

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**



**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“DISEÑO DE REDES HFC PARA DISTRIBUCIÓN DE SEÑALES  
DIGITALES DE TELEVISIÓN”**

**TESINA DE SEMINARIO**

**Previo a la obtención del Título de:**

**Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Presentado por:**

**JOSEPH RAMÓN CHANG RIZZO**

**JOSÉ ADRIÁN MACÍAS ZAMBRANO**

**Guayaquil-Ecuador**

**2013**

# AGRADECIMIENTOS

A Dios.

A mis padres, Noris y Ramón, y su esfuerzo constante por darme y darnos lo invaluable de la salud y educación. Por su entrega y amor.

A los docentes, reconociendo más que el conocimiento, su calidad humana.

A mis hermanos, amigos y compañeros con quienes compartí estos años de formación profesional.

**Joseph Chang Rizzo**

A Dios, por brindarme salud y la oportunidad de realizar mis estudios.

A mis padres, que me apoyan y que siempre han estado apoyándome.

A mis amigos, por su apoyo y su confianza en mí.

A mis compañeros universitarios.

A mis hermanos por su apoyo.

A los docentes que a lo largo de mi aprendizaje me han transmitido sus conocimientos y experiencias.

**José Adrián Macías Zambrano**

# DEDICATORIA

A todo aquello que otorga sentido a la vida.

Al amor, que da sentido a la mía.

**Joseph Chang Rizzo**

A Dios.

A mis padres.

A mis familiares.

A mis amigos.

A los docentes.

**José Adrián Macías Zambrano**

# **TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

**MSc. César Yépez Flores**

**PROFESOR DEL SEMINARIO DE  
GRADUACION**

---

**Ph.D. Freddy Villao Quezada**

**PROFESOR DELEGADO POR LA  
UNIDAD ACADEMICA**

# DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesina, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)

---

Joseph Chang Rizzo

---

José Adrián Macías Zambrano

# RESUMEN

El presente documento aborda el diseño de redes HFC digital, enfatizando en los parámetros de orden técnico a considerar.

En un primer capítulo se recoge aquellos hitos históricos antecedentes de las redes HFC para la distribución de señales digitales, para posteriormente justificar la ejecución del trabajo y trazar los objetivos a alcanzar.

La primera preocupación en una gran edificación son sus bases. Nuestra edificación es el diseño de una red HFC y las bases las trazamos en el segundo capítulo con un fuerte marco teórico. Se inicia con la arquitectura de la red: Cabecera, red troncal, red de distribución, acometida y equipos terminales. Se describe las funciones de cada etapa y de sus equipos. La siguiente sección trata de los medios de transmisión de esta red, la fibra óptica y el cable coaxial. Entre sus características se habla de la atenuación y cómo la señal se ve afectada a lo largo del medio. Se termina este capítulo abordando las particularidades de los canales ascendente y descendente de la red.

El tercer capítulo es la esencia del tema de interés. Se presenta al diseño como una tarea compleja donde convergen múltiples factores que se influyen entre ellos, destacándose la inversión económica inicial, la planificación, la elección de

los equipos y su interconexión y la búsqueda de una red confiable, para lo cual es recomendable cumplir una serie de parámetros técnicos de operación de los estándares internacionales recogidos en este documento. Se da a conocer los niveles adecuados de señal y también se encontrará un análisis de la afectación en la relación  $E_b/N_0$  por el uso indiscriminado de amplificadores en cascada.

El siguiente capítulo muestra algunas de las tendencias de evolución de estas redes, por lo tanto, alternativas a seguir que podrían considerar las actuales operadoras que ofrecen este servicio.

Por último, se finaliza con las conclusiones y recomendaciones que nacen partiendo del desarrollo del trabajo.

# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	I
DEDICATORIA .....	III
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	IV
DECLARACIÓN EXPRESA .....	V
RESUMEN.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV
ABREVIATURAS .....	XVI
SIMBOLOGÍA .....	XX
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....	6
2.1 ARQUITECTURA DE UNA RED HFC .....	7
2.1.1 HEADEND, CABECERA .....	8
2.1.1.1 ELEMENTOS DEL HEADEND.....	9
2.1.2 RED TRONCAL.....	21
2.1.2.1 ELEMENTOS DE LA RED TRONCAL .....	21
2.1.3 RED DE DISTRIBUCIÓN .....	25
2.1.3.1 ELEMENTOS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	25
2.1.4 ACOMETIDA .....	33
2.1.4.1 ELEMENTOS DE LA ACOMETIDA .....	33
2.1.5 EQUIPOS TERMINALES .....	36
2.2 MEDIOS DE TRANSMISIÓN.....	38
2.2.1 FIBRA ÓPTICA .....	38
2.2.2 CABLE COAXIAL .....	44
2.3 BIDIRECCIONALIDAD .....	48
2.3.1 CANAL DE BAJADA. DOWNSTREAM. SEÑAL DESCENDENTE.....	48
2.3.2 CANAL DE SUBIDA. UPSTREAM. SEÑAL ASCENDENTE .....	50

CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LA RED HFC .....	53
3.1 PLANIFICACIÓN .....	55
3.2 ELEMENTOS Y SU INTERCONEXIÓN .....	63
3.2.1 TOPOLOGÍA RED TRONCAL.....	64
3.2.2 TOPOLOGÍA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN .....	69
3.2.3 TOPOLOGÍA DE LA ACOMETIDA.....	70
3.3 CUMPLIMIENTO DE PARÁMETROS TÉCNICOS.....	70
3.3.1 RUIDO Y DISTORSIONES .....	73
3.3.1.1 DESCRIPCIÓN .....	73
3.3.1.2 ESTÁNDARES.....	76
3.3.1.3 RELACIÓN $C/N$ Y LA TEMPERATURA .....	77
3.3.1.4 RELACIÓN $C/N$ Y $E_b/N_0$ Y EL USO INDISCRIMINADO DE AMPLIFICADORES EN CASCADA .....	81
3.3.2 MICROREFLEXIONES .....	87
3.3.2.1 DESCRIPCIÓN .....	87
3.3.2.2 ESTÁNDARES.....	88
3.3.3 RETARDO DE GRUPO (GROUP DELAY).....	89
3.3.3.1 DESCRIPCIÓN .....	89

3.3.3.2 ESTÁNDARES.....	90
3.3.4 NIVEL DE LA SEÑAL EN EL TERMINAL.....	91
3.3.4.1 DESCRIPCIÓN .....	91
3.3.4.2 ESTÁNDARES.....	91
3.3.5 NIVEL DE LOS CANALES ADYACENTES .....	92
3.3.5.1 DESCRIPCIÓN .....	92
3.3.5.2 ESTÁNDARES.....	92
3.3.6 OTROS PARÁMETROS.....	94
3.4 DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD .....	95
3.4.1 DISPONIBILIDAD.....	95
3.4.2 CONFIABILIDAD.....	98
3.4.3 EFECTO DE LA REDUNDANCIA EN LAS TASAS DE DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD EN LA RED .....	99
3.4.3 ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD DE UNA RED	101
3.5 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA RED .....	102
CAPÍTULO 4: VARIANTES A LAS REDES HFC DE LAS OPERADORAS QUE OFERTAN EL TRIPLE PLAY EN EL PAÍS .....	108
4.1 CAMBIO DE PARTICIÓN DE FRECUENCIAS .....	109

4.2 OPTIMIZAR CAPACIDAD DEL CANAL DE SUBIDA .....	112
4.3 NODO+0.....	114
4.4 CONVERGENCIA DE DISPOSITIVOS .....	117
CONCLUSIONES .....	118
RECOMENDACIONES.....	121
BIBLIOGRAFÍA.....	123

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema general de una red HFC .....	8
Figura 2.2 Formatos más utilizados de crominancia.....	16
Figura 2.3 Multiplexor Motorola TMX-2010.....	19
Figura 2.4 Chasis Omnistar GX2 de Motorola .....	21
Figura 2.5 Esquema del sistema de fibra óptica en la red troncal .....	24
Figura 2.6 Nodo óptico Motorola SG2000.....	24
Figura 2.7 Comportamiento de la señal durante varias etapas del amplificador	28
Figura 2.8 Configuración típica de un amplificador de distribución .....	28
Figura 2.9 Configuración típica de un extensor de línea.....	29
Figura 2.10 Construcción típica de un cable coaxial de la acometida.....	34
Figura 2.11 Pérdida de cables de la acometida versus frecuencia .....	35
Figura 2.12 Tipos y estructura de la fibra óptica .....	39
Figura 3.1 Fragmento de un levantamiento para el diseño de una red HFC .....	61
Figura 3.2 Topología Estrella .....	64
Figura 3.3 Topología Anillo Envolverte .....	65

Figura 3.4 Topología Anillo Compartido.....	66
Figura 3.5 Topología de una red troncal de mayor tamaño .....	67
Figura 3.6 Topología red de distribución.....	69
Figura 3.7 Peor caso de las magnitudes de microreflexión en una acometida ..	88
Figura 4.1 Diferentes divisiones del espectro en redes HFC .....	110
Figura 4.2 Conversión en bloques .....	113
Figura 4.3 Red HFC tipo nodo+5 .....	115
Figura 4.4 Configuración básica nodo+0 .....	116

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Resoluciones en televisión digital .....	13
Tabla 2.2 Recomendaciones de la UIT-T referentes a la fibra monomodo.....	41
Tabla 2.3 Pérdida de retorno por las terminaciones. ....	47
Tabla 3.1 Resumen del número de suscriptores servicios de audio y video.....	57
Tabla 3.2 Penetración del servicio de televisión por suscripción .....	57
Tabla 3.3 Atenuación vs. Temperatura en el cable coaxial URM67 de Excel....	80
Tabla 3.4 Degradación C/N por el uso de más de un amplificador .....	82
Tabla 3.5 Tasas de transferencia del downstream .....	84
Tabla 3.6 Tasas de transferencia del upstream.....	84
Tabla 3.7 Factor $10\log f_b B$ .....	86
Tabla 3.8 Microreflexiones del eco dominante para DOCSIS 3.0 y SCTE 40....	89
Tabla 3.9 Niveles de señal entre canales de adyacentes .....	93
Tabla 3.10 Equipos y valores para el despliegue de una red HFC .....	105

# ABREVIATURAS

A/D	Convertidor analógico/digital
AC	Alternating Current (Corriente Alterna)
AC-3	Formato de compresión de audio desarrollado por Laboratorios Dolby.
AGC	Automatic Gain Control (Control Automático de Ganancia)
ASC	Automatic Slope Control (Control Automático de Pendiente)
ASI	Asynchronous Serial Interface (Interfaz Serial Asíncrona)
ATSC	Advanced Television System Committee (Comité de Sistemas de Televisión Avanzada)
CATV	Community Antenna Television (Antena de Televisión Comunitaria)
CMTS	Cable Modem Termination System (Sistema de terminación de cablemódems)
CONATEL	Consejo Nacional de Telecomunicaciones
D/A	Convertidor digital/analógico
DCT	Discrete Cosine Transform (Trasformada Discreta de Coseno)
DES	Data Encryption Standard (Estándar de Encriptación de Datos)

DFB	Distributed Feedback Laser
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification (Especificación de Interfaz para Servicios de Datos sobre Cable)
DVB	Digital Video Broadcasting
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier. (Amplificadores de fibra dopada de Erbio).
EGT	Era el nombre de una empresa, comprada por ARRIS Group Incorporated, que se dedicaba a la fabricación de equipos para sistemas de cable. Su nombre quedó como un genérico para los encoders.
FCC	Federal Communications Commission
GOP	Group of Pictures (Grupo de Imágenes)
HD	High Definition (Alta definición)
HBO	Home Box Office
HFC	Hyber Fiber Coaxial (Híbrido Fibra Coaxial)
HUM	Modulación de Zumbido
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)

IRD	Integrated Receiver Decoder (Receptor Decodificador Integrado)
ISDB	Integrated Services Digital Broadcasting (Transmisión Digital de Servicios Integrados)
LNB	Low Noise Block (Bloque de Bajo Ruido)
MPEG	Motion Picture Experts Group (Grupo de expertos de imágenes en movimiento)
MTA	Multimedia Terminal Adapter (Adaptador de Terminales Multimedia)
NPR	Noise Power Ratio (Potencia Relación a Ruido)
NTSC	National Television System Committee (Comisión Nacional de Sistema de Televisión)
PCM	Pulse Code Modulation (Modulación por Codificación de Pulsos)
PON	Passive Optical Network (Red Óptica Pasiva)
PSTN	Public Switched Telephone Network (Red Telefónica Pública Conmutada)
QAM	Quadrature Amplitude Modulation (Modulación de amplitud en cuadratura)

QPSK	Quadrature Phase Shift Keying (Modulación por desplazamiento de fase usando 4 símbolos desplazados entre sí 90°)
RF	Radio frecuencia
SCTE	Society of Cable Telecommunications Engineers (Sociedad de Ingenieros de Telecomunicaciones por Cable)
SD	Standar Definition (Alta estándar)
SENATEL	Secretaría Nacional de Telecomunicaciones
SEM	Smartstream Encryptor Modulator
SUPERTEL	Superintendencia de Telecomunicaciones
SEM	Smartstream Encryptor Modulator
SRL	Structural Return Loss (Pérdida de Retorno Estructural)
TDMA	Time Division Multiple Access (Acceso múltiple por División de Tiempo)
WDM	Wavelength Division Multiplexing (Multiplexación por División de Longitud de onda)

# SIMBOLOGÍA

$\alpha$	Atenuación del cable coaxial en dB/100ft.
$\varepsilon$	Constante dieléctrica
$\lambda$	Longitud de onda / Tasa de fallo de un componente de la red
$\Omega$	Ohmio
$A$	Availability (Disponibilidad)
$B$	Ancho de banda
$C$	Nivel de potencia de portadora
$c$	Velocidad de la luz ( $3 \times 10^8 m/s$ )
$C/N$	Relación portadora a ruido
$C_i$	Nivel de la señal a la entrada del amplificador
$CIN$	Ruido por intermodulación
$CSO$	Composite Second Order. Componentes de distorsión de segundo orden.
$CTB$	Composite triple beat. Componentes de distorsión de tercer orden.
$dB$	Decibelio

$dBc$	Decibelios relativos a la potencia de portadora
$dBm$	Decibelios con respecto a 1 miliwatt
$dBmV$	Decibelios con respecto a 1 milivolt en un sistema de $75\Omega$ .
$D/U$	Desired to undesired ratio. Relación del nivel de portadora de la señal deseada a la señal adyacente o no deseada
$E_b/N_o$	Relación energía por bit a densidad espectral de potencia de ruido
$F_a$	Figura de ruido del amplificador
$f_b$	Tasa de transmisión nominal de bits
$F_p$	Factor de pérdida del dieléctrico
$k$	Constante de Boltzmann ( $1.374 \times 10^{-23} \text{ joules}/^\circ K$ )
$Ksim/s$	Kilosímbolo sobre segundo
$Mbps$	Megabits por segundo
$MTBF$	Mean Time Between Failure (Tiempo medio entre fallo)
$MTTR$	Mean Time To Restore (Tiempo medio de reparación)
$N$	Promedio de potencia de ruido medido sobre un determinado ancho de banda
$n$	Índice de refracción

$N_p$	Potencia mínima de ruido térmico
$S/N$	Relación señal a ruido
$R$	Resistencia óhmica por 100 pies del conductor.
$R(t)$	Confiabilidad de la red en un tiempo $t$
$T$	Temperatura absoluta en grados Kelvin
$T_u$	Tiempo de corte del servicio
$U$	Unavailability (No disponibilidad)
$v$	Velocidad de propagación
$V_p$	Velocidad de propagación relativa
$Z_o$	Impedancia característica

# INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad la comunicación ha sido una necesidad del ser humano. En el mundo actual la necesidad de comunicarnos sigue intacta, pero han cambiado la forma en que lo hacemos.

La telefonía que nos permite escucharnos a miles de kilómetros, la televisión que es un magnífico medio de información y entretenimiento y el internet que mantiene interconectado a todo el planeta, son los grandes pilares de la comunicación de nuestros días.

Los avances en tecnología todavía están lejos de encontrar su límite. Las redes HFC soportan justamente los servicios de televisión, telefonía e internet, con una serie de aplicaciones asociadas: Pago por ver, video bajo demanda, radio, guías interactivas, videojuegos, en fin.

Atrás de todo usuario que disfruta de esta oferta, están las grandes operadoras y un grupo de personas que en conjunto buscan renovar constantemente la red para dar cada vez un mayor y mejor servicio.

Realizamos así una invitación al fascinante mundo de estas redes, esta vez desde la óptica del diseñador.

# **CAPÍTULO 1**

## **DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

### **1.1 ANTECEDENTES**

A finales de la década del 40 la recepción de la señal de televisión abierta todavía era muy mala en aquellos lugares en Estados Unidos que presentaban ciertas condiciones adversas, como la de ser un valle rodeado por montañas y estar alejado de la matriz transmisora. En Mahanoy, uno de los pueblos de Pennsylvania con esta característica, un vendedor de

televisores, John Walson, coloca una antena en la cima de una montaña para receptor adecuadamente la señal, transmitirla a su tienda y distribuirla a su pueblo. Sería el inicio de la televisión por cable o CATV.

Otro aporte es el de Milton Shapp, quien desarrolla un sistema que permitía reemplazar todas las antenas de las azoteas de los edificios, por una sola antena maestra que pueda ser usada por todos los televisores. Para esta tarea se ayudó de cable coaxial y amplificadores de señal. Esta innovación impulsa rápidamente la expansión de la televisión por cable en ese país.

En Noviembre de 1972 nace la televisión pagada, cuando HBO es ofertado por la empresa Service Electric en el sistema de cable de Wilkes-Barre en Pennsylvania. Empezó la oferta de canales a crecer significativamente y el servicio llega a las grandes ciudades.

A inicios de los 90 se empieza a migrar parte de la red a fibra óptica. Las nuevas redes HFC, presentaban una serie de ventajas como ser menos susceptible al ruido y facilitar el transporte de señales bidireccionales.

A mediados de esta década ya empiezan las primeras transmisiones de contenidos digitales sobre estas redes.

La fibra óptica y la digitalización de las señales agilitó la transmisión de voz y datos, permitiendo que la red HFC se preste como una de las mejores

opciones para la convergencia de servicios, que significa la capacidad de ofrecer tanto televisión, telefonía e internet, conocido como triple play, usando como infraestructura una única red. Este es el horizonte hacia donde apuntan la mayoría de las operadoras.

Usbeck (2010) cuando relata la historia de las telecomunicaciones en nuestro país, señala que TeleCable y TVMax fueron las primeras empresas registradas como proveedoras de los servicios de audio y video por suscripción, en el año 1985. Ambas empresas se fusionan el año siguiente, creándose TVCable, quien logra el control de este nuevo servicio tanto en Quito y Guayaquil, manteniendo hasta la actualidad su liderazgo [1].

Sobre el servicio de televisión por cable, las estadísticas de la SUPERTEL, con actualización al 31 de octubre del 2012, señalan que ya son 242 estaciones autorizadas, con un número de 315.621 suscriptores y una penetración del servicio de televisión por suscripción estimada del 13.3% [2].

Muchas de las estaciones en pueblos pequeños tienen una red basada únicamente en coaxial. Las empresas con más suscriptores han visto la necesidad de migrar a redes HFC y algunas de ellas, como la propia TVCable están en pleno proceso de adecuar todas sus redes HFC para soportar señales digitales.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

Las técnicas de modulación, codificación y compresión digital permiten transmitir mayor cantidad de información en menor espacio, optimizando el uso del espectro radioeléctrico. Algunas de las ventajas para los profesionales en el área de telecomunicaciones es tener menos problemas de interferencia y mejores técnicas de corrección de errores. El usuario, por su lado, adquiere una mayor calidad de video y sonido, y es capaz de interactuar con su operadora.

La digitalización es inevitable, por lo menos para aquellas operadoras que pretenden no distanciarse más a los acelerados avances tecnológicos, ofreciendo y cautivando más a sus usuarios.

Es necesario un trabajo de investigación que permita profundizar en las características de diseño con el fin de realizar la migración sin problemas y optimizar el uso de la red.

En la actualidad se tiene poca información del tema. La información obtenida será de utilidad a la comunidad en general, especialmente para quienes quieran profundizar en el tema en investigaciones posteriores.

### **1.3 OBJETIVO GENERAL**

Analizar las características de orden técnico en el diseño y operación de las redes HFC para señales digitales utilizadas por las operadoras de Televisión por Cable locales.

### **1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Conocer los diferentes estándares internacionales aplicables a las redes HFC para señales digitales.
- Valorar las ventajas y desventajas del diseño de redes HFC para señales digitales utilizadas por las operadoras en función de los parámetros técnicos de transmisión y recepción de señales digitales.
- Analizar las pérdidas de señal por atenuación y la afectación en la relación  $E_b/N_0$  por el uso indiscriminado de amplificadores en cascada.
- Analizar los factores que determinan la optimización de la red para la utilización de la máxima modulación digital efectiva, que garantice la mayor tasa de bits/seg en la transmisión.
- Proponer alternativas de solución a posibles problemas encontrados en el diseño de las redes actuales en el entorno ambiental de la ciudad de Guayaquil.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

Si usted escucha una conversación entre médicos, se percatará que hay palabras ajenas a los demás, términos que parecieran códigos para cualquiera, pero muy familiares para ellos. Se puede generalizar que cada profesión involucra un lenguaje, que se empieza a aprender/aprehender durante la formación académica. Las redes HFC tienen también un lenguaje particular. Así, el presente capítulo se encargará de introducir al lector en todo el manejo teórico necesario para hablar en un mismo idioma, describiendo de una manera

general la arquitectura de la red, dando a conocer la mayor parte de los elementos de la red y sus funciones, mencionando las características de los medios de transmisión -fibra óptica y cable coaxial-, terminando con la descripción de una de las singularidades de estas redes, la bidireccionalidad.

## **2.1 ARQUITECTURA DE UNA RED HFC**

Tal como se observa en la figura 2.1, una red HFC suele dividirse en:

- Cabecera de Red o Headend
- Red troncal
- Red de distribución
- Acometida
- Equipo(s) terminal(es)

A continuación se detallará la función de cada una de estas subdivisiones, así como los elementos que requieren para cumplirla.

Se recuerda que el presente trabajo se centra en señales digitales, por lo tanto, se obvia mencionar aquellas especificidades de las redes analógicas.

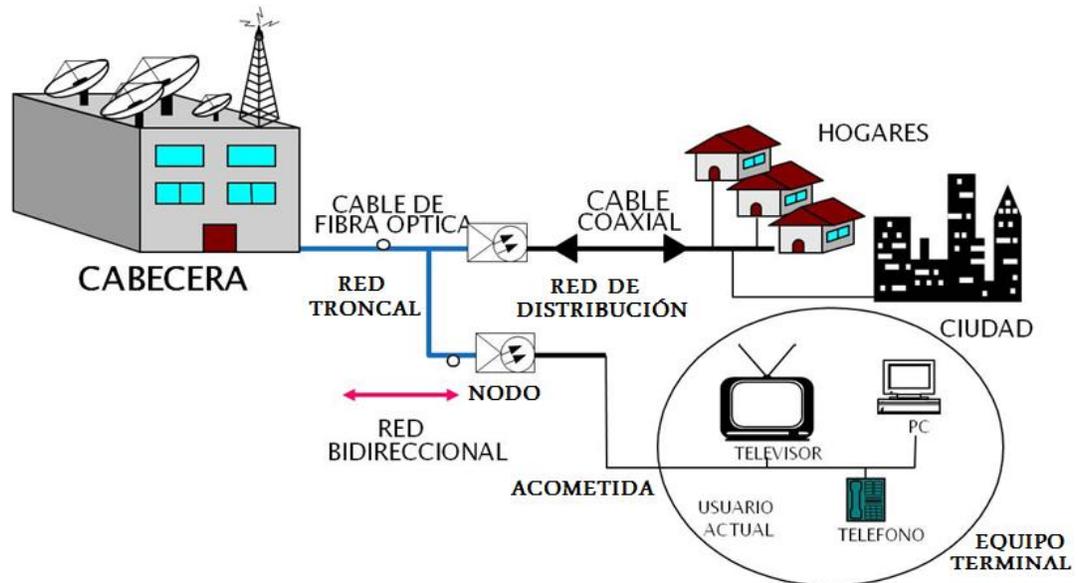


Figura 2.1 Esquema general de una red HFC

Fuente: Tomada de la referencia [3]. Editada por los autores.

### 2.1.1 HEADEND, CABECERA

Es el inicio de la red, el núcleo, desde donde se gobierna todo el sistema. Aumentará en complejidad mientras más servicios se ofrezcan.

Es aquí donde se reciben las señales, además de contar con enlaces a redes de otro tipo, por ejemplo la red de internet, que aportan con información que podrá ser distribuida a los abonados a través de la red.

El headend también se encarga del procesamiento, alistando las señales antes de su distribución. Por ejemplo, la multiplexación de las señales

digitales de video, audio y datos que forman los canales de televisión digital para formar el flujo MPEG de transporte.

Además de la recepción y procesamiento, la cabecera está encargada de monitorear el sistema, supervisar su correcto funcionamiento y de otras tareas como el enrutamiento de datos, conmutación telefónica, gestión del abonado, tarificación de los servicios, entre otros.

#### **2.1.1.1 ELEMENTOS DEL HEADEND**

**Para la recepción de servicios:**

**Antena direccional o directiva:** Una antena omnidireccional radia o capta en todas las direcciones, en cambio una directiva emite o capta la mayor parte de energía en una dirección dada. Esta característica se aprovecha para receptar con niveles óptimos de señal los canales de televisión abierta. De preferencia son colocadas en un lugar alto de la cabecera. Los tipos de antena que se utilizan con más frecuencia son la Yagi-Uda y la logarítmica-periódica.

Se tiene que recalcar que este no es el único método de recepción de canales abiertos. Cuando se requiere aún mayor fiabilidad de la señal, previniendo posibles inconvenientes de la recepción por aire, se

transmite directamente la programación desde la estación de televisión hacia la cabecera a través de enlaces de fibra óptica.

**Antena Parabólica:** Decenas de empresas suben sus contenidos a satélites geoestacionarios, que orbitan la Tierra apuntando a un mismo punto todo el tiempo. Algunos de estos contenidos están libres y otros necesitan de equipos especiales y de un contrato para evitar conflictos de propiedad intelectual y derecho de autor.

Una vez la operadora tiene todo en regla, son por lo general, varias las antenas parabólicas utilizadas para la recepción de las señales satelitales. Este constituye el tipo de recepción más común para los sistemas de cable.

Estas antenas se componen de:

**Reflector:** Concentra la señal en el punto focal de la parábola.

**Dual feed:** Localizado en el punto focal. Sirve para fijar los LNB.

**LNB:** Es el bloque de bajo ruido, el cual amplifica la señal, ya que los niveles de recepción son bajos. Además realiza una conversión a frecuencias más bajas que puedan ser soportadas por el receptor satelital (normalmente las señales satelitales se encuentran en

banda C, que comprende los rangos de frecuencias de 3.7 a 4.2 *GHz* y 5.9 a 6.4 *GHz*, o banda Ku, de 12 a 18 *GHz*. Cuando el alimentador viene integrado al LNB se abrevia como LNBF.

**Receptor:** Se encarga de amplificar, demodular, descryptar y decodificar la señal proveniente de las antenas a través de cable coaxial. Mientras mayor sea la longitud del cable, mayor será el efecto de atenuación de la señal. Loaiza (2011) indica que este cable no debe exceder los 30 metros para que las pérdidas no sean significativas [4].

Se necesita un receptor por cada canal analógico que se capture. En cuanto a la recepción digital, es posible tener menos receptores que canales bajados, cuando el proveedor transmite múltiples canales por portadora, así varios canales serán recibidos por un solo receptor.

Estos equipos también son conocidos como IRD. Los receptores encargados de recibir las señales analógicas, tienen dos salidas, una de audio y otra de video, que serán las entradas al encoder, para su respectiva digitalización y compresión. Por otro lado, los receptores satelitales que reciben señales digitales constan de una sola salida en formato ASI, es decir, se tiene desde ya un flujo de transporte MPEG-2. Como la información ya está digitalizada, esta salida se conecta

directamente al multiplexor, al menos que se utilice un estándar de audio que no sea AC-3, caso en el que deberá pasar obligadamente por el encoder.

Todos los receptores suelen ubicarse en unos bastidores llamados racks. Los racks tienen que ser estandarizados para que sea compatible con los equipos de cualquier fabricante.

**Cable Modem Termination System (CMTS):** Equipo que se utiliza para proporcionar servicios de datos de alta velocidad, como internet o voz sobre IP (telefonía). Es el intermediario entre la red de internet y la red HFC, por lo tanto posee interfaces Ethernet y RF para conectarse a cada una de las redes.

Un CMTS puede hacer las veces de router, enrutando los paquetes desde y hacia la gran red de internet.

Dependiendo del modelo, un CMTS puede manejar desde 4.000 hasta incluso más de 150.000 cable módems.

**Softswitch:** Equipo que provee el control de llamada y servicios de conmutación de paquetes para telefonía. Hace de intermediario entre la red PSTN y la red HFC, se encarga por lo tanto de dirigir las llamadas desde y hacia la red de telefonía pública.

### Para el procesamiento de la señal:

**Encoder o codificador:** Las dos funciones básicas de este equipo es digitalizar y comprimir señales.

El video se codifica utilizando el estándar MPEG-2. Se aprovechará este momento para realizar un pequeño análisis de las acciones que incluye este estándar.

Todos hemos escuchado la palabra resolución, asociándolo muchas veces a qué tan bien se ve una imagen. En la tabla 2.1 encontramos algunas de las resoluciones permitidas en MPEG-2 según el estándar y la definición.

<b>Definición</b>	<b>Resolución</b>	<b>Cuadros o Campos/s</b>	<b>Estándar</b>
Estándar (SD)	720 x 480	hasta 60 p ó 60 i	ATSC / ISDB
	720 x 576	hasta 50 p ó 50 i	DVB
Alta (HD)	1280 x 720	hasta 60 p	ATSC / ISDB
	1920 x 1080	hasta 60 i ó 30 p	ATSC / ISDB
	1280 x 720	25 ó 50 p	DVB
	1920 x 1080	25 p ó 50 i	DVB

Tabla 2.1 Resoluciones en televisión digital

Fuente: Elaborada por los autores. Información de Internet

En la columna de “cuadros o campos/s” encontramos la letra “p” y la “i”. Ellas se refieren al tipo de barrido, sea este progresivo (p) o entrelazado (i, por interlace). El barrido entrelazado barre las líneas pares y luego las impares. Una imagen completa se forma al juntar el campo par con el impar. Entonces 60i, por ejemplo, se refiere a 60 campos por segundo, o bien, 30 cuadros completos en un segundo.

Hagámonos la siguiente pregunta: ¿Qué tasa de transmisión necesitaría aproximadamente si requiero una resolución de 720 x 576 pixeles? Suponiendo que se transmite a 25 cuadros por segundo y recordando que la información de la imagen está contenida en tres señales: Luminancia (Y), diferencia de color al rojo (Cr) y diferencia de color al azul (Cb). Además cada pixel será representado por un determinado número de bits de acuerdo a los niveles de cuantificación, digamos que se utilizan 8 bits usando modulación PCM. Con estos datos haríamos el siguiente cálculo:

$$Tasa\ necesaria = 720 * 576 \frac{pixeles}{cuadro} * 25 \frac{cuadros}{s} * 3\ señales * 8 = 248.83Mbps$$

Asumiendo que se modula el canal de bajada de 6 MHz en 64-QAM, la tasa de transferencia de datos nominal correspondiente (de información

transmitida, sin contar bits de control y otros) es de 27 *Mbps*. ¿Cómo será posible entonces transmitir a 248.83 *Mbps* ? Enumeraremos algunos de los recursos de MPEG-2 para reducir significativamente la tasa de transmisión:

1. Disminuir la resolución creando bloques de píxeles o macrobloques.
2. Evitar transmitir todos los píxeles de color conociendo la capacidad/limitación del ojo humano que es incapaz de percibir los detalles finos de color. Existen diferentes formatos de acuerdo a la resolución de color que se utilice (obsérvese la figura 2.2):
  - a) 4:4:4 Resolución completa de luminancia y color.
  - b) 4:2:2 Resolución completa de luminancia y la mitad de resolución de los componentes de croma. Cada dos píxeles se envían dos veces información de la señal de luminancia y solo una vez información de las señales Cr y Cb.
  - c) 4:2:0 Resolución completa de luminancia y un cuarto de resolución de los componentes de croma. Cada dos píxeles de una línea se envían dos veces información de la señal de luminancia y una vez información de una de solo una las señales de

crominancia, por ejemplo  $C_r$ , la siguiente línea tendrá información de  $C_b$ .

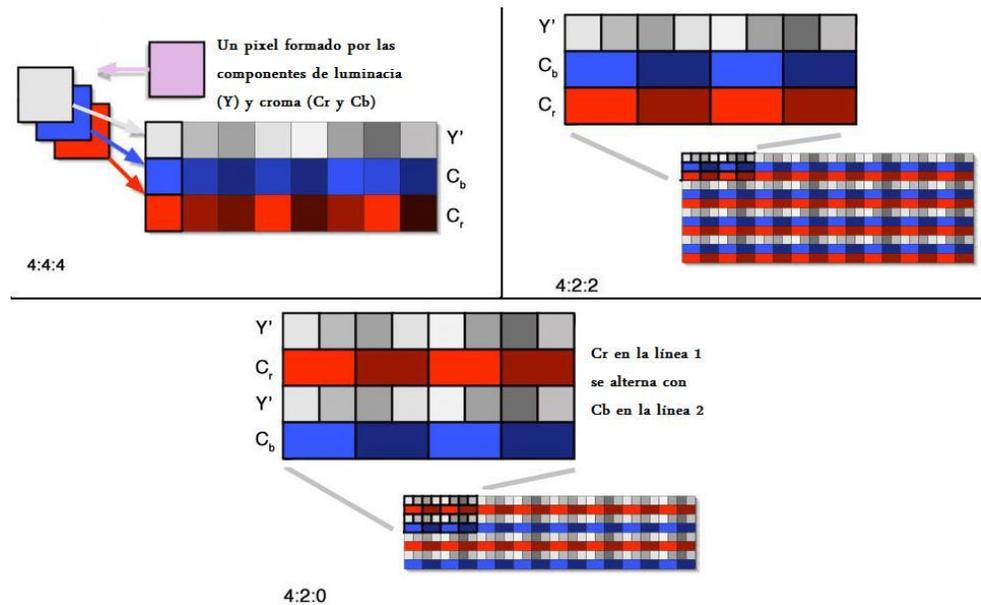


Figura 2.2 Formatos más utilizados de crominancia

Fuente: Referencia [5]. Imágenes juntas y editadas por los autores

3. El video no es otra cosa que imágenes en movimiento. Este estándar utiliza redundancia y predicción de imágenes al momento de armar el GOP que es una secuencia de tres tipos de imágenes:

I: Imagen intra. Es la imagen inicial. No se puede armar nada en su ausencia, por lo que cada GOP tiene al menos una imagen I. Es la más pesada.

P: Imagen predecible posterior. Imagen de predicción en base al movimiento de los objetos de las imágenes precedentes (I o P) más cercanas.

B: Imagen predecible bidireccional. Contiene diferencia de información de las imágenes precedentes o siguientes. Es la imagen menos pesada pero que tarda más tiempo en descomponer.

4. Cada macrobloque además será procesado con la DCT. Los coeficientes son cuantificados.

5. Finalmente se utiliza codificación Huffman.

Todas estas técnicas de compresión, en su conjunto, aumentan considerablemente la capacidad del canal. En el mundo analógico se enviaba un canal de televisión en el espacio de 6 MHz. La compresión digital permite en ese mismo ancho de banda, enviar dos, cuatro, cinco, seis, ocho canales, dependiendo de la tasa de transmisión de bits que necesite la resolución de dichos canales y también de la velocidad de datos que permita la modulación usada.

Illescas e Illescas (2010) mencionan dos variantes de las tramas MPEG-2 que viajan en sentido descendente. Una de ellas consta de 184 bytes

de información, más 1 byte de sincronización y 3 bytes como cabecera, a esto se le añadirá 16 bytes para la detección y corrección de errores, formando una trama total de 204 bytes. El otro tipo de trama está en función de la modulación. Si se usa 64 *QAM* serán 53.760 bits seguidos de 42 bits de sincronización, con 256 *QAM* 78.848 bits y luego son 40 bits los de sincronización [6].

El audio, por su parte, es codificado utilizando AC-3. Tal como lo hace MPEG-2 para el video, AC-3 no transmite el audio innecesario, en este caso, todo lo que no pueda ser percibido por el oído humano. La versión más común es utilizar 5 canales de ancho de banda completo (20 *Hz* – 20 *KHz*) y un canal exclusivo para los sonidos de baja frecuencia.

Como se ha descrito, ambos estándares, MPEG-2 y AC-3, comprimen la información, ocupando menos espacio, resultando en una transmisión más eficiente.

Al encoder se lo conoce también como EGT. Estos equipos usualmente son conectados en cascada, transportando cada uno tanto su propio flujo como el de los encoders anteriores. Loaiza (2011) señala que es posible conectar un máximo de 8 EGTs en cascada [4].

**Multiplexor:** Combina todas las salidas de las cascadas de codificadores para formar un gran flujo de transporte. Obsérvese un modelo de multiplexor en la figura 2.3.



Figura 2.3 Multiplexor Motorola TMX-2010

Fuente: Referencia [7]

**SEM:** Equipo que recibe el flujo MPEG-2 y realiza las siguientes funciones:

Codificar: Usando Reed-Salomon añadiendo bits de información para facilitar la detección de errores.

Aleatorizar: Redistribuye el orden de los bits para disminuir los errores de ráfaga.

Encriptar: Utiliza el estándar DES [6].

Modular: Los dos esquemas más utilizados son 64 y 256 QAM.

**Switch:** Su función es la de concentrar y distribuir. Se los usa para diferentes necesidades. Una sola antena parabólica capta algunos

canales, en ocasiones más de 20. Se necesita, en estos casos, un multiswitch que derive la señal a cada uno de los IRD. También, por ejemplo, cuando se reciben canales en alta definición, un switch se utiliza para concentrar todos los canales HD y enviarlo al SEM desde un solo puerto de salida ethernet.

**Combinador:** Este equipo junta o combina las señales de televisión de definición estándar y alta.

**Transmisor óptico:** A partir de una señal eléctrica modula la intensidad de una fuente de luz para que pueda ser transportada por la fibra de la red troncal.

Existen transmisores directamente y externamente modulados. Entre los primeros tenemos a los diodos láser Fabry-Perot y los DFB, los cuales son usualmente los más utilizados. Los transmisores externamente modulados presentan menores niveles de distorsión.

**Receptor óptico:** Este dispositivo realiza la conversión óptica a eléctrica de la señal recibida desde los transmisores de retorno de los nodos.

En ocasiones los módulos de transmisión y recepción óptica se encuentran en un solo chasis (ver figura 2.4). Ese equipo se encargaría de incluir la señal de televisión a la del CMTS, teniendo finalmente todo el flujo de bajada junto.



Figura 2.4 Chasis Omnistar GX2 de Motorola

Fuente: Referencia [8]

## 2.1.2 RED TRONCAL

Encargada de repartir la señal generada por el headend a todas las zonas de distribución de la red mediante enlaces de fibra óptica.

### 2.1.2.1 ELEMENTOS DE LA RED TRONCAL

**Fibra óptica:** Parte fundamental de la red troncal que permite la transmisión de señales ópticas. Más adelante, en este capítulo, se ahondará en las características de este medio de transmisión.

**Amplificadores ópticos:** Dispositivos que realizan la amplificación óptica directamente. Hay diversas maneras en la que se puede amplificar una señal de luz y según aquello se tiene el tipo de amplificador óptico:

**Amplificadores de fibra dopada:** Multiplexan la señal a amplificar con el bombeo de un láser de onda continua a una longitud de onda generalmente de 980 nm ó 1480 nm. El más común de estos amplificadores es el EDFA, donde son inyectados iones de Erblio para amplificar la señal.

**Amplificador óptico de semiconductor (SOA por sus siglas en inglés):** Un semiconductor proporciona el medio de ganancia. Tiene una estructura similar a la de un láser Fabry-Perot salvo por un recubrimiento anti reflectante en los extremos.

**Amplificadores Raman:** La amplificación se basa en el efecto Stimulated Raman Scattering (Dispersión estimulada Raman) según el cual una señal sería capaz de darle ganancia a otra de menor longitud de onda.

**Amplificadores ópticos paramétricos:** Usan amplificación paramétrica.

**Divisores ópticos:** Dividen la señal óptica en múltiples puertos de salida (2, 4, 8, 16, 32, 64). La potencia es también dividida.

**Nodo óptico:** Es el elemento que marca el fin de la red troncal y el comienzo de la red de distribución. Realiza la conversión eléctrico/óptico y viceversa. Preferiblemente debe ser instalado en el centro de la zona a la que servirá. Un nodo óptico consta de:

**Receptor óptico:** Recibe la señal óptica, la convierte a eléctrica, siendo su salida dividida a un número de ramas coaxiales que servirán a una porción del total de suscriptores.

**Transmisor óptico:** Encargado de realizar la conversión eléctrica a óptica en el camino de regreso hacia el headend. Los nodos ópticos pueden tener uno (combinando el canal de subida de todos los usuarios) o múltiples caminos de retorno (combinando una porción de usuarios), según el caso se requerirán uno o múltiples transmisores. Usando la segunda alternativa se elevan los costos (más fibra y transmisores, uno por cada camino de retorno), pero se logra mejorar la capacidad, obteniendo mayor ancho de banda efectiva del canal de subida.

**Diplexores:** Elementos que separan el espectro del upstream y downstream en el cable coaxial.

Obsérvese en la figura 2.5 la estructura general de la plataforma óptica en la red troncal, mientras en la figura 2.6 se encuentra uno de los modelos de nodo óptico utilizado en las redes HFC.

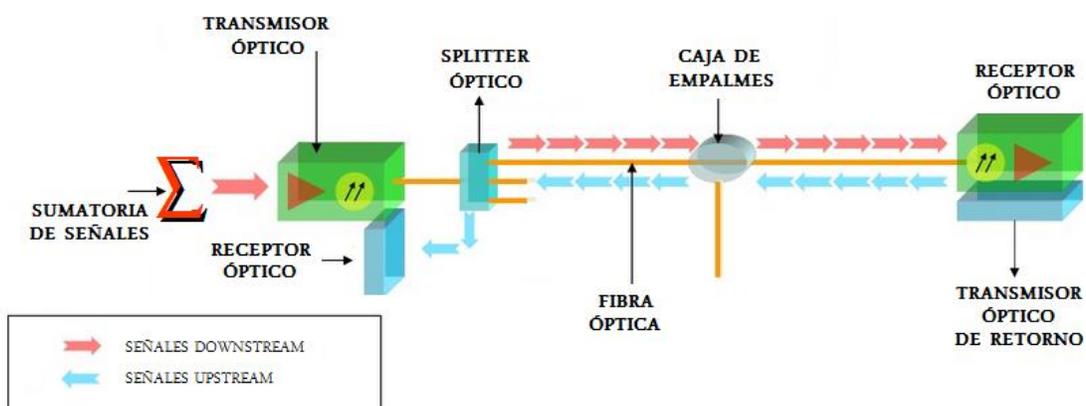


Figura 2.5 Esquema del sistema de fibra óptica en la red troncal

Fuente: Referencia [9]. Editada por los autores.



Figura 2.6 Nodo óptico Motorola SG2000

Fuente: Referencia [9]

### 2.1.3 RED DE DISTRIBUCIÓN

Distribuye señales en RF, por medio de cable coaxial. En este tramo la señal necesitará ser varias veces amplificada hasta llegar al tap, desde donde inicia la conexión de la acometida hacia el usuario.

#### 2.1.3.1 ELEMENTOS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

**1. Nodo óptico:** Marca el inicio de la red de distribución. Ya fue descrito entre los elementos de la red troncal ya que el nodo óptico es la interfaz entre ambas redes.

**2. Cable coaxial:** Presente desde el nodo óptico hasta el usuario. Posteriormente en este capítulo se profundiza en las características de este medio de transmisión

El diseño más común del cable coaxial usado en la red de distribución presenta:

- Un blindaje sólido de aluminio
- Espuma de polietileno que hace las veces de dieléctrico
- Un conductor central de aluminio revestido por cobre, lo que significa un menor peso y menos pérdidas de retorno que los cables de solo cobre.

- Una chaqueta protectora que recubre todo lo anterior, fabricada con polietileno, cuya misión es asegurar las mejores condiciones frente a la acción del ambiente, incluyendo la protección frente a los rayos ultravioletas.

Los cables en esta parte de la red son más grandes, ya que un mayor diámetro garantiza una menor atenuación. Usualmente se usa cable coaxial 750 y 500. El nombre está relacionado a las milésimas de pulgada que tiene el cable. Un cable coaxial 750, por ejemplo, tendrá 0.750 pulgadas de diámetro.

Estos cables además de transportar las señales en RF permiten la alimentación de los elementos activos de la red. Por la parte interna del conductor pasan las señales de baja frecuencia, como la alimentación eléctrica (60 Hz) y por la periferia del conductor las señales de alta frecuencia.

Usualmente el cable 750 se extiende desde los puertos coaxiales del nodo óptico hasta el primer amplificador, y el cable 500 se extiende desde el primer amplificador hasta el tap del abonado.

**3. Amplificadores:** Dispositivos electrónicos activos (necesitan alimentación) que amplifican la señal para que pueda ser llevada a sitios lejanos.

Además de los módulos que amplifican la señal, un amplificador se compone de:

**Diplexor:** Hace las veces de filtro, separando las señales de subida y bajada.

**Ecualizador:** Permite alinear los valores de operación, compensando las pérdidas del cable a distintas frecuencias. La respuesta de frecuencia a la salida del ecualizador es aproximadamente plana.

**Pads:** Para encontrar el nivel de operación óptimo en ocasiones es necesario atenuar la señal, de esta tarea se encargan los pads. Una ganancia excesiva podría aumentar considerablemente los niveles de ruido o las distorsiones.

**Slope (pendiente):** La atenuación es proporcional a la frecuencia, por lo que el amplificador necesita darle mayor ganancia a los canales más altos, de esta tarea se encarga esta parte del circuito.

Todos estos componentes permiten al amplificador adecuar la señal de salida. En la figura 2.7 se contempla la variación de la función de transferencia de la señal al pasar por cada etapa del amplificador.

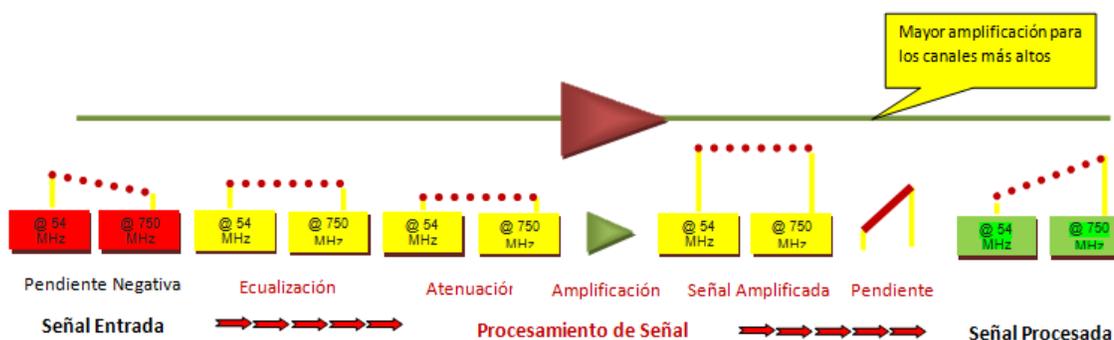


Figura 2.7 Comportamiento de la señal durante varias etapas del amplificador

Fuente: Referencia [9]. Editada por los autores.

Según los módulos de amplificación dividimos los amplificadores en:

**A. Amplificadores de distribución:** Son los más usados en las actuales redes HFC. Poseen de dos a cuatro módulos de amplificación cuya salida puede ser ajustada independientemente. Ver la figura 2.8.

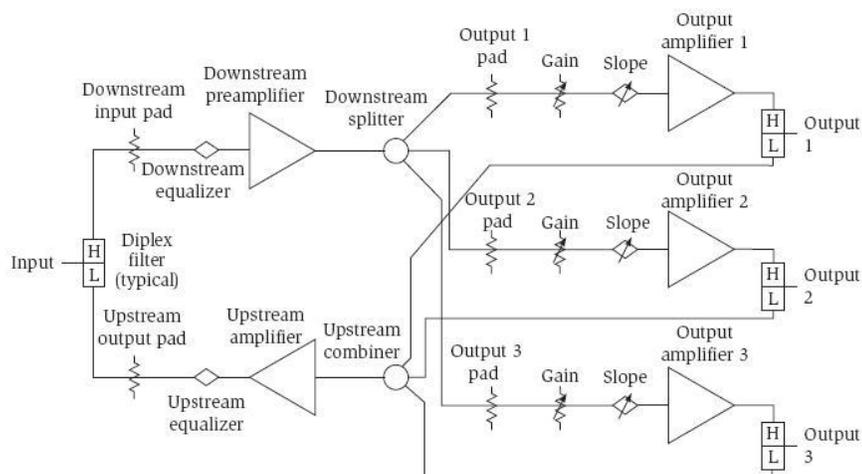


Figura 2.8 Configuración típica de un amplificador de distribución

Fuente: Referencia [10]

Ejemplos de estos amplificadores que encontramos en la práctica:

**Bridge Trunk:** Tiene dos entradas, una para el voltaje AC. Dispone tres o cuatro módulos de amplificación.

**Mini-bridger:** Posee tres puertos de salida, de los cuales únicamente se utilizan dos.

**MBV3:** Amplificador minibridger que sí utiliza las tres salidas RF.

**B. Extensores de línea:** Solo tiene un módulo de amplificación (una salida). Permite llegar a más taps que solo usando amplificadores de distribución. El número de extensores de línea en cascada está limitado por el nivel de distorsión que provoquen. Ver la figura 2.9.

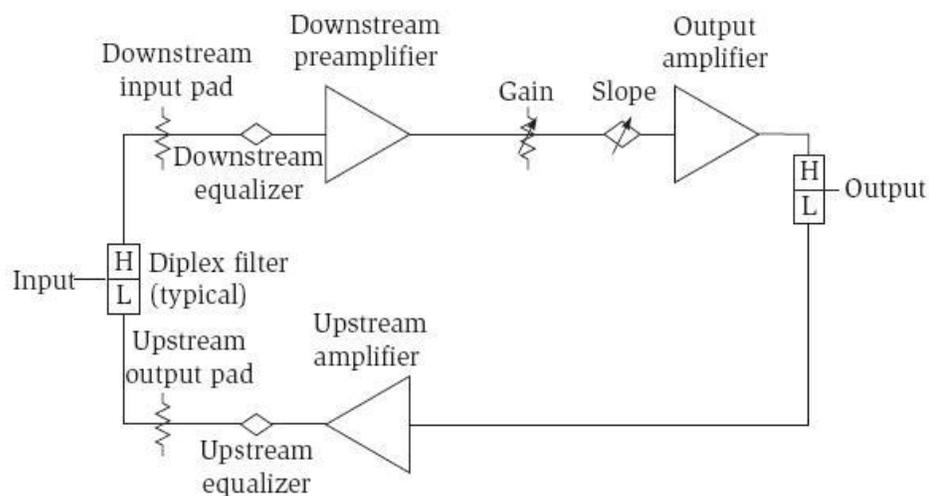


Figura 2.9 Configuración típica de un extensor de línea

Fuente: Referencia [10]

### **Algunas consideraciones de los amplificadores:**

Los fabricantes especifican parámetros como: Potencia mínima de entrada, ganancia de bajada y de retorno, pendiente, entre otros.

En el upstream, un solo módulo es suficiente. Las señales son combinadas pasivamente y alimentadas al amplificador.

Existen variaciones en las pérdidas por temperatura o tiempo. Los fabricantes ofrecen dos alternativas para contrarrestarlas:

**1. Compensadores de temperatura:** Se ajusta la ganancia aproximando las pérdidas por temperatura.

**2. Automatic Gain Control (AGC) o Automatic Slope Control (ASC):** Controladores de ganancia o pendiente automática. El AGC censa una señal a la salida, según la cual obtiene un valor DC que comanda la ganancia, todo esto para que el nivel a la salida sea constante, independientemente de las variaciones en las pérdidas. El ASC censa la amplitud de dos señales para además de la ganancia, controlar la pendiente entre ellas, buscando un mismo nivel de ambas señales en el puerto de salida.

**4. Acoplador:** Elemento pasivo (no necesita ser energizado) que posee una entrada y dos salidas RF. Una salida conserva casi la misma potencia de la señal de entrada, mientras la otra es atenuada. La numeración de los acopladores está en función de la atenuación en *dB* de la salida atenuada.

**5. Splitter o divisor:** Elemento pasivo que divide una señal de entrada a múltiples puertos de salida. La potencia es también dividida. La pérdida en los splitters es plana, porque no está en función de la frecuencia, aunque aumenta si esta es o muy alta o muy baja.

**6. Tap:** Se puede decir que es una combinación de los dos elementos anteriores. Los taps desvían una porción de la señal de entrada y luego la dividen, creando las acometidas de los consumidores, es por tanto la interfaz entre la red de distribución y la acometida.

A un tap lo distingue dos cosas: Su número de salidas y la atenuación en cada una de ellas. Los taps pueden tener 2, 4 u 8 salidas atenuadas y la atenuación puede ser de 4, 8, 11, 14, 17, 20, 23 ó 26 *dB*.

Al tap que no cumple con la función de acoplador (brindar una salida casi sin pérdida) y solo tiene las salidas atenuadas se lo conoce como tap terminal. En las consideraciones de diseño se intenta que a la salida

de los taps el nivel de la señal downstream sea más o menos constante. De esto depende la elección del valor del tap.

Sarabia (2009) indica que al agregar a la red un tap, splitter o acoplador, la atenuación de la señal en sus puertos de salida es de 3.5 a 4 *dB* aproximadamente. A este fenómeno se lo conoce como pérdida de inserción o de paso [11].

**7. Fuente de alimentación:** Encargada de proveer energía a los elementos activos de la red. Loaiza (2011), en su tesis de pregrado, señala que este equipo consta de tres módulos [4]:

**Módulo transformador:** Toma los 120 voltios AC del suministro eléctrico, convirtiéndolo en una onda semi-cuadrada entre 60 y 90 voltios AC a la salida.

**Módulo inversor:** Su función es la de transformar la corriente continua del banco de baterías a corriente alterna que usa el módulo transformador cuando se produce un corte eléctrico.

**Banco de baterías:** Dos bancos de 3 baterías, capaces de proveer energía por 8 horas, en condiciones normales, luego de un corte.

**8. RPI:** Elemento pasivo que inserta al cable coaxial la energía de la fuente de alimentación.

## 2.1.4 ACOMETIDA

Porción de la red que va desde los puertos de salida de los taps hasta los equipos finales de los usuarios.

### 2.1.4.1 ELEMENTOS DE LA ACOMETIDA

**Tap:** Es el elemento interfaz entre la red de distribución y la acometida.

Ya fue descrito anteriormente.

**Cable coaxial:** El cable en la acometida está formado típicamente por un conductor central de acero bañado en cobre, espuma dieléctrica, un blindaje formado de al menos una lámina de aluminio y una malla trenzada también de aluminio, y la cubierta protectora, por lo general de PVC o polietileno. Véase la figura 2.10.

Opcionalmente existen cables que presentan mayor blindaje, envolturas con diferentes grados de resistencia al sol y al fuego, cables con mayor resistencia al agua en caso del daño de la chaqueta protectora, otros que tienen mallado de cobre o su dieléctrico es sólido y no de espuma. Para elegir el adecuado se tendrá que evaluar, entre otras cosas, la aplicación y el costo.

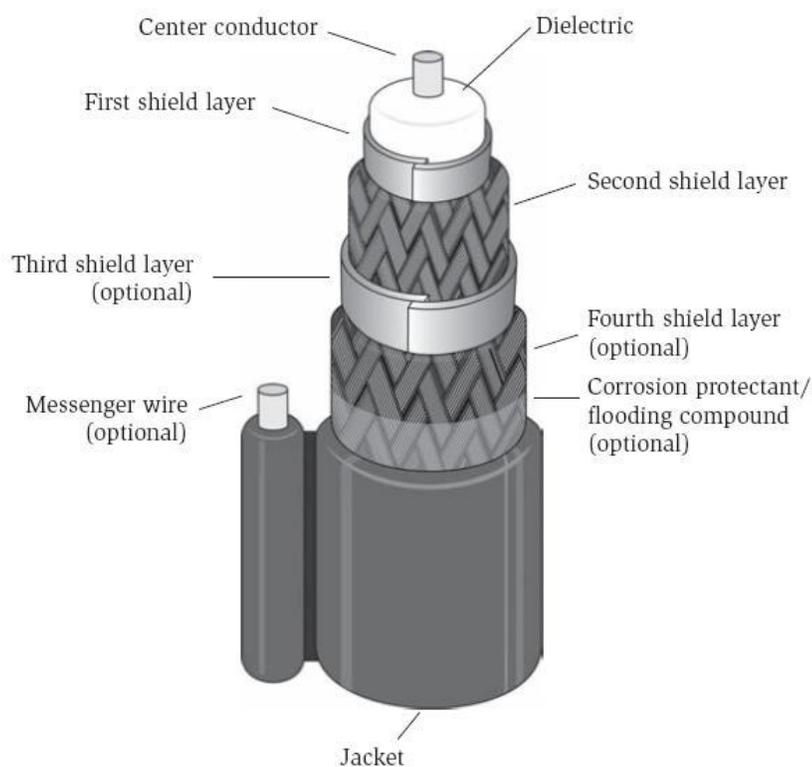


Figura 2.10 Construcción típica de un cable coaxial de la acometida

Fuente: Referencia [10]

Hay diferentes cables para usar en la acometida, pero los más comunes son el RG6 y RG11. Se tiene como norma utilizar el primero para acometida de casas o instalaciones individuales y el segundo para acometida de edificios o conjuntos residenciales debido a que el cable presenta menor atenuación y la señal necesita distribuirse a una mayor cantidad de terminales que en una casa.

Como en todo cable coaxial la señal sufrirá mayor atenuación mientras aumente la frecuencia. En la figura 2.11 se puede visualizar una aproximación de las pérdidas a diferentes frecuencias de cuatro de los distintos cables usados en la acometida. Es necesario recalcar que estos valores no son estáticos y pueden variar según la temperatura.

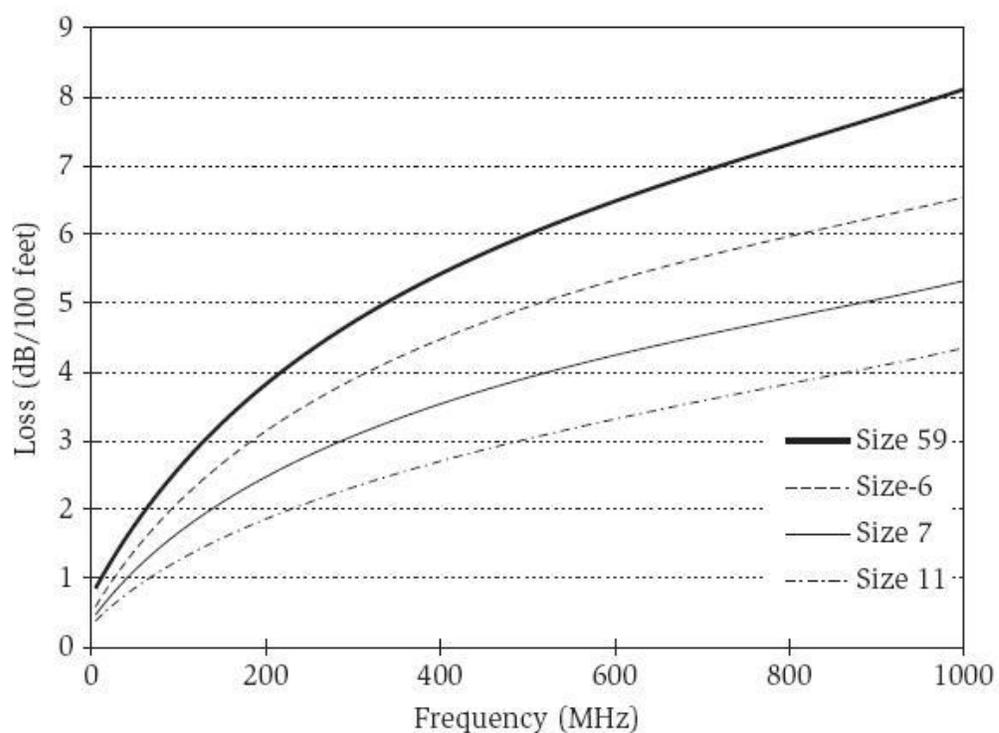


Figura 2.11 Pérdida de cables de la acometida versus frecuencia

Fuente: Referencia [10]

### 2.1.5 EQUIPOS TERMINALES

Aquellos dispositivos que necesitan ser instalados donde el cliente requiera el servicio y sin los cuales no se podría acceder al mismo.

**Módem de datos o Cable módem:** Modulador/demodulador instalado donde el abonado para poder proveer el servicio de internet sobre una red HFC. Posee un puerto RF que permite la conexión con el cable coaxial RG6 y un puerto RJ45 que se conectará a la PC.

**Módem de telefonía:** En el canal de bajada este equipo se encarga de recibir la señal digital, demodularla, descriptarla y convertirla en analógica para el teléfono. En el sentido ascendente hace lo contrario, digitaliza la señal analógica que recibe del teléfono, la encripta y la modula ubicándola en la porción del espectro asignado.

La empresa Telefónica en su *Manual de Telecomunicaciones* señala que el módem permitirá la asignación dinámica de segmentos y frecuencias en función de su ocupación y el nivel de ruido detectado. Podrá además ser configurable para adaptarse a las diversas arquitecturas de red según las densidades y penetraciones esperadas en cada zona [12].

Una de las operadoras locales de la ciudad de Guayaquil, así como otras operadoras de cable, utiliza el MTA para brindar el acceso al servicio de telefonía a los usuarios. El MTA es un cable módem y un adaptador de voz sobre IP incluido en el mismo equipo. Tal cual el cable módem posee un puerto RF y otro RJ45, pero además consta de un puerto RJ11 para que pueda ser conectado a un teléfono.

**Set-top-box:** Recibe la señal digital de la red codificada en MPEG-2, la demodula, decodifica y vuelve a modular para que pueda ser visualizada por los abonados en el canal que ha ofertado el operador. Así mismo es capaz de enviar información de regreso hacia el headend por el canal de subida.

Los decodificadores analógicos irán desapareciendo. La progresiva digitalización es inevitable. Los set-top-boxes digitales son más económicos, con códigos más seguros y el costo de añadir una grabadora de video digital es mucho menor.

Estos equipos soportarán entre otros servicios: Televisión codificada, pago por ver, video bajo demanda, radio, guías interactivas, telecompra, telebanco, videojuegos y transmisión de datos.

## 2.2 MEDIOS DE TRANSMISIÓN

La fibra óptica y el cable coaxial, son quienes dan el nombre a las redes HFC. Se describirá en esta parte del capítulo características propias de cada medio de transmisión, que son necesarias conocer porque son capaces de afectar tanto al funcionamiento como al diseño de la red.

### 2.2.1 FIBRA ÓPTICA

El ancho de banda, los niveles de operación, el número de elementos en cascada, el ruido, las distorsiones, todos estos parámetros fueron limitantes de la red pura de coaxial. La incursión de la fibra óptica a las redes de televisión significó nuevos alcances.

La fibra es un hilo muy fino, un poco más grueso que un cabello humano, de vidrio o plástico que permite enviar pulsos de luz, que representa la información, desde un extremo hacia el otro de la misma.

#### **Tipos de fibra**

Según los modos de propagación la fibra puede ser:

**Multimodo:** Cuando el haz de luz llega a través de varios caminos al extremo de la fibra. Una fuente luminosa emite luz en muchos ángulos en relación al centro de la fibra. El ángulo en el que los rayos de luz entran en la fibra y los principios ópticos de reflexión y refracción, determinan cómo se irán dibujando los varios modos o caminos a lo largo de la fibra.

**Monomodo:** Cuando el tamaño del diámetro del núcleo de la fibra se reduce, llegará un momento donde se transmita únicamente el modo fundamental  $LP_{01}$ , es decir, los haces de luz viajan por un solo camino, paralelo al eje, para llegar al otro extremo. A este tipo de fibra se la conoce como monomodo. Obsérvese los tipos de fibra en la figura 2.12.

La fibra multimodo tiene como ventaja la posibilidad de utilizar mayor potencia óptica y diseño de transmisores y receptores más sencillos. Sin embargo, presenta el problema de la dispersión modal, que es el retardo entre sus distintos modos, por lo que 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.

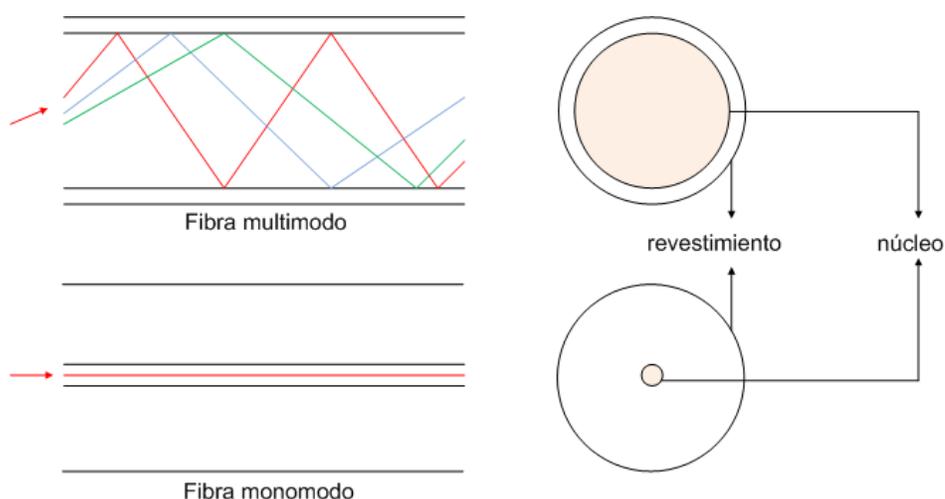


Figura 2.12 Tipos y estructura de la fibra óptica

Fuente: Elaborado por los autores

## Estructura de la fibra monomodo

La estructura de una fibra monomodo es la siguiente:

**Núcleo:** Un filamento muy fino de vidrio ubicado en el centro de la fibra.

Su diámetro fluctúa entre los 3 y 10  $\mu\text{m}$ .

**Recubrimiento:** Cubre al núcleo y tiene un menor índice de refracción, lo que permite que los haces de luz viajen casi en su totalidad a través del núcleo. Su diámetro varía entre los 50 y 125  $\mu\text{m}$ .

**Revestimiento:** Puede alcanzar un diámetro de 1000  $\mu\text{m}$ . Su función es proteger al núcleo del ambiente (impurezas, humedad), reducir las pérdidas por dispersión y añadir resistencia mecánica a la fibra. Esta cubierta tiene por lo menos diez veces el tamaño del núcleo y generalmente tiene algún color para facilitar la identificación.

La estructura de la fibra multimodo y monomodo está representada en la figura 2.12.

La fibra monomodo puede tener variantes en su construcción, pero la más generalizada consiste en un núcleo de 8.3  $\mu\text{m}$  de diámetro, revestimiento extendido hasta los 125  $\mu\text{m}$ , alcanzando junto al recubrimiento unos 250  $\mu\text{m}$  de diámetro.

El sector de normalización de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T) en algunas de las recomendaciones de la serie G: *Sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales*, recoge las características para diversas configuraciones de la fibra monomodo. La tabla 2.2 muestra las recomendaciones de la UIT-T sobre esta temática.

<b>Recomendación</b>	<b>Nombre</b>
G.652	Características de las fibras y cables ópticos monomodo
G.653	Características de los cables y fibras ópticas monomodo con dispersión desplazada
G.654	Características de los cables de fibra óptica monomodo con corte desplazado
G.655	Características de fibras y cables ópticos monomodo con dispersión desplazada no nula
G.657	Características de las fibras y cables ópticos monomodo insensibles a la pérdida por flexión para la red de acceso

Tabla 2.2 Recomendaciones de la UIT-T referentes a la fibra monomodo.  
Fuente: Referencia [13]. Tabla elaborada por los autores.

En el análisis o diseño de una red HFC se deberá tomar en cuenta el tipo de fibra que se está utilizando, ya que cada uno puede variar el efecto de algunos fenómenos propios de la fibra como la dispersión cromática.

## Velocidad de propagación

La velocidad a la que se propaga la señal. La velocidad de propagación está en función del índice de refracción, parámetro análogo a la constante del dieléctrico en el cable. Este índice varía de material a material y no permite que la señal se propague a la velocidad de la luz. La velocidad de propagación en la fibra puede encontrarse con la siguiente relación:

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.1)$$

donde:

$$c = \text{Velocidad de la luz } (3 \times 10^8 \text{ m/s})$$

Se tiene que mencionar que a diferencia de la constante dieléctrica del cable, el índice de refracción y por lo tanto la velocidad de propagación, varía ligeramente en función de la longitud de onda.

## Longitud de onda

Es la distancia que existe entre dos puntos en un mismo estado de oscilación, es decir, donde la forma de la onda se repite. Cada valor de frecuencia tiene cierta longitud de onda asociada. Cuando se utiliza fibra óptica se prefiere utilizar como referencia la longitud de onda ( $\lambda$ ).

Es importante conocer que en la fibra existen tres ventanas de transmisión: La primera a 850 nm, la segunda a 1310 nm y la última a 1550 nm y según cual se utilice se tendrán diferentes valores de atenuación. En el downstream se utilizará segunda y tercera ventana. Para el upstream se utilizará la segunda ventana principalmente.

### **Atenuación**

Es la medida de la pérdida de la señal a través de un componente, circuito o medio de transmisión. Se expresa generalmente en decibel por unidad de longitud ( $dB/Km$ ). En el caso de la fibra existen diversas causas como:

**Absorción:** Mhalke y Gössing (1993) la definen como la atenuación de la luz que viaja a través de la fibra debido a metales de transición como el hierro, cobre, cobalto, cromo, níquel y especialmente por el agua en forma de iones OH [14].

**Scattering (esparcimiento):** Fenómeno en el cual parte de la energía es transferida a las impurezas del material y luego retransmitida en diferentes direcciones o en la misma dirección con diferentes retrasos, conduciendo a pérdida de la señal en la onda transmitida. Esto se debe a pequeñas irregularidades de la fibra desde el proceso de fabricación.

**Deformación mecánica:** Fenómenos como las curvaturas en la fibra, que facilitan que los haces de luz se escapen del núcleo y no se reflejen totalmente.

La atenuación en la fibra presenta valores muchos menores que los del cable. Por lo que la migración al uso de este medio en la red troncal permitió disminuir las cascadas de amplificadores.

La atenuación, en la fibra y cobre, es uno de los factores que impide transmitir a la tasa máxima de bits/seg.

### **2.2.2 CABLE COAXIAL**

La construcción puede variar de acuerdo a su aplicación, como se mostró en la descripción del cable coaxial 750 ó RG6 anteriormente. En esta parte del capítulo se describirán otras particularidades de interés.

#### **Impedancia característica**

Una medida relacionada con la capacitancia e inductancia por unidad de longitud del cable. La impedancia característica de las redes HFC es de  $75\Omega$ . Es importante que todos los elementos de la red, incluido el cable coaxial, tengan este valor de impedancia. La discordancia de impedancias

entre dos elementos lo que crea son ondas reflejadas, disminuyendo el rendimiento de la red.

### **Atenuación**

Como se mencionó, es una medida de la pérdida de la señal en el medio de transmisión. En el cable coaxial se produce por: Mal blindaje, absorción de la señal en el dieléctrico, reflexión de la señal por impedancias desiguales o por pérdidas resistivas en los conductores del cable.

La fórmula general para encontrar la atenuación por pérdidas del cable, que en la práctica es la causa más importante, es:

$$\alpha = 4.344 \left( \frac{R}{Z_o} \right) + 2.774 F_p \sqrt{\epsilon} f \quad [10] \quad (2.2)$$

donde:

$\alpha$  = Atenuación del cable en dB/100ft.

$R$  = Resistencia óhmica por 100 pies del conductor.

$Z_o$  = Impedancia característica

$F_p$  = Factor de pérdida del dieléctrico

$\epsilon$  = Constante dieléctrica

$f$  = frecuencia en *MHz*.

A través de la fórmula, más que para cálculos, se pretende mostrar que la atenuación es directamente proporcional a la frecuencia, lo cual representa un detalle de importante consideración en el diseño de la red HFC. Los fabricantes se encargan de proporcionar los valores de atenuación que presenta el cable a diferentes frecuencias.

Así también es directamente proporcional a la constante del dieléctrico y a la resistencia óhmica, la cual crece mientras decrece el diámetro del cable.

La atenuación además se verá afectada por la temperatura.

### **Velocidad de propagación**

Simplemente la velocidad a la que se propaga la señal en el cable. Está en función directa con la constante del dieléctrico ( $\epsilon \geq 1$ ).

La velocidad de propagación relativa ( $V_p$ ), por otro lado, es la relación entre la velocidad en la que se propaga la señal y su velocidad en el espacio libre. Puede ser encontrada con esta fórmula:

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2.3)$$

### **Return loss (pérdida de retorno)**

Es la relación que existe entre la potencia incidente y la potencia reflejada en el cable, producto del cambio de impedancia del cable o de las

terminaciones del mismo. Podemos imaginarnos que una señal viaja en la dirección deseada, mientras otra se origina en dirección opuesta. Estas señales se van a superponer, en diferentes puntos a lo largo del cable las dos señales se suman o cancelan, lo que significa posible pérdida de información. Por eso es fundamental mantener una impedancia constante ( $75\Omega$ ) a lo largo de la red, para que las reflexiones sean mínimas.

En la tabla 2.3 se puede apreciar cuanto cambia la pérdida de retorno y el porcentaje de señal reflejada en relación con la precisión de las terminaciones a las que se conecta el coaxial.

Precisión de la terminación	Terminación de $75\Omega$		Pérdida de retorno	Reflexión de la señal
	Límite inferior	Límite superior		
+/- 0.1 %	74.925	75.075	66.0 dB	0.05 %
+/- 1.0 %	74.26	75.75	46.1 dB	0.5 %
+/- 2.0 %	73.53	76.50	40.1 dB	1.0 %
+/- 5.0 %	71.43	78.75	32.3 dB	2.4 %
+/- 10.0 %	68.18	82.50	26.4 dB	4.8 %
+/- 20.0 %	62.50	90.00	20.8 dB	9.1 %
+/- 30.0 %	57.69	97.50	17.7 dB	13.0 %
+/- 40.0 %	53.57	105.00	15.6 dB	16.7 %
+/- 50.0 %	50.00	112.50	14.0 dB	20.0 %

Tabla 2.3 Pérdida de retorno por las terminaciones.

Fuente: Valores de la referencia [15]. Tabla elaborada por los autores.

Cuando las reflexiones son medidas en todo el rango de frecuencias donde va a operar el sistema, el resultado se lo conoce como Pérdida de Retorno Estructural (SRL). Se recomienda, en el peor de los casos, un SRL entre 26 y 30 *dB* para el coaxial de la red de distribución y 20 *dB* para el de la acometida. La impedancia característica del cable de distribución no debería superar los  $\pm 2-3$  ohmios de variación y el de la acometida como máximo  $\pm 5$  ohmios.

## **2.3 BIDIRECCIONALIDAD**

Es una característica de las actuales redes HFC. Se continuará mencionando atribuciones propias del downstream y upstream.

### **2.3.1 CANAL DE BAJADA. DOWNSTREAM. SEÑAL DESCENDENTE**

Se refiere al flujo de señal que viaja desde el headend hasta el terminal del usuario. La fuente de la señal del downstream solo es una, la cabecera. Esta señal, a lo largo de la red, será dividida múltiples veces para llegar a cada terminal.

El límite inferior del espectro suele ser 54 *MHz* y el superior estar entre los 550 y 1000 *MHz*. Una de las operadoras locales, por ejemplo, tiene como límites 54 y 864 *MHz*. El límite superior está limitado principalmente por los

componentes de la red. La tecnología de los amplificadores fue una barrera por mucho tiempo. En la actualidad existen amplificadores comerciales hasta de 750, 870 y 1000 *MHz*, aunque la mayoría de cable módems y set-top-boxes no sintonizan más allá de los 864 *MHz*.

Todo este ancho de banda es dividido en canales, cada uno de 6 *MHz* (el ancho de banda usado en la transmisión de un canal analógico en el estándar NTSC). En cada canal viajará bien televisión o bien los servicios de internet y telefonía. El uso de señales digitales permite transmitir más de un canal de televisión en los mismos 6 *MHz*. El número de canales, como mencionamos, depende de la velocidad de transmisión necesaria y la tasa de datos que permita la modulación usada, pero por lo general, agrupan 6 canales de definición estándar y 2 de alta definición en dicho ancho de banda.

El canal de bajada utiliza generalmente como modulación 64 ó 256 QAM dependiendo de la tolerancia a errores del servicio y las condiciones del canal.

En el downstream se busca que la ganancia desde la salida de un amplificador hasta la salida del siguiente sea 0 *dB*. Significa que se

equilibran las pérdidas por la línea del cable y los componentes, con la ganancia que se le da a los amplificadores.

El nivel de señal que reciben todas las casas es casi el mismo, variando en un pequeño rango.

### **2.3.2 CANAL DE SUBIDA. UPSTREAM. SEÑAL ASCENDENTE**

Se refiere al flujo de señal que viaja hacia el headend. Cada terminal del usuario es una fuente de señal para el upstream. Estas señales son combinadas en cada nodo en su camino a la cabecera.

En este sentido los problemas de ruido e interferencia son mayores. En vista de tener menor pérdida por atenuación, casi siempre las señales del upstream están por debajo de las del downstream. El borde inferior está limitado por los armónicos de la alimentación y además por el rango de operación de los amplificadores y algunos elementos pasivos como taps, splitters y acopladores. De esta manera, la frecuencia donde empieza el upstream es comúnmente 5 MHz. La banda usada para el upstream era desde los 5 a los 30 MHz, pero acercándose al año 2000, se incrementó para aumentar el ancho de banda disponible. Una de las operadoras locales tiene actualmente como límites del canal de subida 5 y 47 MHz.

En el upstream no existen canales fijos de 6 MHz, el ancho de banda varía entre los 200 KHz y 3.2 MHz, dependiendo del servicio. Aunque teóricamente las versiones 2.0 y 3.0 de DOCSIS permiten anchos de banda de hasta 6.4 MHz.

En este sentido el ancho de banda efectivo puede ser menor que el ancho de banda disponible. Por debajo se ve limitado por el ingreso de otras señales y por arriba por el group delay de los diplexores (la demora en el paso de aquella parte del espectro cerca de las frecuencias de corte de los filtros).

Para modular las señales de retorno se utiliza por lo general QPSK, 16 ó 64 QAM. Mientras QPSK es una modulación más robusta, menos susceptible al ruido, las modulaciones QAM son más eficientes, transmitiendo a mayores velocidades. Algunas redes son capaces de ajustar automáticamente la modulación de acuerdo a las condiciones del canal.

En sentido ascendente se busca que el nivel de señal que llega a un amplificador sea el mismo que llegue a la cabecera. La cabecera censa este nivel y es capaz de enviar una señal a cada terminal para que lo modifique si hace falta, así el nivel recibido sea el adecuado. A diferencia

con el downstream donde el nivel de la señal que recibía cada terminal era casi el mismo, el nivel al que se transmite difiere.

Es también común usar TDMA. Lo que significa que muchos terminales pueden transmitir en la misma frecuencia pero en diferentes espacios de tiempo, bajo el control del headend, específicamente del CMTS, quien va asignando ventanas de tiempo o slots a cada cable módem de acuerdo al tipo de servicio y prioridad.

## **CAPÍTULO 3**

### **DISEÑO DE LA RED HFC**

El objetivo de este capítulo es presentar al lector una guía para el diseño de redes HFC. La idea no es proponer un diseño ideal, porque creemos que no existe tal, sino más bien, comprender a profundidad cuales son los diversos factores que intervienen en un diseño, reconociendo que el mismo puede variar según diversos requerimientos y necesidades.

Si bien no se presenta un diseño ideal, sí se brindan recomendaciones generales a lo largo del capítulo.

Tal como en la ingeniería, diseñar es el arte de encontrar soluciones, gastando la menor cantidad de recursos, cumpliendo al mismo tiempo una serie de requisitos de orden técnico.

Consideramos que:

Todo diseño debe tener una etapa de planificación.

En cada diseño se deberá seleccionar los elementos que formarán parte de la red y la forma en la que irán interconectados.

La red deberá cumplir parámetros técnicos mínimos dictados por regulaciones y estándares internacionales y nacionales que garanticen su correcto funcionamiento.

Es importante asegurar una red con tasas de disponibilidad y confiabilidad suficientes para mantener la fidelidad de los usuarios.

Cumplir todos los requisitos anteriores asegurando el menor costo.

La estructura del capítulo es la de analizar cada uno de los mencionados factores, vislumbrando como se ve afectado el diseño por cada uno de ellos.

A pesar de subdividir el capítulo en diferentes secciones, cabe señalar que estas etapas están interrelacionadas entre sí. Por ejemplo, para terminar un diseño y armar finalmente un mapa de distribución, se necesita conocer el alcance que tendrá la red, para lo cual es vital una adecuada planificación (3.1), también es necesario conocer los elementos y la topología (3.2), los cuales deben cumplir ciertos parámetros técnicos de operación (3.3), todo lo anterior obedeciendo a un presupuesto que se debe de respetar (3.5).

Empecemos entonces discutiendo sobre la planificación.

### **3.1 PLANIFICACIÓN**

Posteriormente al diseño de un proyecto intervienen las fases de ejecución y finalmente de evaluación donde se juzga el resultado y se realizan ajustes. Cada una de estas etapas están enlazadas. Un diseño mediocre no traerá más que una red mediocre y una gran cantidad de ajustes. Para que esto no suceda es fundamental comenzar con un serio y profundo trabajo de planificación, un estudio preliminar que significará una base sólida para la futura red.

Lo primero en un diseño es determinar el lugar en donde se implementará la red. Se recopilará información sobre:

- **Características del lugar:** Extensión, número de habitantes, topografía, variaciones del clima y temperatura.
- **Normativas:** Desde un principio es necesario ubicar cuál es el marco regulatorio que influye en la implementación de una red HFC. Hay normas acerca de los parámetros de orden técnico y las hay sobre el despliegue físico de la red.

Podrían existir, por ejemplo, condiciones estatales y municipales a considerar, como la manera adecuada de etiquetar los elementos de la red, las tasas que deben cancelarse por el uso de ductos y/o postes, algún peso límite de los cables que irán sobre los postes, en caso de que la infraestructura se monte sobre ellos, entre otros.

En la ciudad de Guayaquil, por ejemplo, no puede obviarse el hecho de que los cables deben ser ubicados en ductos en las zonas regeneradas. La Muy Ilustre Municipalidad determina el espacio que le corresponde al operador tanto en los ductos como en los postes. Las tasas por el uso de los postes de luz deberán entregarse a la Empresa Eléctrica.

- **Situación actual de los servicios:** En el Ecuador la Superintendencia de Telecomunicaciones es el ente encargado de

vigilar, auditar, intervenir y controlar técnicamente la prestación de los servicios de telecomunicaciones, radiodifusión, televisión y el uso del espectro radioeléctrico. En su página web ofrece mes a mes una serie de estadísticas, entre ellas el número total de estaciones autorizadas y usuarios de los servicios de audio y video por suscripción que se resume en las tablas 3.1 y 3.2:

<b>N°</b>	<b>Servicios de audio y video por suscripción</b>	<b>N° de estaciones autorizadas</b>	<b>N° suscriptores</b>
1	Televisión codificada satelital	2	90,955
2	Televisión codificada terrestre	21	51,585
3	Televisión por cable	242	315,621
<b>Total suscriptores televisión pagada</b>		265	458,161

Tabla 3.1 Resumen del número de suscriptores servicios de audio y video

Fuente: Referencia [2]

<b>Estimación de la densidad de usuarios del servicio de televisión por suscripción</b>	
Población total del Ecuador (Censo 2010):	14,483,499
N° promedio de miembros del hogar:	4.2
N° de usuarios estimados del servicio de Televisión por Suscripción	1,924,276
Densidad de usuarios estimada de la televisión por suscripción en el Ecuador (Penetración del servicio)	13.3%

Tabla 3.2 Penetración del servicio de televisión por suscripción

Fuente: Referencia [2]

En lo que respecta al servicio de internet, los permisionarios presentan un número de 748,862 cuentas [16], y estiman un número de usuarios de 4,936,045, excluyendo a los usuarios de internet vía teléfono móvil (2,364,105). Con estos datos se calcula una penetración del servicio de internet del 34.08%.

Entre los principales proveedores de internet a través de redes HFC tenemos a Suratel con 133.864 cuentas y Ecuadortelecom S.A. con 87.212 cuentas [16].

En cuanto al servicio de telefonía fija encontramos un número total de abonados de 2,233,286 [17]. Tomando el número de miembros promedio en el hogar de la tabla 3.2 se estima un total de usuarios igual a 9,379,801 que equivale a una penetración del servicio de telefonía fija del 64.76%. La gran mayoría de abonados los cubre la Corporación Nacional de Telecomunicaciones CNT EP.

Entre los proveedores de telefonía fija a través de redes HFC tenemos a Setel S.A. con 45.612 abonados y Ecuadortelecom S.A. con 71.539 [17].

A partir de esta información, un rápido análisis llevaría a concluir que la penetración de los tres servicios tiene mucho por aumentar en

comparación con otros países, por lo tanto hay mucho espacio para que mi operadora entre a captar mercado. Sin embargo, se tiene que recordar dos factores que influyen estos resultados: Suscribirse a estas operadoras, considerando la realidad del país, es para muchos todavía un lujo y no una necesidad y el otro factor es que estos números excluyen la piratería. El factor costo se convierte en uno de los más importantes al momento de atraer al cliente y aumentar la penetración del servicio.

- **Competencia:** El producto que me permite ofrecer una red HFC, el servicio integrado o por separado de telefonía, internet y televisión, más allá de cualquier parámetro técnico, está atravesado por la oferta y la demanda. Obedece a las leyes del mercado. Es valioso que yo conozca cuáles son las diferentes operadoras, qué servicios brindan, en qué zonas y a qué precios.

El producto que yo ofrezca deberá tener algún añadido, algún plus que lo haga atractivo ante los potenciales usuarios, sea mayor velocidad de datos, mayor cobertura, diversidad en el servicio, exclusividad en programación o precios más atractivos para mencionar algunos de los factores.

- **Usuario:** Conocer a las personas y sus necesidades es otra de las aristas de la planificación. Si me preocupo por captar esta información, a través de diferentes métodos como las encuestas, se podrán realizar proyecciones de los potenciales usuarios.

El conocimiento del usuario y la competencia ayuda a la operadora a establecer estratégicamente las características de su servicio.

Posterior o paralelamente se realiza un proceso de **levantamiento** de información. Esta etapa consiste en la recopilación sistemática de las características de la zona donde se va a construir la red. Muñoz (2007) apunta que en esta etapa se recolectan datos como “*la localización exacta de los postes, el material de los mismos, las distancias interpostales, la ubicación del CRC (headend), la localización precisa de edificios, escuelas, hoteles, hospitales...*” [18]. Así también recomienda anotar cualquier otro recinto que pudiera requerir algún servicio de la red en un futuro.

En la figura 3.1 se observa el plano de una población en el proceso de levantamiento de información.

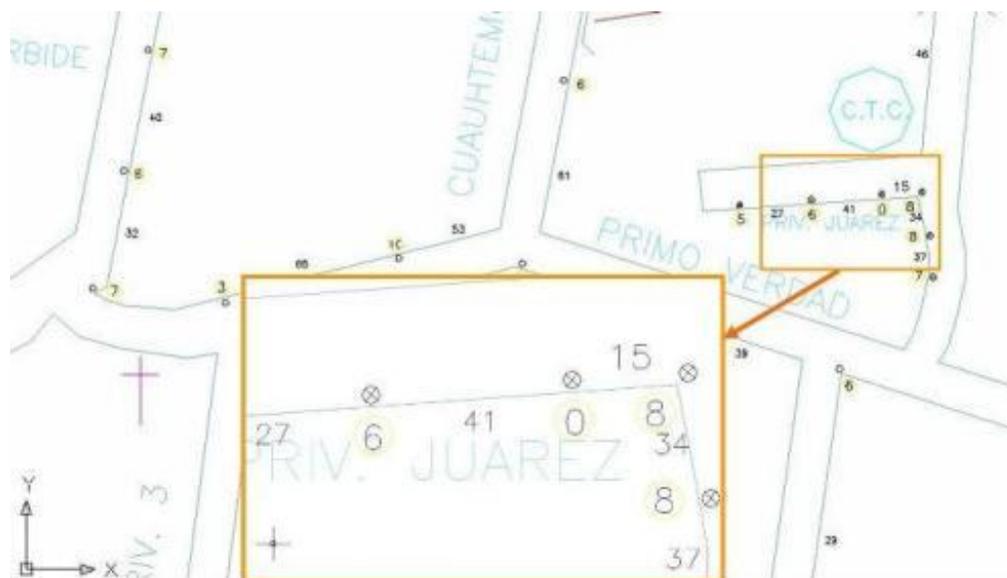


Figura 3.1 Fragmento de un levantamiento para el diseño de una red HFC

Fuente: Referencia [18]

Toda la información recogida es digitalizada y sirve de base para la fase de **segmentación**, la cual consiste en dividir toda el área a cubrir en un cierto número de zonas. Por cada zona se recomienda programar de 500 a 2000 viviendas. La señal será enviada a cada zona por fibra y distribuida por coaxial dentro de la misma. Los nodos ópticos, como se ha mencionado, son los encargados de convertir la señal de óptica a eléctrica y por lo general se extiende desde él cuatro ramificaciones coaxiales, cada una de ellas manejando entre unas 125 a 500 casas pasantes de acuerdo al diseño.

Cuando se realiza un diseño que sirva a menos casas por nodo, se pretende aumentar la capacidad del canal de cada usuario, debido a la creciente

demanda individual de ancho de banda. Un diseño que abarca mayor número de casas busca la reducción de equipos y así disminuir tanto los costos como los puntos de fallo de la red.

En la segmentación no se le puede dar la capacidad máxima de casas pasantes a cada nodo. Se le deberá brindar a la red la capacidad de expandirse, característica conocida como escalabilidad.

Buscando brindar un mejor servicio, la red deberá actualizarse a las nuevas demandas tanto de capacidad como de calidad. Previendo un mayor número de usuarios, la red deberá garantizar la posibilidad de ampliar su cobertura con facilidad y sin mayor repercusión a la estructura actual.

Cabe mencionar que la elaboración de un cronograma en la etapa de planificación, estableciendo fechas claras para toda la labor a realizar y su debido cumplimiento, permitirá evitar un innecesario desperdicio de recursos.

Concluyendo esta sección, la cantidad y calidad de la información recogida condicionan todo el diseño, lo que hace que esta etapa sea sumamente importante. Una floja planificación tendrá series repercusiones a mediano y/o largo plazo. El desconocimiento de alguna norma que limita la ubicación de algún elemento de la red, la medición incorrecta de distancias, la falsa

proyección de usuarios, una saturación temprana de los nodos, derivan en un rediseño, perdiendo la inversión de tiempo, esfuerzo, dinero, recursos.

Siguiendo con el recorrido de los factores que intervienen en el diseño, se discutirá sobre la topología de la red.

### **3.2 ELEMENTOS Y SU INTERCONEXIÓN**

En el capítulo anterior se conoció cuales son los elementos de una red HFC. Ahora nos encargaremos de conocer las diversas formas de interconectar dichos elementos, lo que se conoce como la topología de la red.

No existe una topología única ni mejor, la misma dependerá de las necesidades y decisiones que realice el operador, basándose en su presupuesto, la forma en la que pretende expandirse, recordando que los equipos escogidos y la red en sí deberán cumplir ciertos parámetros técnicos de operación.

Se mostrará a partir de ahora diferentes configuraciones en la red troncal, red de distribución y acometida, divisiones de la arquitectura tratadas en el capítulo anterior.

### 3.2.1 TOPOLOGÍA RED TRONCAL

Mencionaremos las formas en la que la fibra puede estar interconectada:

**Topología estrella:** Desde un punto en común son lanzados caminos separados hacia múltiples puntos. En este caso, el punto en común sería el headend y diversos caminos de fibra serían dirigidos a cada nodo óptico. Con esta arquitectura cada camino es independiente del otro, por lo que se tiene la posibilidad de enviar distinto contenido por cada ruta, además el daño de una fibra afectaría a los usuarios de ese nodo únicamente. Aunque, en la práctica, las múltiples fibras que alimentarán a diversos nodos, al salir del headend comparten el mismo cable, por lo que el daño de una de ellas, podría afectar a más usuarios que los de su nodo asociado. Obsérvese la figura 3.2.

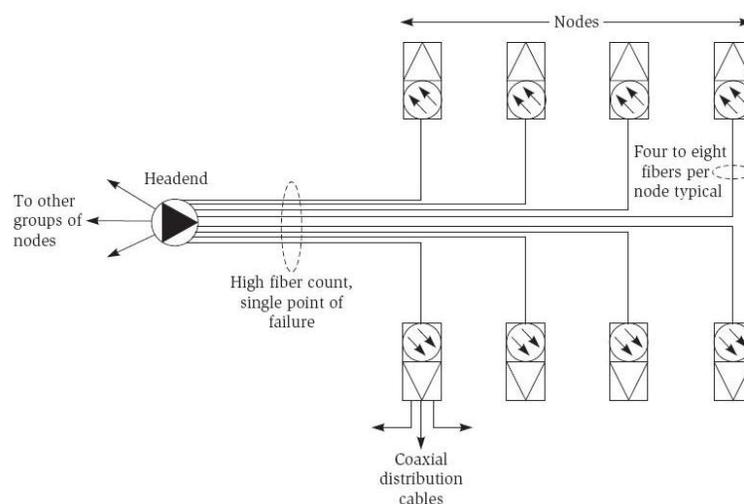


Figura 3.2 Topología Estrella

Fuente: Referencia [10]

**Topología anillo:** Se crean diversas rutas, arregladas en forma de anillo, entre un punto común y cada terminación, para este caso, entre la cabecera y los nodos. Con esta arquitectura la red troncal se convierte en redundante, quiere decir que de existir un corte en uno de los caminos, se tiene el(los) otro(s) que impide dejar sin servicio a los usuarios, aumentando la confiabilidad y disponibilidad del sistema.

Es posible tener un receptor por cada fibra que arriba al nodo y posteriormente un switch que seleccione el camino sin falla. Otra opción es colocar el switch antes y utilizar un único receptor.

Hay dos variedades de topología anillo:

**Anillo envolvente:** Se conserva la independencia entre caminos, pero aumentando considerablemente la cantidad de fibra. Véase la figura 3.3.

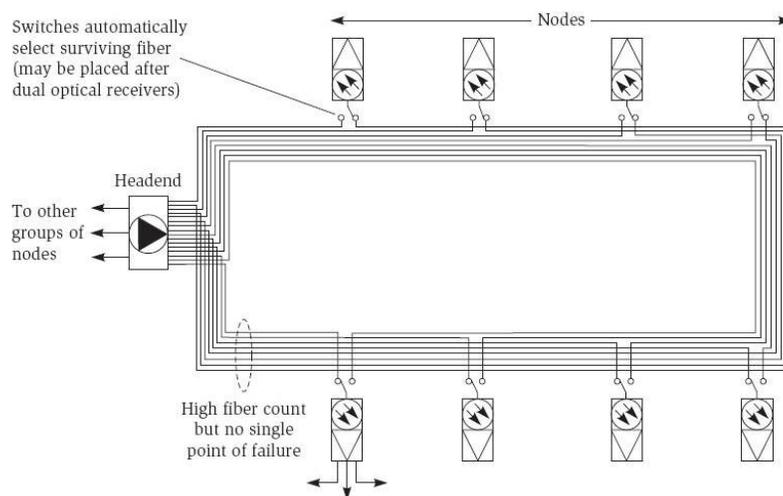


Figura 3.3 Topología Anillo Envolvente

Fuente: Referencia [10]

**Anillo compartido:** Tal como se contempla en la figura 3.4, se usan fibras separadas para enviar una señal común en sentido y en contra de las manecillas del reloj. Ahorra fibra y transmisores, pero está limitado a la distribución de un espectro común.

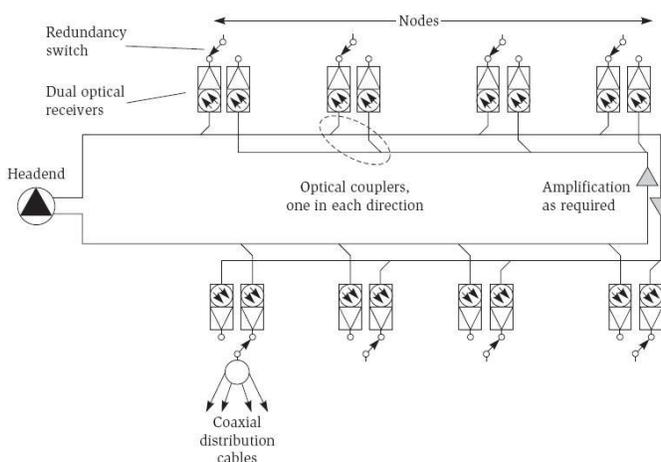


Figura 3.4 Topología Anillo Compartido

Fuente: Referencia [10]

Las distintas topologías pueden verse combinadas en diferentes arreglos de acuerdo a las necesidades del operador.

Podemos notar que en las figuras 3.2, 3.3 y 3.4 la fibra óptica es desplegada directamente del headend hacia los nodos ópticos. Sin embargo, cuando el número de usuarios es muy grande, la red troncal crece porque necesita tener mayor alcance. La señal del headend se dirige a unos nodos primarios que distribuyen a su vez la señal a unos nodos secundarios o también llamados nodos de potencia ya que amplifican la

señal, para recién desde los nodos secundarios dirigir la señal a los nodos ópticos descritos con anterioridad. En estos casos se subdivide la red troncal en primaria, secundaria y terciaria. En la figura 3.5 tenemos la topología de una red troncal de estas características.

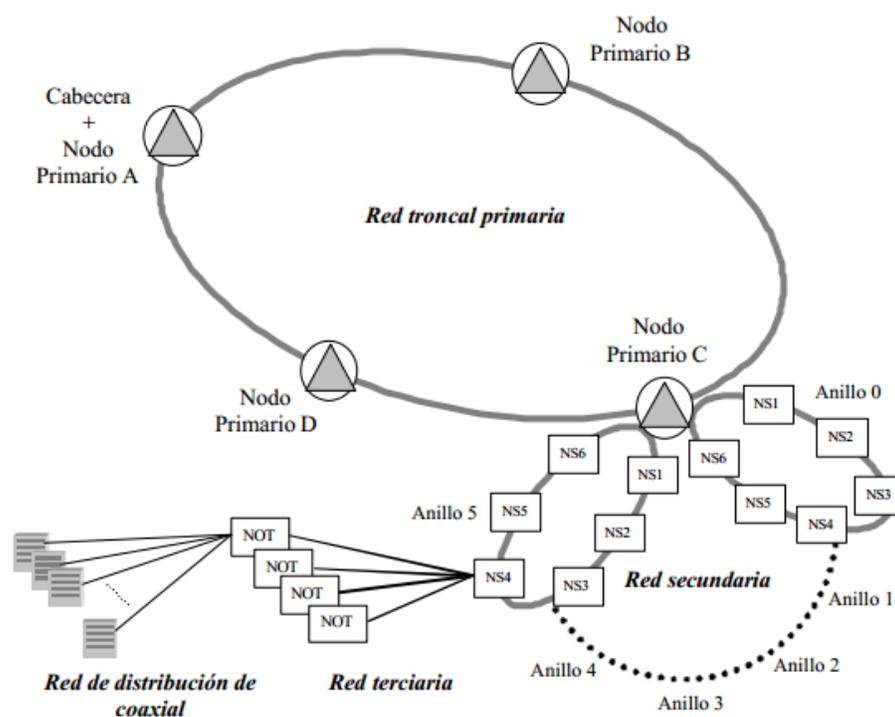


Figura 3.5 Topología de una red troncal de mayor tamaño

Fuente: Referencia [19]

La **red troncal primaria** tiene una topología de anillo redundante conectando la cabecera con los diferentes nodos primarios (HUBS).

En el camino hacia los nodos ópticos es posible tener redundancia de fibra, de equipos, de rutas o todas a la vez. La redundancia asegura mayor

fiabilidad, confiabilidad y disponibilidad en la red, puntos que serán tratados más adelante en este mismo capítulo.

En ciertas configuraciones de red los nodos primarios o hubs asumen ciertas funciones del headend, constan de servidores de video, internet y telefonía, insertan señales locales o realizan la conmutación de telefonía y datos.

Como ventaja descongestionarán al headend, ya que la mayoría de los requerimientos de la zona a la que sirve podrán ser respondidos por él mismo. Se tienen así mini centros de distribución o pequeñas cabeceras ubicadas en diferentes sectores de la red y unidas mediante anillos de fibra redundantes. Como contraste aumentará el número de equipos y espacio físico necesario. El costo de alquiler, mantenimiento y seguridad están del otro lado de la balanza al momento de evaluar lo más conveniente.

Cada nodo primario dará servicio a 4 ó 5 anillos secundarios, cada uno con la capacidad aproximada para servir entre 10000 y 12000 viviendas.

La **red troncal secundaria** también usa típicamente la topología de anillo redundante para unir un nodo primario con 5 ó 6 nodos secundarios (En la figura 3.5 aparecen como NS<sub>n</sub>). Cada nodo secundario está en la capacidad de dar servicio a unos 2000 hogares.

La **red troncal terciaria** une cada nodo secundario con, por lo general, cuatro nodos ópticos utilizando enlaces punto a punto (topología estrella sin redundancia) o nuevamente anillos redundantes. Cada nodo óptico realiza la conversión de la señal óptica a eléctrica cubriendo un área de alrededor 500 hogares, aproximadamente 125 por cada una de las 4 ramas de distribución coaxial que nacen a partir del nodo, aunque este número puede variar, como analizamos en líneas anteriores.

### 3.2.2 TOPOLOGÍA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

Generalmente se usa una topología tipo árbol. Como se observa en la figura 3.6, existe un tronco principal, y a medida que se llegan a los taps se van extendiendo ramificaciones hacia los usuarios.

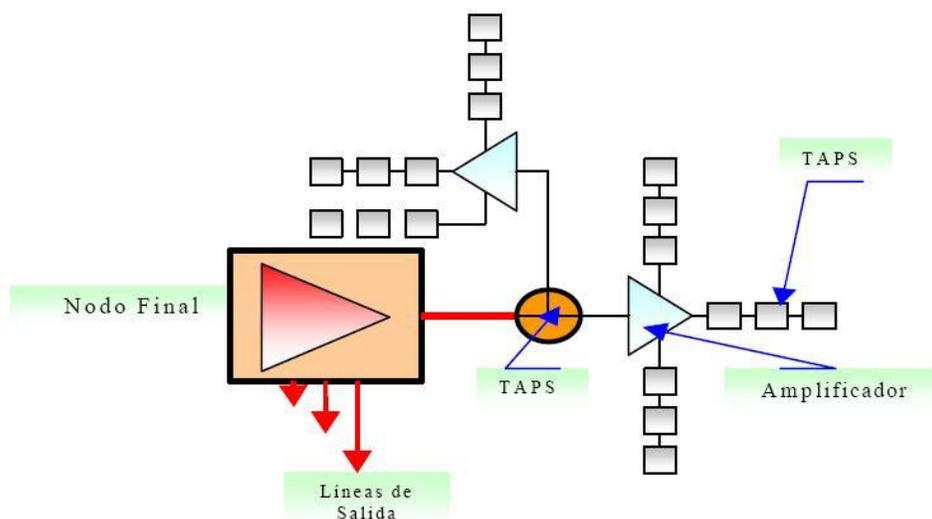


Figura 3.6 Topología red de distribución

Fuente: Referencia [12]

### 3.2.3 TOPOLOGÍA DE LA ACOMETIDA

Es posible utilizar topología estrella o árbol. En la primera de ellas, un cable coaxial diferente se lanza desde el tap a cada vivienda. La topología de árbol se usa, por ejemplo, cuando se tienen muchos departamentos por piso en un edificio, en cuyo caso se coloca un tap en cada planta del que parten las ramas coaxiales que dan servicio a los abonados. En ocasiones un mismo tap da servicio a más de una planta, pero la topología sigue siendo de árbol.

### 3.3 CUMPLIMIENTO DE PARÁMETROS TÉCNICOS

Pasamos a otro de los puntos fundamentales en un diseño, además uno de los objetivos del presente trabajo, el análisis de las características de orden técnico en el diseño y operación de las redes HFC.

En esta sección se realiza también un análisis del impacto de la temperatura y el uso de amplificadores en la relación  $C/N$  y  $E_b/N_o$ .

Para empezar señalaremos cuales estándares detallan parámetros de operación para el buen desempeño de las redes HFC con contenido digital:

**SCTE:** Una asociación profesional sin fines de lucro, la cual ha implementado una serie de estándares para el desarrollo de

especificaciones técnicas en la industria de las telecomunicaciones por cable.

La SCTE 40 denominada “Digital Cable Network Interface Standard” o “Estándar de Interfaz de la Red de Cable Digital” dicta una serie de características técnicas que deberá cumplir una red digital. La última revisión de este estándar fue en el año 2011.

**DOCSIS:** Estándares elaborados por Cable Television Laboratories, mejor conocido como CableLabs, un consorcio que tiene como miembros a distintas operadoras y que se dedica a determinar aquellos requerimientos y especificaciones de las nuevas tecnologías y servicios de los sistemas de cable. Son ellos quienes en marzo de 1997 emitieron la primera versión de DOCSIS. Futuras versiones de DOCSIS son publicadas en los años posteriores, DOCSIS 1.1 en abril de 1999, DOCSIS 2.0 en diciembre del 2001 y DOCSIS 3.0 en agosto del 2006, cada una de ellas con sus correspondientes revisiones. Tomaremos las características de transmisión que asume la última actualización del DOCSIS 3.0 realizada en noviembre del 2011.

**EURODOCSIS:** Es sencillamente el DOCSIS para Europa. Para la última versión del estándar, Cable Europe se junta con CableLabs y por primera

vez publican un solo documento DOCSIS 3.0 donde están anexadas aquellas consideraciones específicas para las redes europeas o lo que podemos llamar EURODOCSIS 3.0.

La principal diferencia de las redes del viejo continente son los 8 *MHz* de los canales del downstream.

Las regulaciones además de buscar el adecuado desempeño de la red, nacen en negociaciones entre operadoras de cable e industrias electrónicas, estableciendo, por mencionar, que cualquier receptor sea compatible para la señal de televisión por cable.

Se debe tomar en cuenta la situación actual de nuestro país. En Ecuador no existe una resolución que dicte aquellos valores de orden técnico que deben cumplir las redes HFC digitales. Existe una regulación, vigente hasta la actualidad, que rige sobre aquellas redes de contenido analógico, la resolución N° 4771-CONARTEL- 08: “Norma Técnica para el Servicio Analógico de Audio y Video por Suscripción bajo la Modalidad de Cable Físico.”

A continuación se procederá a describir una serie de parámetros, definiéndolos e indicando cómo encontrarlos, para luego señalar los valores recomendados por los estándares SCTE y DOCSIS.

### 3.3.1 RUIDO Y DISTORSIONES

#### 3.3.1.1 DESCRIPCIÓN

Para muchos entendidos son los dos parámetros más importantes y que más atención necesitan en las redes HFC.

El término ruido en las redes de televisión por cable, en caso de no especificar lo contrario, se refiere al ruido térmico, aquel que se genera irremediablemente en todo sistema electrónico y está en función de la temperatura y el ancho de banda del canal.

El piso de ruido por sí solo no es significativo, interesa más establecer una comparación con el nivel de la señal, para esto existen las relaciones señal a ruido ( $S/N$ ), portadora a ruido ( $C/N$ ) o energía por bit a densidad espectral de potencia de ruido ( $E_b/N_o$ ).

Los libros de ingeniería suelen detallar más la relación  $C/N$ . La medición se realiza sobre señales moduladas en RF, diferenciándose de la relación  $S/N$  donde las señales están en banda base (sin modular). La relación  $C/N$  se encuentra de la siguiente manera:

$$C/N(dB) = 10 \log \frac{C}{N} \quad (3.1)$$

donde:

C=Nivel de potencia promedio del canal medido.

$N$ =Promedio de potencia de ruido medido sobre un determinado ancho de banda. En el canal de bajada se tomaba un ancho de banda de 4 MHz para señales analógicas (usando el estándar NTSC) y para las digitales se usa 6 MHz. En el canal de subida el ancho de banda depende del servicio.

Es posible encontrar variaciones de la relación  $C/N$ , tales como:

$C/(N + CIN)$ : Portadora a ruido térmico más ruido por intermodulación.

Algunos lo conocen como NPR. No se degrada con la distancia.

$C/(N + I)$ : Portadora a ruido térmico más todos los productos discretos de distorsión y señales que interfieren.

La última relación incluye las distorsiones, pero qué son. Una distorsión es todo aquel ruido transferido desde otra frecuencia. Se generan principalmente a partir de los armónicos de las señales transportadas. A diferencia del ruido, las distorsiones dependen de las señales transportadas.

Para evitar confusiones, realicemos una diferenciación entre las distorsiones en las señales analógicas y digitales. En el mundo analógico la portadora de video concentraba la mayor parte de la energía del canal. Large y Farmer (2009) mencionan que portadoras en

las frecuencias A, B y C, crearán productos por distorsión de orden par en las frecuencias  $A \pm B$ ,  $A \pm C$  y  $B \pm C$ , y productos por distorsión de orden impar en  $A \pm B \pm C$  y en  $2A \pm B$  [10]. Las distorsiones de una señal digital, en cambio, no se encuentran en frecuencias puntuales, son bandas similares al ruido. Los autores citados indican además, que de la mezcla de dos señales digitales aparecerá una banda simétrica de forma triangular, cuyo ancho espectral será la suma del ancho de las dos señales, y que el producto de la mezcla de tres señales digitales tendrá una forma Gaussiana de banda limitada, con un ancho espectral igual a la suma del ancho de las tres señales [10]. Estas últimas distorsiones son mayor en número pero menor en amplitud.

Se destaca además que en las especificaciones de las señales analógicas junto a la relación señal a ruido, se incluían parámetros como la relación portadora a componentes de segundo y tercer orden ( $C/CSO$  y  $C/CTB$ ). Con las señales digitales las distorsiones de segundo y tercer orden y cualquier otra interferencia son tomadas en cuenta dentro de la relación  $C/(N + I)$ .

En la porción de fibra predominan las distorsiones de segundo orden, mientras que en la porción coaxial los de tercer orden.

Entre las causas de distorsión tenemos la operación de los amplificadores cerca de o en saturación y su mala calibración de la respuesta de frecuencia, el cual además es otro de los motivos para no alcanzar la máxima tasa de transmisión bits/seg.

Ambos parámetros, el ruido y las distorsiones, son interdependientes, si el nivel de operación es muy alto, se mejora la relación  $C/N$  pero se generan mayor número de distorsiones; si es muy bajo, serán menos las distorsiones a costa de una peor relación  $C/N$ . Los niveles de operación también pueden variar de una señal a otra, se había mencionado por ejemplo, que la atenuación aumenta mientras mayor sea la frecuencia, por tal motivo la relación  $C/N$  es diferente de un canal a otro. Es preocupación del diseñador encontrar los niveles óptimos de operación en cada canal.

### 3.3.1.2 ESTÁNDARES

La SCTE 40 establece que la relación  $C/(N + I)$  en el canal de bajada deberá ser  $\geq 27dB$  para 64 QAM y  $\geq 33dB$  para 256 QAM [20].

DOCSIS 3.0 asume para el downstream un valor de  $C/N \geq 35 dB$  y que para el upstream la relación  $C/(N + I)$  deberá ser  $\geq 25 dB$  [21].

### 3.3.1.3 RELACIÓN C/N Y LA TEMPERATURA

Aprovecharemos la información precedente para analizar si se ve o no afectada la relación C/N ante la influencia de la temperatura y el uso indiscriminado de amplificadores en cascada.

Para comenzar, pondremos a consideración que a partir de un amplificador se puede obtener la relación C/N de la siguiente manera:

$$C/N(\text{dB}) = C_i(\text{dBmV}) - N_p - F_a(\text{dB}) \quad [10] \quad (3.2)$$

donde:

$C_i$  = Nivel de la señal a la entrada del amplificador

$N_p$  = Potencia mínima de ruido térmico

$F_a$  = Figura de ruido del amplificador

$N_p$  está en relación directa con la temperatura, veamos de que forma:

$$n_p = kTB \quad [10] \quad (3.3)$$

donde:

$n_p$  = La potencia del ruido en Watts

$k$  = Constante de Boltzmann ( $1.374 \times 10^{-23}$  joules/°K)

$T$  = Temperatura absoluta en °K

$B$  = El ancho de banda en Hz.

La potencia de la señal en los sistemas de televisión es usualmente expresada en  $dBmV$ . Para esto realizamos las conversiones respectivas.

$$N_p(dB) = 10 \log(kTB) \quad (3.4)$$

$$N_p(dBm) = N_p(dB) + 30 = 10 \log(kTB) + 30$$

$$N_p(dBmV) = dBm_{75\Omega} + 48.75 = 10 \log(kTB) + 30 + 48.75$$

$$N_p(dBmV) = 10 \log(kTB) + 78.75$$

$$N_p(dBmV) = 10 \log(T) + 10 \log(kB) + 78.75$$

Cuando la medición se la realiza en el downstream, el ancho de banda de un canal es  $6 MHz$  ó  $6000000 Hz$ . De esta manera es posible tener una expresión de la mínima potencia de ruido térmico en función de la temperatura, como sigue:

$$N_p(dBmV) = 10 \log(T) + 10 \log(1.374 \times 10^{-23} \times 6000000) + 78.75$$

$$N_p(dBmV) = 10 \log(T) - 160.84 + 78.75$$

$$N_p(dBmV) = 10 \log(T) - 82.09$$

Esta expresión de temperatura en grados Kelvin se puede trasladar a grados Celsius, unidad más familiar en nuestro medio:

$$N_p(dBmV) = 10 \log(C + 273.15) - 82.09$$

Pongamos como ejemplo a Guayaquil, una de las ciudades más calurosas de nuestro país. Considerando una temperatura mínima de 15°C, una temperatura promedio alrededor de los 25°C y una temperatura máxima que puede llegar aproximadamente a 38°C a ciertas horas del día. Evaluemos la variable  $N_p$  para estos valores.

$$N_p(15) = 10 \log(15 + 273.15) - 82.09 = -57.49 \text{ dBmV}$$

$$N_p(25) = 10 \log(25 + 273.15) - 82.09 = -57.35 \text{ dBmV}$$

$$N_p(38) = 10 \log(38 + 273.15) - 82.09 = -57.16 \text{ dBmV}$$

Concluyendo, mientras decrece la temperatura  $N_p$  se hará más pequeño y  $C/N$  aumentará. La relación  $C/N$  varía 0.33 *dBmV* entre la temperatura máxima y mínima de Guayaquil consideradas.

Además de afectar la relación  $C/N$  a través del piso de ruido, los cambios de temperatura tienen efecto directo en la atenuación del cable coaxial. Se tomará el valor que asumen algunos diseñadores y fabricantes al considerar variaciones en la atenuación de 0.19% por cada grado centígrado.

Generalmente en las hojas de especificaciones técnicas la atenuación está calculada a 20 °C.

En la segunda columna de la tabla 3.3 se observan los valores de atenuación a 20°C en diferentes frecuencias del cable coaxial RG11 URM67 fabricado por la empresa Excel [22]. Las otras tres columnas han sido añadidas para visualizar cómo variaría esta atenuación con referencia a las temperaturas mínima, promedio y máxima de la ciudad de Guayaquil.

<b>Atenuación (dB/100m)</b>				
<b>Frecuencia (MHz)</b>	<b>Temperatura</b>			
	15 °C	20 °C	25°C	38 °C
100	6.74	6.8	6.86	7.03
200	10.40	10.5	10.60	10.86
300	12.48	12.6	12.72	13.03
500	18.82	19	19.18	19.65
1000	27.24	27.5	27.76	28.44

Tabla 3.3 Atenuación vs. Temperatura en el cable coaxial URM67 de Excel

Fuente: Datos de la segunda columna tomados de la referencia [22].

Tabla elaborada por los autores

La atenuación se acentúa más en frecuencias altas. En este ejemplo, a los 100 MHz existe una variación de 0.29 dB entre la temperatura máxima y mínima, a los 500 MHz este intervalo es de 0.83 dB y a los 1000 MHz de 1.2 dB.

Estos valores son referidos a una distancia de 100 metros. De manera general, mientras más larga sea la parte coaxial la atenuación se incrementará y la relación  $C/N$  disminuirá, más aún en aquellos canales de frecuencias altas.

Es responsabilidad del diseñador conocer las características del cable coaxial y prever cómo se verá afectada la señal ante las variaciones de temperatura del lugar donde se desplegará la red.

#### **3.3.1.4 RELACIÓN $C/N$ Y $E_b/N_o$ Y EL USO INDISCRIMINADO DE AMPLIFICADORES EN CASCADA**

Cumpliendo con uno de nuestros objetivos, se analizará qué sucede con la relación  $C/N$  y  $E_b/N_o$  con el uso de amplificadores en cascada.

Cuando se tienen amplificadores en cascada, la relación  $C/N$  puede ser encontrada de la siguiente manera:

$$C/N_{\text{cascada}} = -10 \log \left[ 10^{-\left(\frac{C/N1}{10}\right)} + 10^{-\left(\frac{C/N2}{10}\right)} \right] [10] (3.5)$$

Cuando los amplificadores son idénticos, la fórmula puede reducirse a:

$$C/N_{\text{cascada}} = C/N_A - 10 \log n [10] (3.6)$$

Cabe aclarar que estas fórmulas son válidas mientras las pérdidas entre amplificadores sea igual a la ganancia de los mismos, los amplificadores tengan la misma figura de ruido y una ganancia mínima de 20 *dB*.

A partir de esta fórmula aproximaremos la pérdida en decibelios que sufre la relación *C/N* por el uso de más de un amplificador.

<b>Amplificadores</b>	<b>Degradación C/N (dB)</b>
2	3.01
3	4.77
4	6.02
5	6.99

Tabla 3.4 Degradación *C/N* por el uso de más de un amplificador

Fuente: Tabla elaborada por los autores

La relación  $E_b/N_o$ , por su parte, es conocida como la relación señal a ruido por bit. No tiene dimensiones ni toma en cuenta el ancho de banda. Es un parámetro importante en la transmisión de datos digitales y depende en especial del esquema de modulación utilizado. La siguiente fórmula permite establecer un vínculo entre las relaciones *C/N* y  $E_b/N_o$ :

$$E_b/N_o(dB) = C/N(dB) - 10 \log\left(\frac{f_b}{B}\right) \quad [10] \quad (3.7)$$

donde:

$f_b$  = Tasa de transmisión nominal de bits

$B$  = Ancho de banda del canal

La tasa de transmisión nominal o tasa binaria bruta es el número de bits transmitidos por unidad de tiempo, sin tomar en cuenta los bits utilizados para la corrección de errores y las cabeceras de los protocolos. Para el Sistema Internacional de Unidades la unidad de esta tasa es el bit por segundo (bit/s, b/s, bps).

La ecuación anterior nos permite concluir que si la relación  $C/N$  aumenta o decae un cierto número de decibeles, ocurrirá lo mismo con la relación  $E_b/N_o$ .

Realicemos un análisis adicional. Las diferentes versiones de DOCSIS señalan los diferentes formatos de modulación usados tanto en el canal de bajada y subida. En las tablas 3.5 y 3.6 se observa la tasa de transmisión total y entre paréntesis la tasa de transmisión nominal de los distintos esquemas de modulación utilizados tanto en el canal ascendente como en el canal descendente:

<b>Downstream</b>				
<b>Ancho de banda del canal</b>	<b>Tasa de transferencia de símbolos 64 QAM (Ksíms/s)</b>	<b>Tasa de transmisión de datos 64 QAM (tasa nominal) [Mbps]</b>	<b>Tasa de transferencia de símbolos 256 QAM (Ksíms/s)</b>	<b>Tasa de transmisión de datos 256 QAM (tasa nominal) [Mbps]</b>
6 MHz	5.056941	30.34 (27)	5.360537	42.88 (38)

Tabla 3.5 Tasas de transferencia del downstream

Fuente: Referencia [4]

<b>Upstream</b>				
<b>Ancho de banda del canal</b>	<b>Tasa de transferencia de símbolos (síms/s)</b>	<b>Tasa de transmisión de datos QPSK (tasa nominal) [Mbps]</b>	<b>Tasa de transmisión de datos 16 QAM (tasa nominal) [Mbps]</b>	<b>Tasa de transmisión de datos 64 QAM (tasa nominal) [Mbps]*</b>
0.20 MHz	160	0.32 (0.3)	0.64 (0.6)	0.96 (0.9)
0.40 MHz	320	0.64 (0.6)	1.28 (1.2)	1.92 (1.7)
0.80 MHz	640	1.28 (1.2)	2.56 (2.3)	3.84 (3.4)
1.60 MHz	1280	2.56 (2.3)	5.12 (4.6)	7.68 (6.8)
3.20 MHz	2560	5.12 (4.6)	10.24 (9)	15.36 (13.5)
6.40 MHz*	5120	10.24 (9)	20.48 (18)	30.72 (27)
* Disponible a partir de DOCSIS 2.0				

Tabla 3.6 Tasas de transferencia del upstream

Fuente: Referencia [4]

Nótese que a pesar de tener la misma tasa de transferencia de símbolos, la tasa de bits transmitidos varía dependiendo de la modulación utilizada, ya que cada una de ellas transmite diferente número de bits por símbolo. Visualicémoslo tomando la segunda fila de la tabla 3.6 donde se tiene una tasa de transferencia de símbolos de 320 sím/s. Las modulaciones QPSK, 16 QAM Y 64 QAM transmiten 2, 4 y 6 bits por cada símbolo respectivamente, por lo que las tasas de transmisión de datos son 320 sím/s \* 2 para QPSK, 320 sím/s \* 4 para 16 QAM y 320 sím/s \* 6 para 64 QAM, como se aprecia en la tabla.

Se hace evidente como la tasa de transmisión varía en función del ancho de banda y del esquema de modulación, siendo la que transmite más bits por símbolo la que alcanza mayores velocidades.

Además de la relación  $C/N$ , la relación de energía por bit sobre ruido está en función de la tasa nominal y el ancho de banda. La tabla 3.7 resuelve el factor  $10 \log_{10}(f_b/B)$  para distintos anchos de bandas y tasas de transmisión nominal mostrados en las tablas 3.5 y 3.6.

<b>Downstream</b>			
<b>Ancho de banda</b>	<b>64 QAM</b>	<b>256 QAM</b>	
6 MHz	0.653	0.802	
<b>Upstream</b>			
<b>Ancho de banda</b>	<b>QPSK</b>	<b>16 QAM</b>	<b>64 QAM</b>
0.20 MHz	0.176	0.477	0.653
0.40 MHz	0.176	0.477	0.628
0.80 MHz	0.176	0.459	0.628
1.60 MHz	0.158	0.459	0.628
3.20 MHz	0.158	0.449	0.625
6.40 MHz	0.148	0.449	0.625

Tabla 3.7 Factor  $10 \log \left( \frac{f_b}{B} \right)$

Fuente: Tabla elaborada por los autores

Nótese como la relación  $E_b/N_o$  se ve más afectada con las tasas de transmisión más altas, independientemente del ancho de banda usado.

Como se mencionó en el capítulo anterior, es posible ajustar la modulación según las condiciones del canal. Ejemplifiquemos un caso en el que la interferencia en un canal del upstream de 0.20 MHz de ancho de banda obliga a bajar la modulación de 16 QAM a QPSK, la cual tiene menor velocidad de transmisión pero es más robusta sobre interferencias. La tabla 3.7 nos permite apreciar que con este cambio el

factor  $10\log\left(\frac{f_b}{B}\right)$  disminuye en  $0.301 \text{ dB}$ . Siguiendo la ecuación 3.7, notamos que la relación  $E_b/N_o$  aumentaría en el mismo valor.

Si se realizan cambios en la modulación por una diferencia de menos de un decibel en la relación  $E_b/N_o$ , dese cuenta qué tan significativo son los  $3 \text{ dB}$  de degradación que aporta un segundo amplificador en cascada, sin mencionar un tercero o un cuarto.

No es imposible trabajar con amplificadores en cascada pero el rango de niveles de operación disminuye y además se complica la tarea de trabajar con tasas de transmisión altas, lo cual es cada vez más necesario en las redes modernas.

Podemos concluir que la relación  $E_b/N_o$  se ve afectada por las transmisiones a alta velocidad y en mayor medida por el uso de amplificadores en cascada. Se recomienda un diseño que considere máximo un amplificador en la sección coaxial.

### **3.3.2 MICROREFLEXIONES**

#### **3.3.2.1 DESCRIPCIÓN**

Otro parámetro técnico a considerar son las microreflexiones, las cuales describimos como pequeñas reflexiones que ocurren en la porción coaxial de la red. La magnitud de estas reflexiones depende de factores

como la concordancia de impedancias entre elementos de la red, el aislamiento de los puertos de los splitters y la longitud del cable.

Este fenómeno conduce a tener errores de bits en la transmisión digital ya que las señales retrasadas se superponen a los símbolos transmitidos.

De manera general, las microreflexiones disminuyen mientras el tiempo y la frecuencia aumentan, como se aprecia en la figura 3.7.

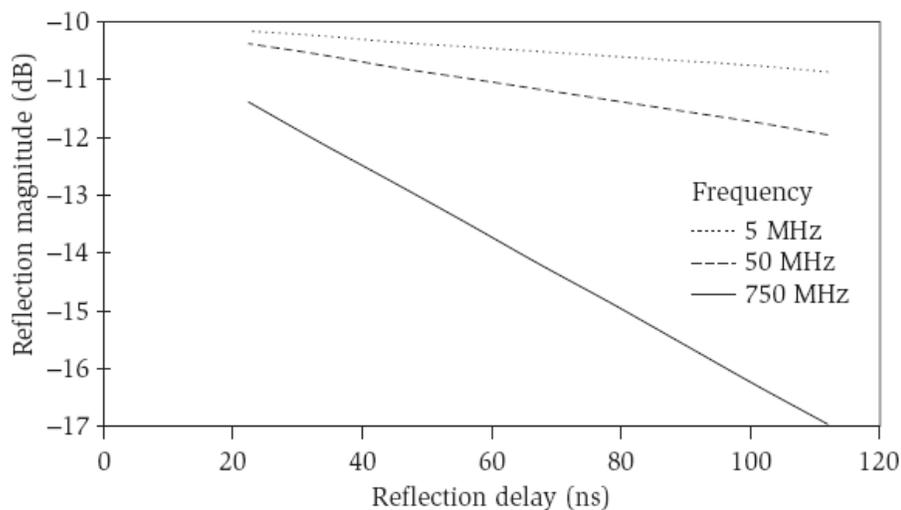


Figura 3.7 Peor caso de las magnitudes de microreflexión en una acometida

Fuente: Referencia [10]

### 3.3.2.2 ESTÁNDARES

La tabla 3.8 recoge los valores establecidos para las microreflexiones del eco dominante en los estándares DOCSIS 3.0 y SCTE 40.

<b>DOWNSTREAM</b>	
<b>DOCSIS 3.0</b>	<b>SCTE 40</b>
-10 dBc con retraso $\leq 0.5 \mu\text{s}$	-10 dB con retraso $\leq 0.5 \mu\text{s}$
-15 dBc con retraso $\leq 1.0 \mu\text{s}$	-15 dB con retraso $\leq 1.0 \mu\text{s}$
-20 dBc con retraso $\leq 1.5 \mu\text{s}$	-20 dB con retraso $\leq 1.5 \mu\text{s}$
-30 dBc con retraso $> 1.5 \mu\text{s}$	-30 dB con retraso $\leq 4.5 \mu\text{s}$
<b>UPSTREAM</b>	
<b>DOCSIS 3.0</b>	
-10 dBc con retraso $\leq 0.5 \mu\text{s}$	
-20 dBc con retraso $\leq 1.0 \mu\text{s}$	
-30 dBc con retraso $> 1.0 \mu\text{s}$	

Tabla 3.8 Microreflexiones del eco dominante para DOCSIS 3.0 y SCTE 40

Fuente: Datos tomados de las referencias [20, 21].

Tabla elaborada por los autores.

El estándar SCTE incluye las microreflexiones mayores a  $4.5 \mu\text{s}$  dentro de la interferencia en la relación  $C/(N + I)$ .

### 3.3.3 RETARDO DE GRUPO (GROUP DELAY)

#### 3.3.3.1 DESCRIPCIÓN

En una red ideal el tiempo de transmisión en todas las frecuencias es el mismo, mas en la realidad factores tales como: Reflexiones de señal, dispersión cromática de la fibra (la velocidad de propagación cambiando

en función de la longitud de onda), las características de los moduladores y demoduladores para canales individuales y los retrasos en las frecuencias cercanas a la frecuencia de corte de los diplexores, conllevan a que los componentes de la señal no lleguen simultáneamente al receptor.

El group delay o retardo de grupo es así otro parámetro técnico a considerar, una medida de la tasa de cambio del desplazamiento de fase versus frecuencia en un dispositivo o red.

Este factor aumenta con el uso de modulaciones de mayor eficiencia de ancho de banda, aquellas modulaciones con mejor tasa de bits por  $Hz$ .

Si el group delay es demasiado alto cerca del límite superior del upstream, no será posible utilizar cierta porción de aquel espectro.

### **3.3.3.2 ESTÁNDARES**

La SCTE 40 señala un límite máximo de  $0.37 \mu s/MHz$  a través del canal de  $6 MHz$  [20].

DOCSIS no coloca un valor máximo a respetar. Indica en el downstream un retraso de grupo característico de  $75 ns$  dentro del ancho de banda ocupado por el CMTS. Mientras muestra un valor de  $200 ns/MHz$  en el rango de operación del upstream [21].

### **3.3.4 NIVEL DE LA SEÑAL EN EL TERMINAL**

#### **3.3.4.1 DESCRIPCIÓN**

Es necesario cierto nivel de señal para que esta pueda ser receptada adecuadamente por el terminal.

Algunos diseñadores establecen la pérdida máxima permitida para la acometida. A partir de este dato ponen límites en la longitud de los cables y uso de elementos (acopladores, splitters) en esta porción de la red. De esta manera prevén el nivel de señal que tiene que llegar al puerto de salida del tap para que el equipo terminal no tenga inconvenientes en la recepción. Por lo general, se trata que este nivel se encuentre alrededor de  $0\text{ dBmV}$ .

#### **3.3.4.2 ESTÁNDARES**

Depende de la modulación en uso en el downstream. La SCTE 40 permite para 64 *QAM* un nivel de la portadora a la entrada del terminal desde  $-15\text{ dBmV}$  hasta  $+15\text{ dBmV}$  y para 256 *QAM* un nivel entre  $-12\text{ dBmV}$  y  $+15\text{ dBmV}$  [20].

### 3.3.5 NIVEL DE LOS CANALES ADYACENTES

#### 3.3.5.1 DESCRIPCIÓN

Este parámetro establece el nivel permitido entre canales adyacentes para evitar interferencias que conlleven a un degrado significativo de la señal.

#### 3.3.5.2 ESTÁNDARES

La SCTE 40 establece que el nivel de potencia de portadora de una señal modulada en 64 *QAM* con respecto a un nivel de referencia de 0 *dB* de una señal analógica NTSC, tiene que ser de  $-10 \pm 2$  *dB* y el de una señal modulada en 256 *QAM* de  $-5 \pm 2$  *dB*, estos son llamados niveles nominales. Además permite una variación de  $\pm 3$  *dB* de dichos niveles [20]. Podríamos así finalmente concluir que el rango de una señal 64 *QAM* se encuentra entre  $-10 \pm 5$  *dB* y el de una 256 *QAM* entre  $-5 \pm 5$  *dB* con respecto a los 0 *dB* de referencia.

La relación señal deseada versus señal adyacente *D/U* será mínima en el momento en que la primera se encuentre en su límite inferior permitido y la segunda en su límite superior.

La regla 47 de la FCC establece que la relación entre dos señales analógicas debe estar en el rango de  $\pm 3$  *dB*. Así que el peor caso de la

relación  $D/U$  sería  $-3\text{ dB}$ . Si dos canales adyacentes usan ambos  $64\text{ QAM}$  ó  $256\text{ QAM}$  la mínima relación  $D/U$  debe ser de  $-6\text{ dB}$ . Con todas estas indicaciones obsérvese la tabla 3.9 que resume la relación mínima permitida entre canales adyacentes con diferentes esquemas de modulación.

<b>Modulación del canal deseado</b>	<b>Modulación del canal adyacente no deseado</b>	<b>Peor caso de la relación D/U</b>
Analógica NTSC	Analógica NTSC	-3 dB
Analógica NTSC	64 QAM	+2 dB
Analógica NTSC	256 QAM	-3 dB
64 QAM	Analógica NTSC	-18 dB
64 QAM	64 QAM	-6 dB
64 QAM	256 QAM	-15 dB
256 QAM	Analógica NTSC	-13 dB
256 QAM	64 QAM	-5 dB
256 QAM	256 QAM	-6 dB

Tabla 3.9 Niveles de señal entre canales de adyacentes

Fuente: Referencia [20]

La SCTE 40 señala que independientemente de cumplir estos requerimientos, el nivel de las señales digitales a la entrada del terminal deberá situarse en el rango determinado en el punto 3.3.4.2.

### 3.3.6 OTROS PARÁMETROS

Tanto para DOCSIS como para la especificación SCTE 40 el retraso en el downstream desde el headend hasta el usuario más lejano no puede ser mayor a  $0.8\text{ ms}$ , aunque cabe señalar que típicamente es mucho menor [20,21].

En cuanto a la modulación HUM, producto de la alimentación a baja frecuencia, la SCTE indica que no deberá traspasar un 3% pico a pico [20]. DOCSIS es más específico al apuntar que la modulación HUM en una portadora del downstream no puede ser mayor que  $-26\text{ dBc}$  (5%) y una del upstream no será mayor a  $-23\text{ dBc}$  (7%) [21].

La SCTE 40 señala también que la variación de amplitud en un canal digital de  $6\text{ MHz}$  debe ser  $\leq 6\text{ dB}$  pico a pico.

El ruido de fase, para la especificación SCTE, no superará los  $-86\text{ dBc/Hz}$  [20].

### **3.4 DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD**

El usuario al momento de decidirse por algún proveedor no se fija en parámetros técnicos, lo que a él le interesa es qué ofrece cada uno y a qué precio.

Las operadoras además de preocuparse por captar nuevos suscriptores, deben orientar sus esfuerzos por mantener aquellos que tiene. Para esta tarea es fundamental realizar una labor que permita a sus clientes adquirir una experiencia positiva del servicio. Será crucial que el servicio no se caiga y de existir alguna interrupción, corregirla en el menor tiempo posible. Esto se mide a través de las tasas de disponibilidad y confiabilidad de la red, que deberán en lo posible ser contempladas en el diseño.

En las siguientes líneas definiremos a la disponibilidad y confiabilidad, paralelamente se mostrará cómo encontrar estos valores en una red.

#### **3.4.1 DISPONIBILIDAD**

Es una magnitud adimensional que toma valores entre cero y uno para expresar la relación entre el tiempo en que un servicio está disponible y el tiempo total de la medición. Mientras más cercano se encuentre a uno,

mayor será la disponibilidad. Se lo simboliza con la letra  $A$  (tomada del término en inglés availability).

La disponibilidad de la red está asociada con las interrupciones del servicio, las cuales se pueden dar por problemas en la alimentación eléctrica, imperfecciones o daños en los elementos de la red o por malas condiciones de transmisión como la interferencia de señales o el bloqueo por capacidad insuficiente del canal.

El número de fallos que presente un componente en un intervalo dado de tiempo es conocido como tasa de fallo ( $\lambda$ ). Puede encontrarse teóricamente basándose en la tasa de fallo de las partes individuales (capacitores, resistores, semiconductores) determinada por los fabricantes, o a través del comportamiento en el campo.

Esta tasa se verá afectada por factores como la temperatura, la protección al clima, los años y la potencia de operación.

En el caso de querer encontrar la tasa de fallo de toda la red, se deberá sumar las tasas individuales de cada componente.

$$\lambda_{\text{system}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad [10] \quad (3.8)$$

donde:

$\lambda_i$  = La tasa de fallo del componente  $i$

$n$  = Número de componentes cuyo fallo conducirá a un fallo del sistema

El tiempo medio entre fallo puede ser encontrado a partir de la tasa de fallo con esta simple relación:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} [10] (3.9)$$

El tiempo medio de reparación indica qué tan rápido es arreglado o reemplazado un componente.

Es posible encontrar la disponibilidad a partir del tiempo medio entre fallo y el tiempo medio que toma la reparación:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} [10] (3.10)$$

La no disponibilidad, simbolizado con la letra U (Unavailability), expresaría qué tanto el servicio no ha estado disponible y puede encontrarse con la siguiente relación:

$$U = 1 - A [10] (3.11)$$

Este parámetro también puede ser encontrado a partir del tiempo de corte del servicio ( $T_u$ ) durante un periodo  $t$  de medición de esta manera:

$$U = \frac{T_u}{t} [10] (3.12)$$

DOCSIS 3.0 y sus predecesores señalan que en una red de cable la disponibilidad deberá ser considerablemente mayor al 99%.

### 3.4.2 CONFIABILIDAD

Es la probabilidad de que el sistema no falle en un tiempo específico. Representa qué tan confiable es algún componente o todo nuestro sistema. Se lo encuentra con la siguiente relación:

$$R(t) = e^{-\lambda t} [10] \quad (3.13)$$

Por lo tanto la probabilidad de que el sistema falle es  $1 - R(t)$ .

La confiabilidad de todo el sistema puede ser encontrada a partir de su respectiva tasa de fallo o multiplicando las confiabilidades de los componentes.

$$R_s(t) = R_1(t)R_2(t) \dots R_n(t) [10] \quad (3.14)$$

donde:

$R_s(t)$  = La confiabilidad neta del sistema sobre el periodo  $t$ .

$R_1(t)R_2(t) \dots R_n(t)$  = Las confiabilidades de los componentes individuales que conducen a una falla del sistema sobre el mismo periodo.

### 3.4.3 EFECTO DE LA REDUNDANCIA EN LAS TASAS DE DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD EN LA RED

En el uso del lenguaje escrito, la redundancia es evitada consciente y constantemente en el intento de estilizar la escritura. Pero en el área de la ingeniería la redundancia no es mal vista. Ya conocemos, por ejemplo, que en las técnicas de corrección de errores, unos bits agregados a una trama de datos pueden significar la recuperación de información en caso de pérdida.

El manual de telefónica recoge tres tipos o niveles de redundancia [12]:

**De ruta:** También conocida como redundancia física o espacial. Se da cuando desde un punto existe más de un camino para llegar a otro. Es lo que sucede en una topología tipo anillo.

**De equipo:** Se refiere cuando se tienen dispositivos duplicados para que uno entre en acción ante la falla del otro. También puede darse el caso de que un solo dispositivo presente una mayor tolerancia a fallos ya que han sido duplicados sus componentes internos.

Como sistema de reserva el headend consta de una serie de equipos duplicados que entrarán en funcionamiento ante la falla o avería de sus homólogos.

Dentro de la red es común la duplicidad de transmisores y receptores ópticos.

**De fibra:** También conocida como redundancia en la capacidad óptica. No se usan todos los hilos de fibra disponibles, para los que se encuentren “en exceso” cumplan una de las siguientes funciones:

- Reemplazar aquellas fibras cuyos valores de atenuación superan ciertos límites máximos o que han sufrido algún daño.
- Proporcionar mayor capacidad de transmisión de datos. Esto es utilizándolos tanto en los enlaces propios, por ejemplo, los existentes entre las centrales de conmutación telefónica, como en los enlaces con los clientes cuando necesitan servicios con mayor velocidad como las videoconferencias.
- Escalar con nuevos servicios no contemplados en el diseño inicial.

Cuando se tienen redes redundantes la no disponibilidad equivalente es el producto de la no disponibilidad de cada segmento de la red:

$$U = \frac{(T_{u1})(T_{u2})}{t^2} [10] (3.15)$$

Para la tasa de fallos hay que considerar los momentos en los que ambas porciones redundantes fallen al mismo tiempo. Para esto:

$$\lambda_R = \lambda_1 \left[ 1 - e^{-\frac{(\lambda_2)(MTTR_1)}{t}} \right] + \lambda_2 \left[ 1 - e^{-\frac{(\lambda_1)(MTTR_2)}{t}} \right] \quad [10] \quad (3.16)$$

La redundancia permite menor cantidad de fallos, se asegura una red con menor tiempo fuera de servicio, lo que también significa una mayor tasa de confiabilidad.

El punto de quiebre está en que una mayor cantidad de rutas, equipos y fibra no utilizada demanda una mayor cantidad de recursos. La operadora deberá evaluar qué tanto va a invertir en la redundancia de la red.

### **3.4.3 ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD DE UNA RED**

Large y Farmer (2009) recomiendan la siguiente serie de pasos para encontrar adecuadamente las tasas de disponibilidad y confiabilidad [10]:

1. Subdividir la red en segmentos.
2. Asignar apropiadamente cada componente en la subdivisión que corresponda. Esto se realizará tomando en cuenta el sector de la red que se ve afectado ante el daño de algún elemento, independientemente de su ubicación física.
3. Determinar las tasas de fallo de cada componente: La alimentación eléctrica, baterías, amplificadores, transmisores y receptores ópticos

(podrían tener diferentes tasas de subida y bajada), conectores, medios de transmisión (tanto fibra óptica y coaxial), otros elementos pasivos y activos, equipos terminales, equipos del headend.

4. Estimar los tiempos en los que se restaura el servicio (*MTTR*): Está en las manos del operador, en relación con la experiencia de los técnicos y la capacidad de monitoreo que tenga el sistema. Mientras más se tarde en estar al tanto de algún fallo, más tiempo pasará para darle respuesta. También se tiene que considerar el tipo de fallo, ya que se dará prioridad a aquellas interrupciones con la mayor cantidad de clientes afectados.

5. Calcular las tasas de fallo, disponibilidad y confiabilidad.

### **3.5 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA RED**

El último factor que interviene en el diseño de una red es la cantidad de recursos, en especial económicos, que se cuenta para el proyecto.

De qué sirve que el diseñador establezca una red perfecta técnicamente, si la misma no se ajusta a un determinado presupuesto.

Es una tarea complicada animarse a estimar el costo de la red. Es un factor muy variable. Como hemos recalcado a lo largo de este capítulo, el diseño se compone de factores interdependientes los unos de los otros, así el valor

de la inversión del proyecto cambiaría en función de: El alcance inicial (extensión, número de usuarios), los equipos (cantidad, proveedor, características técnicas, calidad), el nivel de redundancia que se quiera dar, entre otros. Y todo aquello sin considerar el gasto del personal involucrado, ni los valores a partir de la siguiente etapa, muy vinculada al diseño, que es la implementación, lo que significaría incluir recursos humanos, costos de infraestructura e instalación (incluyendo el tendido del cable), la compra/alquiler del espacio físico para el headend y posiblemente hubs, las tasas municipales, servicios básicos, gastos administrativos, posteriormente lo correspondiente a la posible extensión, mantenimiento y otros.

A pesar de la multiplicidad de factores, nos animamos a realizar un análisis económico para un diseño con las siguientes características:

- Una red con un alcance inicial de 5000 casas pasantes, atendiendo a 3500 desde un principio.
- Para la recepción de señales se utilizarán 3 antenas en banda C y 2 en banda Ku.
- Se ofertarán 12 canales de televisión abierta y hasta 80 canales en total. Se pronostica el uso de 30 IRDs. Aquellos receptores que manejan varios canales a la vez son un poco más costosos. El valor de la tabla 3.10 es un promedio entre aquellos y los que manejan un solo canal.

- Se receipta la señal digital de 6 canales que no transmiten audio bajo el estándar AC-3. Como cada encoder tiene dos tarjetas decodificadoras y considerando además que son 12 las señales analógicas, anotamos un total de 9 de estos equipos.
- Para el control de la red se asume una inversión inicial de \$ 80.000.
- La red troncal estará dispuesta con una topología redundante de doble anillo que juntará, mediante fibra, la cabecera con diez nodos ópticos. Cada nodo da origen a cuatro ramificaciones coaxiales, quienes cubrirán un máximo de 125 casas pasantes.
- Por cada rama coaxial calculamos un amplificador de distribución y uno extensor de línea.
- Se divide el número de usuarios para 8 para aproximar el número necesario de taps de 8 salidas.
- Se redondea el uso de un splitter por usuario.
- En cuanto a la extensión de los medios de transmisión se asumen 12 Km de fibra, que se hacen 24 Km si colocamos un doble anillo, 20 Km para el coaxial en la red de distribución y 100 Km para la acometida.

De acuerdo al diseño planteado, la tabla 3.10 resume equipos y valores:

<b>Equipo</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor total</b>
<b>Headend</b>			
Antena banda C	\$ 600	3	\$ 1,800
Antena banda Ku	\$ 250	2	\$ 500
CMTS	\$ 9,500	1	\$ 9,500
Softswitch	\$ 9,450	1	\$ 9,450
Encoder	\$ 7,500	9	\$ 67,500
IRD	\$ 1,600	30	\$ 48,000
Multiplexor	\$ 35,000	2	\$ 70,000
SEM	\$ 3,500	2	\$ 7,000
Rack	\$ 250	4	\$ 1,000
Multiswitch	\$ 15	3	\$ 45
Equipos de control			\$ 80,000
Transmisor óptico	\$ 1,760	1	\$ 1,760
Receptor óptico	\$ 700	10	\$ 7,000
<b>Red troncal</b>			
Nodo óptico	\$ 6,000	10	\$ 60,000
Amplificador distribución	\$ 2,000	40	\$ 80,000
Fibra óptica monomodo, dispersión no desplazada	\$ 3 c/m	24 Km	\$ 72,000
<b>Red de distribución</b>			
Amplificador extensor de línea	\$ 1,500	40	\$ 60,000
Cable coaxial #500	\$ 1.5 c/m	20 Km	\$ 30,000
<b>Acometida</b>			
Taps	\$ 220	438	\$ 96,360
Splitter	\$ 4	3500	\$ 14,000
Cable coaxial RG6, RG11	\$ 0.48 c/m	100 Km	\$ 48,000
<b>Terminales</b>	\$ 40	3500	\$ 140,000
<b>Total:</b>			<b>\$ 903,915</b>

Tabla 3.10 Equipos y valores para el despliegue de una red HFC

Fuente: Valores tomados de las referencias [6,11,23,24].

Tabla elaborada por los autores.

Cabe mencionar que los valores de los equipos están sujetos a variaciones según el fabricante, el modelo y las características de operación, pero pretenden en su conjunto dar la idea de la inversión mínima requerida para el despliegue de una red de este tipo, que en este caso sale alrededor del millón de dólares.

En el headend se excluyen las antenas de recepción de televisión abierta, el costo del cableado interno, los equipos necesarios para el monitoreo de la señal, además no se considera los diversos conectores, la redundancia de equipos, ni los valores ajenos a los elementos de la red pero que son necesarios dentro del diseño como el sueldo de los diseñadores y personal involucrado en el proyecto. También se promedia un costo bajo por terminal.

A pesar de la ausencia de estos factores, se evidencia la fuerte inversión que significa, sin embargo, todo esto se ve recompensado a corto plazo, ya que el triple play es uno de los negocios más rentables en el sector de las telecomunicaciones.

Todas las etapas que se han tratado en este capítulo, finalmente confluyen en el diseño final de la red. Antes de la implementación estará listo un plano o mapa de distribución, que incluirá, entre otros detalles, el lugar en el que estará ubicado el headend, por donde pasará la red, la extensión tanto de la fibra como del coaxial, la interconexión de los elementos en determinada

topología, la distancia entre cada poste, las zonas donde se utilizarán ductos, la subdivisión de los nodos, el número de casas pasantes programadas para cada nodo óptico, el alcance inicial de la red.

## **CAPÍTULO 4**

### **VARIANTES A LAS REDES HFC DE LAS OPERADORAS QUE OFERTAN EL TRIPLE PLAY EN EL PAÍS**

Uno de los objetivos específicos trazados al inicio del proyecto era valorar las ventajas y desventajas del diseño de las redes HFC digitales de las operadoras locales. Otro era el de proponer alternativas de solución a los problemas encontrados en tales diseños.

Debido a políticas de confidencialidad, no se tuvo acceso al diseño de dichas redes, por lo que, en este último capítulo centramos la atención en las posibles variantes hacia donde pueden caminar las operadoras. Ya no hablamos de soluciones sino de posibilidades abiertas que se pueden tomar.

#### **4.1 CAMBIO DE PARTICIÓN DE FRECUENCIAS**

Resulta que la demanda del upstream sigue en aumento, las aplicaciones par a par (peer to peer) consumen gran ancho de banda, además se hace más cotidiano subir a la web: Fotos, archivos, videos. Llegará aquel momento donde las operadoras de cable consideren ampliar el ancho de banda del upstream.

Large y Farmer (2009) realizan una división de las redes según el límite superior del upstream y el inferior del downstream:

**División baja (low-split):** Las redes actuales donde el upstream no llega más allá de los 50 MHz.

**División media (mid-split):** Las primeras redes de televisión por cable tenían amplificadores que llegaban a los 220 MHz. Por lo que la mitad de la red eran los 110 MHz. Esta referencia se toma para bautizar como

redes de división media a aquellas que tienen como límite superior del upstream frecuencias cercanas a los 110 MHz.

**División alta (high-split):** Se mueve inclusive el límite superior del upstream a más de los 170 MHz.

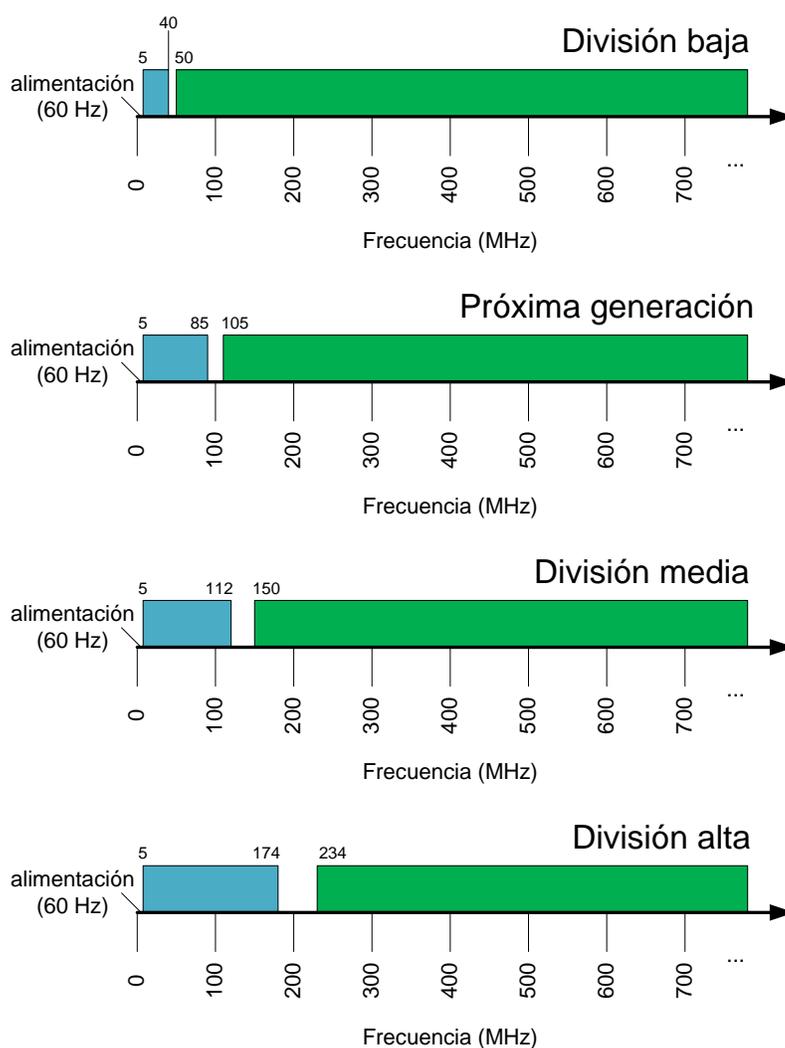


Figura 4.1 Diferentes divisiones del espectro en redes HFC

Fuente: Elaborada por los autores

En la figura 4.1 se observa las diferentes reparticiones de ancho de banda. El canal de subida tiene una tonalidad azul, mientras el de bajada verde. Se observa en la división baja, la usada actualmente, una gran desproporción en el tamaño de ambos canales.

Se aprecia además un espacio de salvaguarda entre las bandas -crossover región-. Si no hay una separación adecuada, se tienen inconvenientes como el alto costo de los diplexores o el incremento del retraso de grupo.

Fuera del país ya se han trabajado propuestas de migrar a una nueva generación de redes. Una de estas propuestas parte el upstream a los 85 MHz y da inicio al downstream en los 105 MHz. Véase en la figura 4.1 la “Próxima generación”

Entre las primeras desventajas aparece el lado regulatorio. En algunos países las operadoras tienen que transmitir los canales de televisión abierta en la misma frecuencia y el canal 2 se ubica entre los 54 y 60 MHz. Esto ha dejado de ser una limitante en aquellos lugares donde se ha realizado el apagón analógico. Por el lado económico y de operación, se tendrá que reemplazar cada diplexor de la red, mejorar o reemplazar los amplificadores del upstream, algunos transmisores ópticos y receptores de la cabecera. Además los terminales deben poder transmitir en el nuevo rango.

## 4.2 OPTIMIZAR CAPACIDAD DEL CANAL DE SUBIDA

Otra solución para responder a la creciente demanda en el upstream es la de mejorar su capacidad. Existen varias alternativas:

**División del canal:** Se refiere a dividir el canal de subida en varios caminos desde el nodo óptico, lo que se traduce en transmitir en fibras separadas, así habrá el mismo ancho de banda de la fibra para una menor cantidad de usuarios. Con esta opción aumenta la fibra requerida y la cantidad de transmisores ópticos, uno por camino.

**Block Conversion (Conversión en bloque):** Consiste en tomar varios caminos de retorno y desplazarlos, a todos menos uno, en frecuencia. Los bloques son combinados y transmitidos usados solo un transmisor, el cual tiene que ser de alto rendimiento para evitar que decaiga la relación portadora-ruido (C/N) al aumentar la carga de señales. Por lo tanto no se podrán usar láser Fabry-Perot (F-P) que son más baratos pero de menor desempeño.

En el headend se tendrá que realizar el proceso inverso, para esto se puede conseguir un solo receptor que sintonice hasta los 200 MHz o tener cuatro en el espectro de 5-40 MHz.

La figura 4.2 esquematiza esta solución.

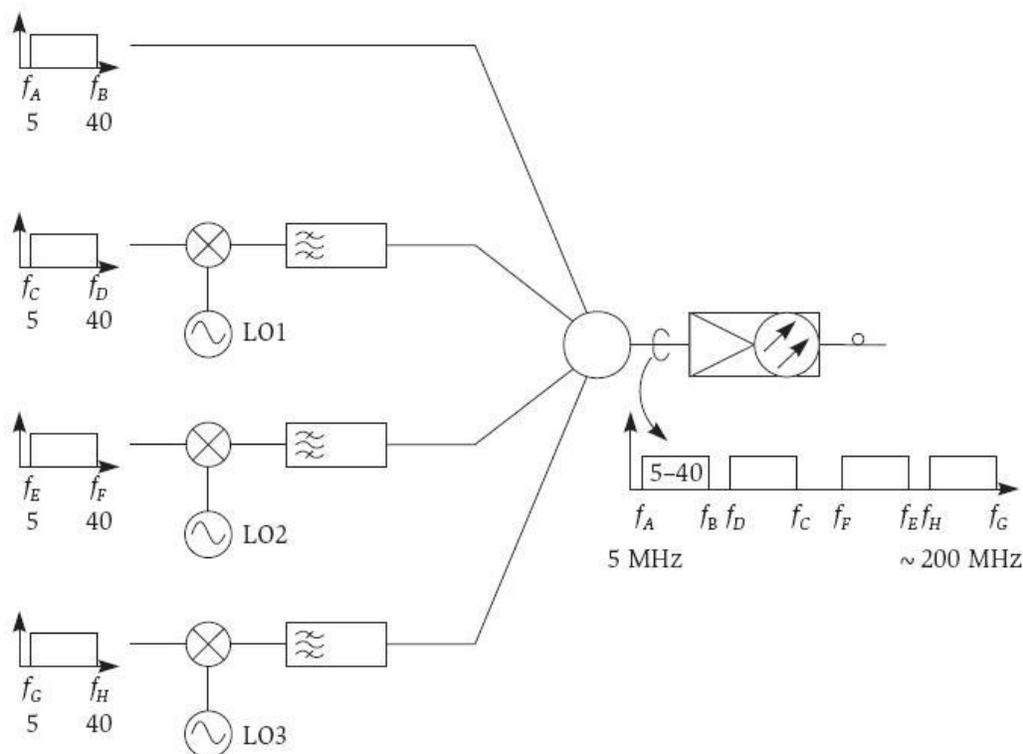


Figura 4.2 Conversión en bloques

Fuente: Referencia [10]

**WDM:** Con esta alternativa cada rama que llega al nodo alimenta a un transmisor que opera a diferente longitud de onda. WDM también se llama al equipo que combina y separa las señales ópticas a diferentes longitudes de onda. Es necesario uno en el nodo para combinar las señales de los transmisores y otro en el headend para separarlas y dirigir las a los receptores. Con esta opción se ahorra la fibra y transmisores adicionales necesarios en la división de canal.

**Digital Return (Retorno Digital):** Radica en digitalizar en el nodo las señales y convertirlas nuevamente en RF en la cabecera. Se necesita un convertidor analógico/digital (A/D) por cada rama coaxial y otro digital/analógico (D/A) en el headend. Sus salidas llegarán a un mux que dará paso a un transmisor digital alternando los datos de uno y otro convertidor A/D.

### 4.3 NODO+0

Richey (2010) presenta las ventajas de la migración de las redes HFC a un tipo Nodo+0 [25].

La expresión nodo+x se refiere al número de elementos activos entre la cabecera y el cliente. A lo largo de la evolución de las redes se han tenido diferentes configuraciones.

En la figura 4.3 se observa un arreglo nodo+5. Entre la cabecera y el usuario hay un total de 6 dispositivos activos: El nodo óptico, 3 amplificadores de distribución y 2 amplificadores extensores de línea.

La configuración más utilizada en las redes HFC que transportan señales digitales en nuestro medio es la de nodo+1, en ocasiones también se encuentra la de nodo+2 en algunas de las ramas, pero no más.

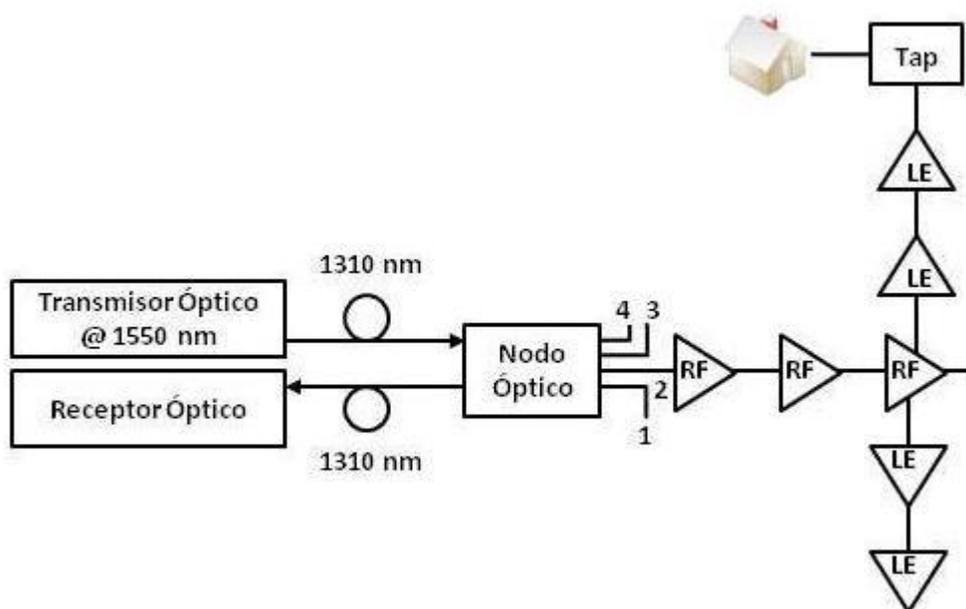


Figura 4.3 Red HFC tipo nodo+5

Fuente: Referencia [25]

La propuesta nodo+0, véase la figura 4.4, consiste en reducir como único elemento activo a un nodo óptico conectado a un amplificador extensor de línea (nodos-LE), aproximándose la red HFC a una red PON.

Para realizar este cambio, Richey propone lo siguiente [25]:

- Si la fibra usa segunda ventana en el sentido descendente, trasladar la transmisión a la tercera ventana, es decir de 1310 nm a 1550 nm. Usar esta longitud de onda produce menores pérdidas por atenuación y facilita la amplificación de la señal óptica.

- Configurar el retorno para que opere sobre una sola fibra, con la mencionada técnica WDM.
- En el lugar que ocupaba previamente el nodo, permanecerá la fuente de alimentación para energizar los nodos-LE y además se colocarán divisores y amplificadores ópticos. Los divisores son pasivos y los amplificadores los hay tanto activos como pasivos.
- Los nodos-LE reemplazarán al último amplificador extensor de línea en las configuraciones nodo más algo. De esta manera estarán más cerca de los usuarios como se observa en la figura 4.4. Se desplegará fibra hasta la ubicación de estos nodos, reemplazando al coaxial.

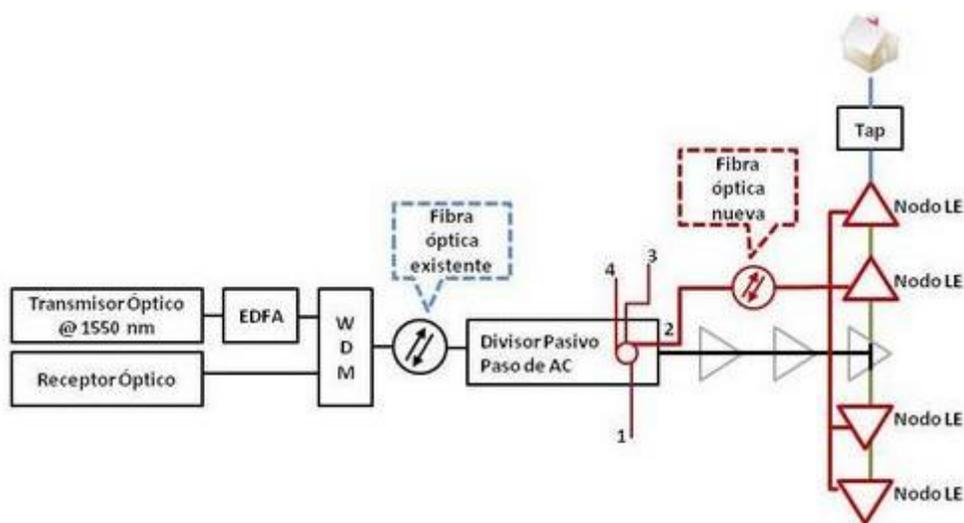


Figura 4.4 Configuración básica nodo+0

Fuente: Referencia [25]

Entre las ventajas de este sistema tenemos:

- Disminución del consumo de potencia. Un ahorro de energía de más del 80%.
- Una red con mejores tasas de confiabilidad, debido a la menor interacción con el suministro de energía eléctrica.
- La implementación puede ser progresiva, nodo a nodo, de acuerdo a las necesidades.
- Los dispositivos disponibles en la actualidad para lograr este diseño permiten un buen desempeño hasta los 1.3 GHz, aumentando el ancho de banda de bajada.
- Esta configuración facilita el posible uso del espectro entre 1 a 2.6 GHz para el canal de subida.

#### **4.4 CONVERGENCIA DE DISPOSITIVOS**

Ya se ha mencionado que la evolución de la red HFC ha permitido la convergencia de servicios, sin embargo, un nuevo reto es la convergencia de dispositivos. Nos referimos a la posibilidad de que sea un solo terminal el que necesite el usuario, sintetizando las funciones del set top box y los módems.

## **CONCLUSIONES**

1. En el diseño de una red HFC, así como otras redes de servicios de telecomunicaciones, es imperioso una serie de conocimientos técnicos: Conocer las características de los medios de transmisión; realizar cálculos matemáticos y establecer los niveles óptimos de señal a lo largo de la red; reconocer las características técnicas de los elementos activos y pasivos de la red; entender cómo influyen factores como la atenuación, el ruido y las distorsiones en el desempeño de la red, entre otros.  
  
Pero también es esencial una serie de habilidades que desbordan lo técnico: El reconocimiento del mercado, las necesidades del usuario y la

oferta de la competencia; poder ajustarse a un presupuesto determinado; así también es importante el trabajo en equipo, el respeto y la tolerancia, porque se diseña junto a otras personas.

2. A partir de los estándares SCTE 40 y DOCSIS 3.0, hemos analizado las características de orden técnico en el diseño y operación de las redes HFC que distribuyen señales digitales. Diseñar de acuerdo a sus recomendaciones, me brindará una red en la que puedo confiar.
3. Las operadoras quieren el mejor desempeño de su red, pero además es necesario el desarrollo de una norma técnica, hasta ahora inexistente, que regule en el territorio nacional el cumplimiento de parámetros técnicos de operación de estas redes HFC que distribuyen contenidos digitales, otorgando una mayor garantía de un buen servicio a los usuarios. El desarrollo de la normativa debe estar a cargo del CONATEL, la ejecución de la SENATEL y el futuro control de la SUPERTEL.
4. De usar dos amplificadores en cascada la relación  $E_b/N_o$  decaerá en  $3\text{ dB}$ , si se usan tres lo hará en  $4.77\text{ dB}$ , si se usan cuatro en  $6\text{ dB}$ , y así sigue en aumento. La relación  $E_b/N_o$  se ve afectada por las transmisiones a alta velocidad, pero en mayor medida por el uso de amplificadores en cascada. Se debe procurar que su uso no sea indiscriminado.

5. En la práctica no se alcanza la mayor tasa de bits/seg en la transmisión de datos por factores como la mala calibración de la respuesta de frecuencia de los amplificadores y su operación en saturación; características del medio como la dispersión cromática o la atenuación; la temperatura o el tiempo de los elementos de la red.

## RECOMENDACIONES

1. La característica de redundancia, al menos en la red troncal, disminuirá considerablemente los cortes de servicio por fallos de componente.
2. Ubicar los nodos ópticos en el centro de la zona a la que servirá. Evitar darle la capacidad máxima de casas pasantes.
3. Evitar diseñar segmentando cada nodo óptico con el máximo número de casas pasantes. Evita que la red pueda expandirse.
4. Considerar máximo un amplificador en la sección coaxial.
5. Es fundamental mantener una impedancia constante ( $75\Omega$ ) a lo largo de la red, para que las pérdidas por reflexiones sean mínimas.

6. Es común eludir costos en la planificación de la red. Los recursos destinados a esta etapa significan inversión y no costo. Recordar que una floja planificación tendrá series repercusiones a mediano y/o largo plazo.
7. Recordar que no existe un diseño de red único ni mejor. Eso sí, todo diseño deberá encontrar aquel equilibrio entre lo técnico y lo económico, las necesidades del usuario y del proveedor.
8. Nuestra actualización tiene que ser permanente, tal cual el desarrollo mismo de las telecomunicaciones. De tomar como referencia este trabajo, se debe revisar bibliografía actualizada sobre innovaciones en las redes HFC, sus elementos o su diseño, teniendo presente que en el campo de la tecnología es donde se dan los avances más acelerados.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Usbeck C. Ecuador y las Comunicaciones, una Historia Compartida. Senatel. Ecuador. 2010.
- [2] Superintendencia de Telecomunicaciones. Estaciones y N° de suscriptores de los servicios de audio y video por suscripción autorizadas en el ámbito nacional. Situación al 31 de octubre del 2012. [http://www.supertel.gob.ec/pdf/estadisticas/suscriptores\\_tvpagada.pdf](http://www.supertel.gob.ec/pdf/estadisticas/suscriptores_tvpagada.pdf).  
Fecha de consulta: Noviembre del 2012.
- [3] Historia de la TV por cable. <http://www.televisionporcablecatv.comuv.com/>  
Fecha de consulta: Mayo del 2012.
- [4] Loaiza A. Diseño de la cabecera (Headend) de una empresa de CATV para proveer televisión de alta definición (HDTV) en las ciudades de Quito y Guayaquil utilizando una arquitectura redundante. Tesis, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional. Ecuador. 2011.
- [5] Pulido M. ¿Qué es el muestreo de color (color sampling)? <http://onesoulpost.wordpress.com/2012/08/>. Fecha de consulta: Agosto del 2012.
- [6] Illescas C., Illescas J. Estudio previo para la implementación del sistema triple play en una red HFC de la empresa servicable. Tesis, Facultad de

Ingenierías, Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Ecuador. 2010.

- [7] TMX-2010 Transport Multiplexer. [http://www.motorola.com/Video-Solutions/US-EN/Products-and-Services/Video-Infrastructure/Multiplexers/TMX200\\_US-EN](http://www.motorola.com/Video-Solutions/US-EN/Products-and-Services/Video-Infrastructure/Multiplexers/TMX200_US-EN). Fecha de consulta: Mayo del 2012.
- [8] Omnistar GX2 optical broadband transmission platform. [http://www.motorola.com/Video-Solutions/US-EN/Products-and-Services/Broadband-Access/Optical-Transport/GX2+Platform\\_US-EN](http://www.motorola.com/Video-Solutions/US-EN/Products-and-Services/Broadband-Access/Optical-Transport/GX2+Platform_US-EN). Fecha de consulta: Mayo del 2012.
- [9] HFC. Hyber Fiber Coax. Redes híbridas de fibra óptica y cable coaxial. <http://es.scribd.com/doc/51771870/diapositivas-redes>. Fecha de consulta: Mayo del 2012.
- [10] Large D., Farmer J. Broadband cable access networks. The HFC plant. Morgan Kaufmann. Estados Unidos. 2009.
- [11] Sarabia A. Estudio y diseño de una red de última milla HFC (Hybrid Fiber Coaxial), utilizando tecnología DOCSIS para brindar servicios triple play para el sector sur este de la ciudad de Quito. Tesis, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional. Ecuador. 2009.

- [12] Telefónica. Manual de Telecomunicaciones. <http://es.scribd.com/doc/4716905/Manual-Telecomunicaciones-by-Telefonica>. Fecha de consulta: Junio del 2012.
- [13] ITU. Sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales. <http://www.itu.int/rec/T-REC-G/s>. Fecha de consulta: Octubre del 2012.
- [14] Mahlke G., Gössing P. Fiber Optic Cables. Siemens. Alemania. 1993.
- [15] McClatchie F. What is return loss, and why should i measure it? <http://www.fmsystems-inc.com/manuals/RETURN%20LOSSart.pdf>. Fecha de consulta: Julio del 2012.
- [16] Superintendencia de Telecomunicaciones. Datos de cuentas y usuarios de internet por permisionario. Situación a junio del 2012.
- [17] Superintendencia de Telecomunicaciones. Estadísticas de Servicios de Telecomunicaciones: Telefonía fija. Situación a septiembre del 2012
- [18] Muñoz J. Diseñando la Red de Cable. CINIT. 2007.
- [19] Díaz S. Sistemas avanzados de comunicaciones. Redes de Cable. Departamento de Tecnología Electrónica. Universidad de Sevilla. España.
- [20] Society of Cable Telecommunications Engineers. ANSI/SCTE 40 2011 Digital Cable Network Interface Standard. 2011.
- [21] CableLabs. Data Over Cable Service Interface Specifications DOCSIS 3.0. 2011.

- [22] Excel. Hoja técnica del cable coaxial URM67. [http://www.excel-networking.com/\\_assets/downloads/Exc\\_RG\\_Type\\_75\\_Coaxial\\_Cable\\_S P.pdf](http://www.excel-networking.com/_assets/downloads/Exc_RG_Type_75_Coaxial_Cable_S P.pdf). Fecha de consulta: Junio del 2012.
- [23] Arteaga J., Fernández P. Estudio para la implementación de un headend digital en la empresa municipal de telefonía, agua potable y alcantarillado “ETAPA” y que permita la distribución de televisión digital a empresas de telecomunicaciones a nivel nacional. Tesis, Facultad de Ingenierías, Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Ecuador. 2008.
- [24] Egüez M. Proceso de conversión de transmisión análoga a digital en un sistema de televisión por cable manteniendo continuidad con los otros servicios que se transmiten en la red HFC. Tesis, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador. 2005.
- [25] Richey S. Upgrading the network. A path to node+0. Estados Unidos. 2010.