, se multiplica por la duración de la FFT (40 μ s) y se divide por la suma de la FFT y el prefijo cíclico que en este caso se asume con un valor medio de 2.5 μ s (42.5 μ s). Finalmente se

multiplica por la tasa de código FEC efectiva que es 0.8785, obteniéndose el valor de 0.7954 Sps/Hz como eficiencia espectral.

Esto es:

$$\left[\frac{(7680 - 80 - 88 - 60 - 48)}{7680} \right] \cdot \left(\frac{40}{42.5} \right) \cdot 0.8785 = 0.7954 \text{ Sps/Hz}$$

Por su parte, los canales sincrónicos proporcionan una mayor eficiencia espectral QAM, estimada en 0.8040 Sps/Hz (Al-Banna y Cloonan, 2014).

Con los valores de eficiencia espectral de canales asincrónicos, se calcula la tasa de bits por segundo de los 8 canales de 192 MHz en Downstream. La Tabla 15 expone estos resultados para distintos esquemas de modulación.

Tabla 15. Tasa en Downstream.

Modulación	Sps/Hz	Sps 190 MHz	1 canal (bps)	8 canales (bps)
256 QAM	0.7954	151126000	1209008000	9672064000
512 QAM	0.7954	151126000	1360134000	10881072000
1024 QAM	0.7954	151126000	1511260000	12090080000
2K QAM	0.7954	151126000	1662386000	13299088000
4K QAM	0.7954	151126000	1813512000	14508096000
8K QAM	0.7954	151126000	1964638000	15717104000
16K QAM	0.7954	151126000	2115764000	16926112000

Para Downstream el valor es de **16.9 Gbps**, varias veces superior al máximo disponible en las redes actuales, y competitivo con respecto a los sistemas FTTH de uso comercial.

De manera análoga al caso de Downstream, se puede estimar la eficiencia espectral en Upstream resultando ser 0.8146 Sps/Hz (Al-Banna y Cloonan, 2014).

La Tabla 17 presenta los resultados del cálculo para un canal de 95 MHz efectivo, y para un máximo de dos canales.

Tabla 17. Tasa en Upstream.

Modulación	Sps/Hz	Sps 95 MHz	1 canal (bps)	2 canales (bps)
256 QAM	0.8146	77387000	619096000	1238192000
512 QAM	0.8146	77387000	696483000	1392966000
1024 QAM	0.8146	77387000	773870000	1547740000
2K QAM	0.8146	77387000	851257000	1702514000
4K QAM	0.8146	77387000	928644000	1857288000

Se observa que utilizando 2 canales de 95 MHz (columna 5) y una modulación 256 QAM, se logra una tasa superior a un Gbps. Utilizando una modulación 4K QAM se obtiene una tasa de transferencia de datos máxima en Upstream de **1.86 Gbps**.

7. Requerimientos de calidad de señal

Para obtener las tasas en bits por segundo calculadas y presentadas en la sección anterior, se deben cumplir con requerimientos de calidad de señal adecuados.

Park y Chung (2011) encuentran que la utilización de corrección de errores hacia adelante (FEC LDPC) reduce los requerimientos de SNR entre 1.5 y 2.5 dB.

Según Al-Banna y Cloonan (2014) las simulaciones teóricas muestran que los códigos LDPC pueden ofrecer mejoras de hasta 6 dB con respecto al FEC RS que se usa actualmente en DOCSIS 3.0.

La relación señal a ruido necesaria para cada de modulación puede ser menos estricta si se utilizan distintos métodos de FEC (Latini, 2015). Los umbrales de SNR para cada modulación se muestran en la Tabla 18 para el caso de Downstream (Al-Banna y Cloonan, 2014).

Tabla 18. SNR necesaria en Downstream para cada modulación.
(Al-Banna y Cloonan, 2014)

Modulación	SNR
16QAM	15
64QAM	21
128QAM	24
256QAM	27
512QAM	30.5
1024QAM	34
2048QAM	37
4096QAM	41

En Upstream, si bien se utilizan modulaciones de menor orden, se hace más difícil obtener valores de SNR tan altos como en Downstream.

La Tabla 19 ilustra los requerimientos para cada nivel de modulación QAM.

Tabla 19. SNR para distintas modulaciones QAM en Upstream. (Latini, 2015)

Modulación	SNR	SNR Máx.
QPSK	8	14
QAM16	14	20
QAM64	20	23
QAM128	23	26
QAM256	26	29
QAM512	29	32
QAM1024	32	-

En el área de las telecomunicaciones, el índice SNR de la relación señal a ruido tiene en cuenta en general la señal sin modular. Por otro lado, se considera CNR como la relación entre la potencia promedio de la portadora, y la potencia de ruido promedio en el ancho de banda ocupado. La potencia de ruido promedio está dada por la densidad espectral de potencia de ruido integrada en el mismo ancho de banda ocupado (Al-Banna y Cloonan, 2014). En función de este parámetro se obtienen los requerimientos de la tabla 20:

Tabla 20. Umbral CNR (en entrada CMTS) necesario para admitir diferentes órdenes de modulación Upstream. (Al-Banna y Cloonan, 2014)

Constellation	CNR (dB)	Set Point (dBmV)
BPSK	8.0	-4
QPSK	11.0	-4
8-QAM	14.0	-4
16-QAM	17.0	-4
32-QAM	20.0	-4
64-QAM	23.0	-4
128-QAM	26.0	0
256-QAM	29.0	0
512-QAM	32.5	0
1024-QAM	35.5	0
2048-QAM	39.0	7
4096-QAM	43.0	10

8. Discusión de resultados

Los cálculos obtenidos en las secciones anteriores muestran que las máximas tasas de transferencia de datos en Downstream y Upstream son de 16.9 Gbps y 1.8 Gbps, respectivamente. Para poder lograr estos límites es necesario mantener altos niveles de SNR en la red HFC, concretamente más de 40 dB, cuando se utiliza corrección de errores LDPC como FEC.

Si los valores de SNR son menores a los antes mencionados, se consiguen igualmente tasas de transferencia de datos elevadas.

Para analizar las posibilidades prácticas de implementación de la versión 3.1 de DOCSIS, se requiere evaluar los niveles de SNR de las redes actuales, y de esa manera determinar los índices de modulación que podrían ser utilizados por cada sub-portadora del sistema OFDM, y en función de estos, las tasas de transferencia que se lograrían.

En la Figura 14 se muestra la distribución de la SNR de la señal recibida en los cablemodems en las redes actuales según Al-Banna y Cloonan (2014) y Latini (2015).

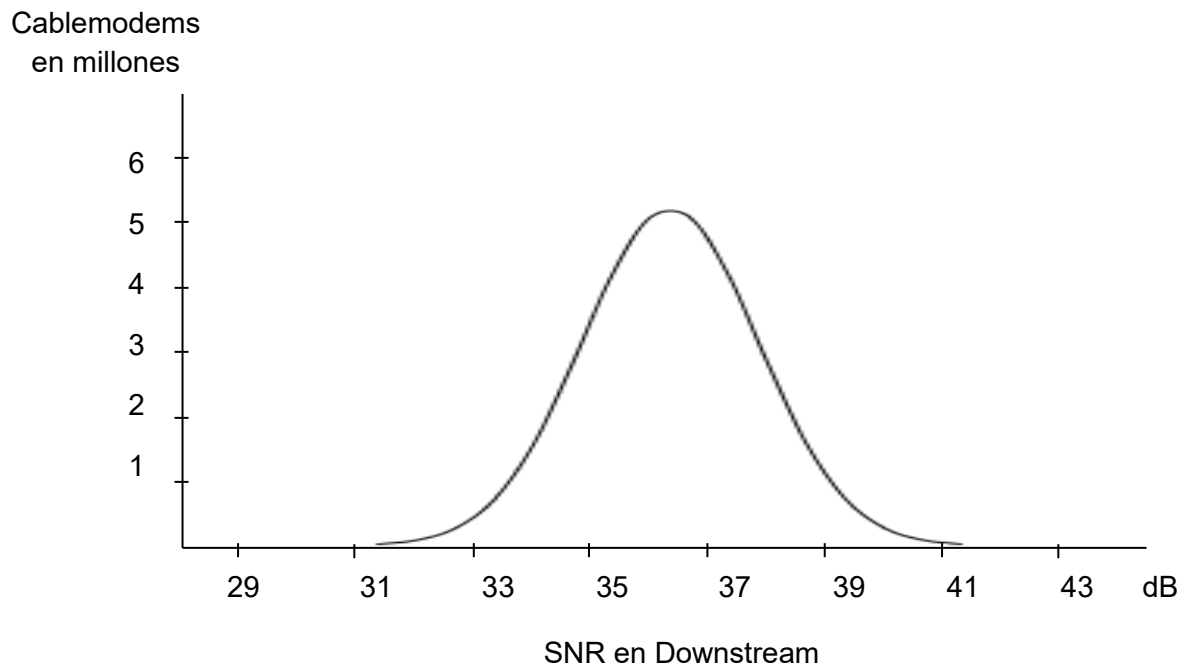


Figura 14. Cantidad de cablemodems operando a diferentes SNR en redes HFC actuales. (redibujada, Al-Banna y Cloonan, 2014)

En la Figura 14, se observa que la mayoría de los cablemodems en redes actuales se encuentran operando centrados en valores cercanos a los 37 dB de SNR. Estas medidas si bien no permitirían llegar a las máximas tasas de transferencia antes mencionadas, igualmente permitirían obtener tasas superiores a los 10 Gbps en Downstream y de 1 Gbps en Upstream, aprovechando los múltiples perfiles de modulación (MMP, Multiple Modulation Profile) que ofrece DOCSIS 3.1.

El despliegue de la curva de distribución de la Figura 14 sobre los distintos perfiles de modulación, permite identificar la zona de operación de la mayoría de los cablemodems, como lo ilustra la Figura 15.

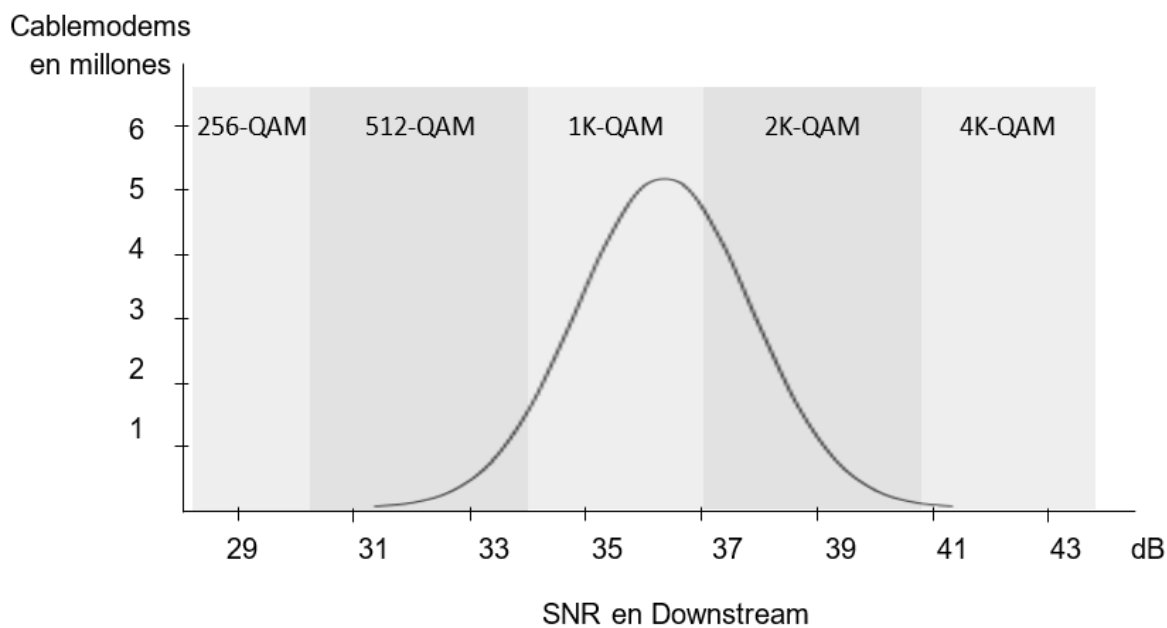


Figura 15. Perfiles de modulación según SNR. (redibujada, Al-Banna y Cloonan, 2014)

Las redes actuales son en su mayoría de configuración N+3, es decir nodo más 3 amplificadores por rama de distribución. Por la extensión de las mismas los valores de SNR no son mayores a los graficados.

La implementación de DOCSIS 3.1 en estas redes sólo necesitaría de la actualización de las placas de los CMTS DOCSIS 3.0 actuales, y la instalación de cablemodems nuevos del lado del usuario.

Adicionalmente, los planes de mejora de las redes, reduciendo la cascada a 1 amplificador (N+1) o a ninguno (N+0), brindaría la posibilidad de obtener mayor eficiencia del sistema.

Si se traducen los perfiles de modulación a las tasas de bits por segundo en Downstream, que fueron calculadas en la sección 6, y considerando el máximo aprovechamiento del espectro, es decir un límite superior de 1.8 GHz, con 8 canales de 192 MHz se obtiene la Figura 16.

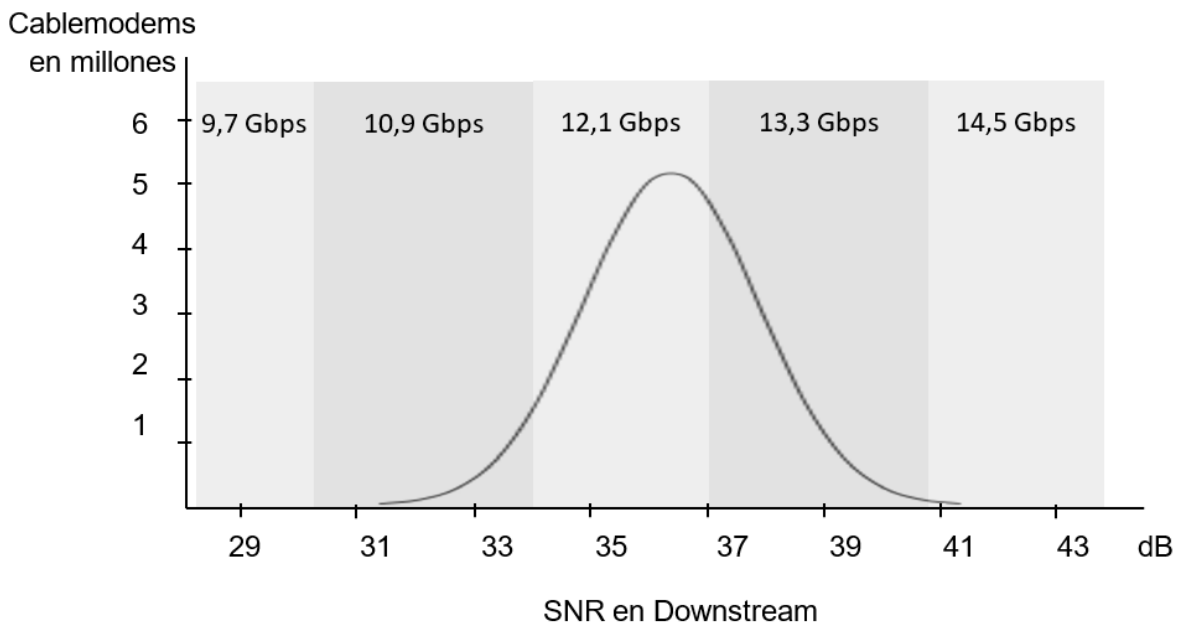


Figura 16. Tasas de transferencia en Downstream según SNR.

Este resultado refuerza la posibilidad de seguir utilizando las actuales redes HFC con inversión acotada, y al mismo tiempo obtener tasas de transferencia de datos considerables.

9. Conclusiones

Las redes HFC pueden incrementar las tasas de transmisión de datos sin modificar sustancialmente los componentes de red que se utilizan actualmente.

Si se implementan las consideraciones realizadas, se pueden ofrecer tasas de transferencias de datos del orden de 16.9 Gbps en Downstream y 1.8 Gbps en Upstream utilizando todas las prestaciones establecidas en la norma DOCSIS, versión 3.1.

Para obtener estas velocidades se necesita rediseñar las actuales redes HFC a un esquema con la menor cantidad de activos posibles (Nodo + 0), y mantener dichas redes con niveles muy bajos de ruido, distorsiones e interferencias, por los altos índices de modulación que se utilizan. Como alternativa de transición a estos diseños, pueden elegirse esquemas de N+1 o N+3, resignando parte de la tasa de transferencia, pero con un menor costo de despliegue en lo inmediato.

DOCSIS 3.1 define diferentes “perfiles” para adecuarse a las condiciones del canal de comunicación. Uno de los parámetros que forman parte de estos perfiles es la modulación de la sub-portadora de OFDM. Cada esquema se establece por cablemodem de acuerdo a las condiciones particulares de cada canal. No pueden existir perfiles ilimitados, principalmente porque las capacidades de memoria son finitas. El CMTS debe administrar el almacenamiento y empaquetado de datos por separado, para luego codificar y modular en la capa física. En este sentido, DOCSIS 3.1 define 16 perfiles de transmisión en Downstream y 7 en Upstream (Ghorbel y colaboradores, 2018).

No obstante, varios esquemas de modulación menores a 16K QAM garantizan igualmente tasas de transferencia superiores a las 10 Gbps en Downstream, como se mostró en la Tabla 15.

Si bien los elevados niveles de SNR necesarios para obtener altas tasas de transmisión obligan a un mayor mantenimiento de la red, al disminuir las áreas de servicio se simplifica el mantenimiento y se acotan los problemas derivados de la sumatoria de transmisiones en la vía de retorno.

Otro efecto que se produce en las redes, con la reducción de la cantidad de activos, se minimiza drásticamente el consumo de las fuentes de alimentación de red, y en consecuencia se disminuye el costo de despliegue y mantenimiento por la reducción de la cantidad de fuentes.

Para obtener las máximas tasas de transferencia, se debe disponer todo el espectro de directa solamente para la transmisión de datos, abandonando la utilización del espectro para la transmisión de señales de televisión tradicional, tanto analógicas como digitales.

Los servicios de Internet de contenido audiovisual se están moviendo hacia la mejora de la calidad y la adopción de fibra óptica. En términos de servicio al cliente, las mejoras deben hacerse en respuesta e interacción en tiempo real. Además de vincularse con el cliente a través de los medios tradicionales, como el teléfono, el servicio de asistencia o las visitas al sitio, es recomendable utilizar Internet por cable digital para interactuar estrechamente con el consumidor a través de la televisión.

Con la competencia derivada de la globalización, las empresas deben centrarse en la investigación y el desarrollo de recursos tecnológicos. En el entorno empresarial actual, los servicios y procesos innovadores brindan a los consumidores servicios y mensajería instantánea, lo que aumenta la aceptación de los usuarios (Lai y Chou, 2017).

Otro elemento que enfatiza la necesidad de liberar aproximadamente 500 MHz de espectro dedicado a los sistemas tradicionales de televisión, es el “apagón” analógico, que se viene produciendo paulatinamente en casi todos los países del mundo, y que está previsto en nuestro país para estos años.

Otro requerimiento para obtener estas tasas de transmisión de datos, es llevar el límite superior del espectro para el Downstream hasta 1.8 GHz, como lo aconseja la versión 3.1 del estándar DOCSIS. De igual manera existe un incremento en el espectro de Upstream alcanzando los 204 MHz como límite superior. De esta manera la separación de frecuencias (Split) entre los espectros de directa y retorno quedaría entre 204 y 258 MHz.

Las mejoras en los procesos de corrección de errores (LDPC) que utiliza la versión 3.1 de DOCSIS, ayudan a lograr el objetivo de obtener las máximas tasas de transferencia de datos, pudiendo tolerarse menores valores de SNR que con el anterior método de FEC Reed Solomon.

La codificación LDPC permite la comunicación con una eficiencia cercana al límite que establece Shannon, con una gran confiabilidad y una complejidad aceptable que se adapta a diferentes medios de comunicación (Leiner, 2005).

La inclusión de OFDM en el estándar proporciona un mejor aprovechamiento de las capacidades del canal, utilizando distintos perfiles de modulación definidos por el CMTS (Ghorbel y colaboradores, 2018).

Se encuentra en estudio la posibilidad de implementar el sistema conocido como Full Duplex DOCSIS, que pretende brindar tasas de transferencia tanto en Downstream como en Upstream, del orden de los 10 Gbps. Si bien esto no implicaría un crecimiento en las tasas de transmisión calculadas en el presente trabajo en lo que se refiere a Downstream, permitiría obtener un sistema simétrico, que puede ser conveniente para alguna categoría de usuarios (Cablelabs, 2018a).

La especificación Full Duplex DOCSIS establece que eventualmente se podrían brindar 10 Gbps simétricos en redes de 1,2 GHz, en configuraciones de FTTLA y topologías de referencia HFC de N+0 (Coomans y colaboradores, 2018).

También se puede mencionar que una transición adicional a los sistemas de FTTH lo constituye la tecnología conocida como RF sobre vidrio (RFoG). En este caso la red pasa a ser enteramente de fibra óptica, aunque no pasiva, como en los restantes esquemas de fibra al hogar. Estas redes incluyen un amplificador de fibra óptica para poder llegar a los usuarios finales, aunque mantienen los equipos terminales de red, reduciendo el costo de implementación de las mismas. Utilizando distintas longitudes de onda en las señales transmitidas, es posible transportar por un solo cable de fibra óptica datos de distinta naturaleza, tanto en Downstream como en Upstream.

Otro incentivo para la implementación de las nuevas topologías de redes HFC con altas tasas de transferencia, es la posibilidad de ser utilizadas para la alimentación y conectividad de la nueva tecnología de redes de telefonía celular 5G, facilitando la penetración propia que ofrece la capilaridad de la red de cable (Hayes, 2017). Al transportar una cantidad sustancial del tráfico inalámbrico, las redes HFC complementan y permiten la transición a 5G (Cablelabs Informed Insights, 2017).

Si bien FTTH se acepta como el objetivo final de las redes de cable y telecomunicaciones en general, DOCSIS 3.1 ofrece una alternativa para seguir incrementando los anchos de banda actualizando las redes HFC (Coomans y colaboradores, 2018).

Los diseños de redes HFC de fibra profunda (Fiber Deep) o Nodo+0 amplificadores pueden, si se eligen áreas de servicio convenientes, permitir la transición en el futuro a sistemas FTTH, reemplazando el último tramo de la red por fibra óptica.

Otra mejora importante antes de realizar la transición a los diseños FTTH, lo constituye el sistema Remote PHY (Cablelabs, 2018b), el cual agrega un dispositivo de red que proporciona conversión del transporte digital Ethernet, al transporte de RF analógico que se envía a la red HFC.

Con los argumentos descritos en el presente trabajo, se puede afirmar que las redes HFC ofrecen una alternativa más económica a los operadores que ya las poseen desplegadas, en contraposición a un sistema enteramente óptico, que requeriría una inversión mucho mayor, a corto y mediano plazo.

10. Líneas Futuras de Trabajo

Se puede plantear como línea futura de trabajo la posibilidad de simulación de los sistemas propuesto a fin de evaluar fehacientemente las consideraciones de calidad de señal establecidas para lograr las tasas de transferencia de datos más elevadas.

Recientemente se comenzó a plantear, por parte de las organizaciones involucradas, la posibilidad de extender el espectro de utilizado para la transmisión en el cable coaxial a frecuencias superiores a los 1.8 GHz, fijados como límite en el presente trabajo, y establecidos en el último estándar en la materia, como lo es DOCSIS 3.1. De ser viable se podrían incrementar aún más las tasas de transmisión de datos en las redes HFC.

Una línea futura de trabajo es entonces, el estudio de las posibilidades de incrementar el espectro utilizado, tanto en upstream como en downstream, con el acompañamiento de los estándares necesarios, para que los fabricantes desarrollen equipamiento apto para incrementar las tasas de transferencias calculadas.

La posibilidad de seguir ampliando el espectro utilizado para la transmisión en el cable coaxial, deberá incluir un análisis de la conveniencia de seguir utilizando las redes HFC en lugar de decidirse por la implementación de FTTH, tanto en el orden económico como la posibilidad de ampliación futura.

Referencias

- Al-Banna A, Allen J, Cloonan T**, 2009, "DOCSIS 3.0 Upstream Channel Bonding: Performance Analysis in the presence of HFC Noise", *SCTE*.
- Al-Banna A**, 2012, "Architecting The DOCSIS® Network To Offer Symmetric 1Gbps Service Over The Next Two Decades", *Spring Technical Forum, CableLabs, NCTA, SCTE*.
- Al-Banna A, Cloonan T**, 2014, "The Spectral Efficiency of DOCSIS 3.1 Systems", *Arris*.
- Cablelabs**, 2017, "Data-Over-Cable Service Interface Specifications DOCSIS® 3.0 Physical Layer Specification".
- Cablelabs**, 2014, "Data-Over-Cable Service Interface Specifications DOCSIS® 3.1, Physical Layer Specification, CM-SP-PHYv3.1-I03-140610".
- Cablelabs**, 2016, "Data-Over-Cable Service Interface Specifications DOCSIS® 3.1, Physical Layer Specification".
- Cablelabs**, 2018a, "Data-Over-Cable Service Interface Specifications DOCSIS® 3.1 Physical Layer Specification CM-SP-PHYv3.1-I03-140610".
- Cablelabs**, 2018b, "Data-Over-Cable Service Interface Specifications DOCSIS® 3.1 Physical Layer Specification CM-SP-PHYv3.1-I15-180926, Remote Downstream External PHY Interface Specification".
- Cablelabs Informed Insight**, 2017, "Cable: 5G Wireless Enabler".

- César C, Heyaime-Duverge, Vasant K, Prabhu**, 2010, "Statistical Multiplexing of Upstream Transmissions in DOCSIS Cable Networks", *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 56, pp. 296-310.
- Chen J, Wang L, Li Y**, 2005, "Performance Comparison between Non-Binary LDPC Codes and Reed-Solomon Codes over Noise Bursts Channels", *Proc. IEEE ICCAS*, pp. 1-4.
- Ciciora W, Farmer J, Large D, Adams M**, 2004, "Modern Cable Television Technology, Video, Voice, And Data Communications", *San Francisco, Elsevier Inc.*
- Cisco**, 2009, "Cable Access Technologies".
- Cisco**, 2017, GS7000 Data Sheet Cisco GS7000 1218-MHz 4-Port Fiber Deep Node optical node specifications".
- Commscope**, 2018, "F677TSVM XP HomeConnect® 75 Ohm XPRESSPREP® Coaxial Drop Cable, Series 6, black PVC jacket with messenger", *Product Specification*, 4514603.
- Coomans W, Chow H, Maes J**, 2018, "Introducing Full Duplex in Hybrid Fiber Coaxial Networks", *IEEE Communications Standards Magazine*, Vol. 2, Issue : 1.
- Effenberger F**, 2016, "Future Broadband Access Networks", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 104, No. 11, pp. 2078-2081.
- Freeman R L**, 2005, "Fundamentals of Telecommunications", *John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey*.
- Garcia Bish J R**, 2014, "Nuestras Redes de Cable, están listas para Docsis 3.1", *Encuentro Regional de Telecomunicaciones, Rosario*.
- Ghorbel M B, Berscheid B, Bedeer E, Hossain J, Howlett C, Cheng J**, 2018, "Principal Component-based Approach for Profile Optimization Algorithms in DOCSIS 3.1", *IEEE Transactions on Network and Service Management*.

- Hamzeh B**, 2016, "Full Duplex DOCSIS Technology over HFC Networks", *Spring Technical Forum Proceedings, CableLabs, Inc.*
- Hayes K R**, 2017, "The Intersection of HFC and 5G", *Technical Forum SCTE-ISBE and NCTA.*
- He Z, Skrobko J, Zhang Q, Zhang W**, 2016, "The Capacity of Analog Optics in DOCSIS 3.1 HFC Networks", *2016 Spring Technical Forum, CableLabs, NCTA, SCTE.*
- Hranac R**; 2006, "DOCSIS 3.0", SCTE Technical Columns.
- Lai K, Chou H**, 2017, "Open Innovation: An Analysis of the Business Model of Digital Cable Television", *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Applied System Innovation IEEE-ICASI.*
- Latini P S**, 2015, "DOCSIS 3.1: Plan its deployment using the data in your current DOCSIS 3.0 OSS tools" *A Technical Paper prepared for the Society of Cable Telecommunications Engineers. SVP Broadband Communications.*
- Lee K**, 2011, "Proposing Fiber Feedforward Coaxial Cascade HFC Networks", *IEEE Transactions on Communications, Volume 59, pp. 1927-1933.*
- Leiner B M J**, 2005, "LDPC Codes – a brief Tutorial".
- Martín A, Coomonte R, Feijóo C**, 2011, "Which could be the role of Hybrid Fibre Coax in Next Generation Access Networks?", *10th Conference of Telecommunication, Media and Internet Techno-Economics (CTTE).*
- Martínez H D**, 2011, "Conceptos y Ventajas de Emigrar a DOCSIS 3.0", *CNA Cable Networks, ATVC.*
- Multimedia Connect**, 2012, "FTTx: Explanation of Optical Fibre Networks and Detailed Look at FTTH", *White Paper N° 10.*
- Nokia**, 2016, "XG-CABLE for HFC networks", *Technology White Paper.*

- Park J, Chung K**, 2011, "An adaptive low-power LDPC decoder using SNR estimation", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*.
- Peled A, Ruiz A**, 1980. "Frequency Domain Data Transmission using Reduced Computational Complexity algorithms", ICASSP '80. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol 5, pp: 964 - 967*
- Ping L, Yuan Y, Zhu Z**, 2013, "On the performance Analysis of Energy-Efficient Upstream Scheduling for Hybrid Fiber-Coaxial Networks with Channel Bonding", *IEEE Communications Letters, Vol. 17, pp. 1020 – 1023*.
- Plevyak T, Sahin V**, 2010, "Next Generation Telecommunications Networks, Services and Management", *IEEE Press. Series on Networks and Services Management*.
- Rice D J**, 2015, "DOCSIS 3.1 technology and hybrid fiber coax for multi-Gbps broadband", *2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*.
- Şahin S, Tolun M R, Baykal Y**, 2009, "Expert System for Access Telecommunication Networks", *World Congress on Computer Science and Information Engineering, Expert System for Access Telecommunication Networks*.
- Stoneback D**, 2011, "The evolution of Hybrid Fiber-Coaxial cable networks to an all-fiber network", *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*.
- Toy M**, 2015, "Cable Networks, Services and Management", *IEEE Press. Series on Networks and Services Management*.
- Weinstein S B, Ebert P M**, 1971, "Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform", *IEEE Transactions on Communication Technology, Vol. Com-19, N° 5*.
- Ying C, Li C**, 2015, "Progressive and Cost-Effective Bidirectional CATV/Wireless-Over-Fiber Lightwave Transport System", *IEEE Photonics Journal, Vol. 7, N° 6*.

Zhang L, Ma Y, Liu K, Zeng Y, 2010, "Research of the Noise Characteristic on the Upstream Channel for HFC Network ", *2nd International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS)*.

Zhou B, Zhang L, Kang J, Huang Q, Tai Y Y, 2008, "Non-Binary LDPC Codes vs. Reed-Solomon Codes", *Proc. 2008 Information Theory and Applications (ITA) Workshop*.

Glosario

5G	Telefonía celular de quinta generación
ADSL	Línea de abonado digital asimétrica (Asymmetric Digital Subscriber Line)
AM-VSB	Modulación de Amplitud con Banda Lateral Vestigial (Amplitude Modulation Vestigial Side Band)
ANSI	Instituto Nacional Americano de Normas (American National Standards Institute)
ATM	Modo de Transferencia Asíncrona (Asynchronous Transfer Mode)
BPI	Línea de Base de Privacidad (Baseline Privacy Interface)
BW	Ancho de banda (Band Width)
C/I	Relación Portadora a Interferencia (Carrier to interference ratio)
CABLELABS	Organización sin fines de lucro fundada en 1988 (Cable Television Laboratories)
CATV	Antena Comunitaria (Community Antenna Television)
CCAP	Plataforma de Acceso de Cable Convergente (Converged Cable Access Platform)
CM	Modem de Cable (Cable Modem)
CMTS	Sistema de Terminación de Módem de Cable (Cable Modem Termination System)
CNR	Relación Portadora a Ruido (Carrier to Noise Ratio)
CodeWord	Palabra de código

COS	Clase de servicio (Class of Service)
CP	Prefijo Cíclico en el sistema OFDM (Cyclic Prefix)
CW	Onda Continua (Continuous Wave)
DES	Estándar de cifrado de datos (Data Encryption Standard)
DFT	Transformada Discreta de Fourier (Discrete Fourier Transform)
DHCP	Protocolo de Configuración Dinámica de Cliente (Dynamic Host Configuration Protocol)
DOCSIS	Especificación de Interfaz para Servicios de Datos por Cable (Data Over Cable Service Interface Specification)
DOWNSTREAM	Transmisión de datos aguas abajo.
DPT	Transporte Dinámico de Paquetes (Dynamic Packet Transport)
DSL	Línea de Abonado Digital (Digital Subscriber Line)
DWDM	Multiplexado compacto por División en Longitudes de Onda (Dense Wavelength Division Multiplexing)
EDFA	Amplificadores Ópticos de Fibra Dopada con Erblio (Erbium Doped Fiber Amplifiers)
ETHERNET	Estándar de redes de área local para computadores con acceso al medio por detección de la onda portadora y con detección de colisiones (CSMA/CD)
EuroDOCSIS	Especificación de Interfaz para Servicios de Datos por Cable Europeo (European Data Over Cable Service Interface Specification)
FDM	Multiplexación por División de Frecuencias (Frequency Division Multiplexing)
FEC	Corrección de Errores Hacia Adelante (Forward Error Correction)

FFT	Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)
FIBER DEEP	Fibra profunda
FS	Tasa de maestro
FSO	Óptica de espacio libre (Free Space Optics)
FSS	Sistema de Apilamiento de Frecuencia (Frequency Stacking System)
Fsu	Tasa de muestreo de Upstream
FTTC	Fibra hasta el gabinete o Fibra hasta la vereda (Fiber-to-the-cabinet o fiber-to-the-curb)
FTTH	Fibra hasta el hogar (Fiber To The Home)
FTTLA	Fibra hasta el último activo (Fiber To The Last Active)
FTTN	Fibra hasta el nodo (Fiber To The Node)
FTTx	Distintos sistemas que usan fibra óptica (Fiber to the x)
HDSL	Línea de abonado digital de alta velocidad (High bit rate Digital Subscriber Line)
HEADEND	Cabecera del sistema de CATV
HFC	Híbridas de Fibra y Coaxial (Hybrid Fiber Coaxial)
HUB	Concentrador del sistema de CATV
ICI	Interferencia inter-símbolo (inter-symbol interference)
IDFT	Transformada Inversa de Fourier Discreta (Inverse Discrete Fourier Transform)
ISDL	Línea de abonado digital RDSI (ISDN Digital Subscriber Line)
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

IP	Protocolo de Internet (Internet Protocol)
IPPV	Visión por pago por impulso (Impulse Pay Per View),
IPv6	Protocolo de Internet de versión 6.
KEK	Clave de cifrado de clave (Key Encryption Key)
LDPC	Comprobación de paridad de baja densidad (Inglés low density parity check)
LLC	Subcapa de Control de Enlace Lógico (Logical Link Control)
LMDS	Sistema de Distribución Local Multipunto (Local Multipoint Distribution Service)
MAC	Subcapa Control de Acceso al Medio (Media Access Control)
MAP	Mapas de asignación de ancho de banda aguas arriba (Bandwidth Allocation Map)
MCNS	Multimedia Cable Network Partners System (MCNS)
MIC	Comprobación de integridad de mensaje (Message Integrity Check)
MMP	Múltiples perfiles de modulación (Multiple Modulation Profile)
MPEG	Grupo de Expertos de Imágenes en Movimiento (Moving Pictures Experts Group)
MPEG2	Estándar Grupo de Expertos de Imágenes en Movimiento versión 2 (Moving Pictures Experts Group 2)
MSDSL	DSL simétrico multitasa (Multi-rate symmetric DSL)
MSO	Operadores de Sistemas Múltiples (Multiple System Operator)
N+0	Arquitectura HFC de Nodo más 0 amplificadores.
N+1	Arquitectura HFC de Nodo más 1 amplificador.

N+3	Arquitectura HFC de Nodo más 3 amplificadores.
NCP	Puntero de siguiente palabra de código (Next Codeword Pointer)
NTSC	Comité Nacional de Sistema de Televisión (National Television System Committee)
OFDM	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
OFDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
ONT	Terminaciones de Red Óptica (Optical Network Terminations)
OSI	Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (Open System Interconexión)
PC	Computadora personal (Personal Computer)
PDM	Subcapa Física Dependiente del Medio (Physical Medium Dependent)
PDU	Unidades de Datos de Protocolo (Protocol Data Unit)
PHY	Capa física de DOCSIS (Physic)
PLC	Canal de enlace Físico (PHY Link Channel)
PON	Red Óptica Pasiva (Passive Optic Network)
POS	Paquete sobre Sonet (Packet Over Sonet)
POWER LINE	Transmisión a través de las líneas de distribución eléctricas
PPP	Protocolo Punto a Punto (Point to Point Protocol)
PSTN	Red Telefónica Pública Conmutada (Public Switched Telephone Network)

QAM	Modulación de Amplitud en Cuadratura (Quadrature Amplitude Modulation)
QoS	Calidad de servicio (Quality of Service)
QPSK	Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (Quadrature Phase Shift Keying)
RADSL	Líneas de Abonado Digital de Tasa Adaptable (Rate-adaptive digital subscriber line)
RF	Radiofrecuencia (Radio Frequency)
RFoG	RF sobre vidrio (RF over Glass)
SC	Portadora simple (Single Carrier)
S-CDMA	Acceso Múltiple por División de Código Síncrona (Synchronous-Code Division Multiple Access)
SCTE	Sociedad de Ingenieros de Telecomunicaciones por Cable (Society of Cable Telecommunications Engineers)
SDH	Jerarquía Digital Síncrona (Synchronous Digital Hierarchy)
SDSL	Línea de abonado digital simétrica (Symmetric Digital Subscriber Line)
SNR	Relación Señal a Ruido (Signal to Noise Ratio)
SONET	Red Óptica Síncrona (Synchronous Optical Network)
SPLIT	Separación de frecuencias entre Downstream y Upstream en HFC
STB	Decodificador de CATV (Set Top Box)
TCP	Protocolo de control de transmisión (Transmission control protocol)
TDM	Multiplexación por división de tiempo (Time Division Multiplexing)
TDMA	Acceso Múltiple por División de Tiempo (Time Division Multiple Access)

TEK	Clave de cifrado de tráfico (traffic encryption key)
TELCO	Empresa de telecomunicaciones
TFTP	Protocolo de Transferencia de Archivos Trivial (Trivial File Transfer Protocol)
TOD	Hora del Día (Time of Day)
TSD	Periodo de muestreo en Downstream (Downstream sampling period)
Tsu	Período de muestreo en Upstream (Upstream sampling period)
Tu	Duración del símbolo útil
UADSL	ADSL universal
UCD	Descriptor de Canal Ascendente (Upstream Channel Descriptor)
UDP	Protocolo de datagramas de usuario (User Datagram Protocol)
UPSTREAM	Transmisión de datos hacia arriba
VDSL	Línea de abonado digital de muy alta tasa de transferencia (Very high-bit-rate Digital Subscriber Line)
VoIP	Voz sobre Protocolo de Internet (Voice over Internet Protocol)
WDM	Multiplexación por División de Longitud de Onda (Wavelength Division Multiplexing)
WIMAX	Interoperabilidad mundial para acceso por microondas (Worldwide Interoperability for Microwave Access)