



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“ANÁLISIS DE LA TRANSMISIÓN DE BANDA ANCHA EN  
REDES HFC: LIMITACIONES TECNOLÓGICAS, REVISIÓN DE  
STÁNDARES”**

### **INFORME DE MATERIA DE GRADUACIÓN**

Previo a la obtención del Título de:

#### **INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

Presentado por:

ALBA CECILIA BUSTAMANTE TIPÁN

ANNABEL DEL ROCÍO MACAS MACAS

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2015

## AGRADECIMIENTO

A Dios. A mis padres Tarquino y Susana por su esfuerzo, amor y ejemplo, por enseñarme a luchar por mis sueños de una forma correcta. A mi hermana Laura que aunque está lejos siempre ha estado a mi lado para no dejarme caer. Gracias por darme la oportunidad de alcanzar esta meta.

Alba Cecilia Bustamante Tipán.

A Dios. A mis padres por ser el pilar de mi vida, por su amor y apoyo incondicional, en toda mi carrera estudiantil porque gracias a ellos he logrado alcanzar esta meta. A mis hermanas por sus buenos consejos y apoyo en todo momento.

Annabel del Rocío Macas Macas.

## DEDICATORIA

A mi familia. A mis padres, mi hermana, a mi novio Irving Garófalo porque juntos y con esfuerzo estamos alcanzando una nueva meta, a mi pequeño David Alejandro porque él con su sonrisa es capaz de cambiar mi mundo.

Alba Cecilia Bustamante Tipán.

A mi familia. A mis padres, Luis y Narcisca quienes creyeron en mí y con sus consejos formaron de mí una mejor persona, A mi esposo por su amor, confianza, comprensión y continuo apoyo, a mi hija por ser la luz que guía mi camino la razón de mi vivir.

Annabel del Rocío Macas Macas.

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

M.Sc. Cesar Yépez F.

PROFESOR SEMINARIO DE GRADUACIÓN.

---

PhD. Freddy Villao Q.

PROFESOR DELEGADO POR LA UNIDAD ACADÉMICA.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de éste informe nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral.” (Reglamento de graduación de la ESPOL).

-----

Alba Cecilia Bustamante Tipán

-----

Annabel del Rocío Macas Macas

## RESUMEN

La presente investigación se basa en el análisis de la transmisión de servicios de nueva generación a través de las redes HFC, el estándar DOCSIS implementado, los rendimientos, eficiencias, y limitaciones en la transmisión de información.

La evolución de la redes de CATV dieron paso a lo que hoy en día son redes HFC, las cuales llegaron para facilitarnos la utilización de la red para el tráfico de retorno. Las redes HFC fueron construidas para brindarnos servicios como acceso a redes de datos además de la distribución de las señales de TV analógica y digital. En este estudio nos enfocamos en la transmisión de datos basados principalmente en el estándar DOCSIS.

De esta manera se analizara el estándar DOCSIS, la evolución que ha venido teniendo esta plataforma, sus limitaciones. Gracias a CableLabs el estándar DOCSIS ha sido mucha utilidad para este tipo de estudio.

Además se hace un breve análisis del rendimiento y la capacidad del canal, como también las interferencias que pueden degradar seriamente el rendimiento de las redes HFC.

## ÍNDICE GENERAL

|   |       |
|---|-------|
| AGRADECIMIENTO .....                              | II    |
| DEDICATORIA.....                                  | III   |
| TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....                    | IV    |
| DECLARACIÓN EXPRESA.....                          | V     |
| RESUMEN .....                                     | VI    |
| ÍNDICE GENERAL .....                              | VIII  |
| ABREVIATURAS.....                                 | XIII  |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                            | XVI   |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                             | XVIII |
| INTRODUCCIÓN.....                                 | XX    |
| CAPÍTULO 1  |       |
| 1. GENERALIDADES .....                            | 1     |
| 1.1 Introducción de la Redes CATV.....            | 1     |
| 1.2 Evolución de las redes CATV.....              | 3     |
| 1.3 Transición a Datos.....                       | 5     |
| 1.4 Banda Ancha.....                              | 6     |
| 1.5 Demanda de Servicios de Nueva Generación..... | 10    |
| 1.6 Objetivo General.....                         | 11    |
| 1.7 Objetivos Específicos.....                    | 12    |



## CAPÍTULO 2

|  |    |
|--|----|
| 2. Redes HFC.....                                  | 13 |
| 2.1 Topología y elementos de las redes en HFC..... | 13 |
| 2.1.1 Cabecera.....                                | 15 |
| 2.1.2 Red Troncal.....                             | 18 |
| 2.1.3 Red de distribución.....                     | 19 |
| 2.1.4 Acometida.....                               | 22 |
| 2.1.5 Equipos Terminales.....                      | 22 |
| 2.1.6 Elementos activos y pasivos de la Red.....   | 24 |
| 2.1.6.1 Elementos activos de la red.....           | 24 |
| 2.1.6.2 Elementos pasivos de la red.....           | 26 |
| 2.2 Medios de Transmisión.....                     | 27 |
| 2.2.1 Fibra Óptica.....                            | 27 |
| 2.2.2 Cable Coaxial.....                           | 29 |
| 2.3 Señales de la red HFC.....                     | 30 |
| 2.3.1 Señales Analógicas.....                      | 30 |
| 2.3.2 Señales Digitales.....                       | 31 |
| 2.3.2.1 Televisión Digital.....                    | 31 |
| 2.3.2.2 IPTV.....                                  | 32 |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.3.2.3 Servicios de datos soportados por la Red HFC.....         | 33        |
| 2.3.3.4 La vía de retorno .....                                   | 35        |
| 2.4 Estándares de la Red HFC.....                                 | 37        |
| 2.5 Seguridades de la red HFC. ....                               | 39        |
| 2.5.1 Medidas de Prevención.....                                  | 41        |
| 2.5.2 Aspectos de seguridad en Banda Ancha.....                   | 43        |
| <b>CAPÍTULO 3</b>   |           |
| <b>3. ANÁLISIS DEL ESTÁNDAR DOCSIS.....</b>                       | <b>45</b> |
| 3.1 Comunicación de datos en DOCSIS.....                          | 45        |
| 3.1.1 DOCSIS y la transmisión de datos. ....                      | 46        |
| 3.2 Evolución de DOCSIS .....                                     | 48        |
| 3.2.1 DOCSIS 1.0 .....  | 52        |
| 3.2.2 DOCSIS 1.1 .....  | 55        |
| 3.2.3 Diferencias y compatibilidades entre DOCSIS 1.0 y 1.1. .... | 57        |
| 3.2.4 DOCSIS 2.0 .....  | 60        |
| 3.2.5 DOCSIS 3.0 .....  | 66        |
| 3.2.5.1 Ventajas de DOCSIS 3.0.....                               | 70        |
| 3.2.6 DOCSIS 3.1 .....  | 71        |
| 3.3 DOCSIS con funcionalidades extras.....                        | 73        |

|   |     |
|---|-----|
| 3.4 Vulnerabilidades de DOCSIS .....                        | 74  |
| CAPÍTULO 4  |     |
| 4. CAPACIDAD DEL CANAL .....                                | 76  |
| 4.1 Teorema de Shannon.....                                 | 77  |
| 4.1.1 Velocidad de transmisión. ....                        | 80  |
| 4.1.2 Rendimiento y eficiencia de modulación.....           | 82  |
| 4.2 Cable Módem.....  | 87  |
| 4.2.1 Inicialización de operación del cable módem (CM)..... | 88  |
| 4.2.2 Limitaciones de un cable-módem.....                   | 92  |
| 4.2.2.1 Limitación de velocidad.....                        | 93  |
| 4.3.2 Rendimiento de Cable Módems .....                     | 94  |
| 4.4 Metodología de agregación de canales .....              | 96  |
| 4.4.1 Saturación de canales.....                            | 97  |
| CAPÍTULO 5  |     |
| 5. RUIDO EN LAS REDES HFC.....                              | 100 |
| 5.1 Tipos de Ruido .....                                    | 101 |
| 5.1.1 Ruido de Ingreso.....                                 | 101 |
| 5.1.2 Modulación de amplitud HUM .....                      | 101 |
| 5.1.3 Ingreso de armónicos.....                             | 102 |
| 5.1.4 Ruido térmico .....                                   | 102 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.1.5 Ruido impulsivo .....                         | 103 |
| 5.1.6 Distorsión común de la trayectoria (CPD)..... | 104 |
| 5.2 Parámetros sobre la red HFC .....               | 104 |
| 5.3 Interferencias en el canal de retorno .....     | 108 |
| 5.4 Técnicas de modulación .....                    | 110 |
| 5.4.1 QPSK.....                                     | 111 |
| 5.4.2 QAM.....                                      | 112 |
| 5.4.2.1 16 QAM.....                                 | 113 |
| 5.4.2.2 64 QAM.....                                 | 114 |
| 5.4.2.3 256QAM.....                                 | 115 |
| 5.5 Limitación de Técnicas de Modulación .....      | 115 |
| CONCLUSIONES .....                                  | 117 |
| RECOMENDACIONES.....                                | 121 |
| BIBLIOGRAFÍA.....                                   | 123 |

## ABREVIATURAS

|                  |  |
|------------------|--|
| <b>AES</b>       | Estándar de Cifrado Avanzado                                 |
| <b>ATM</b>       | Modo de Transferencia Sincrónica                             |
| <b>ATDMA</b>     | Acceso Múltiple por División de Tiempo Avanzado              |
| <b>BPI</b>       | Interfaz de Privacidad de Línea Base                         |
| <b>BE</b>        | Servicio del Mejor Esfuerzo                                  |
| <b>CATV</b>      | Redes de Televisión por Cable                                |
| <b>CableLabs</b> | Cable Television Laboratories                                |
| <b>CM</b>        | Cable Modem  |
| <b>CMTS</b>      | Sistema de Terminación de Cable Modem                        |
| <b>CPE</b>       | Equipo Local del Cliente                                     |
| <b>DES</b>       | Estándar de Encriptación de Datos                            |
| <b>DHCP</b>      | Protocolo de Configuración de Huésped Dinámico               |
| <b>DNS</b>       | Sistema de Nombres de Dominio                                |
| <b>DOCSIS</b>    | Especificación de interfaz para servicios de datos por cable |
| <b>DS</b>        | Descendente  |
| <b>DSL</b>       | Línea de abonado digital                                     |
| <b>DVB</b>       | Digital Video Broadcasting                                   |
| <b>FDMA</b>      | Acceso múltiple por división de frecuencia                   |
| <b>FEC</b>       | Corrección de Errores en recepción                           |
| <b>FTP</b>       | Protocolo de Transferencia de Archivos                       |

|             |  |
|-------------|--|
| <b>HFC</b>  | Red Híbrida de Fibra y Coaxial                       |
| <b>HUM</b>  | Modulación de Zumbido                                |
| <b>IP</b>   | Protocolo de Internet                                |
| <b>ISP</b>  | Proveedor de Servicios de Internet                   |
| <b>IRC</b>  | Internet Relay Chat                                  |
| <b>IPTV</b> | Televisión por Protocolo de Internet                 |
| <b>KEK</b>  | Clave de Encriptación de Clave                       |
| <b>LAN</b>  | Red de Área Local                                    |
| <b>LDPC</b> | Baja Densidad de Control de Paridad                  |
| <b>MAC</b>  | Control de Acceso al Medio                           |
| <b>MPEG</b> | Grupo de expertos de imágenes en movimiento          |
| <b>NSI</b>  | Interfaz de Sistema de Red                           |
| <b>NTSC</b> | National Television Systems Committee                |
| <b>OFDM</b> | Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencias |
| <b>PAL</b>  | Phase Alternating Line                               |
| <b>PHSM</b> | Payload Header Suppression Mask                      |
| <b>PMD</b>  | Subcapa Física Dependiente del Medio                 |
| <b>POST</b> | Power On Self Test                                   |
| <b>QAM</b>  | Modulación de amplitud en cuadratura                 |
| <b>QPSK</b> | Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura  |
| <b>QoS</b>  | Calidad de Servicio                                  |
| <b>RF</b>   | Radio Frecuencia                                     |

|               |   |
|---------------|---|
| <b>RFI</b>    | Interfaz de Radio Frecuencia                                |
| <b>RTP</b>    | Protocolo de transporte para aplicaciones de Tiempo Real    |
| <b>S-CDMA</b> | Acceso múltiple por división de código sincrónico           |
| <b>SECAM</b>  | Color Secuencial con Memoria                                |
| <b>SNR</b>    | Relación de Señal a Ruido                                   |
| <b>SNMP</b>   | Protocolo de administración de red simple                   |
| <b>STB</b>    | Set Top Box   |
| <b>TCP/IP</b> | Protocolo de control de Transmisión / Protocolo de Internet |
| <b>TDM</b>    | Multiplexación por División de Tiempo                       |
| <b>TFTP</b>   | Protocolo de Transferencia de archivos simple               |
| <b>TOD</b>    | Time of Day   |
| <b>UCD</b>    | Descriptor del canal Upstream                               |
| <b>UDP</b>    | Protocolo de Datagrama de Usuario                           |
| <b>UGS</b>    | Servicio de slots no solicitados                            |
| <b>UGSAD</b>  | Servicio de slots no solicitados con detección de actividad |
| <b>UMTS</b>   | Sistema Universal de telecomunicaciones móviles             |
| <b>US</b>     | Ascendente  |
| <b>USENET</b> | Red de Usuario  |
| <b>VoIP</b>   | Voz sobre Protocolo de Internet                             |
| <b>WWW</b>    | Red Informática Mundial                                     |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1. Arquitectura de una red CATV coaxial .....                                     | 3  |
| Figura 1.2. Redes de Acceso.....   | 8  |
| Figura 1.3. Velocidades comerciales en tecnología fija y móvil.....                        | 9  |
| Figura 2.1. Arquitectura de la red HFC .....   | 14 |
| Figura 2.2. Estructura de una red de datos para banda ancha .....                          | 16 |
| Figura 2.3. Estructura de una red troncal para HFC .....                                   | 19 |
| Figura 2.4. Diagrama de bloques de un canal descendente en un nodo óptico<br>terminal..... | 20 |
| Figura 2.5. Diagrama de bloques de un canal ascendente en un nodo óptico<br>terminal.....  | 21 |
| Figura 2.6. Equipos terminales .....   | 24 |
| Figura 3.1. Tráfico IP a través del sistema de datos sobre cable.....                      | 46 |
| Figura 3.2. Arquitectura de DOCSIS 1.0 .....   | 52 |
| Figura 3.3. Banda de frecuencias para DOCSIS .....   | 53 |
| Figura 3.4. Flujos de servicio en DOCSIS 1.x.....  | 58 |



|   |     |
|---|-----|
| Figura 3.5. Compatibilidad entre DOCSIS 1.X y 2.0 .....                                   | 63  |
| Figura 3.6. Diagrama de la unión de cuatro canales en DOCSIS 3.0.....                     | 68  |
| Figura 3.7. División de secciones-un CMTS por nodo .....                                  | 75  |
| Figura 4.1. Interacción entre el CM, servidor TFTP, el CMTS, y el acceso a Internet. .... | 91  |
| Figura 5.1. Error de ráfaga por ruido impulsivo .....                                     | 104 |
| Figura 5.2. Cable coaxial RG-500 Y RG-6.....  | 105 |
| Figura 5.3. Diagrama de fasores y constelación de puntos QPSK.....                        | 111 |
| Figura 5.4. Constelación de puntos 16-QAM .....   | 114 |
| Figura 5.5. Constelación de puntos 64 QAM .....   | 114 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Evolución de DOCSIS.....   | 51 |
| Tabla 2. Esquemas de modulación y tasas de transmisión de DOCSIS<br>1.x.....                  | 59 |
| Tabla 3. Compatibilidad entre DOCSIS 1.0 y 1.1 .....  | 60 |
| Tabla 4. Esquemas de modulación y tasas de transmisión de DOCSIS<br>2.0.....                  | 62 |
| Tabla 5. Características generales de cada versión DOCSIS.....                                | 66 |
| Tabla 6. Tabla comparativa de las versiones de DOCSIS respecto a<br>capacidad de canales..... | 69 |
| Tabla 7. SNR para cada modulación, usando SCDMA.....  | 80 |
| Tabla 8. SNR para cada modulación, usando A-TDMA.....   | 81 |
| Tabla 9. Velocidades de transmisión establecidas en DOCSIS 2.0 .....                          | 81 |
| Tabla 10. Capacidad del canal de DOCSIS 2.0, con A-TDMA.....                                  | 84 |
| Tabla 11. Capacidad del canal de DOCSIS 2.0, con SCDMA.....                                   | 84 |
| Tabla 12. Capacidad del canal de DOCSIS 3.0 para 4 canales unidos, con<br>A-TDMA.....         | 85 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 13. Capacidad del canal de DOCSIS 3.0 para 4 canales unidos, con<br>SCDMA. .... | 85  |
| Tabla 14. Configuración de Canales.....   | 97  |
| Tabla 15. Pérdidas en dB en el cable coaxial para 100m. ....                          | 106 |

## INTRODUCCIÓN

Este presente trabajo se conforma por cinco capítulos, los cuales han sido estudiados detalladamente de la mejor manera para un fácil entendimiento del lector sobre el análisis de la transmisión de banda ancha en las redes HFC.

En el capítulo 1, se estudiará sobre las redes CATV y su evolución, dando así el paso a la transición de datos de tener una tecnología unidireccional de servicio de televisión a evolucionar a una tecnología bidireccional de servicio de televisión telefonía y acceso a internet de banda ancha.

El capítulo 2, se estudiará sobre las redes HFC, sus medios de transmisión y la topología de red formada por la cabecera, red troncal, red de distribución y acometida. Se describe cada una de sus funciones, así como los equipos usados por el usuario. Se especifica el estándar implementado, las señales que transmitidas y los aspectos de seguridad de la red.

El capítulo 3, analiza el estándar DOCSIS, su evolución y las mejoras en cada una de sus versiones. Además especifica las diferencias, compatibilidades y vulnerabilidades.

En el capítulo 4, se analiza el rendimiento y la máxima capacidad del canal y se verifica que las velocidades establecidas se encuentren dentro del límite dado por Shannon. Así como también la importancia del Channel Bonding para transmitir mayores velocidades.

En el capítulo 5, analizamos los tipos de ruido que se presenta en la red HFC que afectan principalmente en el canal retorno, las técnicas de modulación y las limitaciones de las mismas.

Finalmente presentamos las conclusiones y recomendaciones que nacen de este trabajo.

# **CAPÍTULO 1**

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1 Introducción de la Redes CATV.**

Las redes CATV (Community Antenna Television) también conocidas como redes de televisión por cable tiene sus inicios a mediados del siglo XX por la década del 40 en Estados Unidos, y a finales de los años 80 en España.

Las redes CATV se crean bajo la necesidad de poder brindar un servicio de televisión y radio a usuarios que se encontraban distanciados de los centros de emisión, sin necesidad que los mismos dispongan de una antena.

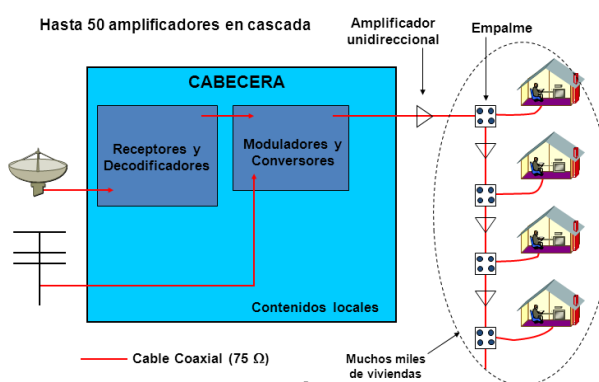
Todo el tendido de las redes CATV era de cable coaxial, debido a esto para que las señales puedan llegar con un buen nivel de calidad, la

red necesitaba estar conformada por un sistema de antenas, amplificadores y mezcladores de señal para poder transmitir las señales de televisión analógicas. Este sistema distribuye sobre el cable coaxial varios canales analógicos al mismo tiempo, los mismos que debían ser amplificados cada cierta distancia para compensar las pérdidas y debilitamientos de la señal provocadas por la separación de la central.

Dado que las redes CATV se usaban únicamente para la transmisión de radio y televisión no existía la necesidad de un canal de retorno, estas redes eran unidireccionales, de esta forma los amplificadores que contenían la red tenían como función amplificar las señales que van hacia el usuario por el canal descendente, y además de no permitir el paso de ninguna señal hacia el emisor [1].

En la Figura 1.1 se puede observar una red CATV completamente coaxial con una topología de árbol. En la cabecera se encuentra toda la información que se va a transmitir a los usuarios por la red, en la red troncal la distancia de los amplificadores va a depender tanto de la frecuencia y ancho de banda utilizada como del porcentaje de atenuación que tiene el cable coaxial, el cable coaxial usado es de 75 ohmios, la distancia de los amplificadores también depende de la cantidad de usuarios en cada tramo, mientras más usuarios existan en el tramo menor distancia existirá entre los amplificadores y

mientras con mayor frecuencia se trabaje menor será la distancia entre amplificadores [2]. En redes de gran capacidad se usan de 20 a 30 amplificadores ubicados en cascada a distancias de 600 m, mientras que en redes de menor ancho de banda se podría tener hasta 60 [3]. La red Troncal se conecta con la red de distribución y ésta a su vez se enlaza con la acometida que alimenta directamente a los usuarios.



**Figura 1.1. Arquitectura de una red CATV coaxial. [2]**

En Ecuador los primeros sistemas de audio y video por suscripción se dan inicio con la empresa TVCable siendo una de las primeras proveedoras de servicio de CATV en el país.

## 1.2 Evolución de las redes CATV.

Inicialmente las redes CATV transmitían de forma unidireccional las señales analógicas de televisión, por tal motivo la cabecera simplemente recogía las señales de televisión y las adaptaba para la transmisión en el cable, sin embargo se crearon sistemas



análogos que son bidireccionales permitiendo que los usuarios envíen datos hacia el emisor, esto inició con el uso del servicio de Pay Per View el cual necesitaba una comunicación full dúplex.

Este servicio como su nombre lo indica representa el pago o la compra que hace el usuario por eventos específicos que desea ver, esta compra se podía realizar a través del equipo decodificador que poseen los usuarios o directamente desde la red telefónica. Los encargados de procesar las señales de entrada y salida son los decodificadores y las señales de salida usan el canal de retorno o canal ascendente para la transmisión de datos entre el receptor y el proveedor del servicio, enviando respuestas del usuario en servicios interactivos [4].

A medida que avanza el tiempo debido a la demanda, el sistema análogo de las redes CATV no era suficiente para ofrecer los servicios, migrando de esta forma a un sistema digital.

La digitalización y compresión de señales de vídeo permite la difusión simultánea de un número de canales cada vez mayor. El servicio de Vídeo Bajo Demanda digital para muchos abonados, requiere sistemas complejos y de gran capacidad en la cabecera.

Es por esto que las empresas de televisión por cable se han visto impulsadas a mejorar su ancho de banda para poder brindar mayor

calidad de imagen y sonido, así como nuevas facilidades de interactividad [5].

Es así que en los años 90 se introduce la fibra óptica a las redes CATV, cuya misión principal es poder transmitir mayor capacidad de información de una manera más óptima y buscando una reducción de costos, de esta forma toda la red troncal de cable coaxial es reemplazada por fibra óptica, mientras que la red de distribución se mantiene con cable coaxial, marcando el inicio de un nuevo tipo de redes, las redes HFC [6].

Una de las mayores ventajas de las redes HFC es la baja atenuación que tiene la fibra óptica, lo que permite aumentar las distancias de transmisión y por consecuencia disminuir el número de amplificadores, de esta forma las redes CATV dejaron de ser una simple red de distribución de señales analógicas de TV para convertirse en una red de telecomunicaciones capaz de permitir al usuario interactuar y enviar datos hacia el servidor.

### **1.3 Transición a Datos.**

Debido a la necesidad de ofrecer servicios de voz y datos en las redes de televisión, las empresas buscaron opciones para poder transmitir de una manera óptima la información, encontrando las siguientes alternativas [4]:

1. Una de ellas es el uso de redes superpuestas, esto es extender una segunda red para voz y datos aparte de la red que comúnmente se emplea para llegar a los usuarios, esta red posee pares de cobre en su último segmento. Cabe recalcar que esta elección es costosa para el operador pero beneficia al usuario, ya que puede hacer uso de su teléfono y modem convencionales y así evitar una inversión en equipos nuevos. Este método tiene su ventaja que no comparte el espectro con el canal de retorno, dejando así disponibilidad para otros servicios.
2. La segunda opción son las redes integradas, las cuales hacen uso de la propia capacidad de la red para cursar el tráfico de telefonía y datos, esto depende si cumple con las características físicas del cable. Para esto se requiere instalar un modem de cable para la recepción de datos.

HFC es una red integrada y es capaz de ofrecer y aportar todos los servicios por un único acceso y de manera integrada, mediante el uso de fibra óptica permite que la red tenga mayor cobertura y se aproveche el ancho de banda del coaxial ya instalado (1 GHz) [6].

#### **1.4 Banda Ancha.**

El desarrollo de las tecnologías al paso del tiempo ha evolucionado en todas las áreas brindando una mayor comodidad a los usuarios en su

vida diaria. Todos estos avances tecnológicos se han venido dando gracias a la Banda Ancha porque ha logrado transformar la forma de vivir de la sociedad actual.

Cuando hablamos de banda ancha nos referimos a la tecnología de transmisión de datos la cual tiene una capacidad elevada para transportar información que incurre en la velocidad de transmisión, estas velocidades son considerablemente mayores a las tecnologías anteriores y permite perfeccionar los servicios brindados [7].

Las tecnologías de acceso de banda ancha surgen por la necesidad de un incremento de ancho de banda. La banda ancha puede transmitirse en diferentes plataformas, entre las que tenemos [8]:

- La línea de abonado digital (DSL) transmite datos e información de manera más rápida utilizando la infraestructura de cobre para dar servicios a velocidades de hasta algunos megabits por segundo, pero esto no aplica para redes HFC.
- El sistema de terminación de módem por cable CMTS proporciona acceso de banda ancha a internet usando las redes HFC para brindar servicios digitales a los usuarios.

- El Sistema Universal de telecomunicaciones móviles UMTS fue creado para brindar servicios de voz y datos.

En la figura 1.2 se observa las diferentes redes de acceso que se utiliza para transmitir información de banda ancha.



Fuente: Elaborado por los autores

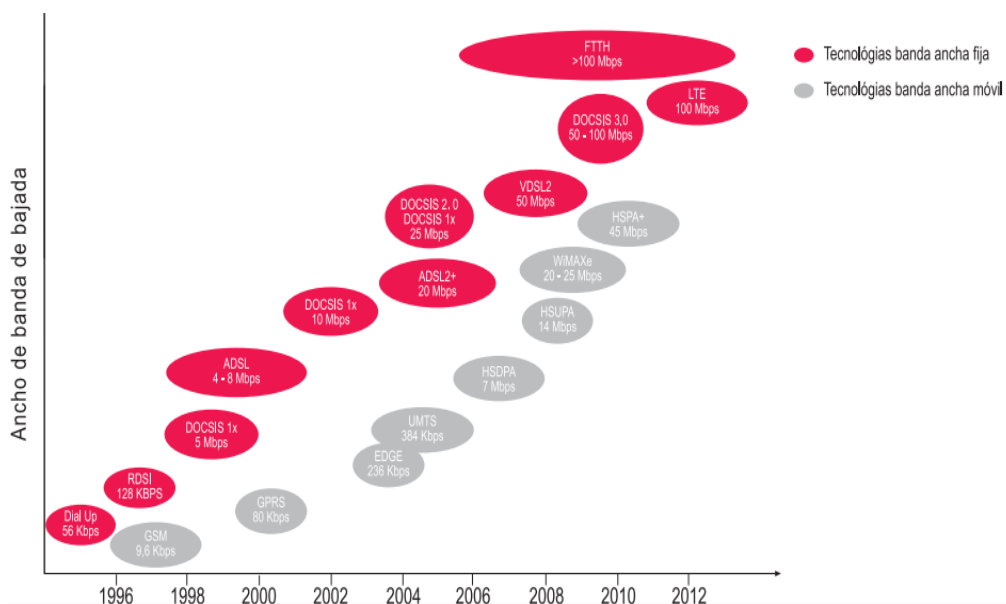
**Figura 1.2. Redes de Acceso**

Todas estas tecnologías a pesar de sus diferencias tienen gran velocidad de transferencia de datos y permiten la transmisión de nuevos servicios.

El acceso de banda ancha a internet necesita el procesamiento de datos, es decir, si la información es analógica debe codificarse a digital o incluso para ocupar menos ancho de banda en algunos casos se suele comprimir los datos, encargándose de la codificación el equipo del usuario, regresando los datos a su formato original [9].

Es tanto el impacto del uso de la banda ancha que se ha convertido en un servicio muy utilizado tanto en ambientes comerciales, en hogares y en medios empresariales.

En la figura 1.3 se observa la evolución que ha tenido las velocidades comerciales tanto en tecnología fija y móvil. Como se puede observar en lo referente a las tecnologías de cable quien establece las velocidades es el estándar DOCSIS, el cual comparte la velocidad máxima entre varios usuarios, de esta manera depende de una configuración óptima de la red para que la velocidad se divida entre menos usuarios [10].



**Figura 1.3. Velocidades comerciales en tecnología fija y móvil. [10]**

Las redes HFC disponen un gran ancho de banda para la distribución de datos, para transmitir la información por el canal ascendente se asignan las frecuencias de 5 a 42 MHz para la comunicación del usuario hacia la cabecera. En una red solo coaxial las perturbaciones generadas cuando se tiene muchos usuarios hacen inservible el canal de retorno, salvo que se tenga una red reducida; las redes HFC usan coaxial solo en la red de distribución, en este caso los únicos usuarios que comparten el ancho de banda son los usuarios de cada tramo y las interferencias son mínimas.

Las actuales redes HFC poseen anchos de banda en ambos sentidos, permitiendo obtener redes de telecomunicación multiservicio [5].

### **1.5 Demanda de Servicios de Nueva Generación.**

Debido al interés que ha generado integrar los servicios de voz y datos, las redes HFC han sido adecuadas para brindar mayor interoperabilidad y brindar servicios de nueva generación. Las tecnologías que trabajan sobre HFC buscan tener mayores soportes de ancho de banda en el canal de retorno y hacia la integración de servicios.

En los tiempos actuales el servicio de internet de banda ancha es usado en todas las áreas geográficas, siendo el volumen de tráfico de

datos mucho mayor al usado en años anteriores cuando el internet era usado principalmente para la investigación y educación.

El acceso a Internet ha permitido a los usuarios realizar en línea acciones de su vida cotidiana, incluyendo entretenimiento, educación, comercio, comunicación o interacción social y trámites. La red HFC es capaz de brindar interactividad en servicios de telecompra, juegos, teletexto interactivo, videojuegos que necesitan que los tiempos de respuesta con otros usuarios de la red sean pequeños. El servicio de voz también se puede añadir a los servicios que brinda HFC debido a que tiene bidireccionalidad de datos, pero estos necesitan un ancho de banda constante mientras dure la transmisión.

Gracias a la digitalización de contenidos los usuarios tienen a su alcance infinidad de servicios y mediante la infraestructura de la fibra óptica se ha podido converger servicios y aplicaciones sobre una misma plataforma usando un mismo medio de transmisión [5].

### **1.6 Objetivo General.**

Analizar la transmisión de los servicios de nueva generación en redes HFC bajo el estándar DOCSIS considerando la influencia de ruido y las velocidades de transmisión alcanzadas, analizar sus limitaciones y soluciones para satisfacer eficientemente la demanda del usuario.



### **1.7 Objetivos Específicos.**

- Describir la solución técnica para la implementación de transmisión de datos en las redes HFC. Estándares implementados.
- Describir los estándares más utilizados para la transmisión de datos e internet en las redes establecidas en el Ecuador.
- Analizar las consideraciones de ruido en las redes HFC que limitan las técnicas de modulación y limitan su optimización.
- Analizar el rendimiento y eficiencia de modulación en términos del teorema de máxima capacidad de canal de Shannon.
- Describir la metodología de ``agregación de canales`` para incrementar la capacidad de velocidad de transmisión, y el rendimiento de los cable módems.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. REDES HFC**

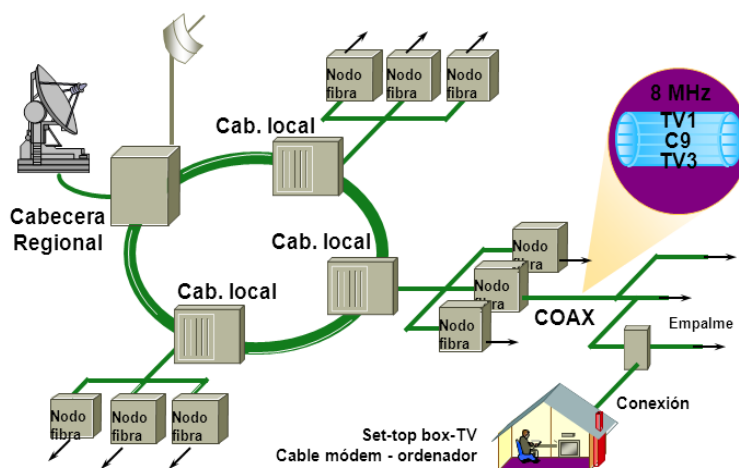
Una red HFC es una red de telecomunicaciones híbrida de fibra óptica y cable coaxial que permite la transmisión de video, voz y datos en banda ancha. La razón principal de la combinación de fibra y coaxial es aprovechar las ventajas de los dos medios de transmisión, la fibra nos brinda poca atenuación y nos permite alcanzar grandes distancias, mientras que se aprovecha el excelente ancho de banda que nos da el cable coaxial [6].

#### **2.1 Topología y elementos de las redes en HFC.**

La red HFC consta básicamente de 4 elementos:

1. Cabecera
2. Red troncal
3. Red de distribución
4. Acometida

Las redes HFC poseen una arquitectura altamente jerárquica basada en anillos de fibra óptica y redes activas de coaxial. En la figura 2.1 se puede observar la arquitectura mencionada, donde un primer anillo de fibra se encarga de distribuir información desde la cabecera regional a las cabeceras locales, desde las cabeceras locales o concentradores se tiende fibra hacia los convertidores opto-eléctricos donde se cambia el tipo de cable de fibra óptica a cable coaxial para formar la red de distribución y así llegar a cada usuario a través de la acometida [11].



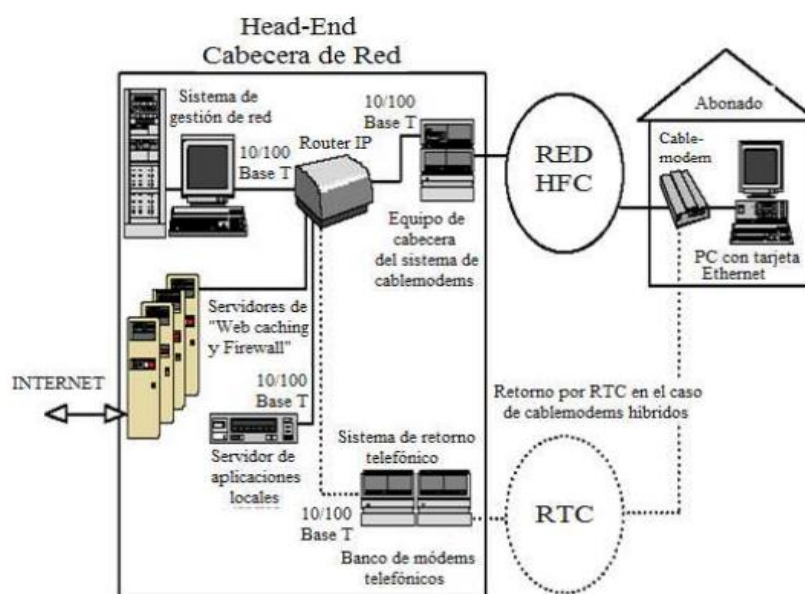
**Figura 2.1. Arquitectura de la red HFC. [2]**

A continuación se detalla cada uno de los elementos físicos que componen la topología de una red HFC.

### **2.1.1 Cabecera.**

La cabecera es el inicio de la red y es la responsable de procesar la información que se va a transmitir hacia los abonados. Para la transmisión de datos, los equipos que se conectan con internet se encuentran en la cabecera principal, mientras que en los nodos primarios se encuentran los equipos encargados del funcionamiento de los cable módems. En la cabecera se puede diferenciar la cabecera de servicios y la cabecera de transmisión, la de servicios posee los equipos y sistemas que permiten brindar de manera integrada los servicios, mientras que la cabecera óptica o de transmisión posee los equipos que permiten dar soporte a los servicios que se van a transmitir [1].

La figura 2.2 muestra la estructura de la red de datos para banda ancha.



**Figura 2.2. Estructura de una red de datos para banda ancha. [1]**

Los equipos que se utilizan en la cabecera de la red HFC son los siguientes:

- **Router:** La red usa un router para acceder a internet.
- **Firewall:** Le da seguridad y protege a la red de ataques externos.
- **Servidor Proxy:** Permite el acceso de una manera más rápida a internet pues actúa como caché de páginas web, haciendo copias locales de las páginas más visitadas
- **Servidores:** Se encargan de proveer servicios a otras computadoras tales como WWW, FTP, IRC, USENET, e-mail, DNS, DHCP, Sincronización horaria, Juegos.

- **Conmutador ATM multiservicio:** Permite interconectar equipos de tecnologías distintas tales como ATM, Frame Relay, X.25, y trabaja alrededor de los 19 Gbps para soportar el tráfico de la red.
- **Conmutador LAN:** Permite que los servidores se conecten con el conmutador ATM multiservicio usando tecnología 100 Base-T y ATM.
- **Conmutador ATM de acceso:** Tiene menor capacidad que el conmutador ATM multiservicio, pero posee una cantidad mayor de puertos.
- **Cabecera de módems de cable:** Para la transmisión bidireccional se utilizan dos módems, uno en el hogar del abonado (CM), y otro en la cabecera conocido como Sistema de Terminación de Cable módems (CMTS) que es el responsable de la codificación, modulación y es la red de acceso a datos a la cual se conectan los cable módems integrados en HFC, soportando entre 4000 y 30000 usuarios [1].

Las redes HFC también proponen el uso del servicio telefónico sobre IP, DOCSIS utiliza mecanismos para una buena calidad de servicio en tiempo real. Voz y datos comparten el mismo canal en la red donde el equipo de VoIP Residential Gateway va

a codificar las señales del equipo telefónico para transportarlo sobre IP, para lo cual se necesita un servidor de llamadas para realizar las funciones de control, en este caso la comunicación entre dos usuarios de la misma red se puede realizar sin usar la red telefónica pública [11].

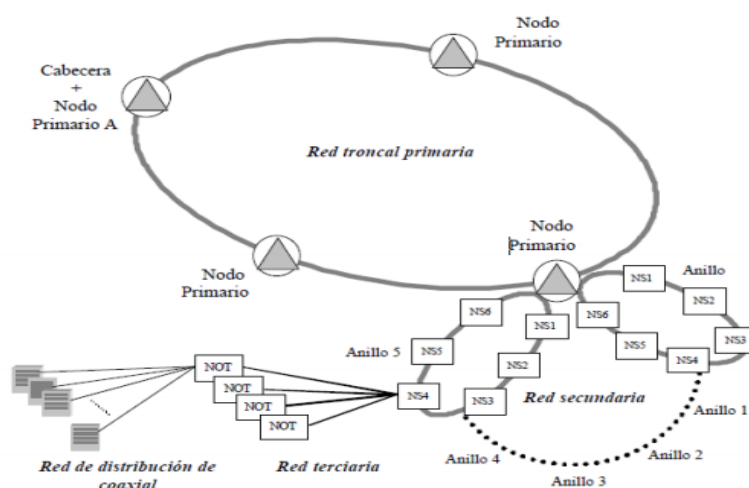
### **2.1.2 Red Troncal.**

La red troncal es una red de fibra óptica encargada de repartir las señales generadas en la cabecera hacia la red de distribución y viceversa. La red troncal está formada de una red primaria y una red secundaria [11].

La red primaria tiene una estructura de anillos redundantes que unen un conjunto de nodos primarios, los mismos que dan servicios a zonas determinadas, cada nodo primario alimenta a los nodos secundarios mediante enlaces punto a punto o mediante anillos. En la red secundaria los nodos secundarios se comunican con los nodos ópticos terminales en los que se realiza la conversión óptica-eléctrica para dar paso a la red de distribución de cable coaxial [6].

Para la red troncal se debe asegurar la redundancia de caminos entre los nodos principales, para que en caso de ruptura no existan problemas en la transmisión de datos.

La figura 2.3 es un ejemplo de la red troncal de una empresa extranjera, se puede observar claramente las distribuciones de fibra mencionadas anteriormente.



**Figura 2.3. Estructura de una red troncal para HFC. [12]**

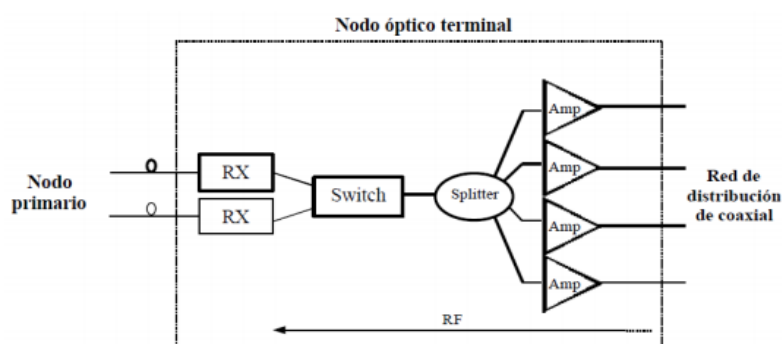
### 2.1.3 Red de distribución

La red de distribución es una red coaxial en la cual se transmiten señales en Radio Frecuencia, ésta red que tiene una estructura tipo bus, da inicio en un nodo óptico terminal y culmina en un tap que es la interfaz entre la red de distribución y la red de acometida del abonado, debido al uso de cable coaxial la señal tendrá que ser amplificada hasta llegar a una red de derivadores o taps, generalmente se usan un máximo de 6 amplificadores.

En el nodo óptico se realiza la conversión óptico-eléctrica y viceversa. En la figura 2.4 se observa cómo trabaja el nodo

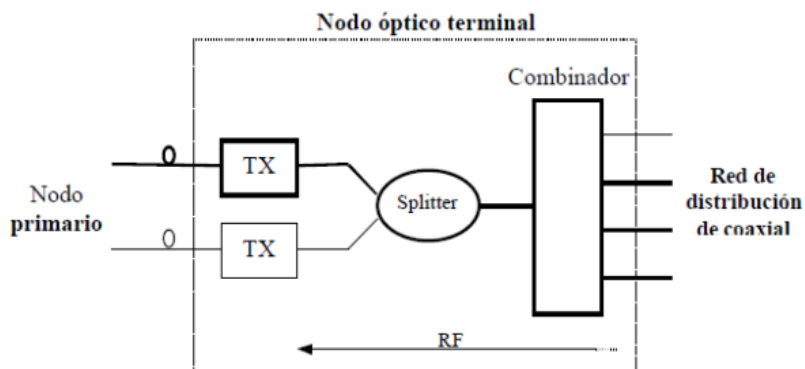


óptico en el canal descendente , los receptores ópticos realizan la conversión óptico-eléctrica de la señal proveniente de la red troncal y se tienen dos receptores porque el uno es de respaldo, el switch selecciona uno de los dos caminos en función de la calidad de señal ya sea el principal o el de respaldo y la señal RF que sale del switch llega a un amplificador que se encarga de proveer la señal adecuada para cada rama de coaxial que soporta aproximadamente 125 usuarios [1].



**Figura 2.4. Diagrama de bloques de un canal descendente en un nodo óptico terminal. [1]**

En el canal ascendente los caminos de retornos llegan hacia un combinador el cual forma una única señal que se envía hacia los transmisores ópticos de retorno los mismos que envían la señal hacia la red troncal hasta llegar a la cabecera. En la figura 2.5 se puede ver el diagrama de bloques de un nodo óptico para el canal ascendente.



**Figura 2.5. Diagrama de bloques de un canal ascendente en un nodo óptico terminal. [1]**

Respecto al cable se usa coaxial RG-750 (0.75 pulgadas de diámetro) y RG-500 (0.5 pulgadas de diámetro), el cable RG-750 generalmente se usa desde el nodo óptico hasta llegar al primer amplificador, mientras que el cable RG-500 va desde el primer amplificador hasta el tap del usuario. Además el coaxial no transporta solo las señales RF sino también lleva la alimentación para los elementos activos de la red, permitiendo el paso de bajas frecuencias como la alimentación eléctrica (60 Hz) por la parte interna del conductor, y respecto al ancho de banda, todos los usuarios de la misma red coaxial comparten el ancho de banda [13].

#### **2.1.4 Acometida.**

La acometida es el último tramo de la red HFC, éste se conecta a la red de distribución en el tap o derivador y llegan hasta el domicilio de los usuarios usando cable coaxial de calibre RG-6.

Para la acometida se puede usar dos arquitecturas, la estrella y la tipo árbol. La arquitectura estrella usa un solo tap para dar servicio a todas las viviendas de diferentes pisos de un edificio, mientras que la tipo árbol se usa cuando existen muchas viviendas en cada piso y se coloca un tap en cada piso.

Para la acometida se pueden usar cables RG6 y RG11, pero por normativa se debe usar el RG6 para realizar las acometidas de casas o instalaciones individuales, y el RG11 para conjuntos residenciales o edificios ya que se necesita distribuir la señal a una cantidad mayor de terminales y el cable RG11 presenta una menor atenuación [13].

#### **2.1.5 Equipos Terminales.**

Se conoce como equipos terminales aquellos dispositivos que provee la conexión entre el usuario final y el sistema de distribución. Estos equipos pueden realizar varias funciones de acuerdo al servicio que desee, como transformación de formatos de los datos de la red, testeo, funciones de seguridad, etc.

Estos dispositivos son instalados en el interior de la casa donde el usuario solicite el servicio, ya que sin esto no podemos acceder al mismo [11].

- **Módem de datos o Cable módem:** Es un dispositivo que permite acceder a los servicios de banda ancha a través de las redes HFC, ya que su principal función es ofrecer conectividad a internet, ocupando el ancho de banda disponible en la red de televisión por cable. Desde la cabecera podemos configurar las velocidades de transferencia de los canales ascendentes y descendentes en un rango de 10 Mbps hasta 42 Mbps.
- **Módem de telefonía:** Este equipo en el canal de bajada o downstream se encarga de recibir la señal digital, demodularla, descriptarla y convertirla en analógica para el teléfono, en cambio en el canal de subida o upstream hace lo contrario y así lo ubica en el espectro asignado.
- **Set-top-box (STB):** Dispositivo que recibe la señal digital de la red codificada en MPEG-2, la procesa y permite la visualización de televisión a los abonados, el STB también permite el envío de información hacia la cabecera.

En la figura 2.6 se observan los equipos terminales que se encuentran en el hogar del usuario de la red HFC.

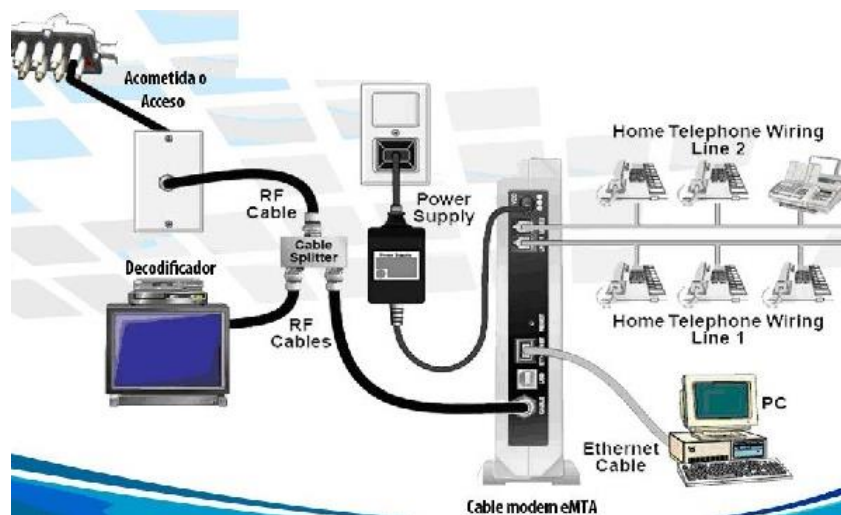


Figura 2.6. Equipos terminales. [14]

## 2.1.6 Elementos activos y pasivos de la Red.

### 2.1.6.1 Elementos activos de la red

Se conoce como elementos activos a todos los elementos que se encuentra en una red de cable que amplifican o decodifican la señal utilizando voltaje para funcionar. A continuación se hace una breve descripción de cada uno de éstos equipos [15]:

**Amplificadores:** Su función es aumentar el nivel de operación de una señal de entrada.

**Decodificador o Convertidor:** El decodificador tiene la función de decodificar y convertir las frecuencias de señales.

**Modulador:** Dispositivo que varía la frecuencia de las señales de un canal a otro.

**Combinador:** Equipo usado para unir todos los canales en una sola salida.

**Transmisor:** Transmite la señal de la cabecera hacia la red troncal.

**Fuentes:** Tienen la función de proveer energía a todos los elementos activos que se encuentra en la línea de transmisión.

**Clear Path:** Permite la localización de ruido de retorno en la red coaxial.

**Atenuador:** Reduce la amplitud de las señales que lo atraviesan.

**LBN:** Su función es bajar la frecuencia satelital y amplificar con bajo nivel de ruido.

### 2.1.6.2 Elementos pasivos de la red

Son todos los elementos que no necesita voltaje para su funcionamiento y comúnmente se utilizan en la distribución de señal [15].

**Conectores:** Sirve para proporcionar una conexión óptima.

**Acoplador Direccional (Copla):** Se utiliza para dividir la señal de entrada en dos señales de salida con atenuaciones diferentes.

**Derivador (Tap):** Se utiliza para la interconexión entre la línea de distribución y la acometida de los abonados. Hay dos tipos de Tap, Rg500 y los RG6. Los Rg500 se pueden conectar varios abonados a un mismo accesorio, en cambio los RG6 solo se conectan a uno solo.

**Divisor (Splitter):** Divide la señal de entrada en múltiples señales de salida con característica de amplitud y fase.

**Ecualizador:** Este dispositivo es usado para disminuir en potencia la parte de la señal de cable de entrada.

**Terminal de 75 Ohm:** Utilizado para cargar la línea y evitar reflexión de señal.

**Filtros:** Sirve para eliminar una fracción del espectro de señal.

**Insertor de Potencia (Power Inserter):** Se utiliza para mezclar la señal de RF y la energía eléctrica.

## 2.2 Medios de Transmisión

El nombre de las redes HFC provienen de la combinación de fibra óptica y cable coaxial. En este subcapítulo hablaremos de las características y la importancia de cada medio de transmisión.

### 2.2.1 Fibra Óptica

Es un medio de transmisión, usualmente utilizado en las redes de datos, la fibra óptica es un hilo muy fino de vidrio o plástico el cual envía pulsos de luz de un extremo a otro. La fibra óptica se puede clasificar en dos clases:

1. **Multimodo:** Es aquella en el que el haz de luz atraviesa por más de un camino, ya que esta fibra puede tener varios modos de propagación de luz. Generalmente la distancia de transmisión de este tipo de fibra es de 2 km aunque puede llegar a transmitir a 10Gb pero a distancias menores de 300 m. Los diámetros más frecuentes son 62,5/125 y 100/140 micras.



2. **Monomodo:** Es aquella que permite un solo modo de propagación, el modo fundamental  $LP_{01}$ , y esto se obtiene reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra, es decir, los haces de luz viajan por un solo camino paralelo al eje, para llegar al otro extremo.

Dentro de las ventajas del uso de fibra óptica se tiene la inmunidad electromagnética, debido a la disminución de las atenuaciones se pueden alcanzar grandes distancias con anchos de banda superiores y es rentable en instalaciones a largo plazo.

Para la transmisión en fibra se necesita un transmisor que convierte los datos en pulsos de luz para enviarlos a través de la fibra y un conector de recepción que en caso de la red HFC está en el nodo óptico para realizar la transformación óptico-eléctrica, y cada circuito debe tener dos cables de fibra una en cada dirección.

La longitud de onda de la luz en la fibra óptica es o bien 850nm, 1310 nm o 1550 nm y el ancho de banda de la fibra es mucho mayor que el del cable coaxial, por el cual permite transmitir voz, datos y video.

La fibra monomodo es capaz de alcanzar mayores distancias y con tasas de transmisión más altas. De esta manera, la fibra

monomodo es casi universalmente utilizada en las redes de televisión y datos por cable [13].

### **2.2.2 Cable Coaxial**

El cable coaxial es utilizado para transportar señales eléctricas de alta frecuencia, este cable se compone de dos conductores concéntricos, un conductor central o vivo que es el encargado de llevar la información y otro conductor exterior, blindaje o malla que sirve de referencia de tierra.

La impedancia del cable coaxial usado en la red HFC es de 75 ohmios y todos los elementos de la red incluyendo el cable deben tener la misma impedancia para que no existan problemas de ondas reflejadas que disminuyen el rendimiento de la red.

El cable coaxial tiene mayor atenuación que la fibra óptica, muchas veces la atenuación en el coaxial se da por mal blindaje, el dieléctrico absorbe la señal, y existen impedancias diferentes o pérdidas resistivas en los conductores que absorben la señal. Otro factor a considerar en el diseño de la red HFC es que la atenuación en el coaxial es directamente proporcional con la frecuencia y también es afectada por la temperatura.

La pérdida de retorno existe por el cambio de impedancia del cable, cuando el cable presenta pérdidas de retorno la señal reflejada provocará variaciones de tensión a lo largo de la línea, por lo tanto, para que las reflexiones sean mínimas es importante conservar una impedancia constante [13].

### **2.3 Señales de la red HFC**

Las señales que transmite la red HFC se pueden dividir respecto a su tecnología en señales analógicas y digitales. Cuando nos referimos a señales analógicas básicamente son señales de televisión, pero cuando hablamos de señales digitales hay que considerar el tipo de contenido digital que transmiten como televisión digital y la transmisión de datos [11].

#### **2.3.1 Señales Analógicas**

La distribución de señales analógicas de televisión es la primera tecnología que fue soportada por las redes HFC.

En la televisión análoga se emiten señales en Banda Base. Para la modulación es más eficiente modular en frecuencia, es por eso que se analiza la señal de Banda Base en el espectro usando la Modulación de Doble Banda Lateral con Portadora Suprimida, sin embargo con esta modulación existe un desperdicio de potencia al transmitir la portadora, ya que ésta

gasta el 50% de la potencia mientras que la información ocupa solo el 25% debido a la redundancia de las bandas laterales. Para solucionar éste inconveniente se utiliza la Modulación de Banda Lateral Única que a través de filtros ubicados en el circuito de transmisión deja pasar una sola banda lateral, sin embargo si filtramos parcialmente una de las bandas laterales de la modulación de doble banda lateral se puede mejorar el SNR en las bajas frecuencias de la señal moduladora, obteniendo la Modulación de Banda Lateral Vestigial que es la que permite la transmisión de televisión analógica PAL, SECAM y NTSC [11].

### **2.3.2 Señales Digitales**

Dentro del contenido digitales que transmite la red HFC tenemos la televisión digital, la transmisión de datos y la transmisión de televisión por IP, cada una de éstas tecnologías serán explicadas a continuación [11].

#### **2.3.2.1 Televisión Digital**

El nombre de televisión digital se debe a la tecnología que utiliza para transmitir la señal, a diferencia de la televisión tradicional cuya codificación es analógica, la televisión digital maneja sus parámetros de imagen y

sonido en forma binaria representada con unos y ceros. Además permite el uso del canal de retorno dando la opción de interactividad del usuario [11].

La televisión digital posee un mayor ancho de banda que permite un mayor número de canales y una mejor calidad de video y sonido.

### **2.3.2.2 IPTV**

La televisión sobre IP o IPTV es una nueva forma de transmitir televisión a través de la red haciendo uso del protocolo TCP/IP, brindando una programación general a todo público y contenidos específicos que son seleccionados por cada usuario.

El desarrollo de IPTV se ha basado sobre el video streaming permitiendo ver el contenido televisivo sin necesidad que se realice la descarga completa. El usuario tendrá un receptor en su hogar y podrá seleccionar lo que desea ver o descargar, en caso que el usuario quiera descargar el contenido, este se guardará en el receptor y el usuario podrá verlo las veces que desee.

Los contenidos de televisión se encapsulan sobre RTP y UDP y usa una distribución multicast para que cada canal se transmita una sola vez y se replique donde se bifurca la red para alcanzar a los usuarios suscritos a este canal.

Respecto a los contenidos de video bajo demanda compartir el mismo flujo entre múltiples usuarios no es una opción, debido a que el cliente tiene control total sobre la reproducción del contenido por lo que se necesita una distribución unicast.

Ya que IPTV se basa en el protocolo TCP/IP pasa a registrarse en las redes HFC bajo el estándar DOCSIS, siendo una tecnología más añadida a dicha red [11].

### **2.3.2.3 Servicios de datos soportados por la Red HFC.**

Las redes HFC tienen soporte para la transmisión de datos en los que se incluyen internet y telefonía, la red tiene la capacidad para la transmisión bidireccional para lo cual hace uso del canal de retorno y se rige bajo el estándar DOCSIS haciendo uso del protocolo TCP/IP.

Para el servicio telefónico se usa la tecnología de Voz sobre IP (VoIP) que transmite la voz en forma de

paquetes de datos a través del protocolo de Internet IP y no a través de la red telefónica convencional. Este servicio integra conexión, desconexión, transferencia y procesamiento de llamadas, mensajería, correos de voz, directorios, remarcado automático, recepción automática, centros de contacto y privacidad. Cuando los dos usuarios que establecen la comunicación tienen VoIP la comunicación es gratuita, pero si solo el uno posee el servicio de VoIP entonces habría que cancelar un valor para hacer uso del servicio.

Para la transmisión telefónica el usuario posee un adaptador de telefonía que convierte la señal telefónica en señal RF para poder enviarla por el cable coaxial hacia la cabecera en donde un módem modula y demodula el tráfico de la conversación en el canal ascendente y descendente, compartiendo el canal de subida (entre 5 y 42MHz) para la transmisión de datos y usando el espectro entre 375 MHz y 860 MHz para el canal descendente.

El servicio de datos también se maneja sobre IP e incluye el servicio de internet, transacciones y

hospedaje de páginas. Debido al uso de IP los datos son enviados en datagramas o paquetes, en las cabeceras del protocolo IP se encuentra las direcciones IP de origen y destino que son usadas por los switches y los routers para saber a donde se enviarán los paquetes.

Para brindar estos servicios la cabecera de la red se conecta con un proveedor de servicios de Internet y a través de los CMTS se habilita la comunicación con los CM, para el tráfico de bajada los paquetes se encapsulan en MPEG los mismos que se transmiten como flujos de datos modulados con QAM. Mientras que el tráfico de subida o upstream es transportado en tramas Ethernet usando modulación QPSK y QAM [11].

#### **2.3.3.4 La vía de retorno**

En las redes HFC hay dos canales: Canal de subida o Upstream y Canal de bajada o Downstream. Estos canales comparten el mismo cable coaxial pero viajan en filamentos separados de fibra.

En el canal de bajada la transmisión de datos viajan desde la cabecera al terminal del usuario, el cual no presenta ningún problema, ya que la información se



envía por igual a todos los usuarios. En cambio, en el canal de subida los datos viajan hacia la cabecera usando un espectro comprendido en un rango de 5 y 42 MHz, éste ancho de banda es compartido con todos los hogares que parten de un nodo óptico, en ese transcurso puede existir colisiones entre paquetes.

En un inicio el canal de retorno se utilizaba para la transmisión de video digital y monitoreo de equipos, sin embargo en la actualidad la bidireccionalidad de la red es necesaria para los servicios de vídeo, telefonía, datos y para los servicios interactivos de alta velocidad.

En la red HFC el problema principal en el canal ascendente es el ruido eléctrico ya que éste puede provenir de diferentes fuentes en el sistema, el ruido en la red es introducido en el extremo del usuario hacia la cabecera. Así mismo como todas las señales serviciales convergen en un nodo óptico, también las señales indeseadas e interferencias convergen al nodo, dando como resultado un espectro de canal de subida más ruidoso que en el canal descendente [11].

## 2.4 Estándares de la Red HFC.

Debido que al inicio las soluciones de acceso a internet y transmisión de datos dependían de los fabricantes y no existía interoperabilidad, los operadores y fabricantes se vieron en la necesidad de crear estándares que les permitan determinar los requerimientos y especificaciones de las nuevas tecnologías creando así un ente de regularización llamado Cable Television Laboratories o más conocido como CableLabs.

Los estándares asociados al acceso de internet y datos se basan principalmente en los cable módems ya que ellos permiten convertir las redes de cable en redes transparentes para la transmisión de datos de alta velocidad. Entre las normalizaciones para las redes HFC tenemos:

1. **DOCSIS:** (Data Over Cable Service Interface Specification) es un estándar internacional no comercial de Cable Labs que permite a los operadores de cable introducir el acceso a internet sobre las redes HFC para que se facilite el diseño, desarrollo, implementación de servicios, y requerimientos de la interfaz de soporte de comunicaciones.

Este estándar inició en 1997 y la primera versión es DOCSIS 1.0, el mismo que ha ido mejorando a través de versiones tales como

DOCSIS 1.1 en 1999, DOCSIS 2.0 en el 2001, DOCSIS 3.0 en el 2006 y el actual DOCSIS 3.1 que pretende que el nivel de conexiones de cable alcance al de las conexiones de LAN.

2. **EuroDOCSIS:** Es el estándar DOCSIS aplicado en Europa. Fue creado para que los operadores de cable europeos puedan hacer uso de DOCSIS y exista un adecuado desempeño de la red y para que los precios no se elevaran debido a problemas de compatibilidad y estandarización. La principal diferencia de las redes europeas es que los canales de cable tienen un ancho de banda de downstream de 8 MHz, mientras que en América es 6 MHz por canal, lo que permite una mayor velocidad en el canal de bajada.
  
3. **DVB-RCC (Return Channel Cable):** DVB Digital Video Broadcasting es una organización que fue creada para proponer estándares para la televisión digital, inicialmente fue creado para los Set Top Box y luego fue extendido para que exista compatibilidad entre cable módems y cabeceras con los Set-Top Box. Este estándar es usado principalmente en Europa ya que los operadores han desplegado unidades basadas en DVB , además de estándares de audio y video, DVB define conexiones de datos considerando el canal de retorno como DVB RCC y ha sido

definido principalmente para soportar servicios de best-effort y higher-grade.

4. **OpenCable.** La plataforma de aplicaciones OpenCable fue definida por la Cable TV industry a través de CableLabs. OpenCable define una especificación hardware y software, creando una plataforma común para desarrollar servicios interactivos. Este estándar posee una amplia gama de servicios ya que combina a DVB y a DOCSIS, combinando especificaciones para video digital de MPEG2, la capacidad de DVB para aplicaciones básicas de bajo consumo de ancho de banda, con las aplicaciones IP de alto consumo de ancho de banda de DOCSIS [3].

DVB Y Open Cable se utilizan principalmente para televisión digital, mientras que el estándar DOCSIS es el que rige principalmente sobre las redes HFC para la transmisión de datos, es por esto que se ha dedicado el siguiente capítulo para profundizar su estudio.

## **2.5 Seguridades de la red HFC.**

En lo que respecta a seguridad constantemente se está batallando, ya que los hackers siempre intentan introducirse ilícitamente en el sistema, mientras que los administradores de red buscan maneras de evitar que ocurra eso. Sin embargo, no existen garantías de que se

pueda tener una red totalmente segura, siempre se necesitará de actualizaciones con la finalidad de obtener una mejora en un futuro. Estos métodos de seguridad son actualizados frecuentemente para hacerlos difícil de romper.

Los cables modem pueden implementar una serie de medidas de seguridad, cuales se detallan a continuación.

- Mejoras de Firmware
- Control de dispositivos asegurados por el proveedor de servicios
- Certificación digitalmente firmada( autenticación de los módems)
- Encriptación de Datos

Una de las características que tienen los modem DOCSIS es que permiten que su **firmware** sea mejorado frecuentemente, los creadores de DOCSIS reconocen que los modem pueden necesitar actualizaciones de firmware para corregir fallas de diseño que pueden ser vulnerables al fraude de servicios. Uno no conoce que tipos de problemas pueden tener los modem ya que ningún sistema de software o hardware es inaccesible.

La utilización de **certificados digitalmente firmados** se da para la autenticación del dispositivo, actualizaciones de firmware y privacidad de datos. Una característica de los certificados es limitar el proceso de

actualización del cable módem, al ser instalado un certificado en un modem, este solo instalará el firmware al cual autorice el CMTS.

En lo que se trata de **encriptación de datos**, el BPI (Interfaz de Privacidad Base) está diseñado para garantizar la privacidad de datos de una red DOCSIS, para que se efectúe la encriptación de comunicación entre el cable modem y el CMTS tiene que estar inicializada en el paso de privacidad base del proceso de aprovisionamiento.

Los algoritmos que se utiliza para la encriptación de paquetes de datos es el DES (Estándar de Encriptación de Datos) y el KEK (Clave de Encriptación Clave) que es un sistema de encriptación de claves privadas/públicas [16].

### **2.5.1 Medidas de Prevención**

En las medidas preventivas se cuenta con dos herramientas indispensables que son el hardware de enrutamiento de banda ancha (CMTS) y el software de administración de red.

A continuación se detalla algunas opciones para asegurar la red:

- Evitar colisiones de MAC
- Actualización de Plataformas actuales de DOCSIS
- Habilitar la Privacía Base (BPI/BPI+)

Se conoce como colisión MAC cuando dos cable módem tratan de ponerse en línea con la misma dirección MAC. Cuando esto sucede, el primer cable módem que se registró es puesto fuera de línea y logra registrarse el segundo cable módem.

Cuando existe una colisión en las redes HFC, el cable módem intenta registrarse, el flujo de datos es encapsulado por el nodo local y puentado directamente por CMTS, si logra registrar una dirección MAC que anteriormente ya ha sido registrada a través de un segundo nodo, el CMTS no lo reconocerá como colisión MAC y permitirá registrarse el segundo cable módem.

Al realizar una actualización de plataformas de mejora a DOCSIS, implica comprar nuevos equipos CMTS que tenga concordancia a las especificaciones actuales de DOCSIS lo cual sería un gasto, pero esta mejora será muy útil, ya que las versiones iniciales de DOCSIS son vulnerables y una forma segura es actualizar la versión del estándar.

Para habilitar la privacidad base, el cable modem y el CMTS deben tener habilitado un firmware capaz de funcionar en modo BPI, de esta manera, habilitando la encriptación BPI se evitan los ataques a los cable módems impidiendo observar los datos existentes en el cable coaxial, aunque esto no es considerado un

riesgo de seguridad de la administración de la red sí afecta a la privacidad de los clientes, algo no factible dentro de la calidad de la red [16].

### 2.5.2 Aspectos de seguridad en Banda Ancha

Aunque la banda ancha permite un acceso fácil y libre de la información, hay que considerar que existen riesgos informáticos que involucran la vulnerabilidad en seguridad que puede poner en riesgo los datos de los usuarios.

Para garantizar la seguridad de la red se debe adoptar medidas de seguridad entre las cuales tenemos las siguientes [16]:

- **Cortafuegos:** Son programas o equipos que controlan la comunicación de la red para impedir los accesos no autorizados a los recursos de los ordenadores conectados a banda ancha.
- **Cifrado:** Es otra forma de proteger los datos que se encuentran en el ordenador o que viajan a través de la red, se puede utilizar diferentes tecnologías de cifrado que permitan la privacidad e integridad de los datos, sin embargo la información cifrada ocupa aproximadamente el 20% más ancho de banda que la información no cifrada.



- **Gestión de claves:** Es cuando las terminales multimedia cifran una comunicación negociando una clave, pero debe considerarse que para dar seguridad a una aplicación, la información que maneja ésta debe ser crítica.

Cabe mencionar que los aspectos de seguridad implementados en banda ancha se aplican en cualquier medio sin importar la red o la tecnología usada.

## **CAPÍTULO 3**

### **3. ANÁLISIS DEL ESTÁNDAR DOCSIS**

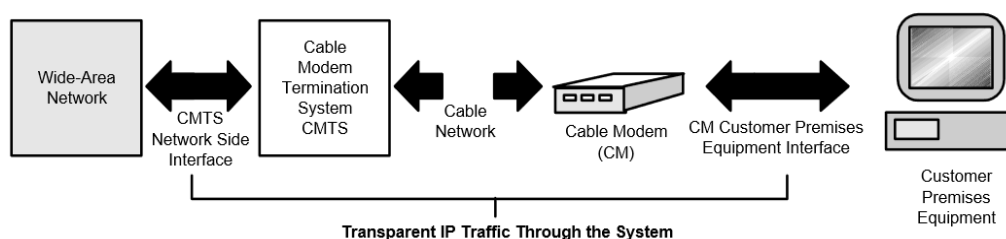
#### **3.1 Comunicación de datos en DOCSIS**

El estándar internacional DOCSIS, que en español significa *“Especificación de interfaz para servicios de datos por cable”*, se crea con la finalidad de desarrollar sistemas de comunicaciones en los que los operadores de cable puedan transmitir a grandes velocidades una amplia gama de servicios haciendo uso de paquetes de datos. Es así que CableLabs (consorcio de expertos de cable y operadores de la industria) propone especificaciones sobre definición, diseño, desarrollo y tendido de red para sistemas de datos sobre cable.

Las especificaciones de DOCSIS son detalladas en 4 documentos principales, especificaciones para CM y CMTS, para interfaz de radio

frecuencia (RFI), para el sistema de gestión y especificación de protocolos de prueba para aceptación, siendo el documento fundamental la especificación para interfaz de radio frecuencia en el que se define especificaciones de capa física y capa MAC.

Por medio de las especificaciones de DOCSIS se permite la transmisión bidireccional de tráfico IP entre la cabecera y los usuarios sobre la red HFC como se ilustra en la figura 3.1 [17].



**Figura 3.1. Tráfico IP a través del sistema de datos sobre cable [17]**

CableLabs y su estándar DOCSIS es el principal referente de normas que usan las redes HFC. Respecto a Ecuador las redes HFC desplegadas se acogen a este estándar, por tal motivo en el presente capítulo se realiza un análisis de las diferentes versiones, actualizaciones y mejoras del estándar.

### 3.1.1 DOCSIS y la transmisión de datos.

Para la transmisión de datos en la red HFC se tiene reservado canales de 6 MHz en el sentido descendente y canales de

múltiples anchos de banda para la transmisión ascendente. La red de acceso establece comunicación bidireccional con un medio físico híbrido fibra/coaxial (HFC) y establece el plan de frecuencias respectivo.

La transmisión de datos se lo realiza entre el CMTS hasta el CM, lo cuales actúan como transmisores y receptores. El CMTS transporta la información hacia los diferentes cables módems mediante transmisión broadcast utilizando la multiplexación por división de tiempo (TDM). La transmisión de bajada no implica dificultad ya que hay un solo transmisor, que no necesita reservar tiempo de envío, en cambio en la transmisión de subida presenta dificultad de comunicación entre ambos extremos, los cables modem quieren enviar datos a la cabecera, pero esta solo puede recibir información uno a la vez.

En el medio físico el CMTS controla el uso de los recursos de la red, asignando los canales de retorno y descendentes. La Subcapa física dependiente del medio (PMD) especifica los esquemas de modulación soportados y ve la necesidad de dividir el tiempo en "intervalos de tiempo" (mini-slots) a través de la multiplexación TDMA o SCDMA, cada formato de ráfaga tiene la codificación FEC programada.

En la subcapa de convergencia de transporte DOCSIS requiere que los paquetes MACs sean transmitidos en el canal downstream, a través de la encapsulación de la trama con MPEG-TS. En el encabezado de la trama MAC se especifica el tipo de información que tiene la carga útil a través del campo PID.

La capa de enlace la encargada de definir un protocolo para designar los tiempos a los CM. El control acceso al medio controla el acceso de los cable modem al canal de retorno evitando que varios módems transmitan simultáneamente y genere colisiones, los flujos de servicio también es un servicio de la capa MAC. La capa de enlace adicionalmente presenta especificaciones de seguridad.

En la capa de red los cable módems y el CMTS permiten el transporte de los paquetes UDP, y soportan protocolos SNMP, TFTP y DHCP [18].

### **3.2 Evolución de DOCSIS**

En la década de los 90, comenzó el proceso de desarrollo, la primera versión fue publicada en marzo de 1997 y luego de dos años se certifica el primer equipo que cumplía con las especificaciones de la versión modificada DOCSIS 1.1. La versión 2.0 se publicó en

diciembre del 2001 y años después en agosto del 2006 salió la versión 3.0 cuya principal característica es el soporte para IPv6 y la agregación de canales que permite utilizar varios canales simultáneamente. La última versión publicada por CableLabs es DOCSIS 3.1 en noviembre de 2013, con esta actualización se pretende que las conexiones de cable alcancen un nivel similar al de las redes LAN.

A continuación se identifica las principales características de las diferentes versiones de DOCSIS.

- **DOCSIS 1.0:** No soporta especificaciones de calidad de servicio, usa el Servicio de Mejor Esfuerzo y maneja velocidades máximas para downstream y upstream de 42 Mbps y 10 Mbps respectivamente.
- **DOCSIS 1.1:** Mantiene las mismas velocidades de transmisión, establece QoS para los servicios sensibles al retardo como la telefonía. Expone mejoras en la eficiencia del ancho de banda, fragmentación, concatenación, supresión de encabezamiento, aprovisionamiento seguro.
- **DOCSIS 2.0:** Tiene soporte para servicios Simétricos y servicios punto a punto (PPP), servicios IP multicast, así como mayor inmunidad al ruido y a la interferencia, agrega nuevas

modulaciones que permite aumentar la capacidad de transmisión.

Es compatible con la versión 1.0 y 1.1

- **DOCSIS 3.0:** Soporte para IPv6 y permite la agregación de canales para alcanzar mayores velocidades
- **DOCSIS 3.1:** Pretende que las conexiones de cable alcancen los niveles de rendimiento de LAN [19].

En la tabla 1 se puede apreciar la evolución que ha tenido el estándar DOCSIS respecto a sus servicios, los dispositivos para el suscriptor y los anchos de banda para el canal ascendente y descendente.

**Tabla 1. Evolución de DOCSIS. [19]**

| Versión                                     | DOCSIS 1.0 | DOCSIS 1.1 | DOCSIS 2.0 | DOCSIS 3.0     |
|---|------------|------------|------------|----------------|
| <b>SERVICIOS</b>                            |            |            |            |                |
| Internet de banda ancha                     | X          | X          | X          | X              |
| Paquetes de servicios                       |            | X          | X          | X              |
| VoIP  |            | X          | X          | X              |
| Videoconferencia                            |            |            | X          | X              |
| Servicios Comerciales                       |            |            | X          | X              |
| Video de entretenimiento                    |            |            |            | X              |
| <b>DISPOSITIVOS PARA EL SUScriptor</b>      |            |            |            |                |
| Cable módem                                 | X          | X          | X          | X              |
| Teléfono VoIP (MTA)                         |            | X          | X          | X              |
| Gateway residencial                         |            | X          | X          | X              |
| Videoteléfono                               |            |            | X          | X              |
| Dispositivos móviles                        |            |            |            | X              |
| Caja receptora IP                           |            |            |            | X              |
| <b>ANCHO DE BANDA DEL CANAL DESCENDENTE</b> |            |            |            |                |
| <b>Mbps/canal</b>                           | 40         | 40         | 40         | Mínimo 160 [2] |
| <b>Gbps/nodo</b>                            | 5 [1]      | 5 [1]      | 5 [1]      | 5 [1]          |
| <b>ANCHO DE BANDA DEL CANAL ASCENDENTE</b>  |            |            |            |                |
| <b>Mbps/canal</b>                           | 10         | 10         | 30         | Mínimo 60 [5]  |
| <b>Gbps/nodo</b>                            | 80 [3]     | 80 [3]     | 170 [4]    | 170 [4]        |

Notas:

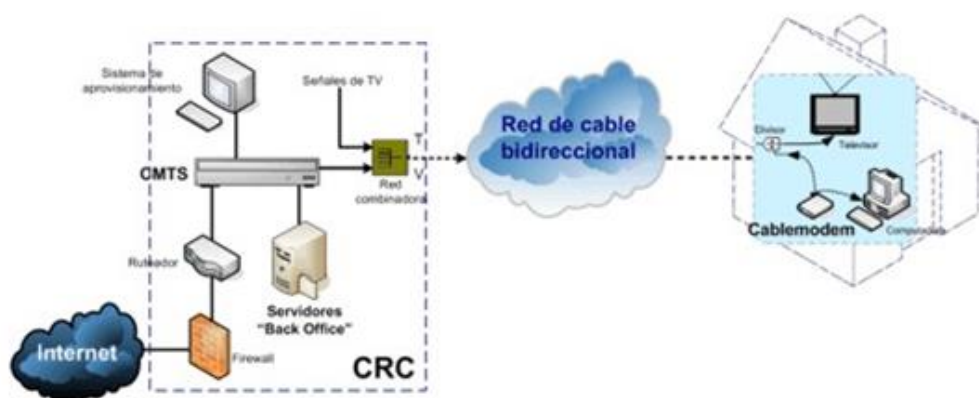
- [1] Se asume espectro disponible de 750 MHz (125 canales) en la red
- [2] Unión de cuatro canales de 6 MHz con 256 QAM
- [3] Se asume espectro disponible de 25 MHz en el enlace ascendente
- [4] Se asume espectro disponible de 35 MHz en el enlace ascendente
- [5] Unión de cuatro canales de 3.2 MHz



### 3.2.1 DOCSIS 1.0

La primera versión de DOCSIS define el protocolo de transmisión de datos y establece las características de los equipos contenidos en la cabecera de red y en el hogar de los suscriptores. Define así el uso de los CMTS, CM y el uso de servidores.

En la figura 3.2 se observa la arquitectura de DOCSIS 1.0 y los elementos antes mencionados.



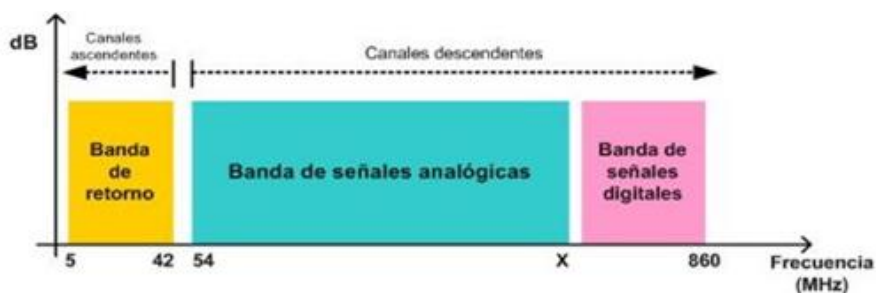
**Figura 3.2. Arquitectura de DOCSIS 1.0. [19]**

Los servidores “back office” permiten establecer la comunicación y definen los servicios que se ofrecerán a los usuarios a través del cable modem. Entre los servidores principales tenemos:

- Servidor DHCP: Permite la asignación dinámica de direcciones IP a los cable módems.

- Servidor TFTP: Autoriza la transferencia de los archivos para la configuración del cable módem y permite la descarga de actualizaciones de software.
- Servidor TOD: Servidor encargado del tiempo para la organización de historiales o eventos que se ejecutan en la red.

Las especificaciones de DOCSIS 1.0 respecto al rango de frecuencias se observa en la figura 3.3, estableciendo el rango de 5-42 MHz para el canal ascendente y 54-860 MHz para el canal descendente.



**Figura 3.3. Banda de frecuencias para DOCSIS. [19]**

Se establece el ancho de banda de cada canal de radiofrecuencia en 6 MHz para TV analógica o para señales digitales usando codificación MPEG-2. Para la modulación descendente se usa 256 QAM (8 bps) y 64 QAM (6 bps) y se alcanza una tasa de 5,360537 Msymbols/s y 5,056941

Msymbols/s respectivamente, mientras que para la vía de retorno se usa modulación QPSK y 16 QAM. Se define el acondicionamiento de la red de cable y para frecuencias mayores a 88 MHz el retardo de transmisión entre la cabecera y el cliente más lejano es de  $\leq 0.8$  mseg (generalmente valores muy por debajo), la relación de portadora versus ruido en cada canal de 6MHz es no menor a 35dB y para la comprobación y corrección de errores se usan los algoritmos Reed-Solomon y Trellis para la modulación ascendente y descendente respectivamente [19].

Muchas de las especificaciones de DOCSIS 1.0 son opcionales y no son requeridas para la certificación generando problemas de seguridad como el cambio del firmware de los módems debido a que el servidor SNMP del módem no tenía la configuración de deshabilitar la administración local Ethernet.

Esta versión brinda una baja calidad de servicio para la transmisión de datos, usando la tecnología del mejor esfuerzo que no era suficiente para los servicios en tiempo real de voz y video por tal motivo se creó la revisión del estándar creando DOCSIS 1.1.

### 3.2.2 DOCSIS 1.1

En ésta versión los rangos de frecuencia se mantienen y para la transmisión de datos, voz y video en el canal de retorno el rango se divide en canales de diferente ancho de banda tales como 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 y 3.2 MHz. Las modulaciones también se mantienen en los dos sentidos, dependiendo de la modulación utilizada se puede brindar velocidades desde 0.32 Mbps hasta 10.2 Mbps para upstream y de 30 a 57 Mbps para downstream.

DOCSIS especifica las operaciones tanto de la capa física como del control de acceso al medio (MAC) de la red HFC, en la subcapa PMD (Dependiente del Medio Físico) utiliza la técnica de multiplexación FDMA para la transmisión en sentido ascendente y descendente, siendo el canal ascendente un medio compartido mientras que el canal descendente se lo utiliza para la difusión de información entre el CMTS y el CM.

En esta versión se realizaron algunos cambios que a continuación detallamos:

- Calidad de servicio (QoS)
- Clasificación de paquetes en el canal ascendente y descendente
- Flujos de servicio

- Establecimiento dinámico de servicio
- Interfaz de Privacidad Básica (BPI+)

En DOCSIS 1.1 un flujo de servicio es elemental para proveer calidad, es por esto que voz, datos y video viajan en diferentes flujos de servicios en el mismo cable modem con la finalidad de brindar una mejor calidad.

Para proporcionar QoS se clasifican los paquetes que atraviesan la interfaz MAC de acuerdo a parámetros definidos para cada flujo de servicio, tanto el CMTS como el CM conforman, controlan y priorizan el tráfico de paquetes.

Todos los servicios de planificación han sido desarrollados para mejorar el proceso de petición-concesión, por ejemplo el CMTS puede proporcionar peticiones y/o concesiones cuando se necesite dependiendo de las necesidades de throughput y los retardos de tráfico que existan en sentido ascendente. Los servicios se adaptan específicamente a cada flujo de datos, teniendo como principales a: servicio de concesión no solicitada (UGS), concesión no solicitada con detección de actividad (UGS-AD), interrogación secuencial en tiempo real (rtPS) y no real (nrtPS) y servicio de máximo esfuerzo (BE, Best Effort).

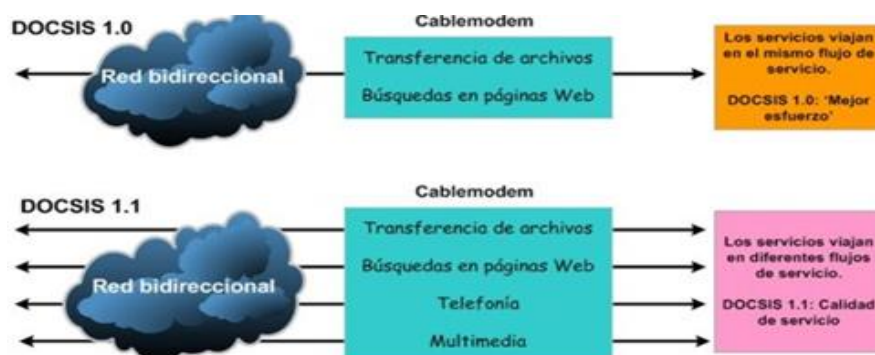
Otra característica de Docsis 1.1 es la supresión de encabezamiento que permite que más datos sean transmitidos en lugar de datos duplicados. La supresión se da cuando el CM identifica la información que no va a variar de una transmisión a otra, como banderas, contadores de tiempo de vida, direcciones de fuente y destino e identificadores de protocolos, ésta información puede pertenecer a la capa 2, 3 y 4. Antes que el CM elimine los campos envía dicha información al CMTS con una máscara denominada PHSM y luego envía el paquete modificado, cuando el CMTS recibe el paquete modificado coloca la información retirada anteriormente y el paquete es enviado a su destino [20].

### **3.2.3 Diferencias y compatibilidades entre DOCSIS 1.0 y 1.1.**

La principal diferencia entre estas dos versiones es la Calidad de Servicio, existen datos que no requieren intervalos de tiempo específicos para la transmisión, mientras que otros como la voz y el video deben llegar en un tiempo constante para que no se altere la fiabilidad de información; DOCSIS 1.1 proporciona las características para mejorar la transmisión de servicios [19].

En la primera versión los servicios de voz, datos y video viajan por un mismo flujo de servicio, en cambio en la versión

mejorada cada servicio viaja en diferentes flujos de servicios. En la figura 3.4 se puede observar lo mencionado anteriormente.



**Figura 3.4. Flujos de servicio en DOCSIS 1.x. [19]**

La transmisión de paquetes en la red de cable se hizo más eficiente cuando se agregó dos funciones como es la concatenación y fragmentación, ya que la finalidad de la concatenación es que el cable módem pueda enviar múltiples paquetes en una sola transmisión y en cambio en la fragmentación en múltiples oportunidades de transmisión enviar una trama. Gracias a la fragmentación y a la Calidad de Servicio se pudo establecer el servicio de VoIP.

Otra de las diferencias de las versiones de DOCSIS es la seguridad BPI, la versión 1.0 tenía una seguridad muy limitada, ya que contaba con esquema sencillo para encriptar el tráfico, en

cambio a la versión modificada se le agregaron certificados digitales con el fin de evitar la falsificación del cable módem.

En la tabla 2 observamos los diferentes anchos de banda y tasa de transmisión tanto en el sentido ascendente como descendente que soporta DOCSIS 1.x (unión de versiones 1.0 y 1.1). DOCSIS 1.x tiene dos esquemas de modulación para cada enlace y cada uno con su respectiva tasa de transmisión siendo así que para el canal US la velocidad de transmisión máxima es de 10.24 Mbps y en el descendente 42.88 Mbps. Además el canal de retorno requiere cinco anchos de canales de RF diferentes [19].

**Tabla 2. Esquemas de modulación y tasas de transmisión de DOCSIS 1.x. [19]**

| Enlace               | Modulación | Rango de frecuencias (MHz) | Ancho de banda del canal (MHz) | Tasa total de transmisión (Mbps) | Tasa nominal de transmisión (Mbps) |
|----------------------|------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Descendente          | 256-QAM    | 88-860                     | 6                              | 42.88                            | ~38                                |
|                      | 64-QAM     | 88-860                     | 6                              | 30.34                            | ~27                                |
| Ascendente (retorno) | 16-QAM     | 5-42                       | 0.2                            | 0.64                             | ~0.6                               |
|                      |            |                            | 0.4                            | 1.28                             | ~1.2                               |
|                      |            |                            | 0.8                            | 2.56                             | ~2.3                               |
|                      |            |                            | 1.6                            | 5.12                             | ~4.6                               |
|                      |            |                            | 3.2                            | 10.24                            | ~9                                 |
|                      | QPSK       | 5-42                       | 0.2                            | 0.32                             | ~0.3                               |
|                      |            |                            | 0.4                            | 0.64                             | ~0.6                               |
|                      |            |                            | 0.8                            | 1.28                             | ~1.2                               |
|                      |            |                            | 1.6                            | 2.56                             | ~2.3                               |
|                      |            |                            | 3.2                            | 5.12                             | ~4.6                               |



La compatibilidad de las versiones de DOCSIS 1.0 y 1.1 se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3. Compatibilidad entre DOCSIS 1.0 y 1.1. [19]**

| CMTS        | CM's        | Funcionamiento   |
|-------------|-------------|--|
| Versión 1.0 | Versión 1.0 | Totalmente compatibles   |
|             | Versión 1.1 | Versiones compatibles.<br>El CMTS 1.0 puede administrar CM 1.1 aunque el funcionamiento de éstos últimos está limitado a las características de la primera versión de la especificación. |
| Versión 1.1 | Versión 1.0 | Versiones incompatibles.<br>Un CMTS 1.1 no puede administrar CM que operan bajo una especificación anterior.<br>El CM 1.0 no cuenta con funcionalidades contempladas en la versión 1.1.  |
|             | Versión 1.1 | Totalmente compatibles.  |

### 3.2.4 DOCSIS 2.0

En el documento de radiofrecuencia se especifican ciertas características funcionales de la red. Especifica la separación óptico/eléctrica máxima de 100 millas entre el CMTS y el CM más alejado, aunque típicamente esta distancia puede ser máximo de 10 a 15 millas. Considerando las 100 millas y una

velocidad de propagación sobre fibra de 1.5 ns/ft se tiene un retraso de ida y vuelta de 1,6 mseg.

DOCSIS 2.0 no modifica las modulaciones en el canal de bajada sin embargo ingresa nuevos esquemas de modulación para la transmisión de datos en sentido ascendente, agrega el uso de 32-QAM, 64-QAM y 128-QAM, y trabaja a través de canales de 6.4 MHz y 3.2 MHz permitiendo ofrecer mayores tasas de transmisión en el canal de retorno, sin embargo al incluir la portadora de 6.4 MHz el SNR del canal disminuye en 3 dB que se recomienda ser compensado con el CMTS, mientras que los mayores niveles de SNR se obtienen cuando se trabaja con modulaciones de 16 QAM y 64 QAM obteniendo 24 dB y 27 dB respectivamente [21].

En la tabla 4 se puede observar las diferentes modulaciones usadas y la tasa total de transmisión dependiente el ancho de banda del canal.

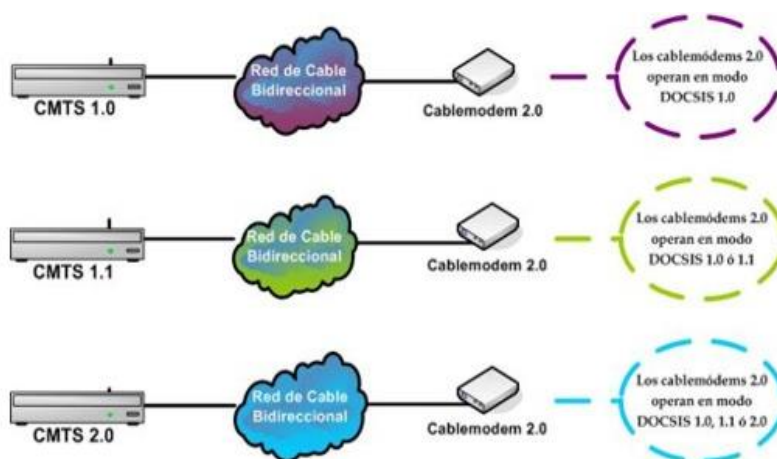
**Tabla 4. Esquemas de modulación y tasas de transmisión de DOCSIS 2.0. [19]**

| Enlace               | Modulación | Ancho de banda del canal (MHz) | Tasa total de transmisión (Mbps) |
|----------------------|------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Descendente          | 256-QAM    | 6                              | 42.88                            |
|                      | 64-QAM     | 6                              | 30.34                            |
| Ascendente (retorno) | 32-QAM     | 3.2                            | 12.80                            |
|                      | 64-QAM     | 3.2                            | 15.36                            |
|                      | 16-QAM     | 6.4                            | 20.48                            |
|                      | 32-QAM     | 6.4                            | 25.60                            |
|                      | 64-QAM     | 6.4                            | 30.72                            |
|                      | 128-QAM    | 6.4                            | 35.84                            |

DOCSIS 2.0 utiliza TDMA y S-CDMA como métodos de acceso para la optimización de las transmisiones de subida y establece un número limitado de peticiones por ancho de banda disminuyendo el número de colisiones en la transmisión.

Aparte del incremento en la capacidad del retorno, la mayor inmunidad al ruido y la mejor corrección de errores en el retorno usando la técnica TCM (Modulación por codificación Trellis) son otras ventajas importantes que tiene esta versión, además de ciertos requisitos que debe cumplir la red de cable para evitar problemas de interferencias y para mejorar el mantenimiento incorporando el monitoreo de red [21].

En DOCSIS 2.0 el CM y el CMTS deben coexistir con los otros servicios de la red de cable. En las primeras versiones de DOCSIS los cable módems tenían inconvenientes para operar eficientemente con estándares modificados debido a que los CM no poseían ciertas funcionalidades, sin embargo los CM DOCSIS 2.0 son compatibles con los CMTS de revisiones anteriores. En la figura 3.5 se puede observar la interoperabilidad antes mencionada [19].



**Figura 3.5. Compatibilidad entre DOCSIS 1.X y 2.0. [19]**

DOCSIS 2.0 cumple con ciertos requerimientos y criterios establecidos en el LTA respecto arquitectura de la red, los mismos que se explican a continuación [21]:

- Interoperabilidad.- Mantiene compatibilidad de equipos y agregación de servicios permitiendo la coexistencia simultánea de versiones sin que implique un funcionamiento incorrecto de los equipos de versiones anteriores.
- Componentes Arquitectónicos Reutilizables.- DOCSIS reutiliza la arquitectura de la red CATV.
- Servicios de Soporte.- El monitoreo y control del sistema se basa en SNMP, implementando sobre SNMP recursos para acciones reactivas, correctivas y preventivas.
- Soporte de Administración (sistemas, componentes y recursos de red).- DOCSIS centraliza la gestión en el CMTS el cual administra los recursos disponibles considerando servicios estáticos y dinámicos, aprovisionamiento de usuario, QoS, seguridad, control de tráfico, etc.
- Calidad de Servicio y Privacidad.- Esta versión continúa usando el sistema básico de seguridad BPI para proteger la privacidad del proceso de comunicación dentro de la red de cable, Para la gestión dentro del sistema utiliza OSS (operation support system) que funciona a través de la

interfaz NSI y es implementada por agentes SNMP instalados en el CM y el CMTS.

- Calidad del Servicio.- DOCSIS controla periódicamente la red para verificar que los rangos de rendimiento y potencia no bajen de los niveles adecuados, los CMTS a través de la gestión MAC de mantenimiento se encargan de la revisión de parámetros y de los respectivos ajustes en caso de ser necesario.
- Escalabilidad.- Respecto a su arquitectura DOCSIS 2.0 posee un esquema modular de dominios (CMTS), para aumentar la capacidad de la red y de los servicios se necesita un mayor número de CMTS, mayor penetración de fibra, más tarjetas RF y aumentar el espectro de RF.
- Seguridad.- Los principales requerimientos de seguridad que la arquitectura de la red debe soportar respecto a LTA son:  
(a) Autenticación y autorización de entidades en cada iteración, (b) identificación y autorización mutua, (c) monitoreo de la red respecto a intrusión para proteger la confidencialidad y disponibilidad del sistema, (d) protección íntegra y confidencial de la información almacenada.  
DOCSIS especifica autenticación, encriptación, intercambio

de claves dinámicamente que hacen referencia a los puntos a y b, sin embargo no establece especificación para los otros dos puntos.

En la tabla 5 se puede observar las 3 versiones estudiadas de DOCSIS con sus respectivos servicios y características generales.

**Tabla 5. Características generales de cada versión DOCSIS [19]**

| DOCSIS      | Servicio                            | Característica                 |
|-------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Versión 1.0 | Acceso a Internet de alta velocidad | Especificación base            |
| Versión 1.1 | Telefonía                           | Calidad de servicio            |
| Versión 2.0 | Servicios simétricos                | Mayor capacidad de transmisión |

### 3.2.5 DOCSIS 3.0

DOCSIS 3.0 es compatible con las versiones anteriores, estas usan las mismas técnicas de modulación, lo cual permite realizar pruebas de capa física y aplicar técnicas para la resolución de problemas. DOCSIS 3.0 se ha implementado con el objetivo de ofrecer una transferencia de datos de alta velocidad y tiene dos

importantes mejoras como es el Channel Bonding (unión de canales) y el soporte de 'IPv6'.

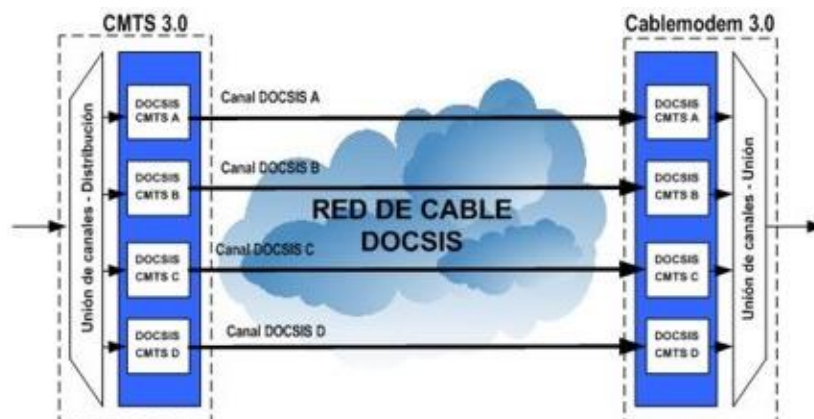
Actualmente se sigue utilizando el protocolo de internet IPv4, el cual ha sido ampliamente usado y cada vez está más al límite de agotarse, porque el número de direcciones disponibles ya no es suficiente para el crecimiento desmedido que ha venido teniendo el internet.

El protocolo de internet IPv6 trae una gama de mejoras, una de ellas es el uso de direcciones de 128 bits correspondientes a 32 dígitos hexadecimales que da como resultado  $3.4 \times 10^{38}$  direcciones IP disponibles.

En las versiones anteriores de DOCSIS para transportar datos se usaba un solo canal en ambos sentidos, pero en DOCSIS 3.0 el channel bonding permite utilizar múltiples canales simultáneamente, tanto de upstream como de downstream, logrando así transferencias de datos superiores a 120 Mbps.

En la figura 3.6 podemos ver el diagrama de la unión de canales, estos se unen de manera lógica para aumentar el canal de comunicación, no se unen físicamente. La información se distribuye en el CMTS para que viaje por distintos canales y lo que hace el cable modem es recolectar y ordenar la misma [19].





**Figura 3.6. Diagrama de la unión de cuatro canales en DOCSIS 3.0. [19]**

La importancia del channel bonding es la capacidad de transmisión elevada que nos puede brindar, cada canal RF tiene un ancho de banda de 6 MHz, y dependiendo del formato de modulación tendremos la tasa de transmisión de datos en sentido ascendente o descendente, por ejemplo, en el canal descendente usando modulación 64-QAM la tasa de transmisión es de 30.34 Mbps, considerado lo anterior si queremos una tasa de transmisión de 121.36 Mbps se tendría que unir cuatro canales, éstos canales no necesariamente tienen que ser adyacentes, pueden estar separados, permitiendo la transmisión inimaginable de datos sobre la red de cable, de esta manera el CM recibirá información de los 4 canales al mismo tiempo considerándolos como un solo canal de mayor capacidad [19].

A continuación en la tabla 6 se muestra una comparación de las versiones de DOCSIS respecto a la capacidad de canales que soporta con channel bonding.

**Tabla 6. Tabla comparativa de las versiones de DOCSIS respecto a capacidad de canales. [12]**

| VERSION | DESCENDENTE              |  |                             |  |                           |
|---------|--------------------------|--|-----------------------------|--|---------------------------|
|         | CONFIGURACION DE CANALES |  |                             |  | DOCSIS rendimiento [Mbps] |
|         | # canales min            | # canales min que el hardware debe ser capaz de soportar | Determinado num. de canales | # maximo de canales  |                           |
| 1.x     | 1                        | 1  | 1                           | 1  | 42.88                     |
| 2.0     | 1                        | 1  | 1                           | 1  | 42.88                     |
| 3.0     | 1                        | 4  | m                           | depende del ancho de banda disponible y del hardware usado | 42.88 x m                 |
| VERSION | ASCENDENTE               |  |                             |  |                           |
|         | CONFIGURACION DE CANALES |  |                             |  | DOCSIS rendimiento [Mbps] |
|         | # canales min            | # canales min que el hardware debe ser capaz de soportar | Determinado num. de canales | # maximo de canales  |                           |
| 1.x     | 1                        | 1  | 1                           | 1  | 10.24                     |
| 2.0     | 1                        | 1  | 1                           | 1  | 30.72                     |
| 3.0     | 1                        | 4  | n                           | depende del ancho de banda disponible y del hardware usado | n x 30.72                 |

### 3.2.5.1 Ventajas de DOCSIS 3.0

DOCSIS 3.0 tiene algunas ventajas sobre las anteriores versiones:

- Mayor capacidad de transmisión a través de la unión de múltiples canales de 6 MHz.
- Arquitectura de cabecera escalable y flexible con CMTS modular (M-CMTS).
- Seguridad.
- Capacidad para servicios convergentes.
- Soporte del protocolo de Internet IPv6.
- Multidifusión IP para soportar aplicaciones IPTV.

En cuanto a la capacidad DOCSIS 3.0 provee mayor densidad de información, enviando más de 18.75 bits por segundos por Hertz (bps/Hz) y eso es debido a la unión de canales [22].

En lo que corresponde a seguridad, DOCSIS 3.0 maneja un sistema estándar de cifrado avanzado AES (Advanced Encryption Standard) cuyo algoritmo nos da una mayor prevención contra los virus y hackers. Este estándar también soporta capacidades de multicasting

mejorando el desempeño de la red, especialmente para aplicaciones IPTV [19].

Otra ventaja de DOCSIS 3.0 es el costo por la reducción de gastos de ejecución, ya que la implementación se lo haría en la misma infraestructura de la red de cable; una vez que el operador se asegura que el CMTS cumple con los requerimientos se procede a sustituir en la red, permitiendo que se pueda migrar a un software sin necesidad de cambios.

La compatibilidad es otro beneficio de DOCSIS 3.0 ya que permite que cuando el operador de cable migre hacia un nuevo equipo con las especificaciones de DOCSIS no sufra ningún efecto negativo sobre el servicio [23].

### **3.2.6 DOCSIS 3.1**

DOCSIS 3.1 permitirá a una nueva generación de servicios de cable satisfacer la demanda de una mayor velocidad de acceso y eficiencia de la red sin necesidad de realizar cambios en la planta externa. Esta tecnología será 50 % más eficiente que la versión anterior y eso es debido al uso de la multiplexación por

división ortogonal de frecuencias (OFDM). Las modulaciones en DOCSIS 3.1 podrán llegar hasta 4096- QAM.

DOCSIS 3.1 proporciona un valor característico para los operadores de cable y consumidores de servicios de banda ancha incluyendo:

- Velocidad: Soporta hasta 10 Gbps de bajada y 1 Gbps de subida de la capacidad de red.
- Calidad de experiencia: Se emplea Gestión de cola de Activos para reducir el retraso de la red como el tráfico de datos que aumenta en la red doméstica, mejorando la capacidad de respuesta de las aplicaciones.
- Alta Capacidad: Habilita un aumento en la capacidad de red con la facilidad de transmitir hasta 50 % más datos sobre el mismo espectro.
- Eficiencia Energética: La eficiencia energética del cable módem aumentará debido a las mejoras de DOCSIS.
- Estrategia Flexible de Migración: Los módems DOCSIS 3.1 están fabricados para coexistir con anteriores versiones.
- Corrección de Errores: Para la corrección de errores se reemplaza el algoritmo Reed-Solomon para dar paso al algoritmo avanzado LDPC que significa baja densidad de control de paridad que permite que bajo las mismas

condiciones 4096-QAM funcione igual que 256-QAM. Su eficiencia es muy cercana a los límites establecidos en Shannon.

CableLabs ha desarrollado la base tecnológica para la prestación de servicios de banda ancha de próxima generación a través de las redes HFC [24].

### **3.3 DOCSIS con funcionalidades extras.**

Las versiones de DOCSIS anteriormente mencionadas, se crearon para cable módems individuales cuya función es habilitar el servicio de banda ancha a través de la infraestructura de la red de cable. Con el pasar de los años han aparecido nuevos dispositivos que incorpora funciones extras al cable módem convencional, como telefonía IP, redes caseras entre otras y que han visto la necesidad de agregar requerimientos adicionales a los modelos de interfaces.

CableLabs creó la especificación eDOCSIS (DOCSIS embebido) cuya función es la definición de las características adicionales que deben añadirse a un cable módem DOCSIS para ofrecer otro tipos de aplicaciones.

Otra de sus creaciones es DOCSIS Set-to Gateway (DSG) este define la interfaz y protocolos asociados para incluir requerimientos adicionales en el CMTS Y cable módem DOCSIS, que permite

soportar la configuración y el transporte de una clase de servicio conocido como "mensajería fuera de banda (Out-Of-Band (OOB) messaging)".

En la actualidad estas y otras opciones más están disponibles para migrar de la red de cable convencional a una red de transmisión de datos de alta velocidad [19].

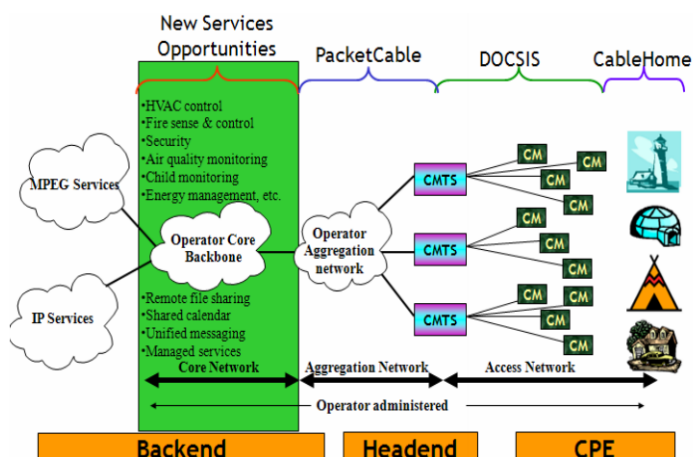
### **3.4 Vulnerabilidades de DOCSIS**

Las fallas de seguridad que se pueden presentar en una red HFC dependen de algunos factores, incluyendo el estándar DOCSIS, los CM's y los CMTS utilizados.

DOCSIS detalla el proceso de aprovisionamiento\* del cable modem en la red de cable, así como las opciones de seguridad y el uso de aplicaciones del CMTS y de los CM's.

Los CM's utilizados no debe permitir ser modificado a conveniencia del usuario, uno de los problemas debido a la infraestructura de la red HFC es la clonación de CM's. Debido al uso de un CMTS por cada nodo es posible dicha clonación, un CM conectado a un nodo y registrado en un CMTS puede usar su misma información (dirección MAC e identificación de equipo) para conectarse al mismo tiempo a otro nodo y a su vez registrarse en otro CMTS permitiendo el acceso a Internet a un usuario no autorizado. En la figura 3.7 se puede observar

el esquema de división de secciones que permite la clonación antes mencionada [16].



**Figura 3.7. División de secciones-un CMTS por nodo. [16]**

Una falla de la versión 1.0 es permitir que las velocidades de transmisión asignadas a cada usuario se puedan modificar, éste proceso se conoce como uncap. El objetivo del uncap o uncapping es descargar un archivo de configuración vía TFTP que contenga la información (MAC) de un dispositivo con mayores velocidades de transferencia. Ésta vulnerabilidad no se encuentra en las otras versiones debido a que está negada la descarga de éste tipo de archivos del servidor TFTP, en estas versiones los archivos de configuración poseen una clave de encriptación establecida por el ISP y además tiene una verificación MD5 que en caso de editar la configuración del modem el registro a la red es rechazado al no ser compatible el MD5 [16].



## **CAPÍTULO 4**

### **4. CAPACIDAD DEL CANAL**

La capacidad del canal es la velocidad máxima a la que se pueden transmitir los datos en un canal de comunicación de forma fiable y así establecer la cantidad de información transmitida.

Antes de iniciar el estudio es necesario tener claro los siguientes conceptos:

1. Velocidad de Transmisión: Medida en bps (bits por segundo) especifica el número de bits que se transfieren entre dos dispositivos en una unidad de tiempo.
2. Ancho de Banda: Especifica el rango de frecuencias en el que se va a transmitir la información. Su unidad de medida es el Hz.

3. Ruido: Son señales no deseadas que causan interferencias en la transmisión.
4. Tasa de Error: Es la relación de bits erróneos recibidos respecto al total de bits transmitidos.
5. SNR: Es la relación Señal - Ruido y mide la intensidad de la señal respecto al ruido que exista en el sistema, es decir establece la medida en que la señal supera al ruido.

Las limitaciones que surgen en un canal se dan principalmente por las características físicas del canal o del transmisor que se usa, provocando limitaciones en el ancho de banda y en la transmisión, así como problemas en la velocidad e interferencias.

Para obtener un uso eficiente del espectro se usan diferentes técnicas de modulación para poder transmitir mayores velocidades, sin embargo la velocidad de transmisión sobre un ancho de banda determinado está limitada por el ruido ya que no se puede aumentar la velocidad de transmisión sin sobrepasar la tasa de error aconsejable [25].

#### **4.1 Teorema de Shannon**

Se conoce que la capacidad del canal está relacionada con la velocidad de transmisión, el Teorema de Shannon especifica:

1. Si la velocidad de transmisión sobre un ancho de banda finito es menor que la capacidad del canal, entonces se puede tener un sistema de comunicación con una muy baja tasa de error.
2. Se establece un límite en la transmisión, permitiendo velocidades muy cercanas a la capacidad del canal, por otro lado cuando se supera la capacidad, la información transmitida deja de ser útil.

En 1949 Shannon usando los estudios previos realizados por Hartley establece una ecuación para el cálculo de la capacidad del canal, en la que se plantea dos consideraciones:

- Permite calcular la máxima velocidad de transmisión de datos en un canal con ruido gaussiano.
- Permite relacionar el ancho de banda y el SNR, cuya meta es transmitir la máxima relación S/R en el menor ancho de banda posible [25].

A ésta ecuación se la conoce como “Ecuación de Hartley-Shannon” la misma que establece que la máxima capacidad de un canal real está en función del SNR.

$$C = B \log_2(1 + S/N) \quad (4.1)$$

O también puede ser expresada en logaritmo de base 10.

$$C = 3.32 B \log (1 + S/N) \quad (4.2)$$

Donde:

C: Capacidad del canal medido en bps.

B: Ancho de banda del canal

S: Potencia de la Señal

N: Potencia del Ruido

Para transformar el SNR en decibelios se usa la fórmula 4.3:

$$SNR_{dB} = 10\log(SNR) \quad (4.3)$$

Usando el SNR en dB se obtiene la aproximación 4.4:

$$C = \frac{1}{3} B (SNR)_{dB} \quad (4.4)$$

La capacidad del canal va a disminuir cuando la potencia del ruido sea elevada, la ecuación de Hartley-Shannon ha sido implementada para un canal gaussiano debido a que en los sistemas de comunicación la mayoría de los canales prácticos se pueden modelar como un canal gaussiano.

El límite que se establece en la capacidad de un canal gaussiano es mayor que el límite de un canal no gaussiano, sin embargo Shannon demostró que la potencia del ruido gaussiano en un ancho de banda establecido es más alta que la potencia de todos los ruidos posibles, convirtiéndose en el peor ruido de todos y estableciendo que el límite

de la máxima capacidad del canal será el valor máximo para obtener una transmisión fiable [26].

#### 4.1.1 Velocidad de transmisión.

Para poder realizar un análisis de eficiencia y modulación usando el teorema de la máxima capacidad de Shannon es necesario recordar las diferentes modulaciones que usa el estándar DOCSIS de la red HFC, así como la relación señal ruido de cada modulación.

El análisis se realizará con la multiplexación S-CDMA y A-TDMA. En las tablas 7 y 8 se puede observar que el SNR de SCDMA es menor en 3dB respecto a A-TDMA, sin embargo la multiplexación S-CDMA, posee menor latencia e incluso es más robusta frente al ruido impulsivo para frecuencias menores a 20 MHz.

**Tabla 7. SNR para cada modulación, usando SCDMA. [27]**

| SNR (dB) | Modulación |
|----------|------------|
| 12       | QPSK       |
| 15       | 8QAM       |
| 18       | 16QAM      |
| 21       | 32QAM      |
| 24       | 64QAM      |
| 27       | 128QAM     |
| 30       | 256QAM     |

**Tabla 8. SNR para cada modulación, usando A-TDMA. [27]**

| SNR (dB) | Modulación |
|----------|------------|
| 15       | QPSK       |
| 18       | 8QAM       |
| 21       | 16QAM      |
| 24       | 32QAM      |
| 27       | 64QAM      |
| 33       | 256QAM     |

En la tabla 9 se observa las velocidades de transmisión establecidas en DOCSIS 2.0.

**Tabla 9. Velocidades de transmisión establecidas en DOCSIS 2.0 [19]**

| Enlace               | Modulación | Ancho de banda del canal (MHz) | Tasa total de transmisión (Mbps) |
|----------------------|------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Descendente          | 256-QAM    | 6                              | 42.88                            |
|                      | 64-QAM     | 6                              | 30.34                            |
| Ascendente (retorno) | 32-QAM     | 3.2                            | 12.80                            |
|                      | 64-QAM     | 3.2                            | 15.36                            |
|                      | 16-QAM     | 6.4                            | 20.48                            |
|                      | 32-QAM     | 6.4                            | 25.60                            |
|                      | 64-QAM     | 6.4                            | 30.72                            |
|                      | 128-QAM    | 6.4                            | 35.84                            |

#### 4.1.2 Rendimiento y eficiencia de modulación.

Para optimizar el rendimiento del canal cuyo ancho de banda es limitado por normas o por características fijas es necesario tener un buen esquema de codificación que permita tener una transmisión con una tasa de error mínima y con el menor costo posible.

Para calcular el porcentaje del rendimiento del canal se usa la fórmula 4.5:

$$\eta = \frac{v}{C} * 100\% \quad (4.5)$$

Donde:

v: tasa de transmisión en el canal (bps)

C: Capacidad máxima del canal

El rendimiento máximo de un canal respecto al ancho de banda ( $\eta_B$ ) se calcula dividiendo la máxima capacidad del canal de Shannon para el ancho de banda [25].

$$\eta_B = \frac{C}{B} = \log_2(1 + SNR) \quad [bps/Hz] \quad (4.6)$$

Por otro lado para obtener una modulación más eficiente se trabaja con modulaciones de mayor orden, pero hay que considerar que aunque las modulaciones de mayor orden son

más eficientes son a la vez más susceptibles a interferencias o ruido por lo que necesitan mejorar su robustez e implementar técnicas de corrección de errores y diferentes métodos de multiplexación.

En este subcapítulo se realiza un análisis respecto al rendimiento y eficiencia de modulación respecto a la capacidad del canal de Shannon. Se considera información de las versiones de DOCSIS 2.0, y 3.0 debido a que son las versiones implementadas en el país.

En las tablas 10 y 11 se observan las máximas capacidades del canal con la versión DOCSIS 2.0, con A-TDMA y SCDMA, respectivamente.



**Tabla 10. Capacidad del canal de DOCSIS 2.0, con A-TDMA**

| Enlace      | Modulación | Ancho de banda del canal (MHz) | Máxima capacidad de canal (Mbps) | Tasa total de transmisión (Mbps) | Rendimiento del canal |
|-------------|------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Descendente | 256-QAM    | 6                              | 65.77                            | 42.88                            | 65.19%                |
|             | 64-QAM     | 6                              | 53.83                            | 30.34                            | 56.36%                |
| Ascendente  | 32-QAM     | 3.2                            | 25.53                            | 12.80                            | 50.13%                |
|             | 64.QAM     | 3.2                            | 28.71                            | 15.36                            | 53.5%                 |
|             | 16-QAM     | 6.4                            | 44.71                            | 20.48                            | 45.8%                 |
|             | 32-QAM     | 6.4                            | 51.06                            | 25.60                            | 50.1%                 |
|             | 64.QAM     | 6.4                            | 57.42                            | 30.72                            | 53.5%                 |

Fuente: Elaborado por los autores

**Tabla 11. Capacidad del canal de DOCSIS 2.0, con SCDMA**

| Enlace      | Modulación | Ancho de banda del canal (MHz) | Máxima capacidad de canal (Mbps) | Tasa total de transmisión (Mbps) | Rendimiento del canal |
|-------------|------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Descendente | 256-QAM    | 6                              | 59.80                            | 42.88                            | 71.7%                 |
|             | 64-QAM     | 6                              | 47.87                            | 30.34                            | 63.3%                 |
| Ascendente  | 32-QAM     | 3.2                            | 22.35                            | 12.80                            | 57.2%                 |
|             | 64.QAM     | 3.2                            | 25.53                            | 15.36                            | 60.2%                 |
|             | 16-QAM     | 6.4                            | 38.41                            | 20.48                            | 53.3%                 |
|             | 32-QAM     | 6.4                            | 44.71                            | 25.60                            | 57.25%                |
|             | 64.QAM     | 6.4                            | 51.06                            | 30.72                            | 60.7%                 |
|             | 128-QAM    | 6.4                            | 57.42                            | 35.84                            | 62.4%                 |

Fuente: Elaborado por los autores

Las tablas 12 y 13 nos muestran las variaciones en la capacidad del canal y en el rendimiento, con A-TDMA y

SCDMA, respectivamente, usando la versión 3.0 de DOCSIS. Para el channel bonding se usa 4 canales debido a que es la unión más común establecida.

**Tabla 12. Capacidad del canal de DOCSIS 3.0 para 4 canales unidos, con A-TDMA.**

| Enlace      | Modulación | Ancho de banda del canal (MHz) | Ancho de banda total (MHz) | Máxima capacidad de canal (Mbps) | Tasa total de transmisión (Mbps) | Rendimiento del canal |
|-------------|------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Descendente | 256-QAM    | 6                              | 24                         | 263.11                           | 171.52                           | 65.18%                |
|             | 64-QAM     | 6                              | 24                         | 215.32                           | 121.36                           | 56.36%                |
| Ascendente  | 16-QAM     | 6.4                            | 25.6                       | 178.87                           | 81,92                            | 45.8%                 |
|             | 32-QAM     | 6.4                            | 25.6                       | 204.24                           | 102.4                            | 50.1%                 |
|             | 64.QAM     | 6.4                            | 25.6                       | 229.68                           | 122.88                           | 53.5%                 |

Fuente: Elaborado por los autores

**Tabla 13. Capacidad del canal de DOCSIS 3.0 para 4 canales unidos, con SCDMA.**

| Enlace      | Modulación | Ancho de banda del canal (MHz) | Ancho de banda total (MHz) | Máxima capacidad de canal (Mbps) | Tasa total de transmisión (Mbps) | Rendimiento del canal |
|-------------|------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Descendente | 256-QAM    | 6                              | 24                         | 239.21                           | 171.52                           | 71.70%                |
|             | 64-QAM     | 6                              | 24                         | 191.48                           | 121.36                           | 63.37%                |
| Ascendente  | 16-QAM     | 6.4                            | 25.6                       | 153.65                           | 81,92                            | 53.3%                 |
|             | 32-QAM     | 6.4                            | 25.6                       | 178.87                           | 102.4                            | 57.25%                |
|             | 64.QAM     | 6.4                            | 25.6                       | 204.24                           | 122.88                           | 60.1 %                |
|             | 128-QAM    | 6.4                            | 25.6                       | 229.68                           | 143.36                           | 62.4%                 |

Fuente: Elaborado por los autores

Se puede ver en las tablas que todas las velocidades de transmisión analizadas se encuentran dentro de la capacidad máxima del canal, sin embargo presentamos las siguientes observaciones:

- Tanto en el canal ascendente y descendente cuando se trabaja con modulaciones mayores la capacidad del canal aumenta, lo mismo sucede con el rendimiento del canal.
- En el canal ascendente como se usan dos anchos de banda (3.2 y 6.4 MHz), se confirma que al usar un ancho de banda doble la capacidad del canal se duplica.
- Tanto con SCDMA como en T-DMA el rendimiento en la transmisión de datos no varía, ya que van a transmitir las mismas velocidades a través del canal.
- Debido a la disminución del SNR en SCDMA se puede observar que la capacidad del canal es menor respecto a A-TDMA lo que provoca que el rendimiento del canal se vea afectado ya que se van a transmitir las mismas velocidades, obteniendo un rendimiento del canal mayor para SCDMA.
- Respecto al rendimiento se puede observar que el mayor rendimiento del canal llega al 71.7%, existiendo la posibilidad de aumentar aún más la velocidad en la transmisión antes de llegar al límite permitido, siendo las

modulaciones que usan más eficientemente el espectro 64, 128 y 256 QAM.

- Si comparamos el rendimiento del canal en DOCSIS 2.0 respecto a DOCSIS 3.0 con unión de 4 canales se puede observar que el rendimiento del canal es el mismo sin embargo la capacidad del canal aumentó considerablemente al poder transmitir velocidades de hasta 171 Mbps.

#### **4.2 Cable Módem**

El Cable Modem CM es un dispositivo final de la red HFC, permite el acceso a la red de datos sobre la infraestructura de televisión por cable y está conectado a la red de cable coaxial mediante un conector tipo F. Dentro de las funciones del CM tenemos:

- Captar o generar señales de radiofrecuencia.
- Modula o demodula los datos.
- Genera / verifica la información de control de errores (FEC).
- Encripta y desencripta la información.
- Usa y respeta el protocolo MAC en el canal ascendente.
- Realiza gestión y control de tráfico.

Su función principal es transmitir paquetes IP de una forma transparente entre la cabecera y el suscriptor, y tiene habilitado la actualización de su software desde la cabecera de la red.

Dependiendo del rango de frecuencias establecido, los cable módems están configurados para realizar una función específica. De ésta forma para frecuencias de 50 a 850 MHz el CM recibe y demodula, y en un rango de frecuencias de 5 a 42 MHz el CM envía y modula, es por esta razón que los usuarios no pueden demodular los datos del canal ascendente debido a que su circuito demodulador está configurado solo para el rango de frecuencias del canal descendente, ésto quiere decir que un usuario no puede demodular los datos enviados por otro usuario, la comunicación entre ellos se establece estrictamente por medio del CMTS y es el único autorizado para demodular los datos de abonado enviados por el CM [18].

#### **4.2.1 Inicialización de operación del cable módem (CM).**

El aprovisionamiento de los cable módems en la red HFC es el núcleo del sistema de servicio de internet, ya que éste involucra que el CM obtenga su dirección IP y su el archivo de configuración, de tal manera la operadora sabe que el CM existe y conoce la información contratada del usuario.

Para entender cómo se realiza el proceso de inicialización del cable módem es necesario conocer los siguientes conceptos.

- **Proceso POST:** Power On Self Test, Proceso de Auto-verificación de encendido.

- **Canal Activo DOCSIS:** Es un canal funcional que ya tiene establecido las modulaciones, presencia de tramas MPEG2-TS y tiene habilitado la recepción periódica de mensajes UDC y MAP.
- **Mensaje SYNC:** Tiempo de sincronización, establece una referencia de tiempo a todos los módems, es un contador de 32 bits que establece tiempos para el funcionamiento correcto de la capa MAC (evitar colisiones).
- **Mensajes UCD:** (Descriptor del Canal Upstream), en este mensaje se especifica la modulación y la frecuencia de transmisión.
- **Mensaje MAP o Mapa:** Significa -Mapa de asignación de ancho de banda- y especifica en qué momento se puede transmitir y el intervalo de tiempo de dicha transmisión.
- **Escalamiento:** Es cuando el CM empieza a operar con un estándar básico.

Luego de ejecutar el proceso POST, existe una interacción entre el CM y CMTS para establecer el canal de bajada y el de retorno, niveles de potencia, frecuencias y otros parámetros de transmisión que permitan el funcionamiento apropiado de la capa MAC. Al terminar el proceso de escalamiento el CMTS

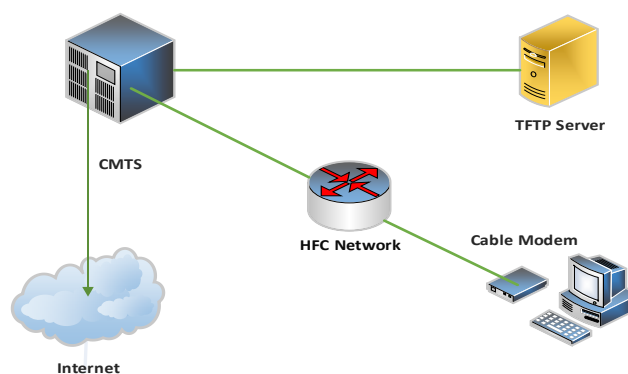
inicia la fase relacionada con la capa IP donde se asigna una dirección IP y se descargan los archivos de configuración.

El proceso de inicialización es explicado a continuación:

1. Se completa el proceso POST y la frecuencia de bajada va a buscar un canal activo de DOCSIS.
2. Para realizar una solicitud inicial para escalamiento el CM examina y selecciona un mensaje UCD apropiado. De igual manera examina los mensajes MAP y después de un intervalo envía un mensaje de "solicitud de escalamiento".
3. Cuando el mensaje del CM sea recibido por el CMTS, éste enviará un mensaje de respuesta de escalamiento, caso contrario el CM envía nuevamente el mensaje de solicitud hasta recibir una respuesta de aceptación.
4. El CM solicita al servidor DHCP (usado por el operador) una dirección IP y el nombre del archivo que contiene su configuración así como el servidor TFTP donde se encuentra dicho archivo.
5. El CM fija la hora del día y descarga desde el servidor TFTP su archivo de configuración( también conocido como paquete DHCP), lo procesa y envía una "solicitud de registro" al CMTS el mismo que responde con una "respuesta de registro".

6. El CM responde con un “reconocimiento al registro” luego de procesar la “respuesta al registro”.
7. Solo si el archivo de configuración tiene establecido parámetros de privacidad básica se establece el intercambio de información de manera segura (especificación SP-BPI+I09-020830) y el CM está habilitado en la red y puede comenzar a enviar datos de usuario.

En la figura 4.1 se puede observar la interacción entre el CM, el servidor TFTP, el CMTS y el acceso a internet.



Fuente: Elaborado por los autores

**Figura 4.1. Interacción entre el CM, servidor TFTP, el CMTS, y el acceso a Internet.**

Mientras exista actividad en el CM va a mantener su dirección IP sin embargo cuando existe un tiempo de inactividad el servidor DHCP remueve la IP y ésta puede ser usada en cualquier equipo, éste proceso dinámico es útil para la optimización del uso de direcciones IP [28].



#### 4.2.2 Limitaciones de un cable-módem

Existen ciertas características de operación que los CM no pueden configurar por razones de seguridad. Para el operador no es factible tener un cable modem que realicen su configuración por sí solo, ya que lo vuelve demasiado propenso a ataques.

Dentro de las limitaciones impuestas al cable modem tenemos:

- El ISP limita su potencia de transmisión para evitar interferencias con los CM de otros usuarios.
- Limita sus velocidades de transmisión a través del archivo de configuración.(CAP)
- No puede acceder a las páginas de diagnóstico del CM
- No puede acceder al monitor de SNMP (SNMP daemon)
- Tiene restringido la actualización de firmware.
- No puede usar cualquier puerto de la red.
- Limita el número dispositivos de usuarios (CPE) que tienen acceso a la red.
- El único autorizado para asignar las direcciones IP es el CMTS
- El CM no puede acceder a Internet desde la red del ISP

El estándar DOCSIS certifica que los cable-módems cumplan con las especificaciones y a la vez impone la mayoría de las limitaciones en el funcionamiento y en la configuración del CM.

El usuario no puede alterar la configuración del CM convirtiéndolo en más seguro.

El firmware del CM solo puede ser actualizado por el operador a través de la interfaz coaxial.

Todos los CM DOCSIS hacen uso del protocolo SNMP mediante el cual el ISP controla el equipo del abonado. Estas restricciones se aplican una vez que el módem está registrado con el CMTS.

A la vez el servidor SNMP puede restringir el uso de puertos TCP/UDP, monitorear y reportar el uso del ancho de banda así como deshabilitar en el modem el monitoreo HTTP interno que generalmente es utilizado para procesos de diagnóstico [28].

#### **4.2.2.1 Limitación de velocidad.**

La limitación de velocidad o también llamado cap es el límite que el ISP establece en la velocidad de transferencia del CM y que va a definir la velocidad asignada a cada usuario para conectarse a Internet.

Cuando el CM se registra al CMTS, éste le asigna un perfil de usuario al modem. Los estándares desde DOCSIS 1.1 en adelante usan éste perfil de usuario para establecer el cap.

Cabe recalcar que éste perfil de usuario se lo obtiene sólo después que el CM se registra al CMTS , a diferencia de DOCSIS 1.0 que envía el archivo de configuración antes de que el cable modem se registre con el CMTS.

En caso de que la limitación de la velocidad se altere y comience a incrementarse respecto al valor asignado en el archivo de configuración, el CMTS podría rechazar ciertos paquetes debido a que no respeta el ancho de banda asignado por el CMTS [16].

#### **4.3.2 Rendimiento de Cable Módems**

El rendimiento del cable modem va a depender tanto del equipo utilizado como del CMTS. El CMTS establece la capacidad operativa del cable módem, ya que él va a determinar las velocidades máximas de transferencia establecida para cada CM tanto en el canal ascendente como en el descendente.

El cable módem que generalmente usan ciertas operadoras de Ecuador es el ARRIS CM550A por lo que presentamos algunas especificaciones del equipo:

Estándar: DOCSIS 2.0

En el canal descendente tenemos:

- Rango de frecuencia (MHz): 88-860
- Modulación :(QAM) 64 o 256
- Velocidad de transmisión :(Mbps) 30.34 o 42.88
- Bandwidth: 6 MHz

En el canal ascendente:

- Rango de frecuencia (MHz): 5-42
- Modulación: QPSK, 8, 16, 32, 64 y 128 QAM (solo S-CDMA)
- Velocidad de transmisión: (Mbps) Max. sobre 30.72

Como se puede observar en las características del cable modem la máxima modulación con la que puede operar el cable módem es 256 QAM obteniendo una transferencia de datos de 42.88 Mbps en un canal de 6MHz [18].

#### **4.4 Metodología de agregación de canales**

La unión de canales o channel bonding agregado en DOCSIS 3.0 ha mejorando el rendimiento en la transmisión de datos de la red HFC y ha permitido a los operadores competir con otras redes de acceso que manejan altas velocidades.

La unión de canales "agrupa" canales de RF múltiples en un solo canal virtual ofreciendo más ancho de banda a un cable módem DOCSIS 3.0.

El CMTS transmite los paquetes con su respectivo número de secuencia a través de múltiples canales hacia el CM, quién se encarga de ensamblar los paquetes en el orden correcto antes de pasarlo al abonado. De igual manera ocurre en el sentido ascendente donde el CM concatena continuamente y fragmenta un flujo de paquetes para enviarlos por los canales asignados por el CMTS.

El grupo de canales sobre los que se organiza la información es llamado bonding group (grupo de unión) y el flujo de servicio asignado a un bonding group es llamado flujo de servicio unido. Hay que tener presente que los canales pueden ser compartidos por diferentes bonding groups [29].

Generalmente el incremento en el ancho de banda significa costosas actualizaciones de infraestructura sin embargo con el uso del channel

bonding en DOCSIS 3.0 ha cambiado este problema. Un solo cable módem puede acceder a múltiples canales que pueden ser tratados ya sea de forma individual o como un bonding group.

En la tabla 14 se puede ver el gran incremento de las velocidades gracias al channel bonding; el número de canales está limitado a las restricciones del hardware y a la cantidad de ancho de banda disponible en cada dirección. Para el caso de la tabla los valores mostrados son específicos de las modulaciones de mayor orden para cada dirección, usando en DS 256 QAM una tasa de transmisión de 42.88 Mbps por canal y en US una velocidad de 30.72 Mbps para 64 QAM.

**Tabla 14. Configuración de Canales. [12]**

| CONFIGURACION DE CANALES |              | Tasa de transmision DS [Mbps] | Tasa de transmision US [Mbps] |
|--------------------------|--------------|-------------------------------|-------------------------------|
| # canales DS             | # canales US |                               |                               |
| 4                        | 4            | 171,52                        | 122,88                        |
| 8                        | 4            | 343,04                        | 122,88                        |

#### 4.4.1 Saturación de canales.

El objetivo de la transmisión es enviar tantos paquetes como sea posible en el ancho de banda establecido, sin embargo existen situaciones de saturación del canal en donde la demanda

requerida supera la capacidad del canal; en algunas ocasiones los arreglos del bonding group pueden dejar en los canales anchos de banda no utilizados y otros sobrecargados. Por lo que, el algoritmo de reasignación se basa en cambiar los canales saturados por canales que tengan espacio para transmitir. Cuando existe un ancho de banda no utilizado en un canal o en bonding group y existe flujos de datos con demanda insatisfecha, una solución para satisfacer la demanda requerida es cambiar el mapa de canales.

Aquí se consideran dos cosas: la cantidad de demanda insatisfecha y la cantidad de ancho de banda que no se está usando en ciertos canales. Sin embargo una interrogante es saber cuánto tiempo hay que esperar para hacer este cambio considerando que el flujo en el canal no muy utilizado puede cambiar y aumentar su demanda.

Otra consideración es que al cambiar de un canal a otro se genera una pérdida del rendimiento, entonces sólo si la pérdida en el rendimiento por no usar un canal supera a la pérdida en el rendimiento por cambiarse de canal, entonces es válido realizar el cambio.

Otra manera de evitar la saturación es por la asignación de minislots a estaciones específicas por lo que permite aprovechar eficientemente el canal de retorno en condiciones de saturación, porque las colisiones solo ocurren en los minislots de contención o mantenimiento [30].



## **CAPÍTULO 5**

### **5. RUIDO EN LAS REDES HFC**

Generalmente se conoce como ruido a todas las señales que perturban la transmisión en los sistemas de comunicaciones, que disminuyen el rendimiento de los sistemas y sobre las cuales no se tiene un control completo.

Para medir el comportamiento frente al ruido se usan dos parámetros, la relación señal ruido en los sistemas analógicos y la tasa de error en caso de los sistemas digitales.

Una de las principales características del ruido es que varía en forma aleatoria respecto al tiempo y se produce por diferentes causas, ya sean internas o externas al sistema de comunicación, es por esto que aun protegiendo el sistema de ruido externo existe un ruido propio del sistema conocido como ruido térmico [25].

## **5.1 Tipos de Ruido**

Los principales ruidos e interferencias que se puede encontrar dentro de una red HFC (DOCSIS) son los siguientes:

- Ruido de Ingreso
- Modulación de amplitud HUM
- Ingreso de armónicos
- Ruido térmico
- Ruido impulsivo
- Distorsión común de la trayectoria.

### **5.1.1 Ruido de Ingreso**

El ruido de ingreso es causado por la interferencia electromagnética en las redes de cable. La potencia disminuye cuando aumenta la frecuencia. Este tipo de ruido se presenta frecuentemente, variando lentamente su intensidad en función del tiempo, afectando mayormente a la banda de frecuencia de la transmisión ascendente. El ruido de ingreso se produce cuando el blindaje es inadecuado y por conectores en mal estado.

### **5.1.2 Modulación de amplitud HUM**

La modulación de amplitud HUM se produce por el acoplamiento de corriente alterna en la envolvente de la señal. Este

acoplamiento se produce a través de las fuentes de alimentación de los equipos y perjudica principalmente a la modulación QAM la cual debe eliminar este ruido, sin embargo los sistemas con modulación QPSK básicamente no son afectados [31].

### **5.1.3 Ingreso de armónicos**

Se denomina ingreso de armónicos a los múltiplos no deseados de la onda seno de frecuencia simple, esto ocurre cuando la señal de salida no es igual a la señal que ingreso.

La distorsión armónica es provocada por las cargas no lineales en el sistema eléctrico, afectando a la red e incluso a otros usuarios que solamente poseen cargas lineales [31].

### **5.1.4 Ruido térmico**

El ruido térmico conocido también como ruido blanco, se produce por las agitaciones o vibraciones de los electrones en un medio de conducción. Al aumentar la temperatura se incrementa un mayor movimiento de los electrones, lo cual produce un flujo de corriente. Este tipo de ruido comúnmente lo encontramos en las líneas de transmisión.

La potencia de ruido generado por una fuente de ruido térmico es proporcional al producto de ancho de banda por la temperatura, matemáticamente se lo representa así [32]:

$$N = kTB \quad (5.1)$$

Donde:

N= Potencia de ruido [Watts]

k=Constante de Boltzman,  $1.38 \times 10^{-23}$  watt/°K-Hz.

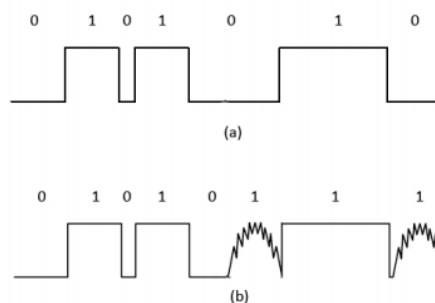
T= Temperatura absoluta, en K ( $^{\circ}\text{C}+273$ )

B=Ancho de banda de la potencia de ruido [Hz]

### 5.1.5 Ruido impulsivo

Es aquel ruido que se genera a causas de perturbaciones electromagnéticas producidas por descargas en el suministro eléctrico, por fallos en las comunicaciones, cambios de tensión en líneas adyacentes, falsos contactos, arcos eléctricos, etc., básicamente incide en la transmisión de datos. Este tipo de ruido no es continuo ya que se forma por irregulares picos de tensión en un corto tiempo de duración. El ruido impulsivo afecta mayormente al canal ascendente que al canal descendente.

En la figura 5.1 podemos observar un error de ráfaga de la señal producido por el ruido, el cual puede cambiar a un conjunto de bits, pero eso depende de la tasa de datos y la duración del ruido [31].



**Figura 5.1. Error de ráfaga por ruido impulsivo. [31]**

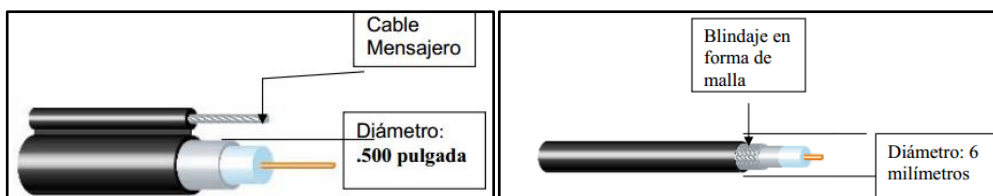
### 5.1.6 Distorsión común de la trayectoria (CPD)

La distorsión común de la trayectoria se presenta como una serie de pulsaciones en el espectro de retorno, situados en canales de 6 MHz. El problema frecuentemente se encuentra en las conexiones mecánicas en los elementos pasivos de las señales de subida y bajada. La CPD es causada por una deficiencia en el punto de conexión de la red que resulta en una oxidación con el tiempo en la interfaz de contacto. La distorsión común de la trayectoria puede disminuir en gran medida el rendimiento y la fiabilidad de la red [31].

## 5.2 Parámetros sobre la red HFC

La red HFC debe cumplir con ciertos parámetros para garantizar los valores de SNR necesitado en cada modulación y para poder transmitir la información con la mínima tasa de error posible.

En la red coaxial de HFC se usa cable RG-6, RG-500, RG-750. El cable RG-750 es usado desde el nodo óptico hasta el amplificador, RG-500 tiene 100% de blindaje y es usado en las líneas principales y de distribución externa y tiene menor pérdida que el RG-6 que es usado para acometidas y distribuciones en la red de abonados, éste cable tiene 95% de blindaje [15].



**Figura 5.2. Cable coaxial RG-500 Y RG-6. [15]**

Para garantizar una SNR que permita tener una transmisión dentro de la capacidad del canal es necesario que el usuario en el cable módem tenga una potencia en el rango de [ -15 , +15 ] dBm.

$$Potencia_{CM} = [ -15 , +15 ] \text{ dBm} \quad (5.2)$$

Una de las consideraciones en el tendido de cable de la acometida es no exceder una distancia de 50 metros desde la casa del usuario hasta el tap de distribución. La tabla 15 nos especifica las pérdidas que existe en el cable coaxial a una distancia de 100m.

**Tabla 15. Pérdidas en dB en el cable coaxial para 100m. [15]**

| ATENUACION [dB] para 100 m. |            |            |             |
|-----------------------------|------------|------------|-------------|
| Frecuencia MHz              | RG 750     | RG 500     | RG 6        |
| 5                           | 0.4        | 0.5        | 1.9         |
| 55                          | 1.2        | 1.8        | 5           |
| 211                         | 2.4        | 3.6        | 9.3         |
| 250                         | 2.7        | 3.9        | 9.9         |
| 300                         | 2.9        | 4.3        | 11.2        |
| 350                         | 3.2        | 4.7        | 12.1        |
| 400                         | 3.4        | 5          | 13.2        |
| 450                         | 3.7        | 5.3        | 13.9        |
| 500                         | 3.9        | 5.7        | 14.7        |
| 550                         | 4.1        | 6          | 15.5        |
| 600                         | 4.3        | 6.3        | 16.3        |
| 750                         | <b>4.9</b> | <b>7.1</b> | <b>18.3</b> |

Es importante especificar que los análisis se han realizado considerando el peor caso de atenuación.

En nuestro caso la atenuación en el cable RG-6 para una distancia de 50 m es 9.15 dB.

$$Atenuación_{RG-6(50m)} = 9.15 \text{ dB} \quad (5.3)$$

Entonces la potencia que debe existir en el tap de distribución está dada por la fórmula 5.4:

$$Potencia_{TAP} = Atenuación_{RG-6(50m)} + Potencia_{CM} \quad (5.4)$$

Obteniendo el siguiente resultado:

$$Potencia_{TAP} = [-5.85, +24.15] \text{ dBm} \quad (5.5)$$

La distancia que existe entre el tap y el amplificador es de 200 metros y se usa cable coaxial RG-500 el mismo que presenta una atenuación en 200 metros de 14.2 dB.

$$Atenuación_{RG-500(20m)} = 14.2 \text{ dB}. \quad (5.6)$$

Para que el usuario reciba una potencia adecuada el amplificador debe tener una potencia dada por la fórmula 5.7:

$$Potencia_{AMPLIFICADOR} = Atenuación_{RG-500(200m)} + Potencia_{TAP} \quad (5.7)$$

En donde la potencia del amplificador que garantiza el SNR está en el rango:

$$Potencia_{AMPLIFICADOR} = [+8.35, +38.35] \text{ dBm} \quad (5.8)$$

Del amplificador al nodo óptico se usa el cable RG-750 y las distancias aproximadas del tendido del cable son entre 200 y 300 metros.

$$Atenuación_{RG-750(300m)} = 14.7 \text{ dB} \quad (5.9)$$

$$Potencia_{NODO-OPTICO} = Atenuación_{RG-750} + Potencia_{AMPLIFICADOR} \quad (5.10)$$

$$Potencia_{NODO-OPTICO} = [+23.05, +53.05] \text{ dBm} \quad (5.11)$$



Se conoce que en el nodo óptico se realiza el cambio eléctrico-óptico en donde se cambia el cable coaxial RG-750 a fibra óptica ADSS G655. La fibra tiene una atenuación máxima de 0.25 dB por Km.

Considerando que generalmente se usan unos 5Km hasta llegar al Head-End entonces la Potencia en el Head-End sería:

$$Atenuación_{ADSS\ G.655(5Km)} = 1.25\ dB \quad (5.12)$$

$$Potencia_{Head-end} = Atenuación_{ADSS\ G.655} + Potencia_{NODO-OPTICO} \quad (5.13)$$

Entonces la potencia que debe proporcionar el Head-End para garantizar los correctos parámetros de la red HFC es:

$$Potencia_{Head-end} = [ +24.3 , +54.3 ]\ dBm \quad (5.14)$$

### 5.3 Interferencias en el canal de retorno

Debido al rango de frecuencias con el que trabaja el canal de retorno (5 - 42 MHz), éste es más propenso a interferencias comparado con el canal descendente; la red formada por cable coaxial es como una antena, la mayoría de las interferencias que ingresan a la red es en el hogar de los abonados o en las acometidas, el problema se hace mayor a medida que la información se dirige hacia la cabecera, ya que dicho ruido se va amplificando y por tal motivo la relación señal ruido disminuye.

El tipo de modulación es muy importante, QPSK y 16QAM son más robustos al ruido, sin embargo se usan modulaciones de mayor orden pero éstas tienen que implementar técnicas de corrección de errores y diferentes métodos de multiplexación.

Los parámetros que más afectan la señal upstream son el ruido producido por la intermodulación, el ruido impulsivo, corrientes inducidas, etc., así como también la interferencia generada por otros sistemas como radio, teléfonos móviles, motores eléctricos, redes eléctricas y más, produciendo degradación de la señal al sumarse cada uno de los fenómenos antes mencionados. La suma de éste ruido con la señal atraviesa los amplificadores y conectores de la red coaxial hasta llegar al nodo óptico donde se genera un efecto embudo al recibir la información y el ruido de todos los usuarios que comparten el nodo, el mismo que se ve limitado en tamaño ya que cualquier ruido generado en cualquier punto afecta a todos los usuarios del sector, ya sea ruido externo o propio del cable.

Para el buen desempeño del canal de retorno y para el óptimo rendimiento de la red es importante la configuración adecuada de los parámetros del canal; se debe conocer el número de canales upstream que cubrirán un nodo óptico y que van a compartir un canal downstream , los niveles de combinación del nodo, el tipo de

modulación, la tasa de símbolos, etc., éstos parámetros varían dependiendo del número de suscriptores, del requerimiento de servicios, capacidad de los canales upstream y downstream, ancho de banda asignada a cada usuario en cada vía y de los planes de expansión del servicio. Configurando los parámetros en diferentes niveles y combinaciones del formato de modulación es posible alcanzar el mismo rendimiento y capacidad de servicio [18].

#### **5.4 Técnicas de modulación**

Las técnicas de modulación usadas en el sentido ascendente son más robustas que las técnicas usadas en sentido descendente, esto se debe a la mayor presencia de ruido en el canal de retorno que obliga a usar modulaciones más resistentes al ruido, las mismas que tienen una eficiencia en bits por símbolo menor según Shannon.

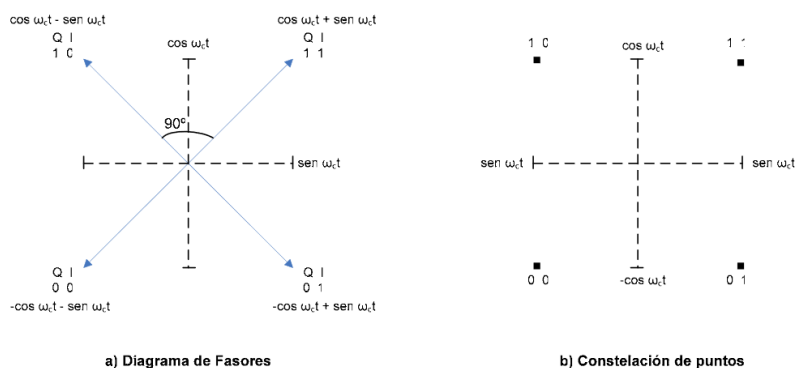
En el canal descendente se usan modulaciones de 64 QAM y 256 QAM, sin embargo la mayor eficiencia requiere una mayor calidad e involucra un costo mayor de los equipos así también requieren mayor SNR, por tal motivo cuando se necesita mayor capacidad se ha preferido utilizar canales adicionales (channel bonding) para mejorar la transmisión.

En el canal ascendente se inició usando 16QAM y QPSK, sin embargo dependiendo del método de acceso utilizado se han ingresado modulaciones de 8, 16, 32, 64, 128 QAM [18].

#### 5.4.1 QPSK

Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK) es una técnica de modulación digital en la que la información transportada por la señal transmitida está contenida en la fase. Con esta modulación son posibles cuatro fases de salida para una misma frecuencia de portadora y con una misma amplitud. Cada fase transmite dos bits QPSK por lo que con cuatro fases se representan los dígitos 00, 01, 10 y 11.

En la figura 5.3 se puede observar el diagrama de fasores y la constelación de puntos de la modulación QPSK.



**Figura 5.3. Diagrama de fasores y constelación de puntos QPSK. [18]**

Una ventaja que tiene la modulación QPSK es la mejora de eficiencia espectral en comparación a otras modulaciones, como BPSK, MSK, GMSK, etc. La modulación QPSK tiene una mayor inmunidad contra el ruido y una alta seguridad de los datos.

El uso de cuadrantes y puntos individuales llamadas constelaciones mejora el rendimiento e incluso el rendimiento con interferencias de la señal de ruido eléctrico. Las constelaciones son ampliamente utilizadas en la tecnología de cable módems para mejorar la velocidad y reducir los errores.

La separación angular entre fases de QPSK es de  $90^\circ$ , esta modulación tiene 4 símbolos y cada símbolo tiene 2 bits. Esta asignación de bits se lo realiza mediante el código gray, lo cual consiste en que entre dos símbolos adyacentes estos solo se diferencian en 1 bit, con lo que se logra minimizar la tasa de bits erróneos [18].

#### **5.4.2 QAM**

Es una técnica de modulación digital la cual transporta datos mediante la señal portadora donde la información está contenida tanto en amplitud como en fase. En QAM al usar diferentes

combinaciones en amplitud y fase permite alcanzar una mayor tasa de bits con una misma velocidad de modulación.

QAM puede transmitir dos señales en una misma frecuencia lo cual aprovecha el ancho de banda disponible, además que es un tipo de codificación M-ario, donde M representa la cantidad de condiciones posibles para una cantidad de variables binarias; este tipo de codificación usa un conjunto de señales de  $2^n = M$ , siendo n número de bits codificados en M condiciones posibles, logrando como resultado salidas diferentes. Esta modulación es aplicada en los módems para velocidades superiores de 2400 bps, así como también en sistemas de transmisión de televisión [18].

#### **5.4.2.1 16 QAM**

16 QAM es un esquema de modulación multinivel en la que  $M=16$  y consecuentemente  $n=4$  dando como resultado  $2^4=16$ , donde cada símbolo está formado de cuatro bits; un bit de nivel y un bit de polaridad por componente. Este tipo de modulación permite contar con 16 estados diferentes entre amplitud y fase [18].

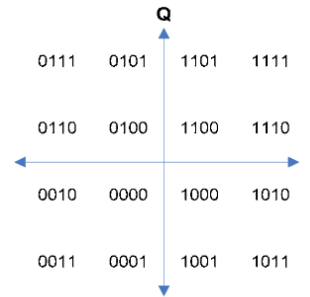


Figura 5.4. Constelación de puntos 16-QAM. [18]

#### 5.4.2.2 64 QAM

64 QAM es un esquema de modulación multinivel en la que  $M=64$  y consecuentemente  $n=6$  dando como resultado  $2^6=64$ , donde cada símbolo está formado de seis bits; dos bits de nivel y un bit de polaridad por componente. Esta modulación permite contar con 64 estados diferentes [18].

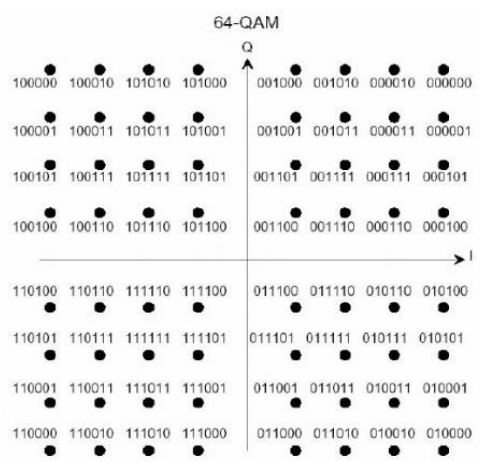


Figura 5.5. Constelación de puntos 64 QAM. [33]

### 5.4.2.3 256QAM

256 QAM es un esquema de modulación multinivel en la que  $M= 256$  y consecuentemente  $n=8$  dando como resultado  $2^8=256$ , donde cada símbolo está formado de ocho bits; tres bits de nivel y un bit de polaridad por componente. Esta modulación permite contar con 256 estados diferentes.

Al aumentar los niveles de QAM se puede transmitir más bits por símbolos simultáneamente, el nivel de la modulación QAM se ve limitada por la frecuencia del ancho de banda y el ruido base. Además cuando la modulación QAM es menor la distancia de separación entre las fases adyacentes aumenta mejorando el comportamiento frente al ruido [18].

## 5.5 Limitación de Técnicas de Modulación

Como vimos en el subcapítulo anterior las modulaciones con las que trabaja DOCSIS son QPSK y QAM. Si bien es cierto que mientras el nivel de QAM aumenta existe un incremento en la velocidad de transmisión de datos también hay que considerar que mientras más bits por símbolo son transmitidos la región de decisión es más pequeña, disminuyendo la confiabilidad en la transmisión. Sin



embargo hemos observado que usando técnicas de corrección de errores se puede obtener un SNR mayor mientras QAM es mayor [34].

Otro punto a considerar es que la velocidad de transmisión no solo depende del tipo de modulación utilizada sino también del ancho del canal de transmisión. La red HFC usa 6MHz de ancho de banda para un canal descendente, y transmite una tasa de 5.360537 Msímbolos/segundo para 256 QAM (8 b.p.símbolo) y de 5.056941 Msímbolos/segundo para 64 QAM. Como se puede observar a medida que aumenta el nivel QAM el nivel de símbolos por segundo aumenta, sin embargo éste valor de símbolos transmitidos por segundo no puede sobrepasar el ancho de banda del canal dado en Hz; tiene que ser menor para garantizar que exista una separación entre canales consecutivos. Si aumentamos el nivel de QAM vamos a tener una transmisión de bits por símbolo que no va a soportar el canal de 6 MHz, por ejemplo en el canal descendente con una modulación de 256QAM se tiene un margen de separación de aproximadamente el 5% a cada lado del canal, obviamente si la modulación aumenta este porcentaje de separación disminuirá.

Es por esto que dada la imposibilidad de aumentar el nivel de modulación se impone la agregación de canales para poder transmitir velocidades mayores.

## **CONCLUSIONES**

1. La implementación de las Redes HFC bajo los estándares aplicables proporciona una solución eficiente por la gran capacidad que tiene para soportar no sólo los servicios de televisión por cable sino también los servicios de datos como internet y telefonía IP.
2. En el Ecuador el grupo TVCABLE sobre la red HFC brinda servicios de voz, video y datos utilizando las especificaciones del estándar DOCSIS para garantizar el correcto funcionamiento de la red, actualmente implementa DOCSIS 3.0 mientras que CLAROTV DOCSIS 2.0.

3. El uso de la plataforma desarrollada DOCSIS reside en la interoperabilidad en los equipos permitiendo a los operadores escoger equipos que se acoplen a sus requerimientos tanto técnicos como económicos.
4. El estudio del estándar DOCSIS nos ha permitido llegar hasta la versión 3.1 alcanzando velocidades de 1 Gbps en el canal ascendente y 10 Gbps en el canal descendente.
5. El rendimiento de las redes HFC se ven afectadas por el ruido de ingreso y de impulso, provocando degradación de la señal en el canal de retorno debido al rango de frecuencia (5-42 MHz) con el que trabaja.
6. La inmunidad al ruido sobre la red HFC es mayor al tener mayor distancia intersimbólica en la modulación QAM; DOCSIS utiliza modulaciones mayores bajo el uso de técnicas de corrección de errores implicando la transmisión de datos adicionales (overhead).
7. El estándar DOCSIS establece el ancho de banda del canal y a su vez limita el nivel QAM, para garantizar una separación entre canales consecutivos la tasa de símbolo por segundos transmitidos tiene que ser menor al ancho de banda en Hz.

8. Basado en el análisis de la máxima capacidad de Shannon se puede confirmar que todas las velocidades transmitidas con las modulaciones especificadas en DOCSIS se encuentran dentro del límite máximo de transmisión, demostrando que la transmisión es fiable y tiene una tasa de error mínima. Para DOCSIS 2.0 y 3.0 se alcanza un rendimiento del 71%.
9. DOCSIS especifica que la eficiencia de modulación aumenta a medida que el nivel de QAM es superior, obteniendo un rendimiento de canal mayor con modulaciones de 64, 128 y 256 QAM.
10. El uso de la metodología de agregación de canales, bajo las especificaciones del estándar DOCSIS y en conjunto con la utilización de cable módems de múltiples canales, permite aumentar el ancho de banda para poder transmitir a velocidades mayores.
11. El rendimiento del canal en términos de Shannon y bajo el uso del channel bonding se mantiene constante respecto al análisis de un solo canal, debido a la proporcionalidad del ancho de banda con el grupo de canales.
12. La cantidad máxima de canales que DOCSIS 3.0 establece en un bonding group depende del ancho de banda disponible en cada dirección

y de las restricciones del hardware; generalmente se permite 4 y 8 canales.

13.El uso del channel bonding en la versión 3.0 ha permitido a los operadores competir frente a operadores que trabajan con redes de acceso que manejan altas velocidades.

## **RECOMENDACIONES**

1. Se debe mantener una impedancia constante de 75 ohmios en la red de cable coaxial para que no existan pérdidas por reflexiones de la señal que disminuyan el rendimiento de la red.
2. Es conveniente que los operadores mantengan actualizada la plataforma de DOCSIS para poder obtener los beneficios de los incrementos de velocidad en la transmisión de datos en la red HFC.
3. Se debe tener cuidado en la implementación de la red de cable después de los nodos ópticos porque allí es donde se almacena una mayor cantidad de fuentes de ruido, que afectan principalmente el canal ascendente.

4. Los operadores de la red de cable híbrida en el Ecuador deben considerar el cambio de la red coaxial por fibra óptica para mejorar la calidad de servicio al abonado y poder transmitir las altas velocidades soportadas por éste medio de transmisión.
  
5. En zonas aisladas o rurales, donde es necesario tener un nivel de mayor penetración, es conveniente extender el uso de la tecnología HFC con tarifas preferenciales para la población de escasos recursos económicos que no dispone de los medios suficientes para tener acceso a la tecnología Direct To Home (DTH), cuyas tarifas son más elevadas que el servicio de audio y video por suscripción ofrecido con las redes HFC.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] VILLALBA FRANCO ADOLFO, Propuesta de la Prestacion de Servicios de Banda Ancha mediante el empleo conjunto de tecnologías de CATV y PLC, Guayaquil, 2012.
- [2] Montañana Rogelio, Acceso Residencial de Banda Ancha, Valencia, 2003.
- [3] Villacrés Bechara Mario, *Diseño de una Red de Telecomunicaciones HFC multiservicios para la empresa Green TV en la ciudad de Esmeraldas*, Sangolqui, 2008.
- [4] Andreula Luis, *SISTEMA DE TELEVISION POR CABLE*.
- [5] Manuel Alvarez, Julio Berrocal, Francisco Gonzalez, Raquel Pérez, Isabel Román, Enrique Vasquez, *TECNOLOGIAS DE BANDA ANCHA Y CONVERGENCIA DE REDES*, Madrid, 2009.
- [6] Jose Abrego, Jorge Nuñez, *Redes HFC*, Santiago, 2011.
- [7] Wilmer Sarango, Xavier Villazhaña, *La Banda Ancha en el Ecuador, su desarrollo y expectativas de crecimiento hacia el futuro*, Cuenca, 2013.
- [8] Córdova Francisco, "TECNOLOGIAS DE ACCESO," [Online]. Available: [http://www.imaginar.org/iicd/tus\\_archivos/TUS6/2\\_tecnologia.pdf](http://www.imaginar.org/iicd/tus_archivos/TUS6/2_tecnologia.pdf). [Accessed 2014 Diciembre].
- [9] Huidrobo Jose Manuel, "Ventajas y Desventajas de las Tecnologías de



Banda Ancha," *Antena de Telecomunicacion*, pp. 65-66, Junio 2006.

- [10] GAPTEL, "Oportunidades y Desafíos de la Banda Ancha," Madrid, 2007.  
[Online]. Available:  
[http://www.gitpa.es/doc/informes/Oportunidades\\_red.es.pdf](http://www.gitpa.es/doc/informes/Oportunidades_red.es.pdf). [Accessed  
Noviembre 2014].
- [11] Wolff Antonio, Diseño e Implementacion de un curso de Servicios sobre  
Redes HFC de Nueva Generacion, Santiago de Chile, 2009.
- [12] Merino Ramos Angel, "Implementacion de DOCSIS 3.0 sobre redes  
HFC," Enero 2013. [Online]. Available:  
<http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/18805/6/amerinoraTFC0113memoria.pdf>. [Accessed Enero 2015].
- [13] Chang Joseph ,Macías José, Diseño de Redes HFC para Distribucion  
de Señales Digitales de Television, Guayaquil, 2013.
- [14] "TODO SOBRE HFC," [Online]. Available:  
<http://todosobrehfc.globered.com/>.
- [15] A. P. Otoniel, Analisis de Ruido en la señal transmitida en un Cable  
Coaxial, Guatemala, 2006.
- [16] Jiménez Gerald,Borbor Daniel, Vulnerabilidades de Seguridad en el  
servicio de Internet de Banda Ancha en Redes HFC, Guayaquil, 2007.
- [17] CableLabs, "Data Over Cable Service Interface Specifications DOCSIS  
1.0," 19 Diciembre 2001. [Online]. Available:

:<http://www.cablelabs.com/wp-content/uploads/specdocs/SP-BPI-C01-011119.pdf>. [Accessed Diciembre 2014].

- [18] Averos Núñez Pastor, Analisis Tecnico - Economico-Regulatorio, de una Operacion de Cable Modem en el Ecuador, Guayaquil, 2006.
- [19] M. I, La Evolucion de la Especificacin DOCSIS, 2006.
- [20] Wilmar Campo, Diego Rueda, Iván Taimal, José Arciniegas, "Analisis del protocolo de DOCSIS para la distribucion de aplicaciones y contenidos de TDi en HFC," Diciembre 2009. [Online]. Available: <http://www.bdigital.unal.edu.co/23531/1/20488-69226-1-PB.pdf>. [Accessed Enero 2015].
- [21] CableLabs, "Radio Frequency Interface Specification," 22 Abril 2009. [Online]. Available: <http://cablelabs.com/specification/radio-frequency-interface-specification-2/>.
- [22] "Tecnologias y Negocios en Telecomunicaciones en el Perú y Latinoamerica," [Online]. Available: <http://www.felipereyesvivanco.com/redes-cableadas/redes-hfc/docsis-3-0/>.
- [23] Angel Gustavo Gómez Parrales, Estudio de la Factibilidad para la implementación de nuevos servicios en la red HFC de "CATEL", Quito, 2007.

- [24] CableLabs Data Over Cable Service Interface Specifications DOCSIS 3.1, "NEW GENERATION OF DOCSIS TECHNOLOGY," [Online]. Available: <http://www.cablelabs.com/news/new-generation-of-docsis-technology/>. [Accessed Diciembre 2014].
- [25] Castro Antonio, Rubén Fusario, Teleinformática para ingenieros en Sistemas de Información II, España, 1999.
- [26] José E Briceño Márquez, Principios de las Comunicaciones, Mérida, Venezuela, 2011.
- [27] MOTOROLA, "DOCSIS 2.0 y 3.0," 16 Abril 2012. [Online]. Available: [http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/Access/DOCSIS/Motorola\\_DOCSIS20\\_30.pdf](http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/Access/DOCSIS/Motorola_DOCSIS20_30.pdf).
- [28] Julio Enríquez Betancourt, Evaluación de la Tecnología de Modem de Cable (DOCSIS) y comparación con la Tecnología xDSL, Caracas, 2004.
- [29] "CableLabs," MAC and Upper Layer Protocols Interface Specification, 2014 Julio 29. [Online]. Available: <http://cablelabs.com/wp-content/uploads/specdocs/CM-SP-MULPIv3.0-I25-140729.pdf>.
- [30] Scott Moser, Brian Dean, Jim Martin, James Westall, Maximizing Bandwidth Utilization in Downstream DOCSIS 3.0 Channel Bonded Network, South Carolina.

- [31] I. Pablo, "Estudio de las Distorsiones en la señal sobre Redes HFC," Julio 2010. [Online]. Available: [http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb2010/pb2010\\_038.pdf](http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb2010/pb2010_038.pdf).
- [32] "Ruido Térmico," Febrero 2015. [Online]. Available: <http://es.scribd.com/doc/59996632/Ruido-Termico#scribd>.
- [33] Teleco, "Inteligencia en Telecomunicaciones," [Online]. Available: [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdconsis2/pagina\\_4.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdconsis2/pagina_4.asp).
- [34] R. L. Freeman, Fundamentals of Telecommunications, New Jersey, 2005.