

# **Análisis y evaluación de la red de acceso HFC para la distribución de contenidos educativos de iTV con QoS**



**Diego Fernando Rueda Pepinosa**  
**Iván Ricardo Taimal Narváz**

Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telemática  
Línea de Investigación en Servicios Avanzados de Telecomunicaciones  
Popayán, Mayo de 2009

# **Análisis y evaluación de la red de acceso HFC para la distribución de contenidos educativos de iTV con QoS**



**Diego Fernando Rueda Pepinosa  
Iván Ricardo Taimal Narvález**

**Monografía presentada como requisito para optar por el título de  
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

Director: PhD. José Luís Arciniegas Herrera  
Asesor: Ing. Wilmar Yesid Campo Muñoz

Universidad del Cauca  
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones**  
**Departamento de Telemática**  
**Línea de Investigación en Servicios Avanzados de Telecomunicaciones**  
Popayán, Mayo de 2009

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos al Ingeniero Wilmar Yesid Campo, quien asesoró este trabajo con una cuota valiosa de optimismo y dedicación. Al Doctor Roberto García Fernández, profesor titular del Departamento de Informática de la Universidad de Oviedo (España), quien nos facilitó el uso de la herramienta de simulación OPNET *Modeler* para llevar a cabo este trabajo. Al apoyo y conocimiento facilitado por los integrantes del grupo de trabajo del proyecto EDiTV.

También agradecemos a nuestros familiares y amigos por su apoyo incondicional para alcanzar nuestras metas.

Diego Fernando Rueda Pepinosa  
Iván Ricardo Taimal Narváez

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS .....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE ACRÓNIMOS .....	viii
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVACIONES DEL TRABAJO DE GRADO .....	3
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.2.1 Objetivo General.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos .....	4
1.3 METODOLOGÍA.....	4
1.4 ESTRUCTURA DE LA MONOGRAFÍA.....	5
<b>CAPITULO II .....</b>	<b>7</b>
<b>2 DISTRIBUCIÓN DE TELEVISIÓN INTERACTIVA .....</b>	<b>7</b>
2.1 TELEVISIÓN INTERACTIVA .....	7
2.1.1 Niveles de Interactividad.....	8
2.1.2 Aplicaciones de iTV para ambientes educativos como caso de estudio.....	9
2.2 ESTANDARIZACIÓN PARA TELEVISIÓN DIGITAL INTERACTIVA .....	10
2.2.1 Estándares para difusión de televisión digital .....	10
2.2.2 Estándares para <i>middleware</i> .....	11
2.3 DIFUSIÓN DE TELEVISIÓN INTERACTIVA EN REDES DE CABLE .....	12
2.3.1 Compresión y codificación de audio y video .....	13
2.3.2 Transmisión y sincronización de datos y aplicaciones MHP .....	14
2.3.3 Multiplexación y transporte .....	16
2.3.4 Codificación del canal y modulación .....	20
2.4 CANAL INTERACTIVO O CANAL DE RETORNO.....	21
2.5 PARÁMETROS DE DESEMPEÑO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE CONTENIDOS DE ITV .....	22
2.5.1 Parámetros de desempeño en el canal de difusión.....	23
2.5.2 Parámetros de desempeño en el canal interactivo.....	24
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>25</b>
<b>3 RED DE ACCESO HFC PARA LA DISTRIBUCIÓN DE ITV .....</b>	<b>25</b>
3.1 HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LA RED DE ACCESO HFC .....	25
3.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS REDES HFC.....	26
3.3 MODELO DE REFERENCIA DVB PARA SERVICIOS INTERACTIVOS EN REDES DE ACCESO HFC.....	28
3.4 ARQUITECTURA DE LA RED DE ACCESO HFC.....	30
3.4.1 Cabecera ( <i>Headend</i> ) .....	30
3.4.2 Red Troncal.....	31

3.4.3	Red de Distribución .....	33
3.4.4	Premisas de Usuario .....	33
3.5	PLATAFORMA TECNOLÓGICA PARA LA PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE ITV EN REDES HFC .....	34
3.6	PROTOCOLO DE ACCESO DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification).....	36
3.6.1	Generalidades del protocolo DOCSIS.....	36
3.6.2	Inicialización de los módems de cable .....	37
3.6.3	Asignación del ancho de banda del canal ascendente y métodos de acceso .....	37
3.6.4	Calidad de servicio en DOCSIS .....	39
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>43</b>
<b>4 ANÁLISIS DEL PROTOCOLO DOCSIS PARA LA DISTRIBUCIÓN DE CONTENIDOS DE ITV .....</b>		<b>43</b>
4.1	MODELO DE TRÁFICO DE LAS APLICACIONES ITV EN EL CANAL INTERACTIVO .....	43
4.1.1	Análisis del tráfico intercambiado entre el STB y el servidor de aplicaciones de iTV.....	44
4.1.2	Determinación de los parámetros de entrada a la simulación de tráfico.....	48
4.2	IMPLEMENTACIÓN DE LAS APLICACIONES DE ITV EN OPNET MODELER	51
4.3	PERFILES DE USUARIOS DE LAS APLICACIONES DE ITV .....	54
4.4	MODELO DE RED HFC PARA LA SIMULACIÓN DE LAS APLICACIONES DE ITV .....	55
4.4.1	Descripción de los equipos utilizados en el modelo de red .....	56
4.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LAS APLICACIONES DE ITV .....	57
4.5.1	Efectos del incremento del número de usuarios sobre la transmisión de aplicaciones de iTV.....	57
4.5.2	Efectos de la variación del tiempo entre MAP sobre la transmisión de aplicaciones de iTV.....	62
4.5.3	Efectos de la combinación entre fragmentación y concatenación sobre la transmisión de aplicaciones de iTV.....	66
4.5.4	Efectos de la variación del tamaño del <i>minislot</i> sobre la transmisión de aplicaciones de iTV.....	68
<b>CAPÍTULO V .....</b>		<b>72</b>
<b>5 EVALUACIÓN DE LA RED DE ACCESO HFC PARA LA DISTRIBUCIÓN DE CONTENIDOS DE ITV .....</b>		<b>72</b>
5.1	CONSIDERACIONES GENERALES PARA LA SIMULACIÓN .....	72
5.2	ASIGNACIÓN DE FLUJOS DE SERVICIO A LAS APLICACIONES DE iTV .....	73
5.2.1	Efectos de la asignación de flujos de servicio a la aplicación EDiTV0.....	74
5.2.2	Efectos de la asignación de flujos de servicio a la aplicación EDiTV1.....	77
5.3	ASIGNACIÓN DE LA PRIORIDAD DE TRÁFICO DEL SERVICIO BEST EFFORT A LAS APLICACIONES DE ITV .....	80
5.3.1	Efectos de la asignación de prioridad de tráfico al servicio BE a la aplicación EDiTV0 .....	80

5.3.2 Efectos de la asignación de prioridad de tráfico al servicio BE a la aplicación EDiTV1 .....	83
<b>CAPITULO VI.....</b>	<b>87</b>
<b>6 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>87</b>
6.1 CONCLUSIONES .....	87
6.2 APORTES DEL TRABAJO DE GRADO.....	89
6.3 RECOMENDACIONES.....	89
6.4 TRABAJOS FUTUROS.....	90
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>92</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1. Comparación técnica de los estándares de difusión de televisión digital.....	11
Tabla 2-2. Tasas de bits para un programa SDTV y HDTV codificados mediante los estándares MPEG-2 y MPEG-4 .....	13
Tabla 2-3. Configuraciones del estándar ETS 300 429 .....	21
Tabla 2-4. Recomendación de los parámetros de nivel de transporte para una adecuada QoS en un servicio de televisión digital en el canal de difusión.....	24
Tabla 3-1. Flujos de Servicio de QoS proporcionados en DOCSIS .....	41
Tabla 4-1. Transferencia de información entre el STB y el servidor de aplicaciones para solicitar información adicional .....	45
Tabla 4-2. Transferencia de la información entre el STB y el servidor de aplicaciones para responder a una pregunta de selección múltiple .....	45
Tabla 4-3. Parámetros de la función de distribución de probabilidad exponencial.....	49
Tabla 4-4. Media y varianza para el tiempo entre peticiones.....	49
Tabla 4-5. Parámetros de la función de distribución de probabilidad normal.....	50
Tabla 4-6. Media y desviación estándar para el tiempo de inicio de respuesta a una pregunta .....	50
Tabla 4-7. Tamaño de las solicitudes, respuestas y archivos (XML e imagen) para las aplicaciones de iTV.....	51
Tabla 4-8. Parámetros DOCSIS para la simulación del tráfico de iTV .....	58
Tabla 5-1. Configuración de los parámetros DOCSIS para la simulación del tráfico de iTV, HTTP, FTP y VoIP .....	72
Tabla 5-2. Perfiles de usuario para los servicios HTTP, FTP y VoIP .....	73

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Fases del proceso de modelado de un sistema de cable .....	5
Figura 2-1. Arquitectura para la difusión de televisión digital en redes de cable .....	12
Figura 2-2. Pila de protocolos para el canal de difusión .....	14
Figura 2-3. Capas del carrusel de objetos DSM-CC.....	16
Figura 2-4. Esquema básico para la multiplexación de los flujos elementales de audio, video y datos.....	17
Figura 2-5. Estructura de un paquete del flujo de transporte MPEG-2 .....	18
Figura 2-6. Relación entre las tablas de la Información Específica de Programa (PSI) ....	19
Figura 2-7. Pila de protocolos en el canal de interacción .....	22
Figura 3-1. Espectro de frecuencias empleado por una red HFC a) Estándar estadounidense b) Estándar europeo .....	28
Figura 3-2. Modelo de referencia DVB para servicios interactivos .....	29
Figura 3-3. Esquema general de la red HFC.....	30
Figura 3-4. Red troncal de la red HFC .....	32
Figura 3-5. Red interna del hogar de un usuario .....	33
Figura 3-6. Componente tecnológico de un sistema de iTV .....	34
Figura 3-7. Tráfico IP a través del sistema de datos sobre cable .....	36
Figura 3-8. Asignación de tiempos en sentido ascendente .....	38
Figura 3-9. Diagrama de estados en DOCSIS para estaciones ya inicializadas .....	39
Figura 3-10. Planificación e Identificadores del Servicio (SID) .....	40
Figura 4-1. Entorno de experimentación .....	44
Figura 4-2. Tráfico generado por usuarios diferentes de la aplicación de solicitud de información adicional al programa de televisión educativo.....	46
Figura 4-3. Interfaz de visualización de la aplicación de solicitud de información adicional al programa de televisión educativo.....	47
Figura 4-4. Tráfico generado por usuarios diferentes de la aplicación de preguntas de selección múltiple sobre el programa de televisión educativo .....	48
Figura 4-5. Comparación de los histogramas de los datos capturados en el laboratorio de EDiTV con las estadísticas de OPNET <i>Modeler</i> para el tiempo entre peticiones .....	52
Figura 4-6. Simulación del tráfico generado por usuarios diferentes de la aplicación de solicitud de información adicional al programa de televisión educativo .....	52
Figura 4-7. Comparación de los histogramas de los datos capturados en el laboratorio de EDiTV con las estadísticas de OPNET <i>Modeler</i> para el tiempo de inicio de respuesta ....	53
Figura 4-8. Simulación del tráfico generado por usuarios diferentes de la aplicación de preguntas de selección múltiple sobre el programa de televisión educativo.....	53
Figura 4-9. Perfiles de usuarios de las aplicaciones de solicitud de información adicional al programa de televisión y de preguntas de selección múltiple.....	54
Figura 4-10. Modelo de red HFC para la simulación de las aplicaciones de iTV. ....	55

Figura 4-11. Tráfico agregado en el canal a) ascendente y b) descendente, <i>throughput</i> en el canal c) ascendente y d) descendente generado por diferente número de usuarios de la aplicación EDiTV0.....	59
Figura 4-12. Retardo a) DOCSIS y b) EDiTV para diferente número de usuarios de la aplicación EDiTV0.....	60
Figura 4-13. Tráfico agregado en el canal a) ascendente y b) descendente, <i>throughput</i> en el canal c) ascendente y d) descendente generado por diferente número de usuarios de la aplicación EDiTV1.....	61
Figura 4-14. Retardo a) DOCSIS y b) EDiTV para diferente número de usuarios de la aplicación EDiTV1.....	62
Figura 4-15. <i>Throughput</i> en el canal a) ascendente y b) descendente, y c) razón de pérdida de paquetes, para diferente tiempo entre mensajes MAP para la aplicación EDiTV0.....	64
Figura 4-16. Retardo a) DOCSIS y b) EDiTV para diferente tiempo entre mensajes MAP para la aplicación EDiTV0.....	64
Figura 4-17. <i>Throughput</i> en el canal a) ascendente y b) descendente, y c) razón de pérdida de paquetes, para diferente tiempo entre mensajes MAP para la aplicación EDiTV1.....	65
Figura 4-18. Retardo a) DOCSIS y b) EDiTV para diferente tiempo entre mensajes MAP para la aplicación EDiTV1.....	66
Figura 4-19. Retardo a) DOCSIS y b) EDiTV para diferentes combinaciones entre concatenación y fragmentación para la aplicación EDiTV0.....	67
Figura 4-20. Retardo a) DOCSIS y b) EDiTV para diferentes combinaciones entre concatenación y fragmentación para la aplicación EDiTV1.....	68
Figura 4-21. Retardo a) DOCSIS, b) EDiTV y c) razón de pérdida de paquetes para diferente tamaño de <i>minislot</i> para la aplicación EDiTV0.....	70
Figura 4-22. Retardo a) DOCSIS, b) EDiTV y c) razón de pérdida de paquetes para diferente tamaño de <i>minislot</i> para la aplicación EDiTV1.....	71
Figura 5-1. Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV sobre el retardo EDiTV.....	74
Figura 5-2. Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV0 sobre el <i>throughput</i> en el canal a) ascendente y b) descendente.....	75
Figura 5-3. Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV0 sobre a) el retardo HTTP y b) retardo FTP.....	75
Figura 5-4. Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV0 sobre a) el retardo VoIP y b) <i>jitter</i> VoIP.....	76
Figura 5-5. Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV0 sobre a) el retardo DOCSIS y b) la razón de pérdida de paquetes.....	77
Figura 5-6. Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV1 sobre el retardo EDiTV.....	77
Figura 5-7. Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV1 sobre a) el retardo HTTP y b) retardo FTP.....	78

Figura 5-8. Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV1 sobre a) el retardo VoIP y b) <i>jitter</i> VoIP.....	79
Figura 5-9. Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación de EDiTV0 sobre a) el retardo DOCSIS y b) la razón de pérdida de paquetes .....	79
Figura 5-10. Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV1 el <i>throughput</i> en el canal a) ascendente y b) descendente .....	80
Figura 5-11. Efectos de la variación de la prioridad del tráfico <i>Best Effort</i> en la EDiTV0 sobre el retardo EDiTV .....	81
Figura 5-12. Efectos de la variación de la prioridad del tráfico <i>Best Effort</i> en la aplicación EDiTV0 sobre a) el retardo HTTP y b) retardo FTP.....	81
Figura 5-13. Efectos de la variación de la prioridad del tráfico <i>Best Effort</i> en la aplicación EDiTV0 sobre a) el retardo VoIP y b) <i>jitter</i> VoIP.....	82
Figura 5-14. Efectos de la variación de la prioridad del tráfico <i>Best Effort</i> en la aplicación EDiTV0 sobre a) el retardo DOCSIS y b) la razón de pérdida de paquetes .....	83
Figura 5-15. Efectos de la variación de la prioridad del tráfico <i>Best Effort</i> en la aplicación EDiTV1 sobre el retardo EDiTV .....	83
Figura 5-16. Efectos de la variación de la prioridad del tráfico <i>Best Effort</i> en la aplicación EDiTV0 sobre el retardo HTTP y FTP .....	84
Figura 5-17. Efectos de la variación de la prioridad del tráfico <i>Best Effort</i> en la aplicación EDiTV0 sobre a) el retardo VoIP y b) <i>jitter</i> VoIP.....	84
Figura 5-18. Efectos de la variación de la prioridad del tráfico <i>Best Effort</i> en la aplicación EDiTV0 sobre a) el retardo DOCSIS y b) la razón de pérdida de paquetes .....	85
Figura 5-19. Efectos de la variación de la prioridad del tráfico <i>Best Effort</i> sobre el <i>throughput</i> en sentido ascendente para a) la aplicación EDiTV0 y b) para la aplicación EDiTV1 .....	86

## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>ACAP:</b>	<i>Advanced Common Applications Platform</i> (Plataforma Avanzada de Aplicaciones Comunes)
<b>ACATS:</b>	<i>Advisory Committee on Advanced Television Service</i> (Comisión Consultiva en Servicios Avanzados de Televisión)
<b>API:</b>	<i>Application Programming Interface</i> (Interfaz de Programación de Aplicaciones)
<b>ARIB:</b>	<i>Association of Radio Industries and Businesses</i> (Asociación de Industrias y Negocios de Radio)
<b>ATSC:</b>	<i>Advanced Television System Committee</i> (Comisión del Sistema Avanzado de Televisión)
<b>BC:</b>	<i>Broadcast Channel</i> (Canal de Difusión)
<b>BE:</b>	<i>Best Effort</i> (Mejor Esfuerzo)
<b>BER:</b>	<i>Bit Error Rate</i> (Tasa de Bits Erróneos)
<b>CA:</b>	<i>Conditional Access</i> (Acceso Condicional)
<b>CAT:</b>	<i>Conditional Access Table</i> (Tabla de Acceso Condicional)
<b>CATV:</b>	<i>Community Antenna Television</i> (Televisión por Cable)
<b>CM:</b>	<i>Cable Modem</i> (Módem de Cable)
<b>CMTS:</b>	<i>Cable Modem Termination System</i> (Sistema de Terminación de Módem de Cable)
<b>CNTV:</b>	Comisión Nacional de Televisión
<b>COFDM:</b>	<i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal Codificada)
<b>CRA:</b>	<i>Contention Resolution Algorithm</i> (Algoritmo de Resolución de Contienda)
<b>CRT:</b>	Comisión de Regulación de Telecomunicaciones
<b>DASE:</b>	<i>Digital Television Application Software Environment</i> (Ambiente Software de Aplicaciones de Televisión Digital)
<b>DECT:</b>	<i>Digital Enhanced Cordless Telecommunications</i> (Telecomunicaciones Inalámbricas Digitales Mejoradas)
<b>DiGEB:</b>	<i>Digital Broadcasting Experts Group</i> (Grupo de Expertos de Difusión Digital)
<b>DHCP:</b>	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i> (Protocolo de Configuración Dinámica de Anfitrión)
<b>DOCSIS:</b>	<i>Data Over Cable Service Interface Specifications</i> (Especificaciones de la Interfaz del Servicio de Datos Sobre Cable)
<b>DSC-CC:</b>	<i>Digital Storage Media Command and Control</i> (Medios de Almacenamiento Digital de Mando y Control)
<b>DSL:</b>	<i>Digital Subscriber Line</i> (Línea Digital de Abonado)
<b>DTV:</b>	<i>Digital Television</i> (Televisión Digital)
<b>DVB:</b>	<i>Digital Video Broadcasting</i> (Difusión de Video digital)
<b>DWDM:</b>	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> (Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa)

<b>EIT:</b>	<i>Event Information Table</i> (Tabla de Información de Evento)
<b>FDMA:</b>	<i>Frequency Division Multiple Access</i> (Acceso Múltiple por División en Frecuencia)
<b>FEC:</b>	<i>Forward Error Correction</i> (Corrección de Errores Hacia Adelante).
<b>FSS:</b>	<i>Frequency Stacking System</i> (Sistema de Apilamiento de Frecuencias)
<b>FTP:</b>	<i>File Transfer Protocol</i> (Protocolo de Transferencia de Archivos)
<b>FTTx:</b>	<i>Fiber to the any</i> (Fibra hasta cualquier ubicación)
<b>GPRS:</b>	<i>General Packet Radio Service</i> (Servicio General de Paquetes Vía Radio)
<b>GSM:</b>	<i>Global System for Mobile Communications</i> (Sistema Global para Comunicaciones Móviles)
<b>HDTV:</b>	<i>High Definition Television</i> (Televisión de Alta Definición)
<b>HFC:</b>	<i>Hybrid Fiber – Coaxial</i> (Híbrido de Fibra y Coaxial)
<b>HTTP:</b>	<i>HyperText Transfer Protocol</i> (Protocolo de Transferencia de Hipertexto)
<b>HTTPS:</b>	<i>HTTP Secure</i> (http Seguro)
<b>IC:</b>	<i>Interaction Channel</i> (Canal de Interacción)
<b>IEC:</b>	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comisión Electrotécnica Internacional)
<b>IEEE:</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)
<b>IP:</b>	<i>Internet Protocol</i> (Protocolo de Internet)
<b>IPTV:</b>	<i>Internet Protocol Television</i> (Protocolo de Televisión por Internet)
<b>ISDB:</b>	<i>Integrated Services Digital Broadcasting</i> (Difusión Digital de Servicios Integrados)
<b>ISO:</b>	<i>International Organization for Standardization</i> (Organización Internacional de Estandarización)
<b>ITU:</b>	<i>International Telecommunications Union</i> (Unión Internacional de Telecomunicaciones)
<b>iTV:</b>	<i>Interactive Television</i> (Televisión Interactiva)
<b>LMDS:</b>	<i>Local Multipoint Distribution Service</i> (Servicio de Distribución local Multipunto)
<b>MAC:</b>	<i>Media Access Control</i> (Control de Acceso al Medio)
<b>MHP:</b>	<i>Multimedia Home Protocol</i> (Protocolo Multimedia de Hogar)
<b>MPEG:</b>	<i>Moving Pictures Experts Group</i> (Grupo de expertos en video)
<b>NIT:</b>	<i>Network Information Table</i> (Tabla de Información de la Red)
<b>nrtPS:</b>	<i>non-real-time Polling Service</i> (Servicio de Interrogación Secuencial No en Tiempo real)
<b>NTSC:</b>	<i>National Television Systems Committee</i> (Comité del Sistema de Televisión Nacional)
<b>OCAP:</b>	<i>Open Cable Applications Platform</i> (Plataforma Abierta de Aplicaciones de Cable)
<b>OLT:</b>	<i>Optical Line Terminator</i> (Terminal de Línea Óptica)
<b>ONT:</b>	<i>Optical Network Termination</i> (Terminación de Red Óptica)

<b>ONU:</b>	<i>Optical Network Unit</i> (Unidad de Red Óptica)
<b>PAL:</b>	<i>Phase Alternate Line</i> (Línea de Fase Alterna)
<b>PAT:</b>	<i>Program Association Table</i> (Tabla de Asociación de Programa)
<b>PC:</b>	<i>Personal Computer</i> (Computador Personal)
<b>PES:</b>	<i>Packetized Elementary Stream</i> (Flujo Elemental Paquetizado)
<b>PMD:</b>	<i>Physical Media Dependent</i> (Dependiente del Medio Físico)
<b>PMT:</b>	<i>Program Mapping Table</i> (Tabla de Mapeo de Programa)
<b>PPV:</b>	<i>Pay Per View</i> (Pago por Ver)
<b>PRC:</b>	<i>Program Clock Reference</i> (Referencia del Reloj de Programa),
<b>PSI:</b>	<i>Program Specific Information</i> (Información Específica de Programa)
<b>PSTN:</b>	<i>Public Switched Telephone Network</i> (Red de Telefonía Pública Conmutada)
<b>QAM:</b>	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> (Modulación de Amplitud en Cuadratura)
<b>QoS:</b>	<i>Quality of Service</i> (Calidad de Servicio)
<b>QPSK:</b>	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> (Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura)
<b>rtPS:</b>	<i>real-time Polling Service</i> (Servicio de Interrogación Secuencial en Tiempo Real)
<b>SDT:</b>	<i>Service Description Table</i> (Tabla de Descripción del Servicio)
<b>SDTV:</b>	<i>Standard Definition Television</i> (Televisión de Definición Estándar)
<b>SID:</b>	<i>Service Identifier</i> (Identificador de Servicio)
<b>SMATV:</b>	<i>Satellite Master Antenna Television</i>
<b>SNMP:</b>	<i>Simple Network Management Protocol</i> (Protocolo de Gestión de Red Simple)
<b>STB:</b>	<i>Set Top Box</i> (Decodificador de Usuario Final)
<b>TC:</b>	<i>Transmission Convergence</i> (Convergencia de la Transmisión)
<b>TCP:</b>	<i>Transmission-Control Protocol</i> (Protocolo de Control de la Transmisión)
<b>TDM:</b>	<i>Time División Multiplexing</i> (Multiplexación por División de Tiempo)
<b>TFTP:</b>	<i>Trivial File Transfer Protocol</i> (Protocolo de Transferencia de Archivos Trivial)
<b>TDT:</b>	<i>Time and Data Table</i> (Tabla de Fecha y Tiempo)
<b>TS:</b>	<i>Transport Stream</i> (Flujo de Transporte)
<b>TV:</b>	Televisión
<b>UGS:</b>	<i>Unsolicited Grant Service</i> (Servicio de Concesión No Solicitada)
<b>UGS-AD:</b>	<i>Unsolicited Grant Service with Activity Detection</i> (Servicio de Concesión No Solicitada con Detección de Actividad)
<b>UMTS:</b>	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> (Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universal).
<b>VLAN:</b>	<i>Virtual Local Area Network</i> (Red de Área Local Virtual)
<b>VoD:</b>	<i>Video on Demand</i> (Video bajo demanda)
<b>VoIP:</b>	<i>Voice over IP</i> (Voz sobre IP)
<b>VSF:</b>	<i>Vestigial Side Band</i>
<b>WAN:</b>	<i>Wide Area Network</i> (Red de Área Amplia)

**WDM:** *Wavelength Division Multiplexing* (Multiplexación por División de Longitud de Onda)  
**xDSL:** *Any Digital Subscriber Line* (Cualquier Línea Digital de Abonado)  
**XML:** *Extensible Markup Language* (Lenguaje de Marcado Extendido)

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUCCIÓN

El televisor como equipamiento presente en la mayoría de los hogares a nivel mundial, debe jugar un papel importante en la implantación de la Sociedad de la Información, que en conjunto con la tecnología digital debe permitir el acceso a los nuevos servicios más allá de la sola distribución de canales de televisión [1]. La digitalización de la televisión facilita la implementación de servicios de baja interactividad proporcionados directamente por la televisión digital terrestre, o bien a servicios más avanzados a los que se accedería a través del televisor con una conexión de banda ancha [1].

La televisión interactiva (iTV, *Interactive Television*) se beneficia de la evolución de la televisión analógica a la televisión digital pudiendo pasar de su simple uso en entretenimiento a convertirse en un medio alternativo para suministrar, intercambiar y consultar información fortaleciendo la influencia de este medio en la sociedad en general [1]. Aunque en la actualidad el computador conectado a Internet es la herramienta de información y comunicación por excelencia, la simpleza y usabilidad de un televisor dotado de una conexión a Internet constituye un ambiente favorable para que la televisión interactiva tenga un futuro promisorio en diferentes áreas como comercio, educación, salud e información, lo cual contrasta con la complejidad y la barrera de penetración de los computadores en los hogares [2].

Los sistemas de iTV utilizan dos canales de comunicación uno de *broadcast* o de difusión y otro interactivo o de retorno [3] [4], para conceder a los televidentes la posibilidad de interactuar con los programas televisivos [5]. El canal de difusión permite una comunicación unidireccional entre el proveedor del servicio y los usuarios; este canal hace referencia al medio (terrestre, por cable o vía satélite) por el cual los contenidos de audio, video y datos asociados a un programa de iTV son entregados simultáneamente a todos los televidentes [3] [4]. El canal interactivo, es un canal bidireccional entre el servidor de aplicaciones y el usuario, y se utiliza para enviar datos o solicitar información adicional a un programa de televisión con el fin de proporcionar una verdadera interactividad [3] [4].

En este orden de ideas, la televisión interactiva puede llegar a ser un medio alternativo para apoyar procesos educativos a distancia para convertirse en una verdadera oportunidad de aprendizaje en casa [2]. Si bien dentro de la educación virtual, la principal herramienta para el aprendizaje es el uso de un computador conectado a Internet, actualmente se están explorando nuevas posibilidades para hacer que la educación virtual se introduzca utilizando la televisión como un medio adicional para llegar a los estudiantes

y de esta manera superar la barrera de penetración de los computadores en los hogares [2].

El presente trabajo de grado está enmarcado dentro del Proyecto Macro “Educación Virtual Basada en Televisión Interactiva para Apoyar Procesos Educativos a Distancia (EDiTV)” [6] el cual busca fomentar la utilización de la televisión como un medio adicional para llegar a los estudiantes haciendo uso de las ventajas de la televisión interactiva. El proyecto macro al cual están vinculadas la Universidad del Cauca, la Universidad Autónoma de Occidente y la Universidad de Oviedo, fue aprobado por el Comité Técnico del Ministerio de Educación Nacional y COLCIENCIAS con cofinanciación del Ministerio de Educación Nacional, como respuesta a la convocatoria 393-2006 de COLCIENCIAS para hacer uso de la red RENATA (Red Nacional Académica de Tecnología Avanzada de Colombia). Así pues, los resultados presentados en esta monografía contribuyeron al cumplimiento de uno de los objetivos adquiridos en dicho Proyecto Macro.

Dentro del proyecto EDiTV, se tiene que el contenido educativo producido y el proceso de aprendizaje han sido desarrollados especialmente para un ambiente de aprendizaje interactivo basado en los estándares DVB-MHP (*Digital Video Broadcasting – Multimedia Home Platform*) para una red de televisión por cable [7]. En este contexto, el material de aprendizaje y las aplicaciones MHP se entregan a los estudiantes por el canal de difusión de la red de cable y por medio de un control remoto el estudiante puede interactuar con la aplicación, que se ejecuta en STB<sup>1</sup> (*Set-Top Box*), para enviar datos o solicitar información a través del canal de interacción o canal de retorno, que en este caso usa la tecnología DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*) como protocolo dependiente de la red para la conexión de Internet [7].

En este sentido, mediante una simulación de la transmisión de tráfico de iTV en un modelo de red Híbrida de Fibra y Coaxial (HFC, *Hybrid Fiber Coaxial*), se realizó un estudio y evaluación de la red HFC permitiendo determinar las condiciones mínimas que la red debe cumplir para soportar los diferentes contenidos y niveles de interactividad dentro de un sistema de educación virtual a distancia, evaluando los parámetros de desempeño característicos de este tipo de servicio para garantizar la calidad de servicio necesaria para su correcta transmisión en conjunto con otras aplicaciones y servicios. Las condiciones particulares de este tráfico de tiempo real hicieron necesario un análisis de las diferentes alternativas de configuración que ofrece el protocolo DOCSIS para la distribución de contenidos educativos de iTV, evaluando el consumo de recursos cuando se implementa sobre redes HFC.

---

<sup>1</sup> Equipo ubicado en las premisas del usuario encargado de decodificar las señales de televisión digital en señales analógicas y ejecutar las aplicaciones MHP para presentarlas en la pantalla de TV

## 1.1 MOTIVACIONES DEL TRABAJO DE GRADO

Durante años la televisión analógica se ha utilizado con fines de aprendizaje, pero los estudiantes han tenido un papel pasivo y la interacción no ha sido posible [8]. Ahora, debido a la inclusión de la tecnología digital en la difusión de televisión se puede lograr un nivel de funcionalidad agregado al permitir la distribución de datos y aplicaciones adicionales al contenido audiovisual para enriquecer los contenidos educativos haciendo así más interactivos los procesos de aprendizaje mediante programas de televisión [8]. De esta forma se dio origen al concepto de *T-learning*.

A continuación, se presentan dos de las definiciones más cercanas al contexto que abordará este trabajo de grado y que se han adoptado para el proyecto EDiTV sobre *T-learning* [7]. En la primera “*el término t-learning se utiliza con el significado de aprendizaje a través de la televisión interactiva (iTV), lo que indica tener acceso interactivo a materiales de aprendizaje ricos en video a través de un TV u otro dispositivo semejante, que se parezca más a un televisor que a un computador. Dicho dispositivo tiene que ser confiable y fácil de utilizar*” [8]. En la segunda definición se considera el *T-learning* como la convergencia entre la televisión interactiva y el *E-learning*, la última entendida como el uso de la tecnología informática (específicamente Internet) para apoyar las actividades educativas y de formación [9] [10] [11]. Es por esto que un servicio de *T-learning* va a requerir de una red de altas prestaciones, que proporcione los recursos necesarios para que la experiencia de aprendizaje interactivo sea satisfactoria, con lo cual se incrementa la demanda de acceso a redes de banda ancha con baja tasa de error.

La digitalización de la televisión ha permitido que las redes que originalmente fueron pensadas para la transmisión de voz o datos puedan distribuir este servicio [12]. Pero la red de acceso HFC, como evolución de las redes de cable tradicionales, se convierte en una alternativa idónea para la transmisión de este servicio dado que reserva una porción del espectro de frecuencia proporcionado por el cable coaxial para los canales de difusión e interactivo permitiendo la transmisión de servicios como TV, voz y datos.

Un sistema HFC, donde la fibra óptica se utiliza en el *backbone* de la red y el cable coaxial es quien llega al usuario final [3], proporciona el ancho de banda necesario para la transmisión de TV, voz y datos [13]. Además, con la diferentes alternativas de configuración de calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*) proporcionadas por el protocolo DOCSIS, la red HFC puede satisfacer las exigencias del tráfico en tiempo real [14], permitiendo discriminar los distintos tipos de servicios para garantizar los requerimientos de red necesarios a dichas aplicaciones en términos de pérdidas de información, retardo y variación del retardo (*jitter*).

De lo expuesto anteriormente y teniendo en cuenta que son pocos los estudios existentes enfocados a la transmisión de datos en tiempo real sobre redes de acceso HFC [13] y

particularmente sobre el tráfico generado por las aplicaciones de iTV, se justificó realizar un análisis y evaluación de dicha red para la distribución por el canal interactivo de contenidos educativos de iTV con QoS para determinar las condiciones mínimas que la red debe cumplir para soportar los diferentes contenidos y niveles de interactividad dentro de un sistema de educación virtual a distancia, de modo que la experiencia en el uso de estas aplicaciones sea satisfactoria.

No obstante, la dificultad para acceder a una red HFC real y las limitaciones económicas para la implementación de un laboratorio de iTV con un canal de retorno DOCSIS, hizo necesario acudir a una herramienta de simulación apropiada para el modelado y simulación de redes HFC, contemplando aspectos relevantes de su funcionamiento, tal como el tráfico en la red, aplicaciones en uso, comportamiento de los usuarios, topologías de red y protocolos empleados. De esta forma y después de una investigación de las diferentes herramientas de simulación de redes de comunicaciones, en este trabajo de grado se optó por utilizar la herramienta de simulación OPNET *Modeler* [15].

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo General**

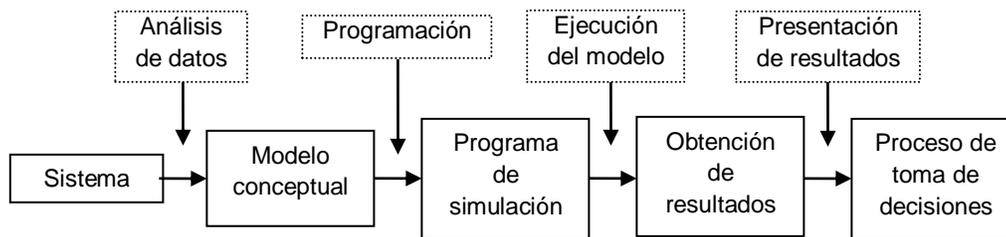
Analizar y evaluar la red de acceso HFC para la distribución de contenidos educativos de iTV con QoS.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- a) Determinar los principales parámetros de desempeño que caracterizan el servicio de iTV para la distribución de contenidos educativos.
- b) Analizar las diferentes alternativas de funcionamiento del protocolo de acceso DOCSIS para dar soporte a la distribución de contenidos educativos de iTV con calidad de servicio.
- c) Evaluar los parámetros de desempeño (retardo, jitter, B.E.R, entre otros) de la red para soportar el servicio de iTV mediante la simulación de este tipo de tráfico en un modelo de red HFC.

## **1.3 METODOLOGÍA**

Para el desarrollo de este trabajo de grado se siguió la metodología mostrada en la figura 1 [13] donde se resumen los diferentes aspectos que se tienen en cuenta a la hora de modelar el comportamiento y prestaciones en redes de cable.



**Figura 1-1.** Fases del proceso de modelado de un sistema de cable

A partir de la descripción del sistema físico a estudiar (la red HFC y las aplicaciones de televisión interactiva), se realizó un análisis de los datos capturados, en el laboratorio de televisión digital interactiva del proyecto EDiTV [16], para reflejar su funcionalidad. El análisis de la información disponible permitió la obtención de los parámetros que caracterizan las relaciones matemáticas que definen el comportamiento del servicio. De esta forma se obtiene el modelo conceptual. Luego se realizó la programación y ejecución del modelo conceptual mediante la herramienta de simulación OPNET *Modeler* para obtener una serie de resultados acerca del comportamiento del sistema ante situaciones reales en las que se quiere evaluar su rendimiento. Finalmente, a partir del análisis de los resultados obtenidos, se pudo prever el comportamiento del sistema ante diferentes situaciones y configuraciones.

## 1.4 ESTRUCTURA DE LA MONOGRAFÍA

Este trabajo de grado tiene una estructura definida en capítulos atendiendo a los temas tratados durante el desarrollo de la misma. Así, en el capítulo I se consideró una síntesis del contexto global en el cual se ubica el proyecto, las motivaciones para la realización del proyecto, los objetivos del proyecto, la estructura y contenido de la monografía.

En el capítulo II, se estudian los aspectos técnicos más relevantes para la prestación de un servicio de iTV, lo cual permitió la definición de los parámetros de desempeño que la red debe proporcionar para una adecuada prestación del servicio de iTV tanto para el canal difusión como para el canal interactivo

En el capítulo III se hace una descripción de la arquitectura de la red de acceso HFC y el alcance que tiene esta para la prestación del servicio de iTV, además se realiza una revisión general del protocolo de acceso DOCSIS con el fin de comprender el funcionamiento del mismo.

En el capítulo IV se muestra el modelo matemático del tráfico de las aplicaciones de iTV encontrado y que representa el comportamiento estadístico del tráfico real generado por las aplicaciones de iTV en el canal interactivo de un sistema de iTV lo que facilita su uso en las simulaciones; además se presenta un modelo de red HFC en la herramienta de

simulación OPNET *Modeler* que permite la simulación del tráfico de iTV en el canal interactivo mediante la conformación de perfiles de usuario. Finalmente se presenta el análisis del protocolo DOCSIS para la transmisión del tráfico generado por las aplicaciones de iTV en el canal interactivo de la red HFC evaluando los parámetros de desempeño como la utilización de los enlaces (*throughput*), el retardo y pérdida de paquetes en la red HFC en diferentes escenarios donde se varió el número de usuarios que acceden a la red y los parámetros de configuración del protocolo como el tiempo entre MAP, tamaño del *minislot* y los parámetros de calidad de servicio como fragmentación y concatenación.

En el capítulo V se muestran y analizan los resultados obtenidos de la simulación del tráfico generado por las aplicaciones de iTV en el modelo de red HFC, evaluando los parámetros de desempeño de la red y de esta forma determinar la configuración óptima del protocolo DOCSIS para dar soporte a estas aplicaciones cuando comparte los recursos de red con otras aplicaciones y servicios de voz y datos.

Finalmente se presentan las conclusiones a las que se llegó con el estudio, teniendo en cuenta los objetivos planteados al inicio del proyecto y las recomendaciones para quienes deseen continuar con trabajos e investigaciones en temáticas tratadas en este trabajo de grado, así como también los trabajos futuros y los aportes del trabajo de grado.

## CAPITULO II

### 2 DISTRIBUCIÓN DE TELEVISIÓN INTERACTIVA

El presente capítulo describe la manera en la cual un programa de televisión interactiva se distribuye por el canal de difusión de la red HFC desde la cabecera hacia el usuario final, así como también la forma en que las solicitudes realizadas y los contenidos entregados en un ambiente de interacción se transmiten por el canal interactivo desde los equipos del usuario hasta el servidor de aplicaciones ubicado en la cabecera de red. Este estudio permitió determinar los parámetros de desempeño que caracterizan el servicio de iTV para una adecuada distribución por un sistema de iTV.

#### 2.1 TELEVISIÓN INTERACTIVA

La inclusión de la interactividad añade a la televisión digital un nivel de funcionalidad más allá de la simple recepción de vídeo, permitiendo ofrecer al espectador un importante conjunto de servicios para explorar nuevas formas de hacer televisión y complementar los contenidos de los actuales programas de televisión [17]. Por lo tanto, la televisión interactiva modifica sustancialmente el esquema de la televisión tradicional permitiendo satisfacer las nuevas necesidades de entretenimiento, comunicación, transacción e información [18].

La ITU-T define a la televisión interactiva (iTV, *Interactive Television*) como “*un servicio en el que el usuario puede enviar solicitudes, en un ambiente de navegación, al proveedor del servicio con el fin de obtener información adicional*” [19]. En consecuencia, se crea la posibilidad de personalizar e influir en el contenido que se muestra en el televisor, bien sea accediendo a información enviada durante el proceso de emisión, pero que solo se hace visible si el espectador lo desea, o bien accediendo a servidores con los que puede intercambiar información a través de un canal de retorno utilizando el televisor como interfaz de salida [8] [20].

A pesar que la interactividad en el ámbito de la televisión puede parecer un fenómeno reciente, se tiene una trayectoria llena de pruebas, experimentos y avances tecnológicos, que han propiciado que en los últimos años la televisión interactiva afronte un relanzamiento en varios países favorecido por el entorno de convergencia entre los medios audiovisuales e Internet [21]. Las primeras experiencias de interactividad en televisión se remontan a los años 70 con la aparición del teletexto [22]. Sin embargo, la aplicación se ve generalizada en los años 90 mediante la participación en programas a través de llamadas telefónicas, teletexto, mensajes de texto cortos (SMS) o Internet [23]. Aunque la mayoría de intentos resultaron en fracasos comerciales [24], su experiencia ofrece una valiosa

información, que resulta de gran valor para analizar la situación presente y las perspectivas a futuro de este nuevo medio.

### 2.1.1 Niveles de Interactividad

Dependiendo de la finalidad para la que haya sido desarrollado un contenido de televisión y en relación con el tipo de recursos tecnológicos y de programación informática que se hayan empleado en su producción, la interactividad suministrada por el programa podrá pasar de ser casi inexistente a permitir un elevado nivel de participación del usuario [25]. En el proyecto DVB (*Digital Video Broadcasting*) se hace una clasificación basada en los perfiles MHP (*Multimedia Home Platform*), identificándose tres niveles de interactividad:

- **Interactividad Local:** Este nivel utiliza el perfil MHP *Enhanced Broadcasting*, permitiendo al usuario interactuar con aplicaciones que se descargan por el canal de difusión y que se almacenan en el receptor para presentar determinada información que se renueva con cierta periodicidad. Dicha información consiste de texto e imágenes que los usuarios pueden consultar mientras ven el programa de televisión [26].
- **Interactividad Remota:** Este nivel de interactividad usa el perfil MHP *Interactive Broadcasting*, permitiendo al espectador interactuar con un proveedor de servicios exterior haciendo posible no solo ver contenidos adicionales a la programación y navegar por ellos, sino también enviar respuestas por parte de los usuarios e incluso comunicarse con otros usuarios. En este caso, la plataforma está dotada de un canal de retorno, con objeto de realizar la comunicación entre los decodificadores y la cabecera de la red [26].
- **Interactividad Real:** Engloba los otros dos niveles de interactividad y es un perfil que obliga al receptor a disponer de un navegador y de un cliente para *e-mail*, además permite el acceso a contenidos de Internet para conseguir información personalizada en tiempo real [27].

Según estos tres niveles, la interactividad abarca desde acciones limitadas en las que el usuario recorre un camino anteriormente construido y almacenado en el receptor hasta la retroalimentación total en el que el emisor y el receptor intercambian sus papeles. Los niveles de interactividad definidos permiten a los fabricantes de receptores y a los desarrolladores de aplicaciones construir diferentes productos con capacidades y costos diferentes.

### 2.1.2 Aplicaciones de iTV para ambientes educativos como caso de estudio

Como caso de estudio se han analizado las aplicaciones para la distribución de contenidos educativos en entornos de educación virtual a distancia basados en televisión interactiva del proyecto EDiTV. El contenido de un curso para *T-learning* es una combinación de diferentes tipos de materiales de aprendizaje tales como páginas DVB-HTML<sup>2</sup>, videos y animaciones, los cuales son presentados en la pantalla de televisor mediante un navegador que se ejecuta en el STB [8].

Las aplicaciones para ambientes educativos que se tuvieron en cuenta como caso de estudio son aquellas que facilitan la entrega contenidos de *T-learning* y cuyos requerimientos han sido definidos dentro del proyecto EDiTV [6] mediante la participación de los diferentes grupos, teniendo en cuenta conceptos pedagógicos, de usabilidad y de ingeniería, los cuales se condensan en los siguientes puntos:

- Debe presentar un Menú de contenidos desde el cual pueda accederse a las diferentes secciones del tema a tratar.
- Debe presentar una barra de navegación dentro de cada sección que permita realizar acciones como volver al Menú de contenidos, Salir o Interactuar.
- Se debe seguir una plantilla general para todas las secciones del curso.
- Cada sección de video puede presentar una o más aplicaciones interactivas.
- Las aplicaciones interactivas solo se deben presentar si el usuario así lo desea.

A continuación se hace una breve descripción de las aplicaciones desarrolladas como prototipos dentro del proyecto EDiTV facilitando la entrega contenidos de *T-learning* por el canal interactivo y que fueron objeto de simulación bajo la herramienta OPNET *Modeler*:

- **Programa educativo con información adicional:** En esta aplicación se habilitan contenidos adicionales a lo largo de la transmisión del programa, los cuales están compuestos de texto e imágenes que se descargan a través del canal interactivo. Para acceder a dichos contenidos la aplicación incluye opciones que el estudiante puede seleccionar iniciando su descarga desde el servidor de aplicaciones del sistema de aprendizaje [8]. La pantalla del televisor se divide en dos espacios, en uno de los cuales el video continúa ejecutándose y en el otro se presenta la información solicitada por el televidente. En este documento y en adelante esta aplicación será denominada EDiTV0.
- **Programa educativo con preguntas de selección múltiple:** En esta aplicación, un estudiante recibe un programa de televisión por el canal de difusión o *broadcast* durante el cual se realizan diversas preguntas de selección múltiple. Cada

---

<sup>2</sup> Aplicaciones que se basan en el uso de XML (*Extensible Markup Language*), HTML (*HyperText Markup Language*) y *JavaScript* combinando texto e imágenes.

pregunta tienen una vigencia durante un tiempo determinado, por lo cual el programa se divide en segmentos, cada uno de los cuales tendrá asociada una pregunta que el estudiante responderá de acuerdo a lo que está observando. Las respuestas seleccionadas desde el control remoto se transmiten del STB hacia el servidor de aplicaciones por el canal interactivo. En este documento y en adelante esta aplicación será llamada EDiTV0.

Este tipo de aplicaciones necesitan que la red de acceso utilizada como canal de retorno que garantice la calidad de servicio adecuada para proporcionar los parámetros de desempeño mínimos que el servicio necesita para que la experiencia del usuario frente a este tipo de aplicaciones sea satisfactoria, puesto que las peticiones entran a competir con otros servicios por los recursos de la red.

## **2.2 ESTANDARIZACIÓN PARA TELEVISIÓN DIGITAL INTERACTIVA**

En cuanto a la estandarización para la iTV, a nivel mundial se han desarrollado algunos intentos por prestar este servicio, los cuales fueron construidos como soluciones propietarias que no son interoperables unas con otras [25]. Esto dificulta la posibilidad que dichas aplicaciones puedan funcionar en más de un sistema ocasionando que los usuarios tengan que disponer del terminal correcto para el estándar que maneje su red de televisión, y que los programadores y estaciones de televisión se preocupen por escoger uno de ellos o proporcionar sus programas para que puedan funcionar en más de un sistema [25] [28]. Teniendo en cuenta las anteriores dificultades los organismos de regulación en telecomunicaciones se preocuparon por definir estándares para la prestación del servicio de iTV [25] [28] el cual se basa en los estándares para la difusión de televisión digital y los estándares para el *middleware* de los STB.

### **2.2.1 Estándares para difusión de televisión digital**

Para la difusión de televisión digital se han desarrollado en todo el mundo varios estándares, entre los cuales se destacan tres que han tenido la mayor penetración: el sistema ATSC (*Advanced Television Systems Committee*) diseñado por los Estados Unidos [29]; el DVB (*Digital Video Broadcasting*) creado en Europa [30], y el ISDB (*Terrestrial Integrated Services Digital Broadcasting*) desarrollado en Japón [31]. De igual manera en China e India desarrollaron su propio modelo.

Cada uno de los estándares describe un sistema para la transmisión de audio y video de alta calidad y datos a través de un canal convencional de difusión que puede ser terrestre (ATSC-T, DVB-T o ISDB-T), por cable (ATSC-C, DVB-C o ISDB-C) o vía satélite (ATSC-S, DVB-S o ISDB-S). La canalización de frecuencias, las modulaciones empleadas y la compresión de audio y video hacen posible que se puedan transmitir múltiples canales de televisión estándar (SDTV, *Standard Definition Television*) o de alta definición (HDTV,

High Definition Television) en el ancho de banda que ocupa un canal analógico. A partir de [29], [30], [31], [32] y [33] se realizó la tabla 2-1 en la cual se muestra una comparación técnica de los tres principales estándares para la difusión de televisión digital por diferentes medios.

**Tabla 2-1.** Comparación técnica de los estándares de difusión de televisión digital

Estándar	Tipo de Sistema	Codificación		Multiplexación y Transporte	Modulación	Ancho de banda del Canal	Tasa de Bit (Mbps)
		Audio	Video				
ATSC	ATSC-T	AC-3 <sup>3</sup>	MPEG-2	MPEG-2	8 VSB <sup>4</sup>	6 MHz	19,28
	ATSC-C		MPEG-4 AVC		16 VSB 256 QAM <sup>5</sup>		38,57
DVB	DVB-T	MPEG-2 DOLBY 5.1 (AC3)	MPEG-2 MPEG-4 AVC	MPEG-2	COFDM <sup>6</sup>	8 MHz	24,88
	DVB-C				16 QAM a 256 QAM	8 MHz	38,1
	DVB-S				QPSK	36 MHz	40
ISDB	ISDB-T	MPEG-2 AAC	MPEG-2 MPEG-4 AVC	MPEG-2	COFDM	6 MHz	23,2
	ISDB-C				64 QAM	6 MHz	31,64
	ISDB-S				QPSK	34,5 MHz	52

## 2.2.2 Estándares para *middleware*

El *middleware* es una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, *Application Programming Interface*) genérica implementada en los STB, que está incluida entre el sistema operativo y las aplicaciones, cuya función es ocultar las especificidades y heterogeneidades del hardware y el sistema operativo que dan soporte a las funcionalidades básicas de un sistema de iTV [28] [34]. Diversos organismos de estandarización han definido sus propias especificaciones para el *middleware*, y como resultado de estos esfuerzos se tienen tres estándares principales para iTV: ACAP (*Advanced Common Applications Platform*), MHP (*Multimedia Home Platform*) y ARIB (*Association of Radio Industries and Businesses*). Entre las características principales de cada uno de estos se tienen:

- **ACAP-ATSC:** Desde el punto de vista de la interactividad ATSC y CableLabs (organización que normaliza las soluciones técnicas para el Cable en EEUU) acordaron una plataforma interactiva común para la difusión por cable y por aire denominada ACAP (*Advanced Common Applications Platform*), que permite ser incorporada en los modelos de televisión de venta libre. Esta plataforma une las bondades de la plataforma OCAP (*Open Cable Applications Platform*) basada en

<sup>3</sup> Estándar de Compresión de Audio Digital que define 5 canales de alta y 1 canal de baja frecuencia

<sup>4</sup> Modulación de Banda Lateral Vestigial (*Vestigial SideBand*)

<sup>5</sup> Modulación de Amplitud en Cuadratura (*Quadrature Amplitude Modulation*)

<sup>6</sup> *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*: Esquema de transmisión OFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal) con modulación de las portadoras en QPSK o 16 QAM.

motores de búsqueda MHP, XML y en los motores de presentación Java de la plataforma DASE (*Digital Television Application Software Environment*) desarrollada originalmente en ATSC [35] [36].

- **DVB-MHP:** Es el primer estándar abierto de televisión interactiva a nivel mundial. El objetivo de MHP es proporcionar Interoperabilidad entre diferentes aplicaciones y terminales y entre los propios terminales. MHP define un interfaz software genérica entre las aplicaciones digitales interactivas proporcionadas por DVB y los terminales en los cuales se van a ejecutar (STB, computadores multimedia). Aunque en principio se desarrolló para ser compatible con DVB se ha extendido este estudio a otras plataformas de televisión digital [27].
- **ARIB-ISDB:** El estándar japonés ISDB adopta la plataforma ARIB (*Association of Radio Industries and Businesses*). ARIB define la programación de aplicaciones software basado en un lenguaje declarativo denominado BML (*Broadcast Markup Language*), que a su vez se encuentra basada en el lenguaje XML [37]. El estándar incorpora un sistema que se basa en las especificaciones MHP del proyecto DVB-GEM (*DVB Globally Executable MHP*), con las estipulaciones necesarias y adicionales para la radiodifusión en Japón [38].

### 2.3 DIFUSIÓN DE TELEVISIÓN INTERACTIVA EN REDES DE CABLE

Este trabajo de grado, como parte del proyecto EDiTV y teniendo en cuenta la elección de estándar europeo (DVB-T) para difusión de la televisión digital terrestre por parte de la CNTV [39], hace referencia al estándar europeo de televisión digital por cable (DVB-C) cuya arquitectura se muestra en la figura 2-1 [40].



Figura 2-1. Arquitectura para la difusión de televisión digital en redes de cable

La arquitectura de la figura 2-1 plantea que los contenidos de audio y video, y las aplicaciones interactivas entregadas por el proveedor de contenidos y servicios deben ser codificados y comprimidos mediante los estándares MPEG-2 o MPEG-4 para facilitar el

proceso de multiplexación y transporte con el fin de generar un único flujo de bits o flujo de transporte MPEG-2, el cual finalmente se codifica y modula para su transmisión por la red de televisión por cable hasta las pantallas de los televidentes [41]. En los siguientes numerales se describen con más detalle los subsistemas que componen la arquitectura para la difusión de televisión digital en redes de cable.

### 2.3.1 Compresión y codificación de audio y video

En este subsistema se utilizan algoritmos de compresión de audio y video para reducir de forma significativa el flujo de bits necesario para representar la información correspondiente a un programa de televisión digitalizado [42], proporcionado por el proveedor de contenidos y servicios. Este proceso fue estandarizado por el *Moving Picture Experts Group* (MPEG), grupo afiliado a la Organización Internacional de Estandarización (ISO, *International Organization for Standardization*) y a la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, *International Electrotechnical Commission*), mediante la definición de una serie de estándares internacionales para la codificación de audio y video en un formato digital comprimido [43].

El sistema DVB actualmente utiliza las especificaciones MPEG-2 [44] para la compresión y codificación de los flujos de audio y video como se describe en ISO/IEC 13818-7 [45] e ISO/IEC 13818-2 (ITU-T Rec. H.262) [46] respectivamente. DVB también ha establecido este procedimiento a través del estándar MPEG-4 [47] donde ISO/IEC 14496-3 se usa para codificación de audio [48] e ISO/IEC 14496-10 (ITU-T Rec. H.264) para codificación avanzada de video [49] [50]. En la tabla 2-2 [51] se muestra un resumen de las tasas de bits después de la codificación de un programa SDTV y HDTV con MPEG-2 y MPEG-4.

**Tabla 2-2.** Tasas de bits para un programa SDTV y HDTV codificados mediante los estándares MPEG-2 y MPEG-4

<b>Servicio de Audio y Video</b>	<b>SDTV</b>	<b>HDTV 720p50</b>	<b>HDTV 1080i50</b>
MPEG-2	4 Mbps CBR <sup>7</sup>	14 Mbps CBR	17 Mbps CBR
MPEG-4 AVC	2 Mbps CBR	9 Mbps CBR	12 Mbps CBR
Información del Servicio	1 Mbps		

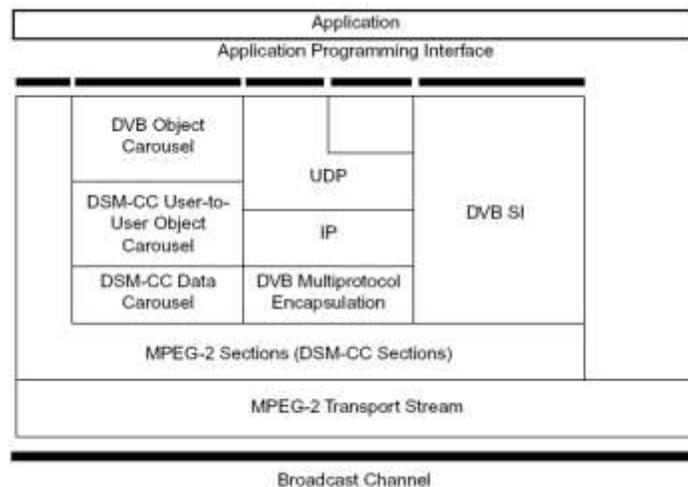
El DVB no proporciona compatibilidad directa entre los modos HDTV y STDV, lo que significa que las transmisiones de televisión de alta definición, no pueden ser recibidas en receptores estándar a menos que se cuente con un receptor que convierta las transmisiones de televisión de alta definición a definición estándar. La resolución de la pantalla para HDTV es de 1920 x 1080 para frecuencias de 25 Hz y 30 Hz [52]. Para SDTV la resolución de pantalla a una frecuencia de 30 Hz oscila entre 720 x 480, 640 x

<sup>7</sup> Tasa de Bit Constante (*Constant Bit Rate*)

480, 544 x 480, 480 x 480, 352 x 480 a 352 x 240, mientras que la resolución de pantalla para una frecuencia de 25 Hz varía entre 720 x 576, 544 x 576, 480 x 576, 352 x 576 a 352 x 288. Las relaciones de aspecto de la pantalla incluyen 4:3 y 16:9 (*wide screen*) [52].

### 2.3.2 Transmisión y sincronización de datos y aplicaciones MHP

La transmisión de datos y eventos por un canal de difusión se realiza en forma de carrusel, mecanismo que se describe en el protocolo DSM-CC (*Digital Storage Media – Command and Control*), publicado por la ISO/IEC dentro del estándar MPEG-2 parte 6 [53]. El protocolo DSM-CC está definido en todas las versiones de la especificación MHP y generalmente se utiliza para difundir las aplicaciones interactivas, por lo que todos los perfiles de MHP deben soportarlo [27]. En la figura 2-2 [27] se muestra la pila de protocolos utilizados para la entrega de datos y aplicaciones MHP a través del canal de difusión.



**Figura 2-2.** Pila de protocolos para el canal de difusión

Los datos a ser transmitidos junto con el contenido audiovisual se dividen en partes llamadas módulos para que pueda transmitirse en forma de carrusel. Un carrusel es un mecanismo en el que el difusor transmite periódicamente todos los datos, uno de tras del otro, hasta que todos ellos hayan sido difundidos, momento en el cual el proceso se inicia desde el principio y el primer módulo se envía de nuevo [53]. Para acceder a un archivo el receptor debe esperar hasta que reciba los fragmentos de datos que está buscando para analizar el módulo y acceder al archivo propiamente dicho [53]. DSM-CC soporta dos clases de carrusel para la transmisión de datos. La más simple de estas es el carrusel de datos, y para situaciones más complejas está el carrusel de objetos [53].

Un carrusel de datos consta de un número de módulos que contiene un archivo. Este módulo puede ser dividido en bloques para hacer más fácil su transmisión. Todos los bloques de todos los módulos dentro de un carrusel de datos son del mismo tamaño,

excepto para el último bloque, el cual puede ser de tamaño más pequeño para permitir al receptor procesar más fácilmente los módulos [53].

El carrusel de objetos DSM-CC amplía el carrusel de datos DSM-CC añadiendo los conceptos de archivo, directorio y flujo, con unas funcionalidades parecidas a las de los sistemas de archivos convencionales [53]. Los carruseles de objetos también están basados en la estructura *Object Request Broker* (ORB) definida por CORBA (*Common Object Request Broker Architecture*), es decir, todos los objetos en el carrusel de objetos se transmiten vía *broadcast* como mensajes BIOP (*Broadcast Inter-ORB Protocol*) dentro de un carrusel de datos DSM-CC [54]. Un carrusel de objetos puede transportar los siguientes tipos de mensajes:

- **DSM::File:** Representa los archivos.
- **DSM::Directory:** Representa los contenedores lógicos para un conjunto de mensajes o referencias de archivos en un directorio.
- **DSM::Stream:** Es una referencia a un flujo MPEG-2, a un único programa o a uno o varios flujos elementales.
- **DSM::ServiceGateway:** Identifica el directorio raíz del carrusel de objetos, de modo que sólo existe uno en cualquier carrusel de objetos.
- **BIOP::StreamEvent:** Describe un conjunto de puntos de sincronización (*eventos de flujo*) en el flujo.

El carrusel de objetos DSM-CC está formado por tres capas como lo muestra la figura 2-3 [25]. En la capa superior, capa del carrusel de objetos, están visibles los objetos DSM-CC *User-to-User* como los archivos y directorios. En la capa intermedia, capa del carrusel de datos, los objetos se transportan en módulos que representan a un contenedor de datos. Los módulos se dividen en bloques que son transmitidos vía *broadcast* como secciones en la carga útil de un mensaje *DownloadDataBlock* (bloque de datos de descarga). Estos *DownloadDataBlock* conforman la capa inferior y se envían en los paquetes del flujo de transporte.

### 2.3.2.1 Sincronización de aplicaciones con el contenido audiovisual mediante eventos de flujo DSM-CC

Existen aplicaciones interactivas que requieren de una sincronización con los programas de televisión. Por ejemplo un programa educativo con preguntas de selección múltiple, la aplicación interactiva tendrá que estar sincronizada con el programa en emisión para asegurarse que tanto la visualización como la duración de la pregunta sean lanzadas después del segmento de programa donde se encontraba la respuesta y asegurarse que el estudiante la pueda responder. Para lograr esto, se requiere de un disparador (*trigger*) MHP en el instante que se pretenda ejecutar la aplicación que se lanza desde un flujo de evento.

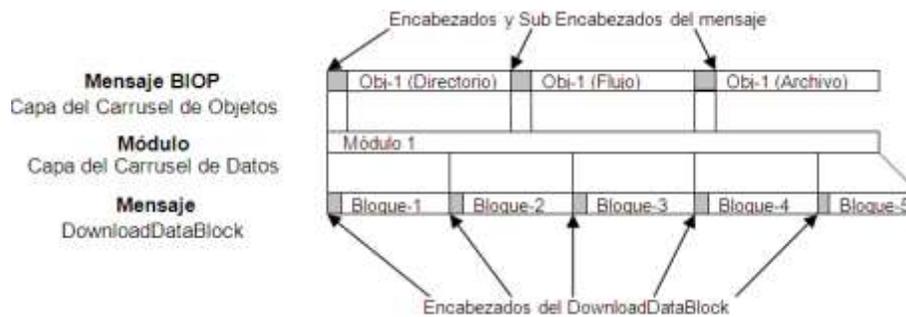


Figura 2-3. Capas del carrusel de objetos DSM-CC

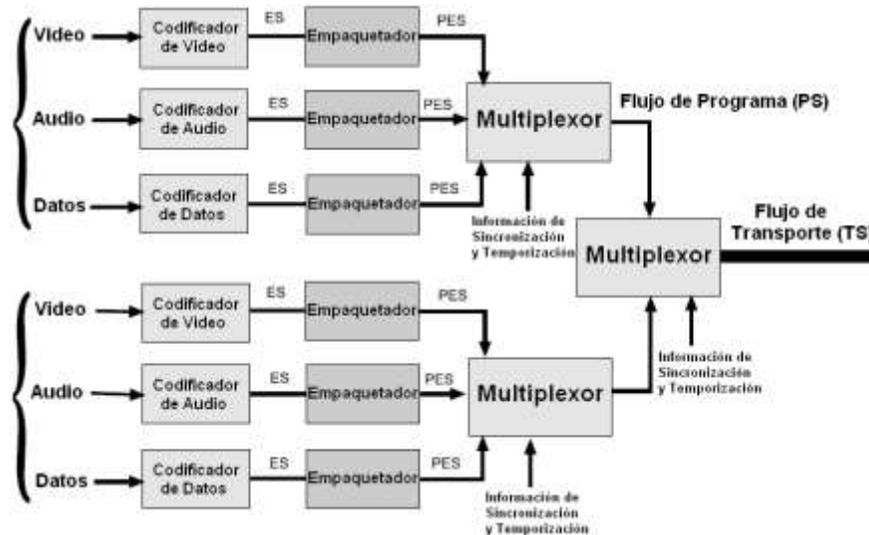
Los flujos de eventos (*stream events*) son marcadores que van en el flujo de transporte en forma de secciones privadas, por lo cual existe un carrusel de objetos que contiene como mínimo un objeto de flujo de evento que identifica el suceso adecuado [55]. Dentro de un flujo de evento se puede transmitir información específica para la aplicación, la cual puede utilizarse para ofrecer información adicional (como el texto de la pregunta de la aplicación del concurso) y así ofrecer un mecanismo de transmisión de datos en tiempo real por el canal de difusión. En el lado del receptor, el terminal MHP será el encargado de realizar todas las acciones necesarias como filtrar el flujo de transporte, extraer y analizar los datos. Por lo tanto, la aplicación MHP sólo tiene que registrar un *listener* para un flujo de evento específico y el terminal MHP se encargará de informar a la aplicación cuando reciba el flujo de evento adecuado [55]. Si un flujo de evento está disponible para la aplicación MHP, el *middleware* creará entonces un objeto *StreamEvent* que se suministrará al objeto *StreamEventListener* registrado en la aplicación. Existen dos tipos de flujo de eventos [55]:

- **Eventos *do it now*:** El evento se lanza inmediatamente sin requerimientos de tiempo [55].
- **Eventos programados (*scheduled*):** El evento se lanza en función de una referencia temporal (NPT, *Normal Play Time*) cuando se alcanza el tiempo preciso. El NPT es un valor de tiempo asociado al contenido audiovisual definido por el DSM-CC y reconstruido con la información de referencia del reloj de programa (PRC, *Program Clock Reference*) presente en el flujo MPEG-2 [55]. Los eventos programados ofrecen una mejor precisión a cambio de una mayor complejidad.

### 2.3.3 Multiplexación y transporte

La función del subsistema de multiplexación y transporte es recibir los flujos de bits generados por los codificadores de las diferentes fuentes (video, audio y datos auxiliares) y mediante multiplexación, generar a su salida una secuencia única de paquetes [29], cuyo formato está definido por el estándar MPEG-2 *Systems* [53]. El enfoque básico para

la multiplexación de los flujos elementales de audio, video y datos de un servicio de televisión digital se ilustra en la figura 2-4 [42] [53].



**Figura 2-4.** Esquema básico para la multiplexación de los flujos elementales de audio, video y datos

En la figura 2-4, los datos resultantes de la codificación de audio y video según las normas MPEG-2 o MPEG-4 forman un *flujo elemental* (ES, *Elementary Stream*) comprimido que es empaquetado para producir paquetes PES (*Packetized Elementary Stream*). Luego, los paquetes PES son multiplexados para formar un único flujo de bits que puede ser un flujo de programa (PS, *Program Stream*) o bien un flujo de transporte (TS, *Transport Stream*). Los flujos resultantes a su vez pueden ser multiplexados para formar un flujo de transporte único, que finalmente se pasa al sistema de codificación de canal y modulación para su transmisión por la red de difusión.

El flujo de transporte está diseñado para aumentar la eficiencia y la facilidad de implementación de aplicaciones de banda ancha, así como también para su transmisión en medios de transmisión ruidosos y con pérdidas donde los errores (por ejemplo, pérdida de paquetes) son probables [53]. El flujo de transporte es una serie de paquetes con una longitud fija de 188 Bytes, cada uno de ellos conformados por un encabezado y una carga útil (*payload*) como se muestra en la figura 2-5 [42]. El encabezado del paquete tiene una longitud fija de 4 Bytes (figura 2-5a) y los campos más importantes de este son:

- **Sync Byte:** Es el primer byte en el encabezado se usa en el decodificador para lograr la sincronización de los paquetes.
- **Transport Error Indicator:** El indicador de error de transporte es un campo de 1 bit e indica que el paquete puede contener errores.

- **Packet Identification (PID):** Es un campo de 13 bits y proporciona el mecanismo para la multiplexación y demultiplexación de los flujos de bits. El PID permite la identificación de los paquetes pertenecientes a un flujo elemental o de control facilitando la extracción de los paquetes correspondientes a un mismo flujo elemental.
- **Continuity Counter:** El contador de continuidad es un valor de 4 bits, que se incrementa en el multiplexor con cada paquete nuevo cuando se envía con el mismo PID. Se usa para determinar si los paquetes se pierden, repiten o llegan fuera de secuencia.

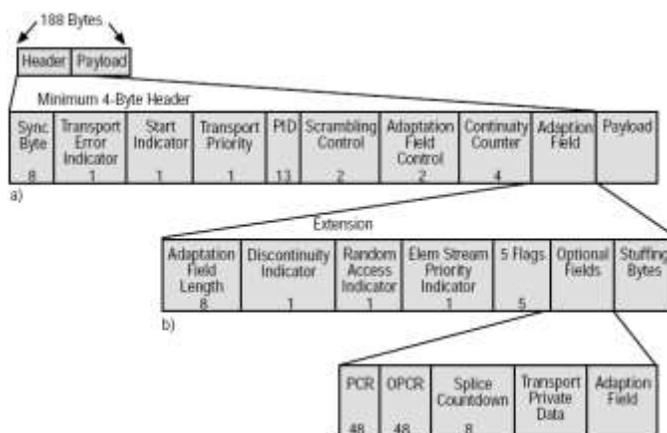


Figura 2-5. Estructura de un paquete del flujo de transporte MPEG-2

El campo de adaptación (*Adaption Filed*) se usa periódicamente para incluir el código de referencia del reloj de programa (PRC, *Program Clock Reference*), permitiendo al decodificador recrear una versión remota del reloj de 27 MHz por cada programa, ya que las señales de reloj para muestreo del audio y del vídeo deben estar enganchadas en frecuencia a este reloj [53]. En este caso se necesita más información en el encabezado por lo cual los bits de control del campo de adaptación (*Adaptation Field Control*) se fijan para indicar que el encabezado es más largo de lo normal y su tamaño se indica usando un código de los 8 bits llamado longitud del campo de adaptación (*Length Field Adaptation*) [53]. Cuando se extiende el encabezado, el *payload* se hace más pequeño para mantener constante la longitud del paquete. La figura 2-5b muestra los campos extras del encabezado y que se incluyen en el campo de adaptación.

Además, en el flujo de transporte se transmiten periódicamente un conjunto de tablas PSI/SI con el fin de estructurar la información relacionada con diferentes aspectos de las transmisiones DVB y recuperar un programa en el receptor. Las tablas de Información Específica de Programa (PSI, *Program Specific Information*) están definidas en el estándar MPEG-2 [53], mientras que las tablas de Información de Servicio (SI, *Service Information*) están definidas por el estándar ETSI EN 300 468 [56]. Las tablas PSI

proporcionan la información necesaria para permitir la configuración automática del receptor para demultiplexar y decodificar los diversos flujos de programas, entre las cuales se tienen [53]:

- **Program Association Table (PAT):** La Tabla de Asociación de Programa contiene la información para encontrar las Tablas de Mapeo de Programa (PMT, *Program Mapping Table*) de cada programa (o servicio) disponible en el flujo de transporte MPEG-2 actual.
- **Program Mapping Table (PMT):** La Tabla de Mapeo de Programa contiene información sobre aquellos flujos elementales que pertenecen a un determinado servicio o programa. Cada servicio dispone de una PMT, donde se listan los PID de los respectivos flujos de audio, video y datos, al igual que la referencia al reloj del programa PCR.
- **Conditional Access Table (CAT):** Esta tabla contiene datos privados con información de posibles restricciones de acceso condicional. Con esta información se controla quien puede ver, escuchar o utilizar el contenido de un programa de televisión digital.

Las tablas PAT (PID=0) y CAT (PID=1) tienen una posición fija dentro del flujo de programa, mientras que las PMT son referenciadas en la PAT. En la figura 2-6 [42] se puede ver como a partir de la información de las tablas PAT se encuentra una tabla PMT que contiene los PID de los flujos elementales de audio, video y datos asociados a un programa determinado (por ejemplo *program 1*) dentro del flujo de transporte.

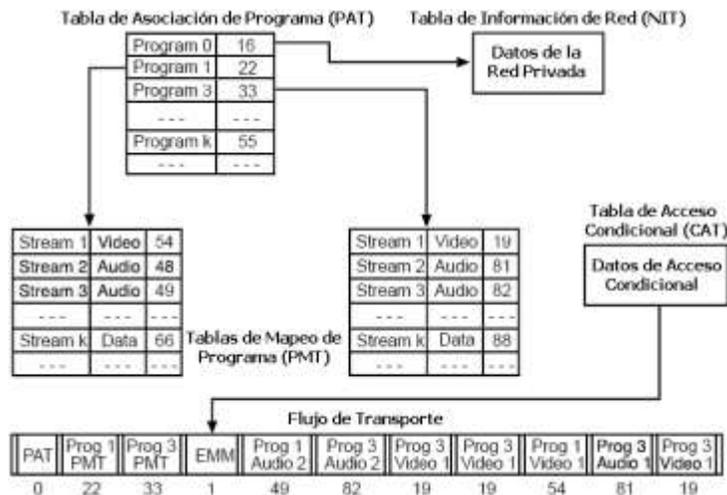


Figura 2-6. Relación entre las tablas de la Información Específica de Programa (PSI)

Las tablas de Información de Servicio (SI) son complementarias a las tablas PSI y definen una serie de tablas obligatorias y opcionales para ofrecer información adicional de los datos que viajan en el flujo de transporte, así como también información relativa a datos y propiedades externas del propio flujo de transporte. Las tablas obligatorias son las siguientes [56]:

- **Network Information Table (NIT):** La Tabla de Información de la Red contiene información de la red en la que se encuentra el flujo de transporte actual, como el nombre de la red, la posición orbital y el número de transpondedor (los dos últimos sólo aplicables en redes satélites).
- **Service Description Table (SDT):** La Tabla de Descripción del Servicio da información adicional que describe los programas disponibles en el flujo de transporte actual, no obstante puede contener información de los programas de otros flujos de transporte.
- **Event Information Table (EIT):** La Tabla de Información de Evento contiene información de los eventos asociados a un programa. Para cada programa se lista como mínimo el nombre del programa actualmente en emisión y el que viene a continuación. Incluso, algunos proveedores también dan información de la programación de todo un día o de toda una semana por adelantado. La EIT es la tabla principal que se examina cuando se construye una guía de programación.
- **Time and Data Table (TDT):** La Tabla de Fecha y Tiempo contiene la hora y fecha actual. Esta tabla se actualiza continuamente.

Adicionalmente a las tablas PSI/SI, en la especificación MHP [27] se define la Tabla de Información de Aplicación (ATI, *Application Information Table*), la cual se referencia desde una o más PMT. La AIT contiene una descripción de todas las aplicaciones MHP que están disponibles durante la emisión de un programa y debe retransmitirse con un intervalo máximo de repetición de 10 segundos.

### 2.3.4 Codificación del canal y modulación

Para la codificación del canal y la modulación de los flujos de transporte MPEG-2 se tiene el estándar europeo DVB-C definido en ETSI 300 429 [40]. El estándar toma el flujo de transporte MPEG-2 y lo somete a un proceso de aleatorización (*interleaving*), con el fin de conformar su espectro para disminuir la interferencia entre símbolos. Posteriormente, a la trama binaria aleatorizada se le aplica una codificación *Reed-Solomon* (204,188) y un entrelazado convolucional, de acuerdo con la técnica de corrección de errores (FEC, *Forward Error Correction*).

Por último, se conforma la banda base que se modula en QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), para lo cual hay una conversión de octetos de bits en símbolos QAM (de  $m$  bits cada uno, según el número de estados de la constelación), un filtrado en coseno alzado y la modulación QAM propiamente dicha. En el lado receptor se llevan a cabo los procesos recíprocos con el fin de obtener las señales MPEG-2 iniciales. En la tabla 2-3 [40] se presentan las posibles configuraciones del estándar ETS 300 429.

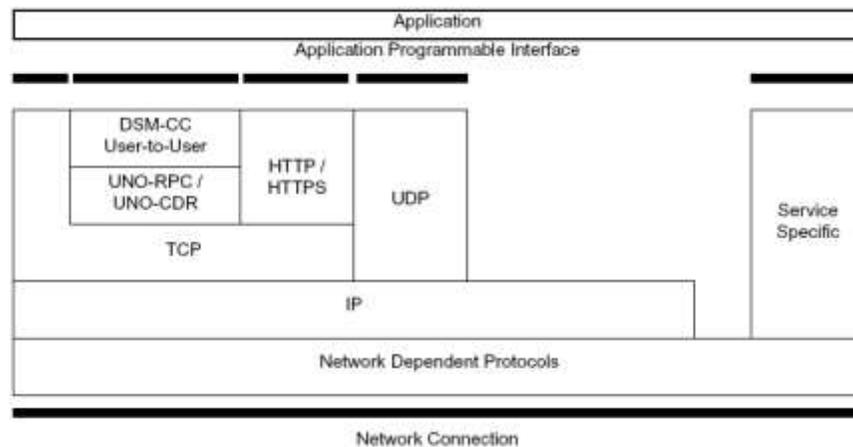
**Tabla 2-3.** Configuraciones del estándar ETS 300 429

Régimen Efectivo MPEG-2/TS (Mbps)	Régimen tras RS (204,188) (Mbps)	Velocidad de Modulación (Mbaudios)	Ancho de Banda (MHz)	Tipo de Modulación
38,1	41,34	6,89	7,92	64-QAM
31,9	34,61	6,92	7,96	32-QAM
25,2	27,34	6,84	7,86	16-QAM
31,672	34,367	6,87	7,90	32-QAM
18,9	20,52	3,42	3,93	64-QAM
16,0	17,40	3,48	4,00	32-QAM
12,8	13,92	3,48	4,00	16-QAM
9,6	10,44	1,74	2,00	64-QAM
8,0	8,70	1,74	2,00	32-QAM
6,4	6,96	1,74	2,00	16-QAM

## 2.4 CANAL INTERACTIVO O CANAL DE RETORNO

Un componente importante en la arquitectura de un sistema para iTV es el canal interactivo o canal de retorno, ya que hace posible la existencia de interactividad en todo el sistema [25]. Una aplicación MHP normalmente usa un canal de retorno para tener un enlace IP bidireccional entre el STB y el proveedor del servicio interactivo [27]. En la figura 2-7 [27] se muestra la pila de protocolos utilizados en el canal de interacción.

El canal de retorno o interactivo puede clasificarse con respecto a las tecnologías disponibles y a la forma cómo las aplicaciones lo utilizan [55]. Desde el punto de vista técnico, los protocolos dependientes de la red hacen que el canal de interacción pueda dividirse en canales cableados, inalámbricos o móviles [55]. Inicialmente y debido a la alta disponibilidad se utilizó la Red Telefónica Pública Conmutada (PSTN, *Public Switched Telephone Network*) para el canal de retorno mediante el uso de un módem que generalmente viene incluido en los terminales MHP (*set-top box*) [25].



**Figura 2-7.** Pila de protocolos en el canal de interacción

Luego aparecieron las conexiones de alta velocidad proporcionadas por tecnologías como DOCSIS, xDSL (*Digital Subscriber Line*) o FTTx (*Fiber To The X*) [25]. Por otro lado y menos comunes por el momento, están los canales de retorno móviles donde las principales tecnologías son GSM (*Global System for Mobile Communications*), GPRS (*General Packet Radio Service*) y UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) [25]. Otra opción es usar un satélite como canal interactivo. Estas tecnologías precisan del uso de un módem para acceder a sus redes de banda ancha. Estos módems se conectan al STB por medio de una interfaz de red Ethernet, WiFi o por un puerto USB. Si bien existen diversas alternativas tecnológicas para el canal interactivo, en este documento se revisó en detalle el funcionamiento del canal interactivo en redes de cable HFC basado en el protocolo DOCSIS.

Los protocolos del nivel de red se define en [59], [60], [61], [62], [63], [64] y [65] respectivamente para CATV (*Community Antenna Television*), PSTN, DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*), GSM, LMDS (*Local Multipoint Distribution Service*), SMATV (*Satellite Master Antenna Television*) y redes satelitales.

## 2.5 PARÁMETROS DE DESEMPEÑO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE CONTENIDOS DE ITV

Las diferentes aplicaciones y servicios que están disponibles en una red de telecomunicaciones generan un tipo de tráfico que tiene unos requerimientos únicos en términos de ancho de banda, retardo, variación del retardo y pérdida de paquetes [66], por lo cual se hace necesario la planificación e implementación de la calidad de servicios en los equipos de la red para proporcionar los requerimientos mínimos de cada uno de ellos.

Partiendo del estudio realizado hasta este punto, para un servicio de televisión digital interactiva se debe cumplir con los parámetros de desempeño tanto para los flujos de

audio, video y aplicaciones MHP en el canal de difusión, como para las solicitudes o envío de información al servidor de aplicaciones en el canal interactivo, cuyos valores mínimos a satisfacer por cualquier red se presentan a continuación.

### 2.5.1 Parámetros de desempeño en el canal de difusión

Las aplicaciones de video son sensibles al retardo y a la pérdida de paquetes [67]. Sin embargo, la red HFC, como evolución de la red de cable tradicional, es ideal para la distribución de canales de televisión digital garantizando los niveles mínimos de calidad de servicio para su adecuada transmisión y recepción, gracias a los siguientes aspectos:

- El hecho que la red HFC tenga un *backbone* o núcleo de red en fibra óptica disminuye el ruido y las interferencias que son la causa principal de los errores en la transmisión de un determinado flujo de datos hacia el televidente [13] [68].
- El mecanismo de transporte MPEG-2 basado en flujos de transporte juega un papel importante en la difusión de televisión digital ya que fue diseñado para transmitirse por medios ruidosos como lo es el cable coaxial [53].
- La canalización del espectro de frecuencias utilizado en la red garantiza que un determinado canal de televisión tenga el ancho de banda necesario para una determinada calidad de imagen y sonido, por lo cual el servicio está corriendo en ambiente controlado [69].
- La norma DVB-C proporciona los algoritmos de corrección y detección de errores para compensar los posibles errores en la transmisión que se pueden presentar, especialmente, en la parte de la red que utiliza cable coaxial [40].
- La difusión de televisión digital mediante el estándar DVB-C cubre grandes audiencias sin la necesidad de escalar las capacidades del servidor de video o las conexiones de red al ser un servicio de difusión [25].

Las anteriores consideraciones permitirán a la red HFC satisfacer los requerimientos de calidad de servicio para la difusión de televisión digital mostradas en la tabla 2-4 [19], [44], [50], [40], [67], [70], [71] y [72] con lo cual no existe una degradación visible de la imagen de video y en el audio del programa de televisión.

**Tabla 2-4.** Recomendación de los parámetros de nivel de transporte para una adecuada QoS en un servicio de televisión digital en el canal de difusión

Tipo de codificación	Retardo ( <i>Delay</i> )	Variación del Retardo ( <i>Jitter</i> )	Ancho de Banda	Packet Loss Ratio (PLR)	Bit Error Rate (BER)
MPEG-2	<200 ms	<50 ms	4 –17 Mbit/s	< 0.5%	$10^{-12}$
MPEG-4 AVC	<200 ms	<50 ms	2 – 12 Mbit/s	< 0.1%	$10^{-12}$

### 2.5.2 Parámetros de desempeño en el canal interactivo

El canal interactivo es un medio compartido y utilizado por una gama de aplicaciones que compiten por los recursos de la red [66]. En el caso de una aplicación de televisión digital interactiva que haga uso del canal interactivo en un ambiente de navegación, las solicitudes de información o envío de la misma necesitan ser atendidas con una adecuada prioridad por parte de los equipos de red para cumplir con los parámetros de retardo y pérdida de información que requiere el servicio y para proporcionar una interactividad adecuada.

Desde el punto de vista del usuario, en un ambiente de navegación el factor principal de calidad de funcionamiento es la rapidez con que se presenta el contenido una vez se lo ha solicitado [67]. Para los servicios interactivos, como la televisión interactiva donde el usuario se encuentra en frente de la pantalla de un televisor y no de un computador, el retardo introducido por la red tiene que estar alrededor de 200 ms y la pérdida de información debe que ser nula [67], es decir, que la información solicitada o enviada sea entregada a su destino exitosamente.

Debido a la naturaleza continua e independiente del tiempo de los contenidos de audio, video y de las aplicaciones de iTV, su reproducción requiere un estricto control del momento y la secuencia de recepción de la información por parte del usuario. Así, la sincronización entre el contenido audiovisual y la información adicional es muy importante en la experiencia del usuario, por lo cual al presentarse para las aplicaciones iTV en el canal interactivo un retardo mayor a 200ms o pérdida de información, el despliegue de los contenidos constituye una experiencia no satisfactoria o desventajosa dependiendo de la percepción subjetiva del usuario, bien sea que este solicite información adicional o envíe información requerida por la aplicación.

Este capítulo aportó en la definición de los parámetros de desempeño que caracterizan el servicio de iTV, cuya evaluación en una red permitirá determinar si esta es capaz de proporcionar los recursos necesarios para una adecuada prestación del mismo y con la calidad de servicio que requieren este tipo de aplicaciones.

## CAPÍTULO III

### 3 RED DE ACCESO HFC PARA LA DISTRIBUCIÓN DE ITV

Con la madurez del mercado y el aumento de la competencia, los operadores de redes de telecomunicaciones fijas han ido evolucionando sus tecnologías para ampliar sus ofertas de servicios [12]. En el caso de los operadores de cable que inicialmente se especializaron en ofrecer el servicio de televisión por suscripción mediante redes de cable coaxial [12], han pasado a proveer servicios de telefonía y acceso a Internet gracias a la inclusión de la fibra óptica en el núcleo de su red y al protocolo de acceso DOCSIS. Esto convierte a las redes de cable tradicionales en redes de acceso Híbridas de Fibra y Coaxial (HFC), lo cual les permite la prestación de nuevos servicios con la calidad de servicio requerida por cada uno de ellos [12] [13] [69]. Así, en este capítulo inicialmente se hace una descripción de la arquitectura de la red de acceso HFC y el alcance para la prestación del servicio de iTV, además se presenta una revisión general del protocolo de acceso DOCSIS con el fin de entender su funcionamiento.

#### 3.1 HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LA RED DE ACCESO HFC

El origen de los operadores de cable se sitúa en las redes desplegadas en su momento en algunas áreas de los Estados Unidos de América para la distribución de señales de televisión en aquellas zonas donde la cobertura televisión terrestre radiodifundida era insuficiente [12]. A este tipo de redes se las identificó bajo el acrónimo CATV (*Community Antena TV*) cuyo objetivo inicial era la distribución de canales de TV analógica (entre 20 y 100 canales) en el entorno metropolitano [12] [73]. El medio de transmisión empleado en estas redes era el cable coaxial, el único en ese momento con el ancho de banda suficiente para la distribución de canales de televisión en formato analógico [12].

Inicialmente, las redes CATV tenían una topología en árbol-rama [74] motivada por las características físicas del cable coaxial y por la naturaleza del servicio al que iba destinado [12]. El cable coaxial proporciona un ancho de banda muy superior al que puede ofrecer un par telefónico, además el comportamiento del cable coaxial con la frecuencia es adecuado para un servicio de difusión como lo es la distribución de canales de TV [12].

Con el despliegue de una red CATV el operador de la misma dispone, además de la distribución de televisión, de una red de acceso que le permite ofrecer otro tipo de servicios como voz y datos [12], bajo grandes requerimientos de ancho de banda y calidad [88]. Sin embargo, las redes de CATV tuvieron que evolucionar para resolver algunas limitaciones inherentes a su origen:

- En la transmisión a grandes distancias, la atenuación introducida por el cable coaxial también aumenta rápidamente [69]. Esto se puede solucionar con amplificadores, pero su empleo tiene un límite de 3 amplificadores puesto que su uso lleva asociado un aumento del nivel de ruido y la distorsión [69]. Este problema se solucionó mediante la introducción de fibra óptica en el primer tramo de la red de cable, dejando el cable coaxial para el tramo final, en la acometida a los usuarios [12]. La introducción de la fibra en el tramo troncal es lo que lleva al concepto de red HFC [3].
- Las redes de cable, que fueron diseñadas para la simple distribución de canales de TV, eran unidireccionales [12]. En este sentido cuando se quería prestar un servicio de voz, el operador de CATV debía utilizar una red de pares propia y específica para este servicio, en paralelo con la red de cable coaxial o bien la red del operador incumbente [12] [69]. En consecuencia, las redes de cable introdujeron un canal de retorno, aunque de menos capacidad que el canal descendente, para facilitar la prestación de servicios interactivos de voz y datos [12].
- Para la transmisión de datos de alta velocidad por redes de cable surgieron diferentes alternativas, estandarizándose el protocolo de acceso DOCSIS para su uso en redes HFC [14]. Este protocolo permite la transferencia bidireccional de tráfico IP entre la cabecera (*headend*) del sistema de cable y los usuarios [74] [75].
- Una nueva etapa en la evolución de las redes de cable, tiene que ver con la introducción de la televisión digital, la cual ha tomado fuerza en los últimos años. Con ello se consigue multiplicar el número de canales que pueden transportarse en el ancho de banda del sistema, proporcionando mayor calidad de imagen y sonido, así como nuevas facilidades de interactividad [69].
- Al introducir servicios de voz, datos y video fue necesario la inclusión de un sistema de acceso condicional para asegurar que los servicios sean accesibles sólo a quienes están autorizados a recibirlos [25] [76]. Una forma de lograr esto es cifrando el contenido de tal manera que sólo puede ser descifrado en el receptor si el usuario está facultado para hacerlo [76].

### 3.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS REDES HFC

Las redes de acceso HFC, se definen como un “*sistema de transmisión bidireccional con medios compartidos de banda ancha que utiliza troncales de fibra entre la cabecera y los nodos de fibra, y distribución coaxial desde los nodos de fibra a las posiciones del cliente*” [3]. La introducción de la fibra óptica en la troncal de la red de cable, reduce las perturbaciones introducidos por las cadenas de amplificadores, ya que la atenuación en la

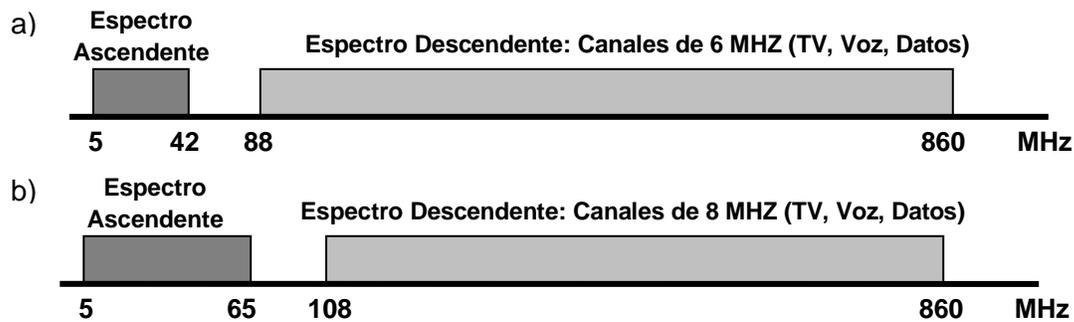
fibra es mucho menor que la del cable coaxial, aumentando considerablemente las distancias a cubrir sin amplificadores [69]. Esto permite diseños de red con mayor cobertura desde la cabecera, reduciéndose el tamaño de las áreas de distribución en cable coaxial [69]. Gracias a ello y al ancho de banda proporcionado por la fibra óptica, se favorece el aprovechamiento del ancho de banda del cable coaxial para explotar sus límites con el objetivo de proporcionar mayores velocidades de acceso a Internet y cubrir un mayor número de usuarios [69].

El grado de penetración de la fibra puede variar acercándose más hacia el usuario final, pero estratégicamente no resulta viable a corto y mediano plazo debido a los costos de implementación que tiene asociados [12] [69]. Por lo tanto, el cable coaxial aún es utilizado en el último tramo de la red por que permite llegar a los usuarios con muy buena calidad de la señal y con un costo menor que si la red estuviera conformada completamente por fibra óptica [69].

Las redes HFC han incorporado un canal de retorno, dotando al usuario no sólo de la capacidad de recibir sino que también de enviar información hacia la cabecera de la red [69]. Esto se consigue por la división en frecuencia, dedicando la parte baja del espectro a las transmisiones en sentido ascendente [69]. El hecho de convertir la red HFC en una red bidireccional, teniendo en cuenta el ancho de banda disponible en ambos sentidos y el número de usuarios en un tramo de coaxial, permite desplegar redes de telecomunicaciones multiservicios (TV, voz y datos) efectivas basada en diferentes estándares tanto para la distribución de televisión digital como para la distribución de datos [69].

En sentido descendente, la banda de radiofrecuencia (RF) (88 MHz a 860MHz en EE.UU. y 108 MHz a 860 MHz en Europa) está dividida en canales de 6 MHz en el sistema NTSC (*National Television Systems Committee*) estadounidense o de 8MHz en el sistema PAL (*Phase Alternate Line*) europeo [74] [75]. Cada uno de estos canales se utiliza para la difusión de televisión analógica y digital y para la transmisión de telefonía o servicios de datos. Los esquemas de modulación adoptados en los canales descendentes son 64 QAM y 256 QAM con lo cual se pueden obtener tasas de transmisión entre 30 y 57 Mbps [74] [75].

El rango de frecuencias en sentido ascendente (*upstream*) (5 MHz a 42 MHz para EE.UU y 5 MHz a 65 MHz para Europa) está dividido en canales con menor ancho de banda (0.2, 0.4, 0.8, 1.6 y 3.2 MHz), para transportar datos, telefonía y servicios de video [74] [75]. Los esquemas de modulación adoptados en los canales ascendentes son QPSK y 16 QAM con lo cual se proporcionan velocidades desde 0.32 Mbps hasta 10.2 Mbps [74] [75].



**Figura 3-1.** Espectro de frecuencias empleado por una red HFC a) Estándar estadounidense b) Estándar europeo

La velocidad de transmisión en sentido descendente y en sentido ascendente varían respecto al esquema de modulación empleado, al ancho de banda del canal y a la versión del protocolo de acceso al medio como se puede ver en [74], [77] y [78]. El canal ascendente es un recurso muy limitado (en comparación con el canal descendente) y debe ser compartido por todos los usuarios haciendo uso de técnicas de acceso al medio, por lo cual el ancho de banda que le corresponde a cada usuario es mucho menor que el ancho de banda de bajada y a medida que más usuarios se conectan al sistema las velocidades de transferencia disminuyen [69], por lo que cada servicio debe ser tratado de forma diferenciada para proporcionar la calidad de servicio que requiere para un adecuado funcionamiento [13].

Cada canal se modula en una subportadora de radiofrecuencia diferente, por lo que la multiplexación de señales se realiza en frecuencia (FDM, *Frequency Division Multiplex*) [74]. Ahora cuando el canal es compartido por varias comunicaciones, el flujo binario de este se divide en ranuras de tiempo que se adjudican a los usuarios bien de forma preestablecida o bien bajo demanda mediante Multiplexación por División de Tiempo (TDM, *Time Division Multiplex*) [74]. En definitiva se realiza una doble multiplexación de los canales: en el dominio de la frecuencia y en dominio del tiempo.

### 3.3 MODELO DE REFERENCIA DVB PARA SERVICIOS INTERACTIVOS EN REDES DE ACCESO HFC

La distribución del espectro de frecuencias en la red HFC permite una transmisión bidireccional que facilita la prestación de servicios interactivos como la televisión interactiva, video bajo demanda, pago por ver, entre otros por la misma red [69]. El modelo de referencia DVB para servicios interactivos presentado en la figura 3-2 [3] [4] sugiere unas funciones interactivas que son facilitadas por el terminal del usuario, el cual tiene que proveer la interfaz para los canales de difusión e interactivo.

El usuario a través de su terminal interactúa con los contenidos y programas distribuidos por el canal de difusión, como resultado de esa interacción puede existir una realimentación del usuario hacia el proveedor de servicios en forma de petición o respuesta por medio del canal interactivo; el proveedor de servicios a su vez puede responder al usuario a través del canal de difusión o del canal interactivo [25].

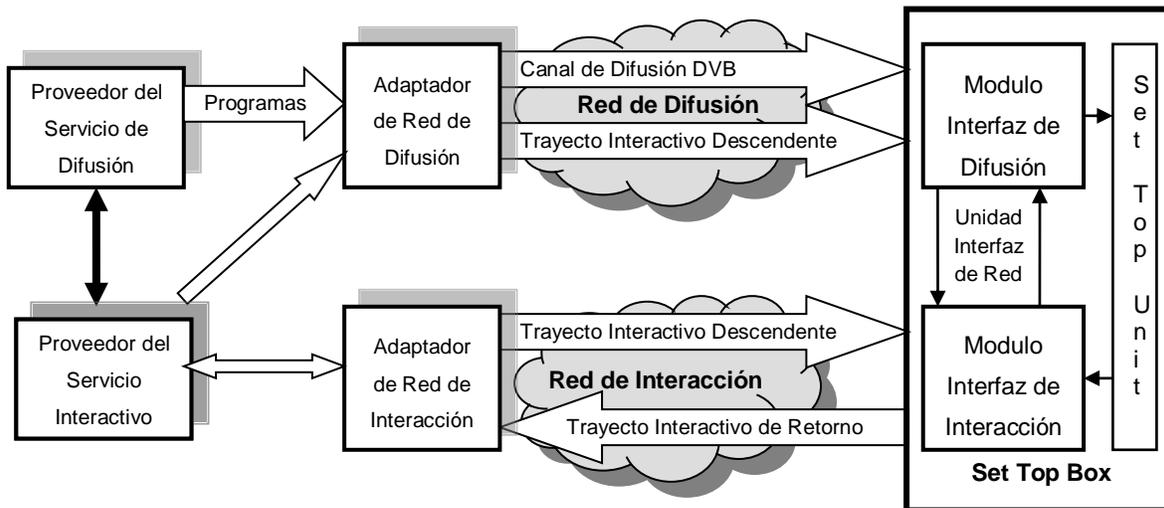


Figura 3-2. Modelo de referencia DVB para servicios interactivos

En este modelo se establecen dos canales de comunicación entre el proveedor del servicio y el usuario [3] [4]:

- **Canal de Difusión (BC, *Broadcast Channel*):** Es un canal unidireccional de banda ancha de difusión de audio, video y datos que se establece desde el proveedor del servicio hasta los usuarios. Este puede incluir un trayecto de Interacción Descendente (*Forward Interaction path*).
- **Canal de Interacción (IC, *Interaction Channel*):** Es un canal bidireccional que se establece entre el proveedor del servicio y el usuario con propósitos interactivos. Está formado por:
  - **Trayecto de Interacción de Retorno (*Return Interaction Path*):** Va desde el usuario al proveedor del servicio y se usa para realizar peticiones al proveedor del servicio o responder a solicitudes. Comúnmente es conocido como canal de retorno (*Return Channel*) y utiliza el espectro de frecuencias ascendente de la figura 3-1.
  - **Trayecto de Interacción Descendente (*Forward Interaction path*):** Va desde el proveedor del servicio al usuario. Se usa para proporcionar alguna información pequeña por parte del proveedor del servicio al usuario y cualquier otra comunicación requerida para la prestación del servicio interactivo. Este puede estar

incluido en el canal de difusión utilizando el espectro de frecuencias descendente de la figura 3-1. Es posible que este canal no se requiera en algunas implementaciones simples las cuales hacen uso del canal de difusión para llevar los datos al usuario, pero que es necesario para la prestación de servicios interactivos de voz y datos.

En este modelo, el servicio de televisión digital interactiva no es un servicio que se ofrezca sobre la banda ancha, sino un servicio diferenciado, que para aplicaciones interactivas hace uso del canal de retorno por banda ancha para solicitar o enviar información [1]. Como se mencionó anteriormente, en el proyecto EDiTV [6] se ha definido que los programas de TV digital se distribuyan por una red de cable mediante DVB-C y para el canal interactivo de banda ancha se usa los estándares DOCSIS con la adaptación europea.

### 3.4 ARQUITECTURA DE LA RED DE ACCESO HFC

La red de acceso HFC tiene una arquitectura adaptada para la distribución de servicios multimedia, tal y como se muestra en la figura 3-3 [69] en la cual se distingue la cabecera de la red, la red troncal y la red de distribución, así como los equipos del usuario final.

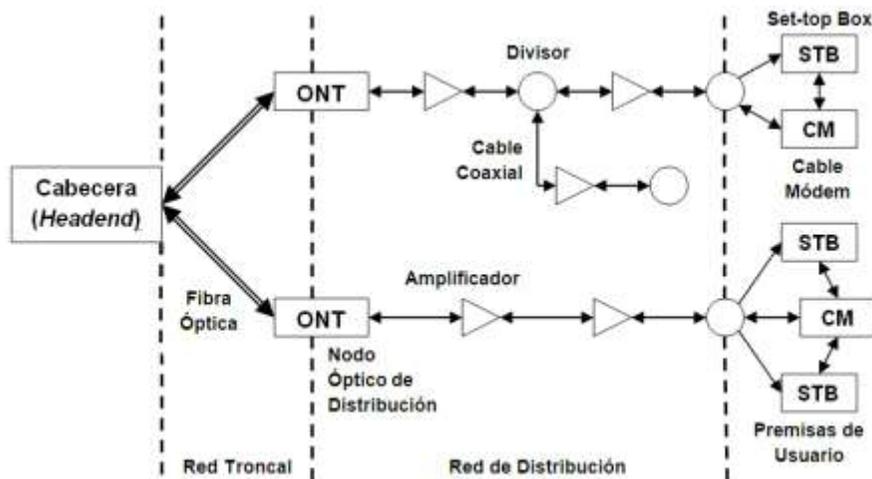


Figura 3-3. Esquema general de la red HFC

#### 3.4.1 Cabecera (Headend)

La cabecera es el sitio donde se recopilan los programas televisivos de diversas fuentes para ser transmitidos por la red de cable en sentido descendente [3]. También se encarga de establecer todas las interconexiones con otras redes de transporte fijas o móviles, así como también de monitorear y supervisar el correcto funcionamiento de la red, tarifcar y controlar el acceso a los servicios prestados a los diferentes abonados [69]. En la cabecera se ubican los servidores para el acceso a los diferentes servicios [74] y todo el

equipo que permite adaptar las señales de banda base a las características del medio de transmisión de la red troncal [79].

Las fuentes del contenido audiovisual de banda base que será distribuido por la red de cable son la televisión vía satélite, la televisión terrestre o pueden ser canales de producción propia [79]. Estos canales se codifican en un flujo de bits para su posterior modulación y transmisión en cumplimiento con la norma DVB-C para sistemas de transmisión de televisión digital [4]. Adicionalmente, pueden existir aplicaciones que adicionen algún nivel de interactividad al programa de televisión digital, por lo cual son codificadas en un formato tal que puedan ser multiplexadas con los flujos de audio y video en un único flujo de transporte MPEG-2 [27].

Por otro lado, para permitir el acceso y configurar el canal interactivo mediante el estándar DOCSIS, es necesario que la cabecera cuente con un sistema de terminación de módems de cable (CMTS, *Cable Modem Termination System*). El CMTS proporciona una funcionalidad complementaria a los módems de cable para que éstos puedan conectarse a una red de área extensa con miras a la transmisión de datos [74]. Esto permite que la red HFC se convierta en un sistema de transmisión de tráfico IP bidireccional [74] y por ende pueda prestar servicios de voz sobre IP (VoIP, *Voice over IP*) e Internet de alta velocidad [69].

Además de la transmisión de datos y señales de televisión, hay varias capacidades de gestión y explotación de red que deben ser configuradas en la cabecera en diferentes servidores de red. Estas capacidades son las siguientes [74]:

- El protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol*), para la gestión de los dispositivos que confirman la red HFC [80].
- El protocolo TFTP (*Trivial File Transport Protocol*) para la telecarga del soporte lógico operacional e información de configuración de los CM [81].
- El protocolo DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*), para la configuración de los anfitriones de una red TCP/IP, en este caso los módems de cable (CM) [82].
- Un protocolo de hora del día, para que los CM obtengan la hora del día y puedan sincronizarse con el CMTS para la transmisión de datos [83].

### 3.4.2 Red Troncal

Se encarga del transporte de la señal óptica desde la cabecera hasta los nodos ópticos de distribución mediante un enlace bidireccional de fibra óptica. La red troncal puede estar conformada por enlaces punto a punto o por una estructura con anillos redundantes que unen los nodos ópticos entre sí. Para los enlaces de fibra se utilizan sistemas ópticos con fibras monomodo trabajando en la segunda (1330 nm) o tercera (1550 nm) ventana

óptica, con un ancho de banda de 108 a 860 MHz para el canal descendente y de 5 a 65 MHz para el canal ascendente o de retorno [69].

La red troncal puede ser dividida en una red troncal primaria y una secundaria tal y como se muestra en la figura 3-4 [69]. La red troncal primaria tiene una topología en anillos redundante y permite que la cabecera alcance los nodos primarios o centros de distribución, para atender áreas que sirven entre miles y decenas de miles de abonados lo cual puede corresponder a una ciudad o a zonas densamente pobladas. Los nodos primarios, amplifican y distribuyen la señal hasta las terminaciones de red óptica (ONT, *Optical Network Termination*), mediante la red troncal secundaria cuya topología puede ser de enlaces punto a punto o en anillo [69].

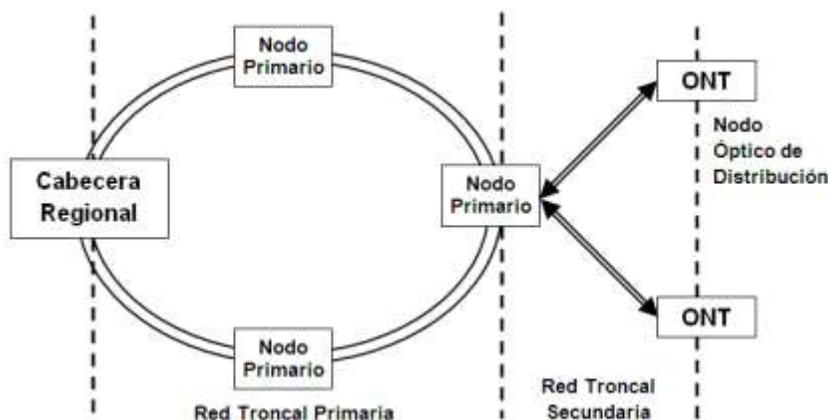


Figura 3-4. Red troncal de la red HFC

Un nodo ONT sirve a un número determinado de usuarios dependiendo del ancho de banda que se le quiere brindar a cada uno de estos, típicamente unos 250 hogares, aunque en sistemas con gran penetración de fibra el número se puede reducir a 125 e incluso a unas pocas decenas [69]. Los ONT son los encargados de convertir las señales ópticas que provienen de la cabecera a señales eléctricas para que puedan ser transmitidas por el cable coaxial hacia el usuario final [69]. En los sistemas bidireccionales, los nodos ópticos también se encargan de recibir las señales eléctricas del canal de retorno, que son generadas por el abonado, y convertirlas en señales ópticas para ser transmitidas a la cabecera [69].

Dado el caso que los nodos primarios atiendan a miles o decenas de miles de usuarios, la solución más adecuada y extendida en la actualidad consiste en utilizar un CMTS en cada uno de estos, accediendo a ellos desde la cabecera regional través de una red de comunicaciones convencional y manteniendo los servidores y demás equipos en la cabecera [69]. En esta solución, el dominio de compartición de ancho de banda ascendente es el ONT, mientras que en sentido descendente, el dominio de compartición se establece por nodo primario, en lugar de la red en su totalidad. A demás con esta

configuración el número de fibras requeridas entre los nodos primarios y la cabecera se reduce [69].

Nuevamente, la tendencia de evolución actual se dirige a la ubicación de las funciones CMTS en la cabecera de la red, utilizando técnicas como multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*) para la transmisión en sentido descendente y de apilamiento de frecuencias (FSS, *Frequency Stacking System*) para el sentido ascendente [69]. Esencialmente, se trata de enviar el flujo de datos de los servicios interactivos en una longitud de onda combinada con los canales descendentes de TV analógica desde la cabecera a un ONT. Mientras que en sentido ascendente, la banda de 5-65 MHz de varios ONT se desplaza en frecuencia, para modular una longitud de onda, que a su vez se multiplexa por división de longitud de onda (WDM) en una fibra que se dirija hacia un nodo primario [69].

### 3.4.3 Red de Distribución

Es una estructura tipo bus de cable coaxial encargada de llevar las señales eléctricas desde el ONT hasta los equipos receptores de los usuarios. En esta parte de la red HFC usualmente se utilizan 2 o 3 amplificadores de señal, cantidad con la cual los niveles de ruido y distorsión tanto en el canal ascendente como descendente son aceptables. La red de distribución cuenta además con una serie de dispositivos pasivos como son los derivadores (*taps*) y divisores (*splitter*) se señal [69].

### 3.4.4 Premisas de Usuario

También se le denomina acometida de red y corresponde a la red en cable coaxial interna de un hogar o edificio y es el último tramo antes de la conexión con los equipos del usuario como los *set-top box* y los módems de cable. En la figura 3-5 [69] se puede ver el esquema la red interna del hogar de un usuario, donde la señal que viaja en el cable coaxial entrante se divide para llevar una señal independiente al STB y al CM.

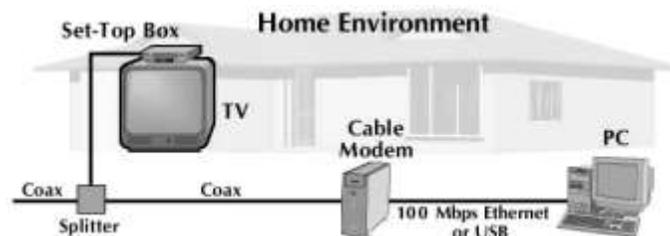


Figura 3-5. Red interna del hogar de un usuario

Los equipos instalados en las premisas del usuario son:

- Set-top-box (STB):** Según [79], es una unidad de soporte físico que contiene un demodulador de señales digitales, un demultiplexor y un decodificador, así como otras funcionalidades e interfaces relativas a la recepción y presentación de las señales digitales de un programa de televisión con el fin de presentarlo en la pantalla de TV. Adicionalmente, el STB tiene implementado un *middleware* para la ejecución de las aplicaciones interactivas que se transportan en conjunto con los programas de televisión digital.
- Módem de Cable (CM):** Es un modulador-demodulador ubicado en las premisas del usuario destinado a ser utilizado en la comunicación de datos en un sistema de televisión por cable [74]. Este equipo permite establecer un enlace IP transparente con el CMTS para acceder a servicios avanzados tanto de datos (a través de un computador) como de voz (a través de un teléfono IP) en las redes HFC. A este equipo se conecta la interfaz *Ethernet* del STB con el fin de utilizar el canal interactivo de la red HFC y dar soporte a las aplicaciones de televisión interactiva facilitando la comunicación con el servidor de aplicaciones.

### 3.5 PLATAFORMA TECNOLÓGICA PARA LA PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE ITV EN REDES HFC

El modelo de referencia para servicios interactivos planteado por el proyecto EDiTV [7] implica la adecuación tecnológica de un grupo de componentes estandarizados en la infraestructura actual de una cadena de televisión digital. La figura 3-6 [7] muestra los componentes tecnológicos involucrados en cada una de las áreas de la arquitectura de un sistema de televisión digital interactiva basada en el estándar DVB-MHP.

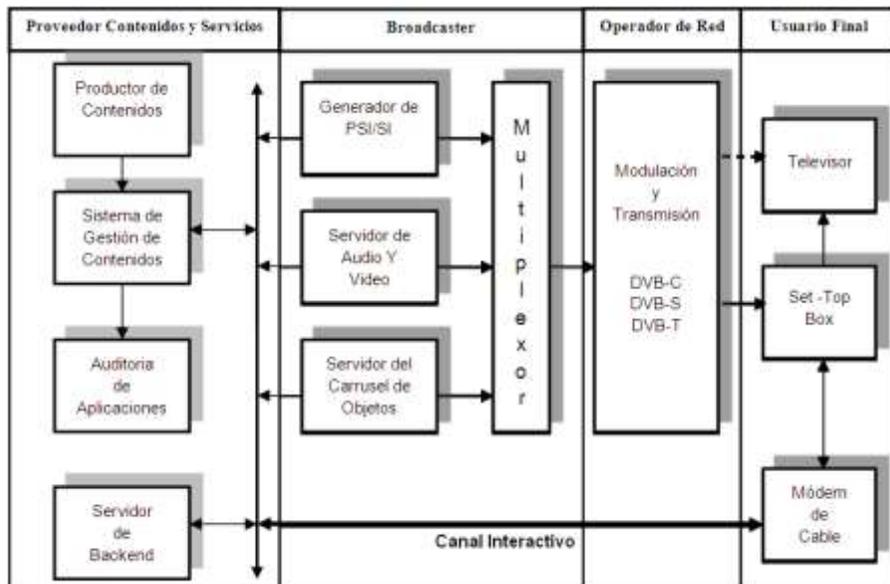


Figura 3-6. Componente tecnológico de un sistema de iTV

En la figura 3-6 se tiene que para la prestación de un servicio de iTV en redes HFC cada uno de los componentes tecnológicos del sistema realiza las siguientes funciones:

- **Proveedor de contenidos y servicios:** Se encarga de la producción, autoría, adecuación y gestión de los contenidos como audio, video, datos, aplicaciones y servicios. Cuenta con un servidor de *backend* el cual puede responder a través del canal de retorno o del canal de difusión a una solicitud hecha por un usuario.
- **Difusor (*Broadcaster*):** Es el encargado de adicionar las aplicaciones a los flujos de audio y video, y realizar su emisión hasta el terminal del usuario a través de la red de transmisión. En el difusor los flujos de audio, video y datos asociados a un programa se multiplexan con los flujos de otros programas en un único flujo de transporte MPEG-2 [53] que es el que finalmente se modula y transmite por la red de cable. Los flujos de audio y video se generan del proceso de codificación y compresión realizado por medio de los estándares MPEG-2 [45] [46]. Con estas especificaciones un programa de televisión digital puede ocupar un ancho de banda de 4 –17 Mbps según la definición del mismo, por lo cual es posible transmitir varios canales de televisión digital en el ancho de banda que ocupa un canal de televisión analógico. Los datos u aplicaciones adicionales al programa se distribuyen por la red mediante el protocolo DSM-CC (*Digital Storage Media – Command and Control*) en forma de carrusel de datos [84].
- **Operador de Red:** Es el responsable de proveer la plataforma tecnológica para la modulación y transmisión del flujo de transporte MPEG-2 por la red de difusión. Para redes HFC la distribución de estos contenidos se hace mediante el estándar DVB-C [4], el cual especifica la distribución de canales de televisión en un ancho de banda de 8 MHz con una modulación de 64 QAM o 256 QAM.
- **Usuario final:** Es el propietario de un terminal denominado STB que se encarga de ejecutar las aplicaciones MHP y decodificar las señales de televisión digital para presentar el contenido audiovisual al usuario por medio del televisor; aunque el televisor puede tener un STB integrado. El STB debe proveer la interfaz para la conexión con el canal interactivo. En una red de acceso HFC el canal interactivo usa la misma infraestructura que la red de difusión y se establece mediante el uso de un módem de cable basado en los estándares DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*) [74].
- **Aplicaciones interactivas en MHP:** La principal característica de un sistema de televisión digital interactivo es la habilidad para correr aplicaciones que han sido descargadas como parte del sistema de difusión; esto es lo que realmente hace la diferencia entre un sistema de televisión interactivo y un sistema de televisión digital convencional. Las aplicaciones interactivas requieren un soporte software en el

receptor (STB), es decir tiene que implementar uno de los perfiles MHP [27] que le permita ejecutar la aplicación e informar al receptor que aplicaciones se encuentran disponibles y como ejecutarlas,

### 3.6 PROTOCOLO DE ACCESO DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*)

El protocolo DOCSIS es el resultado del interés de los operadores de cable en desarrollar sistemas de comunicaciones de alta velocidad por paquetes, capaces de soportar una gran variedad de servicios [14]. Éstos incluyen servicios de telefonía por paquetes y servicios de video-conferencia, además de muchos otros [14]. Para lograrlo, las compañías de cable asociadas en *CableLabs* decidieron proponer una serie de especificaciones de interfaz que permitan la definición, diseño, desarrollo y despliegue de sistemas de datos sobre cable [14]. Por medio de la especificación DOCSIS es posible la transferencia bidireccional de tráfico IP entre la cabecera (*headend*) del sistema de cable y los usuarios, sobre una red mixta de fibra y cable coaxial [75]. En la figura 3-7 [75] se ilustra esta situación.

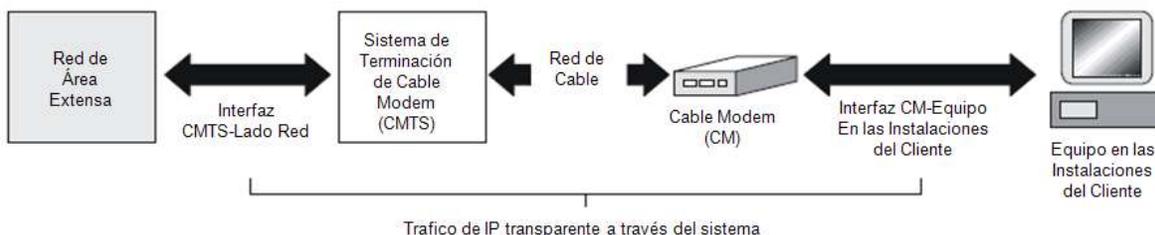


Figura 3-7. Tráfico IP a través del sistema de datos sobre cable

#### 3.6.1 Generalidades del protocolo DOCSIS

El protocolo DOCSIS define las operaciones de las capas de nivel físico y de Control de Acceso al Medio (MAC, *Media Access Control*) de la red HFC. Para la transmisión tanto en sentido ascendente como en sentido descendente se utiliza Acceso Múltiple por División en Frecuencia (FDMA) en la subcapa Dependiente del Medio Físico (PMD, *Physical Media Dependent*) de DOCSIS. El canal ascendente es un medio compartido, mientras que el descendente es un enlace dedicado de difusión desde el CMST al CM [75].

La subcapa de convergencia de la transmisión (TC, *Transmission Convergence*) proporciona una interfaz a la subcapa dependiente del medio físico para la capa de MAC [75]. Para mejorar la robustez en la demodulación y facilitar la multiplexación de video y datos, DOCSIS emplea MPEG-2 en la subcapa TC. El flujo de bits en sentido descendente se define como una serie continua de paquetes MPEG de 188 bytes [75].

### 3.6.2 Inicialización de los módems de cable

Para iniciar la conexión, una estación debe adquirir un canal descendente escaneando la banda de frecuencias hasta que su receptor identifica una señal de bajada válida. Después de obtener la sincronización a nivel físico, la estación puede adquirir las características del canal ascendente a partir de los mensajes de gestión difundidos por la cabecera [75].

Luego la estación obtiene sus parámetros operacionales de la cabecera, entre los que se incluyen dirección IP, información de seguridad, configuración del canal, configuración de clase de servicio, etc., gracias a los servicios de los protocolos DHCP y TFTP respectivamente [75].

A continuación, la estación envía una solicitud de registro, conteniendo los parámetros operacionales, a la cabecera. Esta última realiza, entonces, las siguientes funciones [75]:

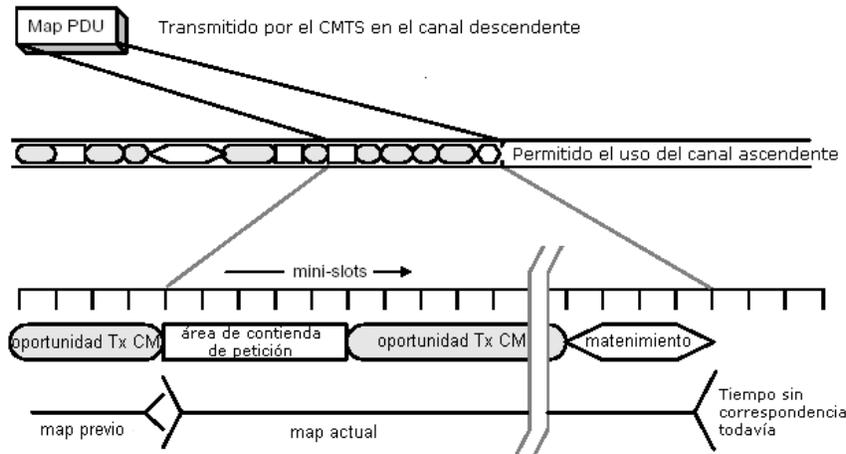
- Confirma la validez de los parámetros operacionales
- Crea un perfil para la estación
- Asigna un identificador de servicio (SID, *Service Identifier*)
- Envía una respuesta de registro a la estación
- Una vez realizada la etapa de inicialización, la estación pasa a la fase de operación normal.

### 3.6.3 Asignación del ancho de banda del canal ascendente y métodos de acceso

El canal ascendente está dividido en intervalos de tiempo debido al mecanismo de asignación de ancho de banda que implementa el protocolo. Cada intervalo es un número entero de *minislots*, siendo éstos la unidad de granularidad para las oportunidades de transmisión en sentido ascendente. El CMTS transmite por el canal descendente, además del tráfico de usuarios, información sobre el uso que los CM pueden hacer del canal ascendente, logrando así la gestión del ancho de banda mediante el envío (*broadcasting*, *multicasting* o *unicasting*) de mensajes de asignación de ancho de banda MAP [75]. En la figura 3-8 [75] se observa el mecanismo de asignación de ancho de banda por el MAP.

Cada intervalo está etiquetado con un código de uso que define tanto el tipo de tráfico que puede ser transmitido como el esquema de modulación de la capa física. Un MAP determinado define algunas ranuras (*slots*) como concesiones a una estación particular para transmitir datos, otros *slots* para la transmisión en contienda donde los CM envían sus solicitudes de tiempo al CMTS y otros como oportunidades a nuevas estaciones para unirse al enlace y demás funciones de mantenimiento. Como resultado de la reserva de ancho de banda, los CM tienen garantizado una transmisión libre de colisiones. Sin

embargo, las solicitudes de asignación de ancho de banda realizadas durante los intervalos de contienda están sujetas a colisiones, las cuales se resuelven por medio de un Algoritmo de Resolución de Contienda (CRA, *Contention Resolution Algorithm*). DOCSIS adopta el CRA conocido como disminución Exponencial Binaria (*Binary Exponential Backoff*) [75].



**Figura 3-8.** Asignación de tiempos en sentido ascendente

Adicionalmente, se tiene el mecanismo de *piggybacking* por medio del cual una estación solicita ancho de banda adicional en la transmisión de datos [75]. Con esto se obvia la contención, dado que las solicitudes se transmiten con los paquetes de datos logrando una reducción en los retardos de acceso [75]. En DOCSIS 1.1, además de los modos de reserva de tiempo de transmisión como son el modo normal de reserva y *piggybacking*, se incluyen el acceso isócrono, el sondeo periódico de solicitud y el modo de acceso inmediato [75]. En la figura 3-9 [13] se indica el diagrama de estados de la fase de operación para cada uno de estos modos de acceso.

El acceso isócrono se utiliza para oportunidades de transmisión de datos asignadas periódicamente, mientras los sondeos periódicos se realizan cuando se tienen oportunidades de transmisión periódicas asignadas por solicitud [75]. Estos modos de acceso están diseñados para flujos con calidad de servicio. Finalmente, el acceso inmediato se concede cuando existe ancho de banda disponible después de satisfacer todos los requerimientos de ancho de banda [75]. Este modo de acceso está abierto tanto para datos como para solicitudes. Si la carga es ligera, este modo de acceso puede emplearse para reducir retardos en los accesos a solicitudes y transmisión de datos [75].

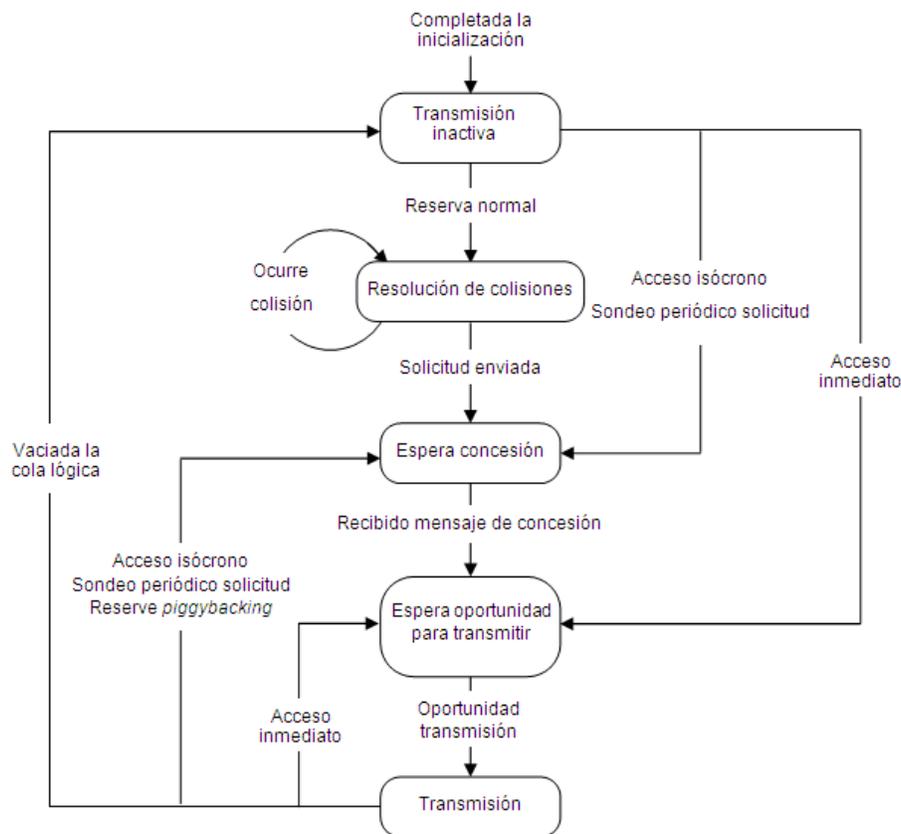


Figura 3-9. Diagrama de estados en DOCSIS para estaciones ya inicializadas

### 3.6.4 Calidad de servicio en DOCSIS

La especificación DOCSIS 1.1 incluye nuevos conceptos relacionado con QoS que no están incluidos en la versión anterior como la clasificación de paquetes e identificación de flujo, la planificación de la QoS de flujo de servicio y los mecanismos de fragmentación y concatenación [75].

#### 3.6.4.1 Teoría de operación

Los distintos mecanismos del protocolo DOCSIS se pueden usar para el soporte de la calidad de servicio tanto de tráfico ascendente como descendente por el CM y el CMTS. Los requisitos de calidad de servicio incluyen [75]:

- Una función de configuración y registro para la configuración previa de flujos de servicio de QoS basados en CM y parámetros de tráfico.
- Una función de señalización para establecer dinámicamente flujos de servicio habilitados para QoS y parámetros de tráfico.

- Utilización de parámetros de tráfico y de planificación de MAC para flujos de servicio ascendentes.
- Utilización de parámetros de tráfico QoS para flujos de servicio descendentes.
- Clasificación de los paquetes que llegan de la interfaz de servicio de la capa superior para un determinado flujo de servicio activo.

### 3.6.4.2 Flujos de Servicio y colas virtuales

La manera de proporcionar una QoS consiste en clasificar los paquetes que atraviesan la interfaz MAC de radio frecuencia en un flujo de servicio el cual es un flujo unidireccional de paquetes que proporcionan una determinada calidad de servicio. El CM y el CMTS proporcionan esta QoS conformando, controlando y priorizando el tráfico de acuerdo al conjunto de parámetros de QoS definido para el flujo de servicio [75]. Los flujos de servicio existen tanto en el sentido ascendente como en el descendente y tienen un identificador de flujo de servicio (SFID) de 32 bits asignado por el CMTS. Adicionalmente se tiene un identificador del servicio (SID) de 14 bits que indica la cola virtual para un flujo de datos en una estación [75]. El SID también es utilizado para gestión de QoS.

Una cola virtual es una entidad elemental que participa en el protocolo MAC. Consecuentemente, una estación registrada mantiene una máquina de estados independiente, como la indicada en la figura 3-10 [75], para cada una de sus colas virtuales. Cuando el CMTS realiza tareas de planificación o resolución de colisiones considera cada cola virtual en lugar de cada estación. Cada SID se ajusta a una cola virtual dentro de la estación. Puede observarse en la figura 3-10 [13] como la estación A tiene asignados 3 SID, cada uno correspondiente a una cola virtual y una QoS determinada.

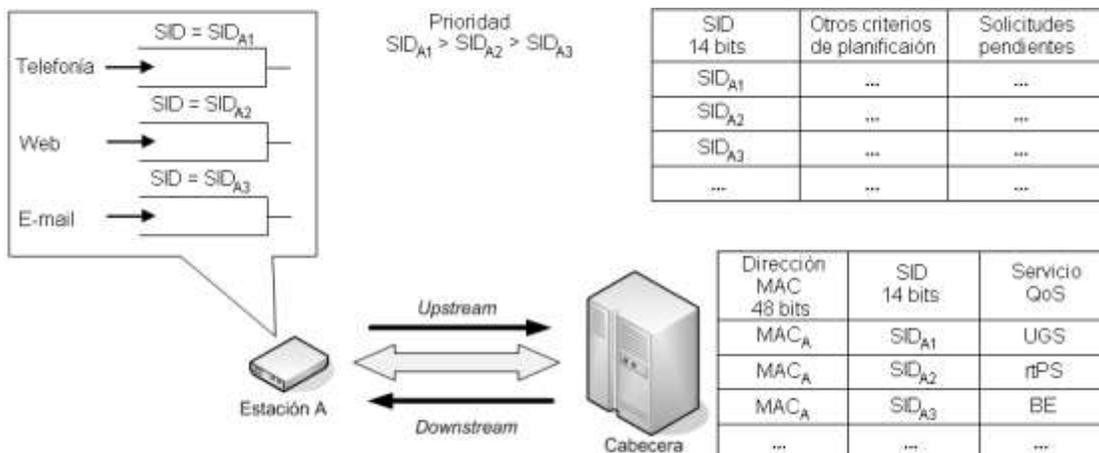


Figura 3-10. Planificación e Identificadores del Servicio (SID)

Para manejar los servicios disponibles, se ha habilitado un mecanismo de clasificación de paquetes basándose en ciertos campos de las cabeceras de las capas 2, 3 y 4 y una asignación de ancho de banda mediante mensajes MAP de forma que la diferenciación de servicios pueda implementarse en redes con DOCSIS [75].

### 3.6.4.3 Flujos de Servicio de QoS en DOCSIS

Los servicios de planificación están concebidos para mejorar la eficiencia del proceso de petición/concesión. Especificando un servicio de planificación y sus parámetros de QoS asociados, el CMTS puede prever las necesidades de *throughput* y retardo del tráfico en sentido ascendente, y proporcionar peticiones y/o concesiones en los momentos oportunos. Cada servicio se adapta expresamente a un tipo específico de flujo de datos. Los servicios básicos comprenden: servicio de concesión no solicitada (UGS, *Unsolicited Grant Service*), servicio de interrogación secuencial en tiempo real (rtPS, *real-time Polling Service*), servicio de concesión no solicitada con detección de actividad (UGS-AD, *Unsolicited Grant Service with Activity Detection*), servicio de interrogación secuencial no en tiempo real, (nrtPS, *non-real-time Polling Service*), y servicio de máximo esfuerzo (BE, *Best Effort*) [75]. En la tabla 3-1 [13] se resumen los flujos de servicio de QoS en DOCSIS, indicando para cada uno de ellos los parámetros de QoS, los modos de acceso y las aplicaciones más relevantes.

**Tabla 3-1.** Flujos de Servicio de QoS proporcionados en DOCSIS

Servicio	Parámetros QoS	Modos de acceso	Aplicaciones
UGS	Tamaño de grant no solicitada Intervalo nominal de <i>grant</i> <i>Jitter</i> de <i>grant</i> tolerado	Acceso isócrono	VoIP
UGS-AD	Tamaño <i>grant</i> no solicitada Intervalo nominal de <i>grant</i> <i>Jitter</i> de <i>grant</i> tolerado Intervalo nominal de sondeo <i>Jitter</i> de sondeo tolerado	Acceso isócrono Sondeo periódico de solicitud	VoIP con supresión de silencios
rtPS	Intervalo nominal de sondeo <i>Jitter</i> de sondeo tolerado	Sondeo periódico de solicitud Reserva <i>piggybacking</i>	Videoconferencia, Video bajo demanda
nrtPS	Intervalo nominal de sondeo Tasa mínima de tráfico reservada Tasa máxima de tráfico sostenida Prioridad de tráfico	Sondeo periódico de solicitud Reserva <i>piggybacking</i> Acceso inmediato	FTP de gran ancho de banda
BE	Tasa mínima de tráfico reservada Tasa máxima de tráfico sostenida Prioridad de tráfico	Reserva normal Reserva <i>piggybacking</i> Acceso inmediato	telnet, FTP, WWW

#### 3.6.4.4 Concatenación y Fragmentación

Con estos dos mecanismos, los *minislots* concedidos serán utilizados completamente para transportar paquetes segmentados o concatenados. De esta forma, el *throughput* del canal ascendente se incrementa [75].

Por un lado, la concatenación es un medio del que dispone el CM para permitir que múltiples paquetes pequeños sean combinados y enviados en una misma trama MAC, aprovechando una sola oportunidad de transmisión [75]. La concatenación reduce la ocurrencia de colisiones reduciendo el número de oportunidades de transmisión individuales necesarias. Por otro lado, la fragmentación consiste esencialmente en la división de grandes paquetes en varios paquetes más pequeños, los cuales se encapsulan en una trama MAC junto con un encabezado de fragmentación de tamaño fijo y un código de redundancia cíclica (CRC) del fragmento [75]. Al habilitar este mecanismo para un flujo de servicio, el CMTS inicia la fragmentación cuando concede a un determinado CM un ancho de banda con un tamaño de concesión menor al de la petición de ancho de banda realizada por el CM. Esto se conoce como concesión parcial. La fragmentación se aplica de la misma forma tanto a las tramas concatenadas como a las simples y se encapsulan de la misma forma [75].

El CMTS puede utilizar dos modos para efectuar la fragmentación. El primero es el modo concesión múltiple, el cual presume que el CMTS retiene el estado de la fragmentación [75]. Este modo permite al CMTS tener múltiples concesiones parciales pendientes para cualquier SID dado. El segundo es el modo remolque que supone el CMTS no retiene ningún estado de la fragmentación. Sólo una concesión parcial está pendiente, por lo que el CM inserta la cantidad restante en el campo remolque del encabezado de fragmento [75]. El CMTS determina el modo que habrá de utilizarse.

El estudio realizado en este capítulo facilitó la comprensión la arquitectura de red HFC y los alcances de la misma para la distribución de contenidos de iTV, la cual proporciona el canal de difusión y el canal interactivo en la misma infraestructura de red basándose en el estándar DVB-MHP para difusión de la iTV y el protocolo DOCSIS para la entrega de contenidos por el canal interactivo. Además el estudio permitirá la definición de un modelo de red HFC para la simulación de contenidos iTV en el canal interactivo como se verá en el capítulo IV.

## CAPÍTULO IV

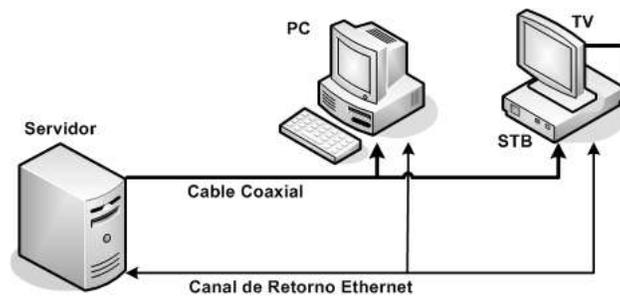
### 4 ANÁLISIS DEL PROTOCOLO DOCSIS PARA LA DISTRIBUCIÓN DE CONTENIDOS DE ITV

En este capítulo se presenta el modelo matemático de las aplicaciones de iTV implementadas para ambientes de educación virtual a distancia, los resultados de la implementación del modelo en la herramienta OPNET *Modeler* y el modelo de la red HFC donde fue simulado. Finalmente, se muestra el análisis del protocolo DOCSIS para la transmisión del tráfico de iTV evaluando los parámetros de desempeño como el *throughput*, el retardo y pérdida de paquetes en la red para diferentes escenarios donde se varió el número de usuarios que acceden a la red y los parámetros de configuración del protocolo como el tiempo entre MAP, tamaño del *minislot* y los parámetros de calidad de servicio como fragmentación y concatenación. Así se determinó la configuración óptima del protocolo DOCSIS para distribución de contenidos iTV.

#### 4.1 MODELO DE TRÁFICO DE LAS APLICACIONES ITV EN EL CANAL INTERACTIVO

Los modelos de tráfico necesitan ser precisos y capaces de imitar las características estadísticas del tráfico real [13]. En consecuencia, para generar el modelo de tráfico de las aplicaciones de iTV objeto de estudio, se realizaron capturas de tráfico generado por estas en el laboratorio de EDiTV [16] de la Universidad del Cauca con el analizador de protocolos *Wireshark* [85], y de esta forma se determinaron los parámetros de las funciones de probabilidad que mejor describen el tráfico generado por el comportamiento de un usuario cuando realiza una solicitud o envía información al servidor de aplicaciones tal y como se muestra en el Anexo A.

El laboratorio de EDiTV de la Universidad del Cauca está conformado por la infraestructura tecnológica presentada en [16], donde se realizaron diferentes capturas de tráfico para 50 usuarios cuando utilizan las aplicaciones de iTV. En la figura 4-1 se puede ver la forma de conexión que hizo posible la captura del tráfico en el canal de interactivo del sistema de iTV.



**Figura 4-1.** Entorno de experimentación

La transferencia de información por el canal interactivo se realiza generalmente usando la pila de protocolo TCP/IP (*Transmission-Control Protocol/Internet Protocol*) con los protocolos HTTP/HTTPS (*HyperText Transfer Protocol/HTTP Secure*) en el nivel de aplicación, tal y como se muestra en la figura 2-7 [27]. Esto permite que las peticiones de cada usuario sean procesadas individualmente por el servidor de aplicaciones [25] [27]. En diferentes trabajos de investigación como los mostrados en [86] [87] modelan el tráfico HTTP teniendo en cuenta el comportamiento estadístico de aspectos como lo son el tamaño de los archivos (peticiones y respuestas) y el tiempo entre las peticiones realizadas por los usuarios. Por su parte [88] caracteriza el tráfico interactivo considerando los mismos parámetros.

En este sentido, para caracterizar el tráfico de las aplicaciones de iTV en el canal interactivo se consideró el tamaño de los archivos y el tiempo entre peticiones. Así, se determinó el comportamiento estadístico de estos aspectos, comenzando con la realización de un estudio previo de los datos reales proporcionados por las capturas de tráfico y la determinación de los parámetros de las funciones de probabilidad a emplear en las simulaciones mediante la programación de una aplicación personalizada (*custom application*) en *OPNET Modeler*, tal y como se muestra en los siguientes numerales.

#### **4.1.1 Análisis del tráfico intercambiado entre el STB y el servidor de aplicaciones de iTV**

La transferencia de información inicia cuando el televidente, una vez que ha elegido la aplicación, selecciona una de las opciones se le presentan para solicitar o enviar información; con lo cual cada vez que un usuario escoge una de ellas se inicia una conexión TCP. En la tabla 4-1 se puede ver el proceso de transferencia de información entre el STB y el servidor de aplicaciones para solicitar información adicional y en la tabla 4-2 el proceso para enviar información como respuesta a una pregunta.

**Tabla 4-1.** Transferencia de información entre el STB y el servidor de aplicaciones para solicitar información adicional

Etapa	Origen	Destino	Protocolo	Mensaje
Conexión	STB	Servidor	TCP	[SYN]
	Servidor	STB	TCP	[SYN, ACK]
	STB	Servidor	TCP	[ACK]
Transferencia de Información	STB	Servidor	HTTP	GET /Proyecto/aplicacion1/sample3.xml HTTP/1.1
	Servidor	STB	TCP	[ACK]
	Servidor	STB	HTTP/XML	HTTP/1.1 200 OK
	STB	Servidor	TCP	[ACK]
Desconexión	STB	Servidor	TCP	[FIN, ACK]
	Servidor	STB	TCP	[FIN, ACK]
	Servidor	STB	TCP	[ACK]
	STB	Servidor	TCP	[ACK]

**Tabla 4-2.** Transferencia de la información entre el STB y el servidor de aplicaciones para responder a una pregunta de selección múltiple

Etapa	Origen	Destino	Protocolo	Mensaje
Conexión	STB	Servidor	TCP	[SYN]
	Servidor	STB	TCP	[SYN, ACK]
	STB	Servidor	TCP	[ACK]
Transferencia de Información	STB	Servidor	HTTP	POST /Proyecto/aplicacion01 HTTP/1.1 (application/x-www-form-urlencoded)
	Servidor	STB	TCP	[TCP segment of a reassembled PDU]
	Servidor	STB	HTTP/XML	HTTP/1.1 200 OK
	STB	Servidor	TCP	[ACK]
Desconexión	STB	Servidor	TCP	[FIN, ACK]
	Servidor	STB	TCP	[ACK]
	Servidor	STB	TCP	[FIN, ACK]
	STB	Servidor	TCP	[ACK]

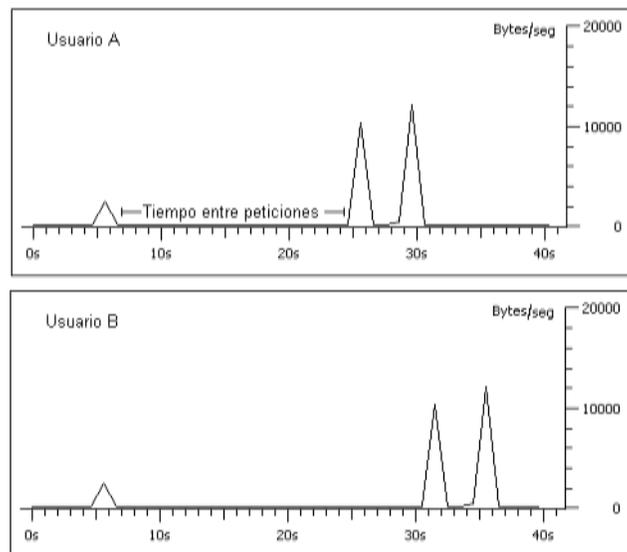
Según las tablas 4-1, 4-2 y las opciones de configuración de las aplicaciones personalizadas de OPNET *Modeler* en fases y tareas<sup>8</sup>, se puede identificar la existencia de una única fase asociada a las tareas de solicitud de información y envío de información y se la ha denominado fase de transferencia de información.

<sup>8</sup> Donde las fases define los patrones de conexión para cada tarea y las tareas describen la actividad básica del usuario en el transcurso de la aplicación [15]

#### 4.1.1.1 Análisis de la transferencia de la información entre el STB y el servidor de aplicaciones para solicitar información adicional al programa de televisión

De acuerdo a la información mostrada en la tabla 4-1, al comienzo de cada conexión TCP y después de haberse sincronizado los equipos con el envío de mensajes SYN, el STB solicita información adicional mediante la transmisión en sentido ascendente de una orden HTTP, generalmente la orden GET. Como respuesta, el servidor con el que tiene establecido la conexión TCP, le responde sirviendo el archivo solicitado segmentado en paquetes IP. Cuando el STB recibe un paquete TCP/IP, responde con un paquete de reconocimiento (ACK) para garantizar la entrega. Una vez se termina la transferencia de información se termina la conexión con mensajes FIN.

En la figura 4-2 se muestra la interacción de dos usuarios diferentes cuando usan la aplicación EDiTV0, donde cada petición que realicen solicitará uno o un conjunto de archivos que se transmiten hacia el STB en conexiones TCP diferentes. Así pues, el primer pico de tráfico corresponde a una conexión TCP para solicitar un contenido con información de tipo texto la cual está contenida en un archivo XML, mientras que los siguientes picos pertenecen a un contenido compuesto por texto (archivo XML) y por una imagen respectivamente. La información de los dos últimos archivos se presenta en la pantalla del televisor en conjunto con el audio y video como muestra en la figura 4-3.



**Figura 4-2.** Tráfico generado por usuarios diferentes de la aplicación de solicitud de información adicional al programa de televisión educativo



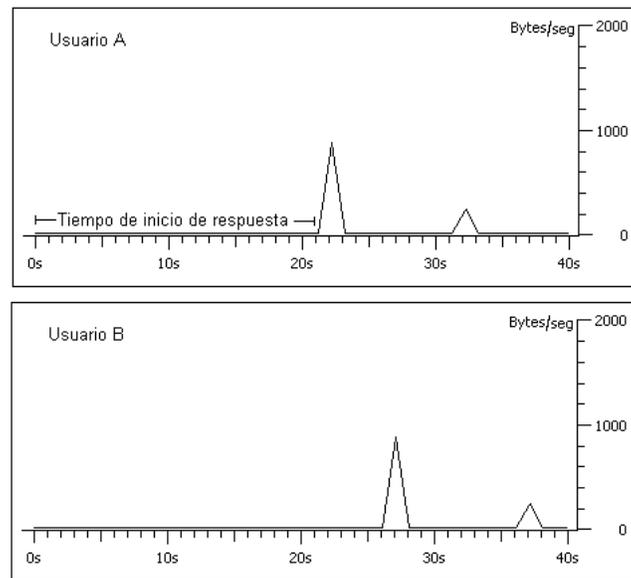
**Figura 4-3.** Interfaz de visualización de la aplicación de solicitud de información adicional al programa de televisión educativo

Además, en la figura 4-2 se puede observar claramente la variación del tiempo entre solicitudes para 2 de las 50 muestras tomadas en el laboratorio, en donde para el usuario A este tiempo es de 19.21 s y para el usuario B el tiempo es de 25.64 s, variaciones que dependen del tiempo de lectura y del nivel de comprensión de los contenidos de cada uno de los usuarios. Entre tanto y para este caso el tamaño de los paquetes en los dos casos no varía porque se trata de la misma información solicitada.

#### **4.1.1.2 Análisis de la transferencia de la información entre el STB y el servidor de aplicaciones para enviar información como respuesta a una pregunta**

La transferencia de información para enviar información al servidor de aplicaciones como respuesta a una pregunta (ver tabla 4-2) sigue un proceso similar al que se realiza cuando el usuario hace una solicitud de información, pero ahora el STB envía en sentido ascendente una orden HTTP, generalmente la orden POST, con la respuesta a la pregunta. En seguida, el servidor con el cual tiene establecido la conexión TCP le confirma al usuario si respondió acertadamente o no a dicha pregunta, enviando en sentido descendente esa información. Finalmente se termina la conexión mediante mensajes FIN.

En la figura 4-4 se puede ver la interacción de dos usuarios cuando están respondiendo a una pregunta sobre el programa de televisión educativo. El primer pico de tráfico de la figura 4-4 corresponde al envío de información desde STB al servidor, al igual que la réplica del servidor, información que se transmiten por la misma conexión TCP. El siguiente pico de tráfico pertenece al proceso de desconexión.



**Figura 4-4.** Tráfico generado por usuarios diferentes de la aplicación de preguntas de selección múltiple sobre el programa de televisión educativo

En la figura 4-4 también se observa la variación del tiempo de inicio de la respuesta, así este tiempo es de 21.38 s para el usuario A y 24.44 s para el usuario B, variaciones que dependen del tiempo de lectura y del nivel de comprensión de los contenidos. Entre tanto el tamaño de los paquetes para los diferentes picos de tráfico no varía. De la figura 4-4 se tiene que el tiempo de inicio de respuesta a una pregunta es el aspecto a considerar a la hora de caracterizar el tráfico generado por un usuario de esta aplicación de iTV, el cual se mide desde el lanzamiento de la pregunta hasta que el usuario responde.

#### 4.1.2 Determinación de los parámetros de entrada a la simulación de tráfico

Una vez comprendida la transferencia de información entre el STB y el servidor de aplicaciones y teniendo en cuenta que los aspectos a caracterizar en este tipo de aplicaciones son el tamaño de los archivos, el tiempo entre solicitudes y el tiempo de inicio de la respuesta, mediante el análisis de bondad de ajuste de *Kolmogorov-Smirnov* [89] realizado a los datos capturados de 50 usuarios, se determinaron las funciones de probabilidad que mejor se aproximan al comportamiento de estos aspectos y que permitieron la simulación de este tipo de tráfico mediante la configuración de una aplicación personalizada. El análisis de los datos capturados y se describe en detalle en el anexo A de esta monografía.

##### 4.1.2.1 Parámetros de entrada para el tiempo entre peticiones de la aplicación de solicitud de información

Como resultado del análisis de bondad de ajuste de *Kolmogorov-Smirnov* realizado en el anexo A y con una confiabilidad del 95%, el comportamiento del tiempo entre peticiones se caracteriza con la función de distribución de probabilidad exponencial y corresponde al tiempo que el usuario se tarda en solicitar el siguiente contenido con información adicional al programa de TV. En la tabla 4-3 [15] se resume la ecuación de la distribución exponencial así como los parámetros que deben ser calculados para habilitar su uso en las simulaciones de la aplicación de iTV en OPNET.

**Tabla 4-3.** Parámetros de la función de distribución de probabilidad exponencial

Distribución	Densidad de probabilidad	Parámetros
Exponencial	$f(x) = \begin{cases} ae^{-ax} & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$	$\mu_x = a^{-1}$ Media $\sigma_x^2 = a^{-2}$ Varianza

Donde  $\mu_x = E(x)$ , es la media o valor esperado y corresponde al promedio del número total de muestras (N) de la señal a analizar y se calcula por medio de la ecuación (1) [90].

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

La varianza,  $\sigma_x^2$ , es el momento central de segundo orden de la señal analizada. En teletráfico, junto con la media, permite caracterizar la variabilidad de las muestras [90]. La varianza se determina por medio de la ecuación (2) [90].

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \quad (2)$$

A partir de las ecuaciones (1) y (2) se calculó en el anexo A la media y la varianza de los valores capturados para el tiempo entre peticiones cuyos los resultados se muestran en la tabla 4-4. La media obtenida en este análisis fue empleada como uno de los parámetros de entrada a la herramienta de simulación para la aplicación de iTV de solicitud de información.

**Tabla 4-4.** Media y varianza para el tiempo entre peticiones

Parámetro	Tiempo entre Peticiones
Media ( $\mu_x$ )	28.5262 s
Desviación estándar ( $\sigma_x$ )	25.1136 s

El hecho que el tiempo entre peticiones de la aplicación EDiTV0 tenga un comportamiento regido por una distribución exponencial significa que van existir casos para los cuales no se realizan peticiones del siguiente contenido dentro del tiempo vigente para la aplicación, lo cual está acorde con la realidad porque un usuario puede o no solicitar un contenido adicional al programa. Asimismo, se encuentra la posibilidad que un usuario solicite un contenido e inmediatamente después solicite el siguiente.

#### 4.1.2.2 Parámetros de entrada para el tiempo de inicio de envío de información como respuesta a una pregunta

Como se describió anteriormente en la aplicación del programa educativo con preguntas de selección múltiple se modela teniendo en cuenta el tiempo desde que se lanza la pregunta hasta que se la contesta y al cual se le ha denominado tiempo de inicio de respuesta. Así, y como resultado del análisis de bondad de ajuste de *Kolmogorov-Smirnov* realizado en el anexo A y con una confiabilidad del 95%, este aspecto se caracteriza con la función de distribución normal. En la tabla 4-5 [15] se resume la ecuación de la distribución normal así como los parámetros que deben ser calculados para habilitar su uso en las simulaciones de la aplicación de iTV en OPNET.

**Tabla 4-5.** Parámetros de la función de distribución de probabilidad normal

Distribución	Densidad de probabilidad	Parámetros
Normal	$f(x) = \frac{1}{2\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2} \quad \text{si } -\infty \leq x \leq \infty$	$\mu_x = a^{-1}$ Media $\sigma_x^2 = a^{-2}$ Varianza

En la tabla 4-6 se muestran los parámetros de entrada a la herramienta de simulación para la aplicación de iTV de envío de información y corresponden a media y desviación estándar (raíz cuadrada de la varianza.) de la aplicación del programa educativo con preguntas de selección múltiple.

**Tabla 4-6.** Media y desviación estándar para el tiempo de inicio de respuesta a una pregunta

Parámetro	Tiempo de Inicio de respuesta (s)
Media ( $\mu_x$ )	38.0102
Desviación estándar ( $\sigma_x$ )	14.1642

Como se puede ver para la aplicación EDiTV0, el tiempo de inicio de respuesta a una pregunta está ligado a una distribución normal, lo que significa que el tiempo más probable que un usuario tarda en responder a una pregunta es de 38.0102 s generándose

así una acumulación del tráfico generado por diferentes usuarios alrededor de este valor con una desviación de 14.1642 s.

#### 4.1.2.3 Parámetros de entrada para el tamaño de las peticiones

En caso de las aplicaciones de iTV analizadas, el tamaño de las solicitudes de información y envío de información no varía porque se trata de una aplicación que despliega la misma información para todos los usuarios (ver figuras 4-2 y 4-4), por lo cual estos valores no se los ha considerado como aleatorios sino constantes y en la herramienta de simulación fueron configurados mediante una distribución constante.

Para la aplicación EDiTV0 los parámetros que se necesitan para llevar a cabo la simulación corresponden al tamaño en bytes de las solicitudes del usuario al servidor y de los archivos (XML e imagen) entregados por el servidor cuando son solicitados, mientras que para la aplicación EDiTV1 se consideró el tamaño de la respuesta a la pregunta enviada desde el usuario al servidor y la respuesta del servidor indicando su acierto o fallo a la pregunta. Estos valores se tomaron de la información proporcionada por el analizador de protocolos *Wireshark* y se presentan en la tabla 4-7.

**Tabla 4-7.** Tamaño de las solicitudes, respuestas y archivos (XML e imagen) para las aplicaciones de iTV

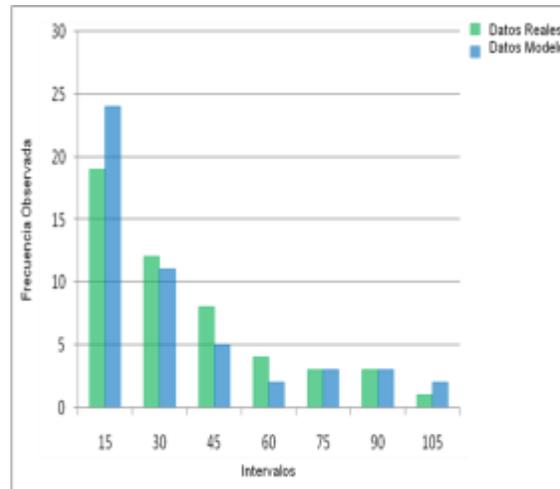
Aplicación de solicitud de información adicional			Aplicación de respuestas de selección múltiple		
Solicitud de información	Archivo XML1	Archivo XML2	Imagen	Envío de Información	Respuesta del Servidor
256 bytes	1084 bytes	8443 bytes	10053 bytes	400 bytes	200 bytes

## 4.2 IMPLEMENTACIÓN DE LAS APLICACIONES DE ITV EN OPNET MODELER

Como se ha mencionada con anterioridad, las aplicaciones de iTV se implementaron en la herramienta de simulación OPNET *Modeler* programando una *Custom Application* para cada una de ellas, teniendo en cuenta los parámetros de entrada expuestos en las tablas 4-4, 4-6 y 4-7. El procedimiento que se realizó para programar las aplicaciones se describe en el video “*Configuración de escenarios HFC (Anexo B)*” adjunto a esta monografía.

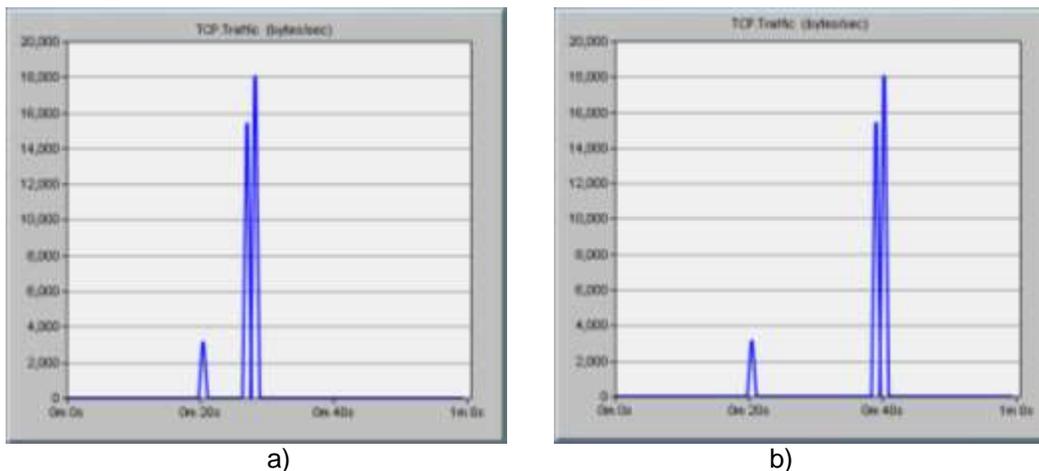
Así, en la figura 4-5 se muestra la comparación de las capturas de tráfico en el laboratorio de EDiTV y las estadísticas generadas por OPNET *Modeler* para el tiempo entre peticiones de la aplicación de solicitud de información. Nótese que los resultados obtenidos fueron similares y siguen el comportamiento de la distribución exponencial, comprobándose que el modelo de tráfico simulado representa de manera adecuada el

comportamiento para esta aplicación de iTV lo que permite validar dicho modelo y por ende puede tomarse como base para hacer los estudios pertinentes.



**Figura 4-5.** Comparación de los histogramas de los datos capturados en el laboratorio de EDiTV con las estadísticas de OPNET *Modeler* para el tiempo entre peticiones

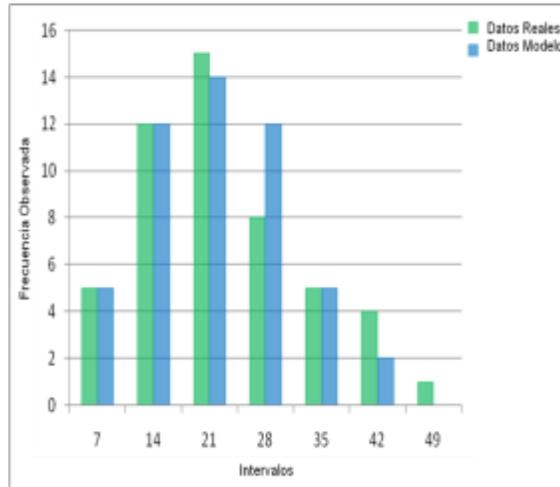
Adicionalmente, en la figura 4-6 se presenta la distribución del tráfico generado por OPNET para dos usuarios diferentes de esta aplicación, para los cuales se estableció un tiempo entre peticiones regido por una distribución exponencial y que es similar a las variaciones de tiempo entre peticiones de la figura 4-2. En la figura 4-6a, el tiempo entre peticiones es de 5.4 s mientras que en la figura 4-6 es de 18.7 s.



**Figura 4-6.** Simulación del tráfico generado por usuarios diferentes de la aplicación de solicitud de información adicional al programa de televisión educativo

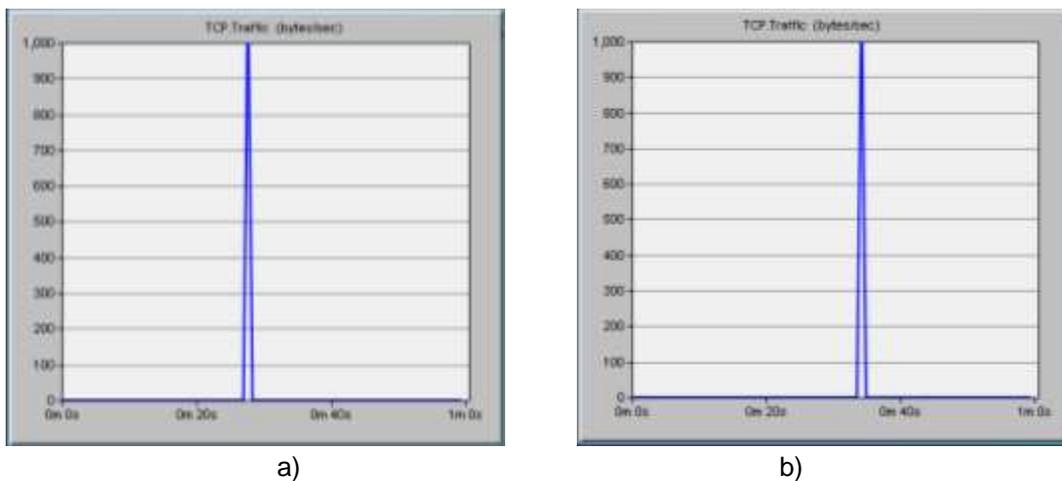
De la misma forma que para la aplicación anterior, en la figura 4-7 se muestra la comparación de las capturas de tráfico en el laboratorio de EDiTV y las estadísticas generadas por OPNET *Modeler* para el tiempo de inicio de respuesta de la aplicación de

preguntas de selección múltiple. Nótese que resultados obtenidos fueron similares y siguen el comportamiento de la distribución normal, comprobándose que el modelo de tráfico simulado representa de manera adecuada el comportamiento para esta aplicación de iTV lo que permite validar dicho modelo y por ende puede tomarse como base para hacer estudios pertinentes.



**Figura 4-7.** Comparación de los histogramas de los datos capturados en el laboratorio de EDiTV con las estadísticas de OPNET *Modeler* para el tiempo de inicio de respuesta

En la figura 4-8 se presenta la distribución del tráfico generado por OPNET para dos usuarios diferentes de la aplicación EDiTV1, para los cuales se estableció un tiempo de inicio de respuesta regido por una distribución normal y que es similar a las variaciones del tiempo de inicio de respuesta de la figura 4-4. Así, en la figura 2-15a, el tiempo de inicio de envío de información es de 27.6 s, mientras que en la figura 2-15b es de 33.2 s.

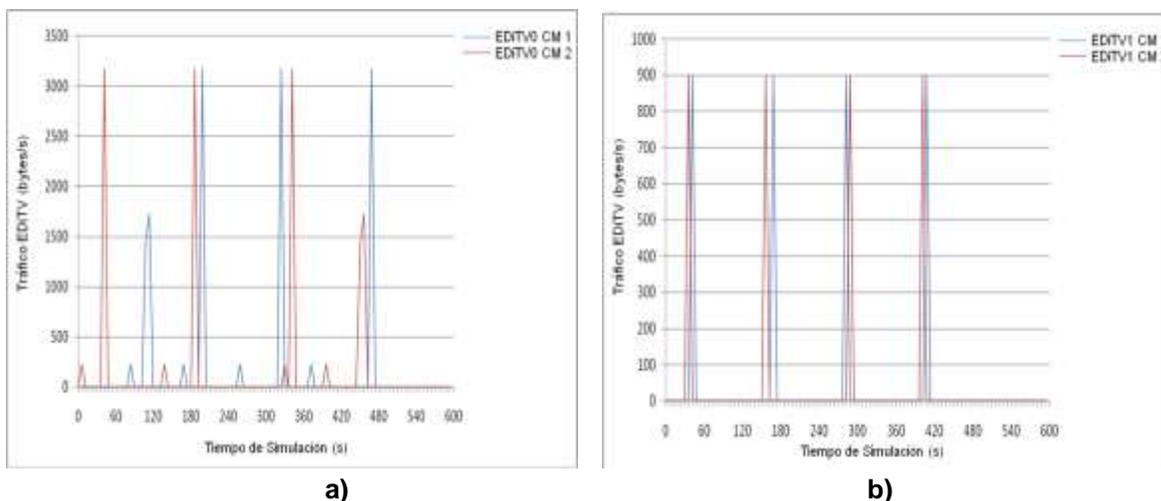


**Figura 4-8.** Simulación del tráfico generado por usuarios diferentes de la aplicación de preguntas de selección múltiple sobre el programa de televisión educativo

### 4.3 PERFILES DE USUARIOS DE LAS APLICACIONES DE ITV

Partiendo del modelo de tráfico simulado, se configuraron dos perfiles de usuario teniendo en cuenta que el productor del programa de televisión educativo es quien define o habilita cuando se puede solicitar información adicional al programa de televisión o responder a una pregunta. Para efectos de simulación, a todos los usuarios de las aplicaciones de iTV cada 2 minutos se les permite la utilización de estas, con lo cual el modelo de tráfico de las aplicaciones entra en funcionamiento basado en el comportamiento estadístico de cada una de ellas. En las figuras 4-9a y 4-9b se muestra el tráfico generado por cada uno de los perfiles de usuario de las aplicaciones de iTV.

Los perfiles de usuario mostrados en las figuras 4-9a y 4-9b simulan de esta manera un fragmento de un programa de televisión cuya duración es de 8 minutos y durante el cual se solicita información adicional o se responde a preguntas de selección múltiple por el canal interactivo en instantes de tiempo determinados.

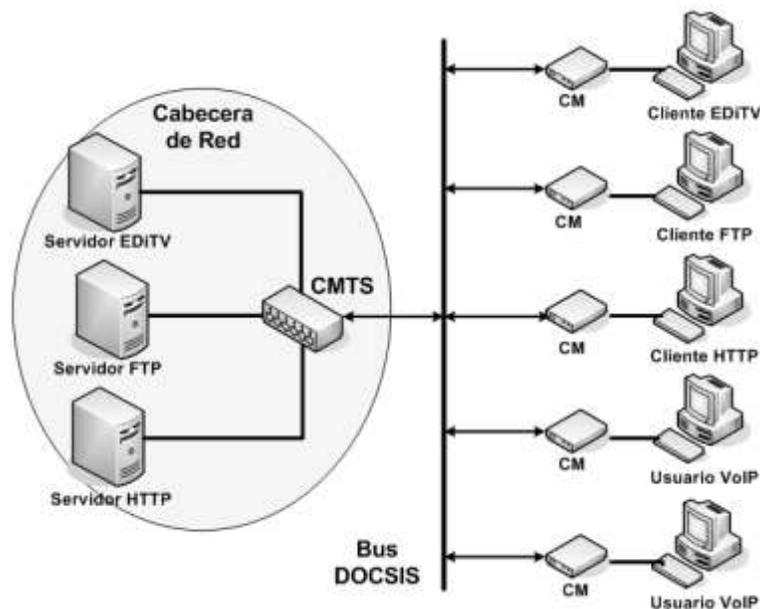


**Figura 4-9.** Perfiles de usuarios de las aplicaciones de solicitud de información adicional al programa de televisión y de preguntas de selección múltiple

Por lo tanto estos perfiles, que determinan el comportamiento de un usuario cuando hace uso de las aplicaciones de iTV, fueron simulados en el modelo de red que se plantea en el apartado 4.4. Facilitando la evaluación de la incidencia del protocolo DOCSIS sobre este tipo de aplicaciones y determinando de esta manera sí la red de acceso HFC es capaz de proporcionar los recursos necesarios para una adecuada prestación del servicio de iTV cumpliendo con los parámetros de desempeño en el canal interactivo de la red.

## 4.4 MODELO DE RED HFC PARA LA SIMULACIÓN DE LAS APLICACIONES DE ITV

Una vez comprendida la arquitectura de la red HFC y descrito los componentes tecnológicos que se requieren para la prestación de un servicio de iTV realizados en el capítulo III, en este apartado se plantea un modelo de red HFC en el cual se simularon los perfiles de las aplicaciones de iTV modeladas y programadas como parte de este trabajo de grado. Para la definición del modelo de red se tuvieron en cuenta los servicios y las aplicaciones que se transmiten por la red, los protocolos empleados, la ubicación de los elementos en la estructura de la red y su funcionamiento, así como también por los objetivos que se quieren alcanzar con la simulación. Así, en la figura 4-10 se presenta el modelo de red HFC a simular.



**Figura 4-10.** Modelo de red HFC para la simulación de las aplicaciones de iTV.

Esta configuración permitirá evaluar el tráfico intercambiado entre el cliente y el servidor de aplicaciones de iTV con el fin de determinar la configuración óptima del protocolo DOCSIS para la prestación de este nuevo servicio y observar las implicaciones que su puesta en funcionamiento pueda tener sobre el resto de aplicaciones ya implementadas, lo cual se logra evaluando los parámetros de desempeño como la utilización de los enlaces (*throughput*), el retardo, variación del retardo y pérdida de paquetes en la red HFC en diferentes escenarios planteados a partir de este modelo.

#### 4.4.1 Descripción de los equipos utilizados en el modelo de red

La red de acceso HFC es capaz de soportar servicios integrados de TV, voz y datos gracias a la infraestructura tecnológica que implementan. En esta red, cada usuario se conecta desde su casa u oficina mediante un módem de cable, y a través de la red de acceso HFC la información es transferida al CMTS que está ubicado en la cabecera de la red. El tráfico que circula por la red puede tener como destino la propia rama a la que se encuentra conectado el abonado (*tráfico interno*), otra rama dentro de la red del operador (*tráfico local*) o bien, el tráfico puede ir dirigido al exterior a través de los *routers* de acceso a Internet (*tráfico externo*) [13].

En este modelo de red, se ha considerado que el servidor de las aplicaciones interactivas (EDiTV), el servidor FTP y HTTP estén ubicados en la cabecera de la red junto con el CMTS y para el caso de las aplicaciones de VoIP los abonados estarán conectados en la misma zona de servicio. Los elementos de red que se utilizaron para la simulación del modelo de red HFC en *OPNET Modeler* tienen las siguientes características y funcionalidades:

- **Servidor:** Tiene configuradas las aplicaciones que serán objeto de estudio en la simulación y estará pendiente de las solicitudes o peticiones que cada estación cliente le pueda hacer y así entregar la información solicitada. Los servidores se conectan al CMTS por medio de interfaces *Ethernet* y se han considerado los siguientes:
  - **Servidor EDiTV:** Corresponde al servidor de aplicaciones interactivas y fue configurado de tal forma que pueda servir los archivos y responder a las peticiones realizadas por los diferentes usuarios de las aplicaciones de televisión interactiva. Para efectos de simulación, el servidor EDiTV almacena los archivos XML y las imágenes serán entregadas al cliente por el canal interactivo.
  - **Servidor FTP:** Se encarga de entregar los archivos que sean solicitados por los clientes FTP, implementando el protocolo de transferencia de archivos [91].
  - **Servidor HTTP:** Corresponde a un servidor Web que entrega páginas HTML a los clientes HTTP que las soliciten [91].
- **CMTS (*Cable Modem Termination System*):** El CMTS tiene la función de hacer la gestión de acceso al medio de las diferentes estaciones de trabajo, la coordinación de los intervalos de tiempo (*slot time*) de transmisión para las diferentes estaciones a partir de mensajes de asignación de ancho de banda (MAP). En este dispositivo se configuran los parámetros físicos para las 4 interfaces DOCSIS que

posee como lo son el ancho de banda tanto del canal de bajada como del canal de subida y la modulación empleada [91]. La modificación de estos parámetros permitirán determinar cuál es la configuración óptima del protocolo DOCSIS para dar soporte a las aplicaciones de iTV.

- **Bus DOCSIS:** El bus DOCSIS representa la estructura lógica de la red HFC, la cual conecta los módems de cable del cliente con el CMTS para el intercambio de información [91].
- **Cable Modem (CM):** Corresponde a un modulador-demodulador y puede enviar y recibir tráfico de aplicaciones desde cualquier protocolo del nivel aplicación (voz, HTTP, FTP). En el modelo OPNET el módem de cable soporta únicamente una clase de servicio, por lo cual si múltiples aplicaciones están corriendo en una estación de trabajo todas ellas serán tratadas con la misma prioridad de acceso a la red [91].
- **Cliente:** Corresponde a una estación de trabajo que se conecta por medio de una interfaz Ethernet al CM. En cada uno de los clientes se configuró únicamente una aplicación o servicio (FTP, HTTP, VoIP o aplicaciones de iTV) de tal forma que se proporcione la QoS configurada en el cable módem.

En la simulación de las aplicaciones de iTV, los clientes que simulan al STB corresponden a estaciones de trabajo que se conecta por medio de una interfaz Ethernet al módem de cable. En estas estaciones se configuraron los perfiles que representan el comportamiento de un usuario durante un lapso de tiempo en el que interactúa con las aplicaciones de iTV tanto de solicitud de información adicional como de preguntas de selección múltiple.

## 4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LAS APLICACIONES DE ITV

Partiendo del modelo de tráfico de las aplicaciones de iTV encontrado previamente, en este apartado se presenta el análisis de los resultados de la simulación de los diferentes escenarios en los cuales se ha variado el número de usuarios de las aplicaciones de iTV y la configuración de los perfiles del protocolo DOCSIS, con el fin de determinar los alcances de la red de acceso HFC para proporcionar los recursos de red necesarios para una adecuada prestación de un servicio de iTV.

### 4.5.1 Efectos del incremento del número de usuarios sobre la transmisión de aplicaciones de iTV

Las dos aplicaciones seleccionadas para el estudio, tienen un comportamiento muy diferente entre sí, mientras la aplicación de solicitud de información adicional al programa de televisión educativo (denominada EDiTV0) distribuye el tráfico en todo el intervalo de simulación, la aplicación de preguntas con respuesta de selección múltiple sobre el programa de televisión educativa (denominada EDiTV1) concentra el tráfico en ráfagas en instantes de tiempo determinados. Estas dos tendencias se evidencian a medida que se incrementa el número de usuarios de determinada aplicación.

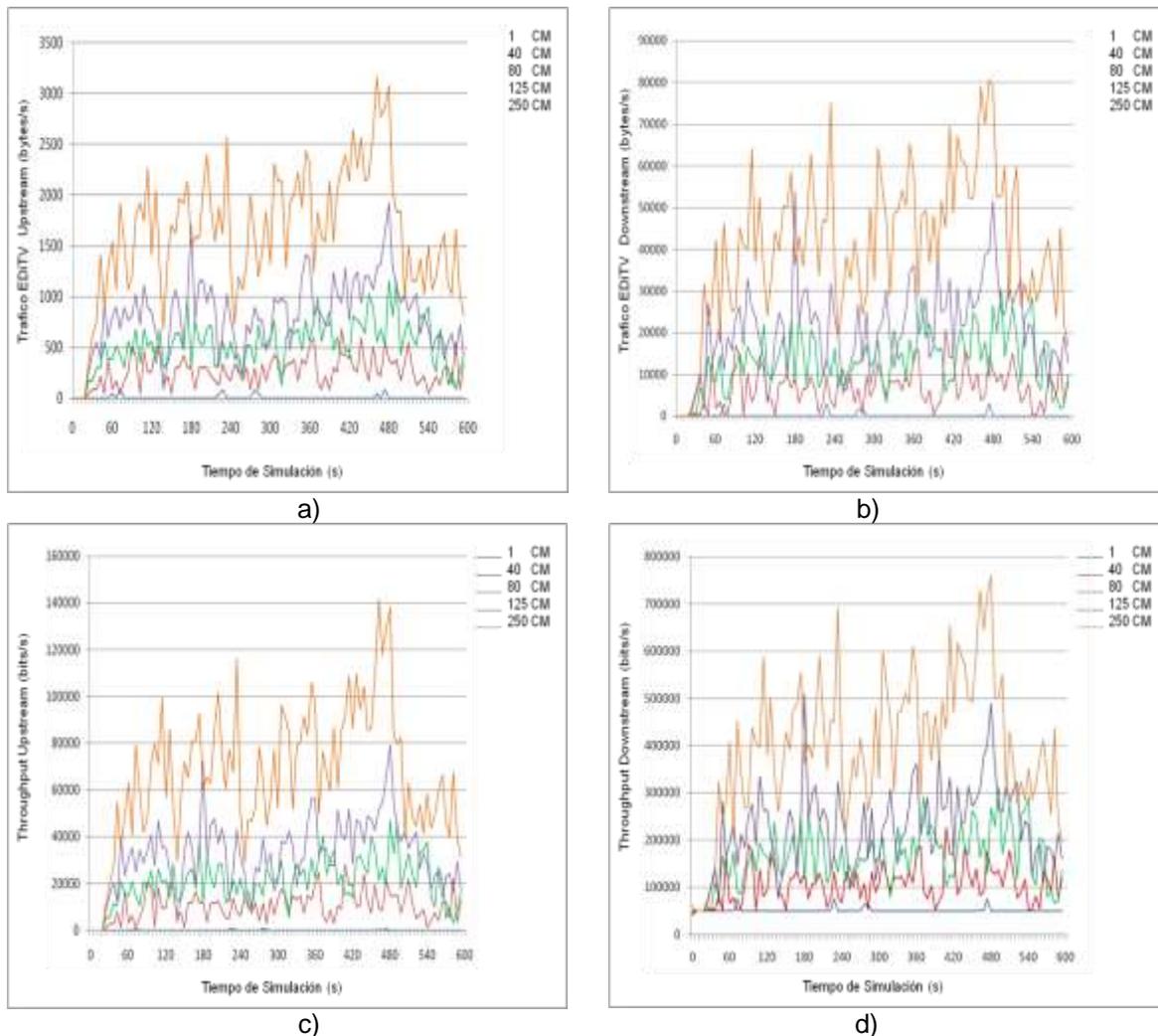
Con la configuración típica del protocolo DOCSIS de la tabla 4-8, con tipo de servicio *Best Effort*, un solo canal ascendente, fragmentación, concatenación y *piggybacking* deshabilitados, se mide inicialmente el efecto del aumento de usuarios tanto para la aplicación EDiTV0 como para la aplicación EDiTV1 para 1, 40, 80, 125 y 250 usuarios.

**Tabla 4-8.** Parámetros DOCSIS para la simulación del tráfico de iTV

Parámetro	Valor
Tasa de datos de <i>Upstream</i>	2.56Mbps / QPSK
Tasa de datos de <i>Downstream</i>	55 Mbps / 256QAM
Tiempo entre MAP	10 ms
Tamaño <i>minislot</i>	16 bytes
<i>Minislot</i> por MAP	200
<i>Slots</i> de contención por MAP	32

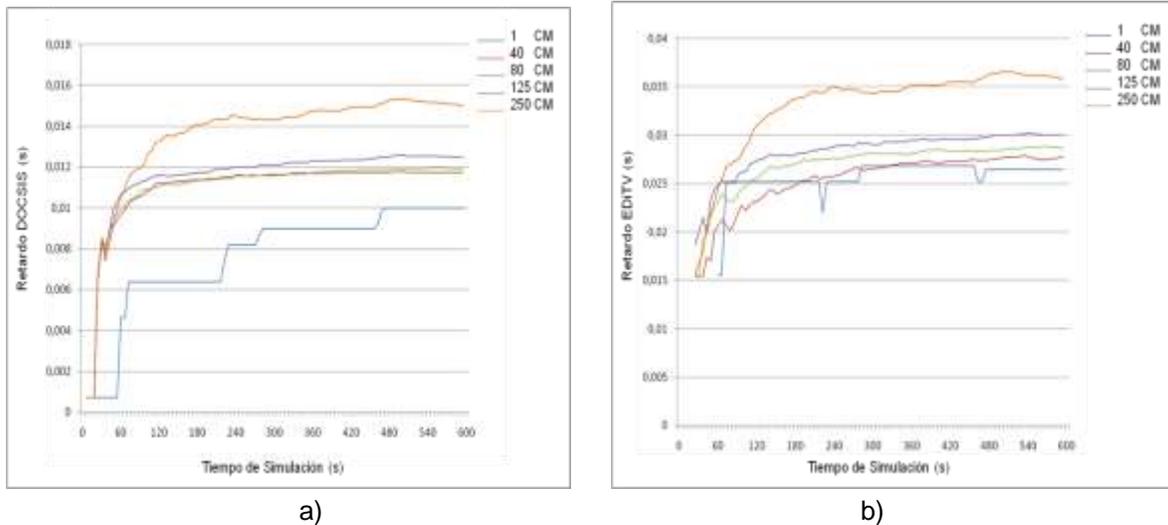
Las figuras 4-5a y 4-5b corresponden a tráfico recibido y enviado por el servidor de aplicaciones mientras que las figuras 4-5c y 4-5d corresponden al *throughput* en la red HFC. El tráfico agregado es el resultado de la transferencia de información iniciada por los diferentes usuarios en los instantes de tiempo donde el productor de televisión ha habilitado la aplicación para extraer la información adicional al programa de televisión. En dichas gráficas puede notarse como a medida que se aumenta el número de usuarios el tráfico de la red aumenta y se presenta disperso en todo el intervalo de tiempo de simulación sin verse aglomeraciones de ráfagas.

En las figuras 4-11a y 4-11b puede observarse que el tráfico generado por un solo usuario no supera los 80 bytes/s tanto en sentido descendente como en el sentido ascendente, mientras que con 250 usuarios se tienen valores pico de 3000 bytes/s en el canal ascendente y 80000 bytes/s en el canal descendente. Este tráfico se incrementa en la red HFC debido al funcionamiento propio del protocolo DOCSIS, al mecanismo de transporte MPEG y a las técnicas de corrección y detección de errores FEC constituyendo el *throughput* de la red. De esta forma, para 250 usuarios el *throughput* toma valores pico de 140 Kbps (figura 4-11c) con un promedio de 70 kbps en el canal ascendente y valores pico de 700 Kbps con un promedio de 400 kbps (figura 4-11d) en el canal descendente.



**Figura 4-11.** Tráfico agregado en el canal **a)** ascendente y **b)** descendente, *throughput* en el canal **c)** ascendente y **d)** descendente generado por diferente número de usuarios de la aplicación EDiTV.

Debido al bajo consumo de ancho de banda, los retardos generados no son muy elevados, así, para 250 usuarios se obtuvo el máximo retardo DOCSIS que en promedio fue de 14.8 ms, este retardo se mide a partir del momento en que se encola una trama para su transmisión en la capa MAC DOCSIS en el lado del transmisor (ya sea CM o CMTS) hasta el momento en que se entrega al receptor. A nivel de la aplicación se tiene el retardo EDiTV, el cual representa el tiempo que tardan en llegar a su destino los paquetes de petición o de respuesta de la aplicación de iTV, que como puede observarse en la figura 4-12b en promedio llegó a 35 ms manteniéndose dentro del límite de 200 ms establecido en [67].



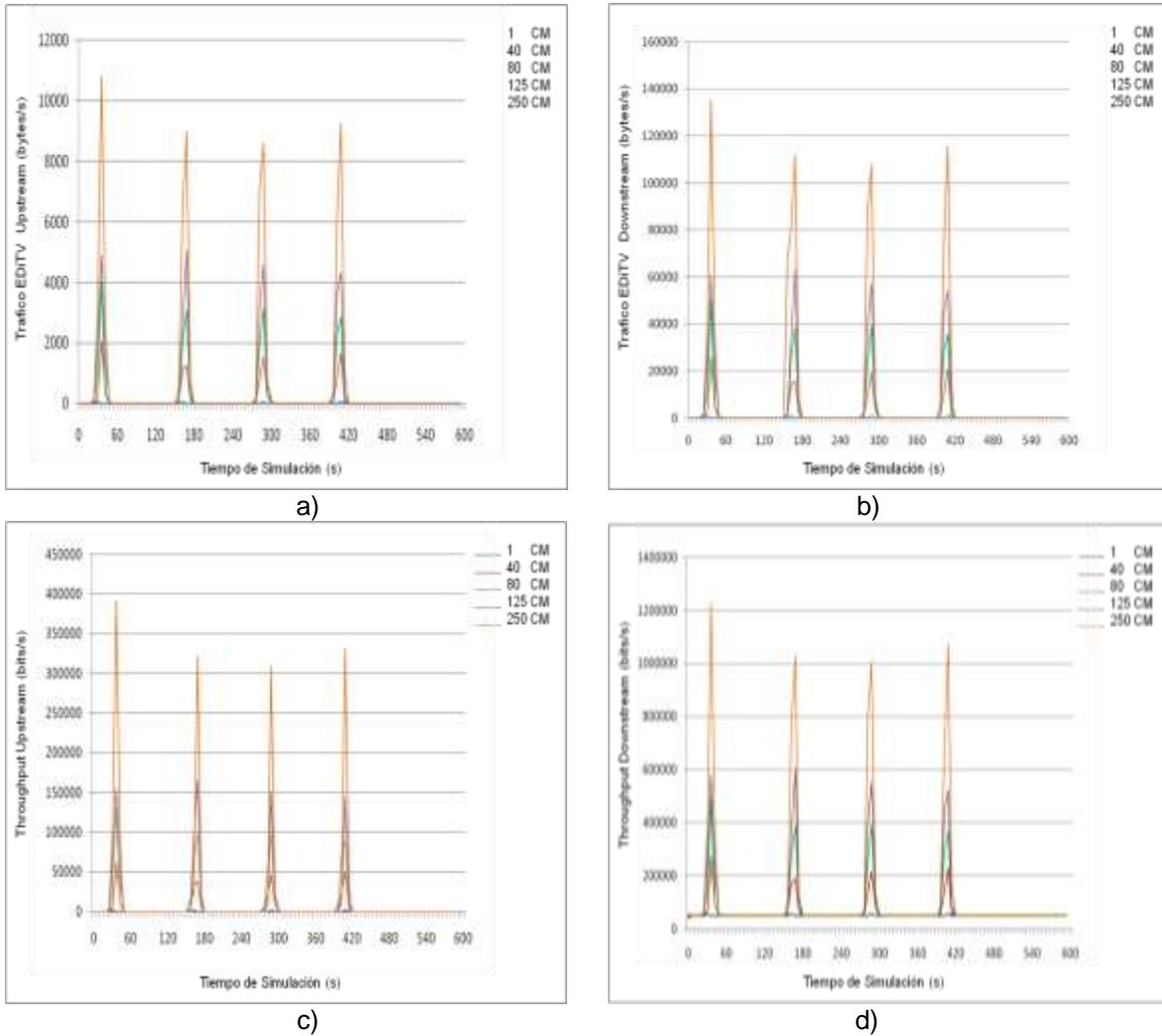
**Figura 4-12.** Retardo a) DOCSIS y b) EDiTV para diferente número de usuarios de la aplicación EDiTV0.

La aplicación EDiTV1, a diferencia de la anterior, requiere la sincronización con el contenido del programa que el usuario recibe por el canal de difusión dado que las respuestas y el intercambio de información a través del canal interactivo están ligados a los eventos que sucedan en el programa ocasionando que el tráfico agregado tenga determinados puntos de afluencia y por ende se presente en ráfagas en la red HFC. Cuando se realiza una pregunta en el contenido audiovisual y comienza a correr un tiempo para delimitar la vigencia de la pregunta, se obtiene que todos los usuarios deberán hacer efectiva su respuesta dentro de ese intervalo de tiempo, provocando que el tráfico se concentre en un intervalo de tiempo, siguiendo la distribución normal según el modelo de tráfico arrojado por el estudio de las capturas de tráfico real. Esta aglomeración del tráfico representada en la capa MAC por un incremento en el número de solicitudes en contienda lo cual incide sobre el número de colisiones y por ende afecta en mayor medida el rendimiento de la red debido a la cantidad de usuarios que tratan de acceder simultáneamente aunque los paquetes no tengan un tamaño considerable.

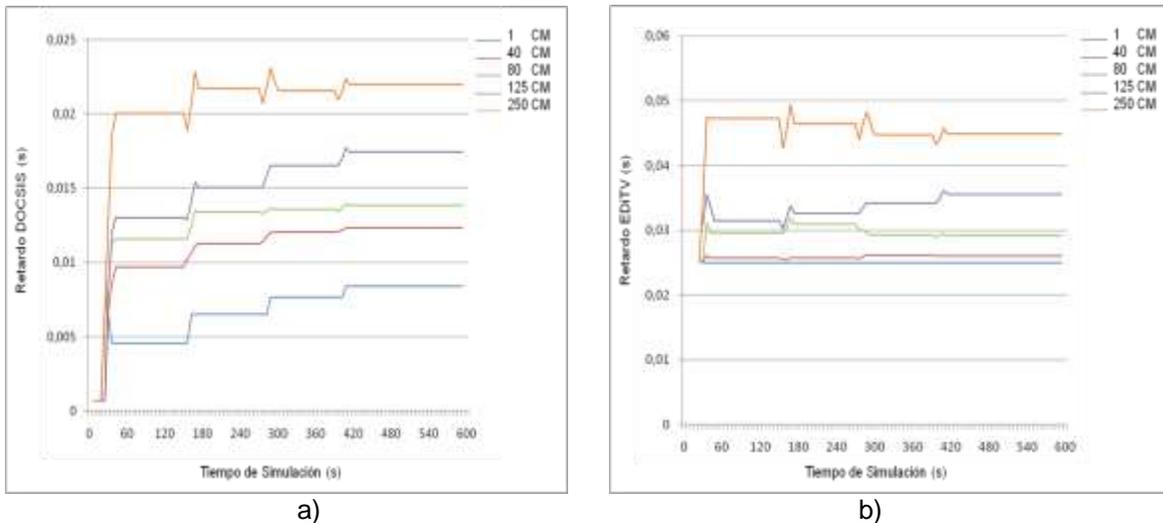
En la figura 4-7 puede notarse que en los puntos de afluencia el tráfico generado por 250 usuarios que responden a una pregunta de selección múltiple (figura 4-13a) llega a 120 Kbytes/s mientras que el tráfico del servidor en contestación a los 250 usuarios (figura 4-13b) es más pronunciado llegando a 1080 Kbytes/s. Sin embargo, y debido al funcionamiento del protocolo DOCSIS, al mecanismo de transporte MPEG y a las técnicas de corrección y detección de errores FEC el *throughput* en el canal ascendente de la red HFC (figura 4-13c) alcanza 400 Kbps y en el canal descendente (figura 4-13d) llega hasta 1200 Kbps.

Para este escenario se tiene que el retardo DOCSIS y EDiTV están dentro de los rangos normales [67]. En la figura 4-14 se muestra el promedio del retardo DOCSIS y del retardo

EDiTV variando el número de usuarios, donde el máximo retardo se obtuvo para 250 usuarios llegando a 22ms de retardo DOCSIS (figura 4-14a) y 48 ms de retardo EDiTV (figura 4-14b).



**Figura 4-13.** Tráfico agregado en el canal **a)** ascendente y **b)** descendente, *throughput* en el canal **c)** ascendente y **d)** descendente generado por diferente número de usuarios de la aplicación EDiTV1.



**Figura 4-14.** Retardo a) DOCSIS y b) EDiTV para diferente número de usuarios de la aplicación EDiTV1.

#### 4.5.2 Efectos de la variación del tiempo entre MAP sobre la transmisión de aplicaciones de iTV

El tiempo entre mensajes MAP tiene mucha relevancia en la configuración del protocolo DOCSIS ya que los mensajes MAP son enviados por el CMTS través del canal de bajada para que los CM puedan solicitar reservas de transmisión de información, por tal razón la generación de mensajes MAP afecta considerablemente el rendimiento del sistema [13].

Cuando se configura un tiempo reducido entre mensajes MAP se producen más oportunidades de transmisión para los CM, disminuyendo el retardo MAC al igual que el retardo en la transmisión de paquetes de una aplicación [13], sin embargo los tiempos muy pequeños entre mensajes MAP no son óptimos, ya que causan sobrecarga en la capacidad de procesamiento del sistema y además provocan que un CM desperdicie muchas oportunidades de reserva mientras se encuentra en espera de la transmisión, en cambio un tiempo excesivamente grande entre mensajes MAP reduce las oportunidades de transmisión.

Para determinar los efectos que tiene la variación del tiempo entre MAP sobre las aplicaciones de iTV, se realizaron simulaciones de diferentes escenarios con la configuración del protocolo DOCSIS de la tabla 4-8. La comparación se hizo para 5ms, 10ms, 20ms y 50ms de tiempo entre MAP.

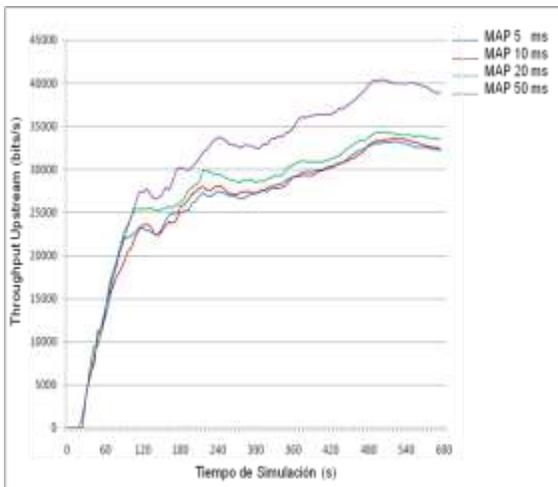
En este sentido, en la figura 4-15 se muestra el efecto de la variación del tiempo entre MAP sobre el *throughput* de la red cuando se tienen 125 usuarios de la aplicación EDiTV0. Como se puede observar, a medida que el tiempo entre MAP disminuye el *throughput* del canal descendente (figura 4-15a) aumenta debido a que el CMTS envía

con mayor frecuencia este tipo de mensajes por el canal descendente reduciendo la tasa de bits efectiva para la transmisión de información.

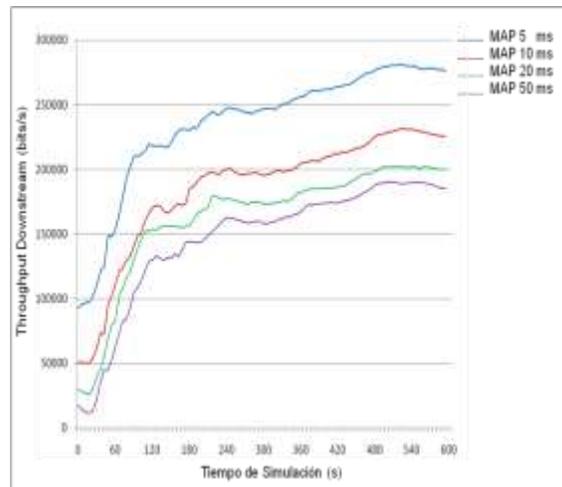
Por ejemplo, para la configuración de la simulación en la que se establece que un mensaje MAP se envía cada 10 ms, se tendrían 100 MAP/sec. Como el mensaje MAP tiene una longitud de 64 bytes, el ancho de banda consumido por este tipo de mensajes sería de 51.2 Kbps. Por lo tanto, en un CMTS con un canal descendente y un canal ascendente, el ancho de banda consumido para transmitir todos los mensajes MAP es entonces de 51.2 Kbps, pero se incrementa por cada canal ascendente adicional. Estos cálculos están realizados con mensajes MAP de 64 bytes, pudiendo ser mayores dependiendo del esquema de modulación y el ancho de banda utilizado en sentido ascendente.

Estas consideraciones indican que la transmisión de mensajes MAP en sentido descendente supone una carga extra, que es superior a la sobrecarga que introducen otros mensajes de mantenimiento transmitidos por este canal, pero que afectan ligeramente al rendimiento de la red.

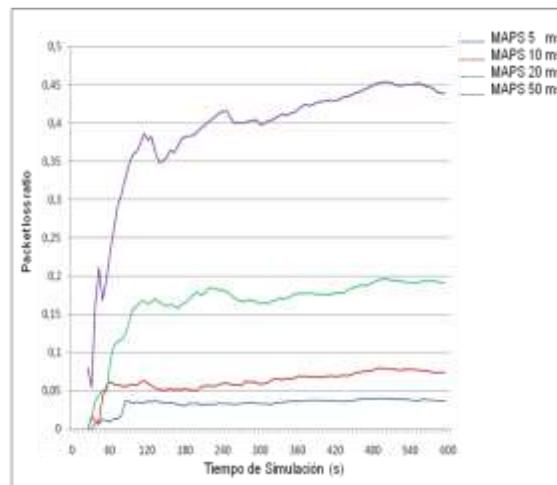
Para el canal ascendente la situación es diferente, en la figura 4-15b, puede observarse que para un tiempo entre MAP de 50 ms el tráfico ascendente es más grande, debido a que las estaciones tienen escasas oportunidades de transmisión, por lo cual los *time-out* de la aplicación se vencen y se produce pérdida de paquetes, por lo cual se hace necesaria la retransmisión y precisamente lo que adiciona tráfico en la red. Esto se puede corroborar con la figura 4-15c donde la razón de paquetes perdidos es en promedio 44 % para cuando la red se configura con un tiempo entre MAP de 50 ms.



a)



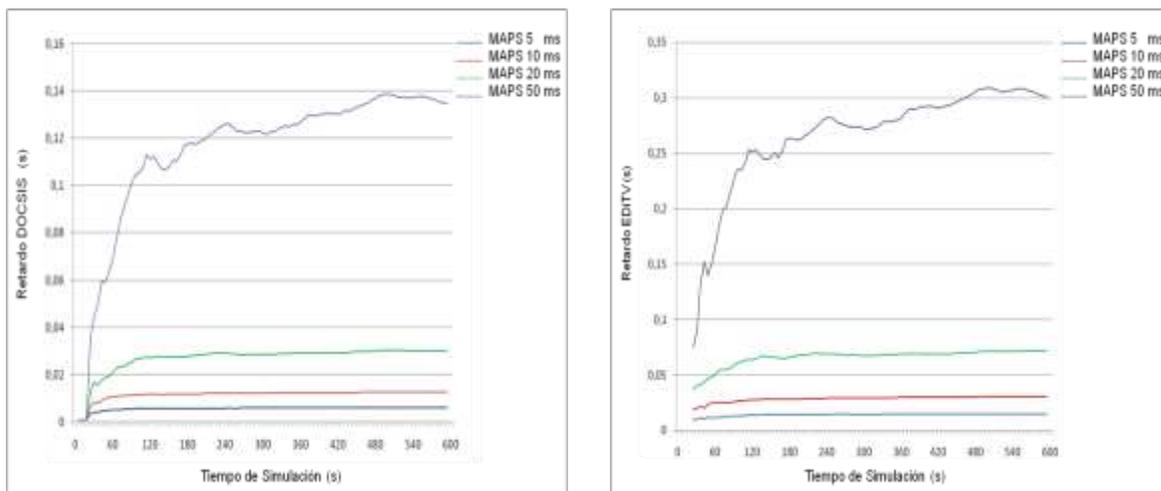
b)



c)

**Figura 4-15.** Throughput en el canal a) ascendente y b) descendente, y c) razón de pérdida de paquetes, para diferente tiempo entre mensajes MAP para la aplicación EDiTV0.

Por su parte, el efecto de la variación del tiempo entre MAP sobre el retardo se muestran en las graficas de la figura 4-16. Nótese como a medida que el tiempo entre MAP aumenta el retardo DOCSIS y EDiTV se incrementan desde valores aceptables hasta valores que perjudican el desempeño de las aplicaciones por cuanto superan el límite de 200ms. El caso más crítico se obtuvo para un tiempo entre MAP de 50ms donde el retardo DOCSIS en promedio alcanzó 140ms como se muestra en la figura 4-16a y el retardo EDiTV en promedio 300 ms según la figura 4-16b.



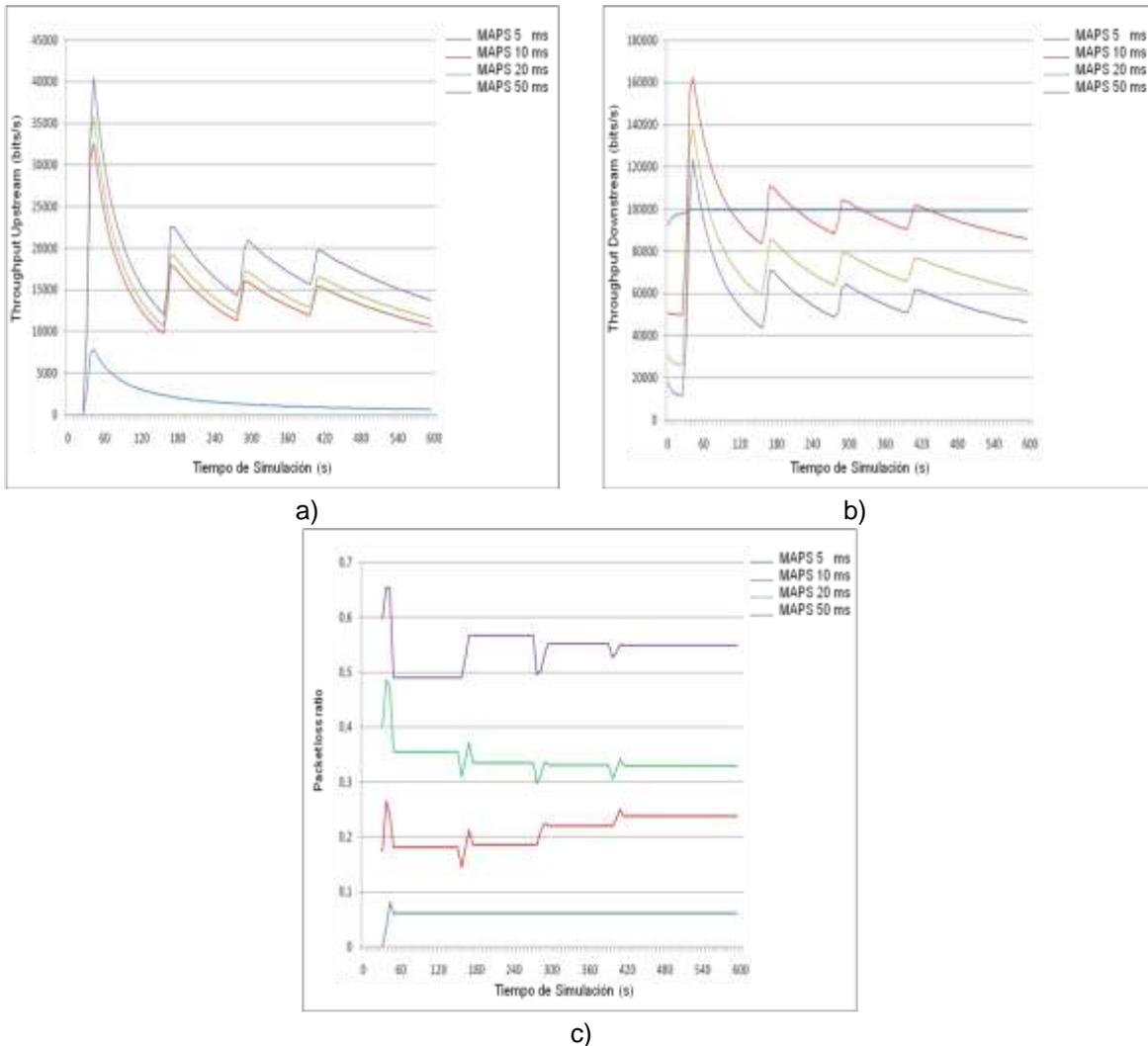
a)

b)

**Figura 4-16.** Retardo a) DOCSIS y b) EDiTV para diferente tiempo entre mensajes MAP para la aplicación EDiTV0.

Para la aplicación EDiTV1 los efectos del tiempo entre MAP son similares a los de la aplicación EDiTV0, por lo tanto si el tiempo entre mensajes MAP es reducido, el tráfico en

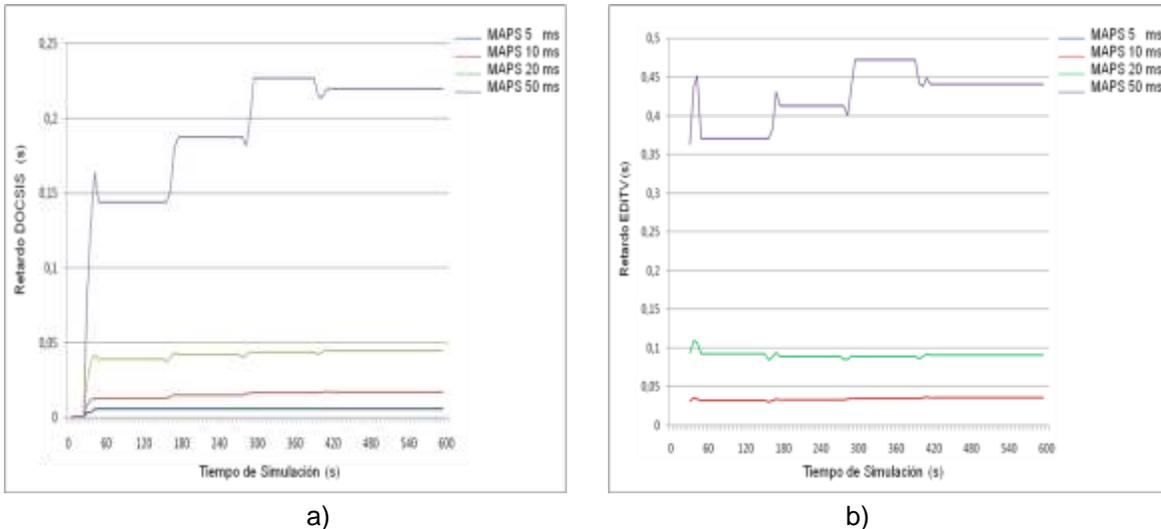
el canal descendente se incrementa debido al aumento en la frecuencia de transmisión de mensajes MAP, en cuanto al canal ascendente se ve un incremento en el tráfico al disminuir la cantidad de mensajes MAP y se debe al tráfico de las retransmisiones. Como caso particular, en la figura 4-17a, con un tiempo entre MAP de 5 ms, la aplicación tiene problemas de funcionamiento por que excede el numero de retransmisiones posibles, y por ende no se genera tráfico.



**Figura 4-17.** *Throughput* en el canal **a)** ascendente y **b)** descendente, y **c)** razón de pérdida de paquetes, para diferente tiempo entre mensajes MAP para la aplicación EDiTV1.

En cuanto a los retardos, puede observarse en la 4-18 que al aumentar el tiempo entre MAP el retardo MAC se incrementa, así para 50 ms de tiempo entre mensajes MAP se obtiene 220 ms en el retardo DOCSIS tal como se muestra en la figura 4-18a y 450 ms en el retardo EDiTV como se muestra en la figura 4-18b. El caso opuesto, tiempo entre

mensajes MAP reducido a 5 ms no presenta grafica de retardo EDiTV dado que no se logra establecer conexión.



**Figura 4-18.** Retardo a) DOCSIS y b) EDiTV para diferente tiempo entre mensajes MAP para la aplicación EDiTV1.

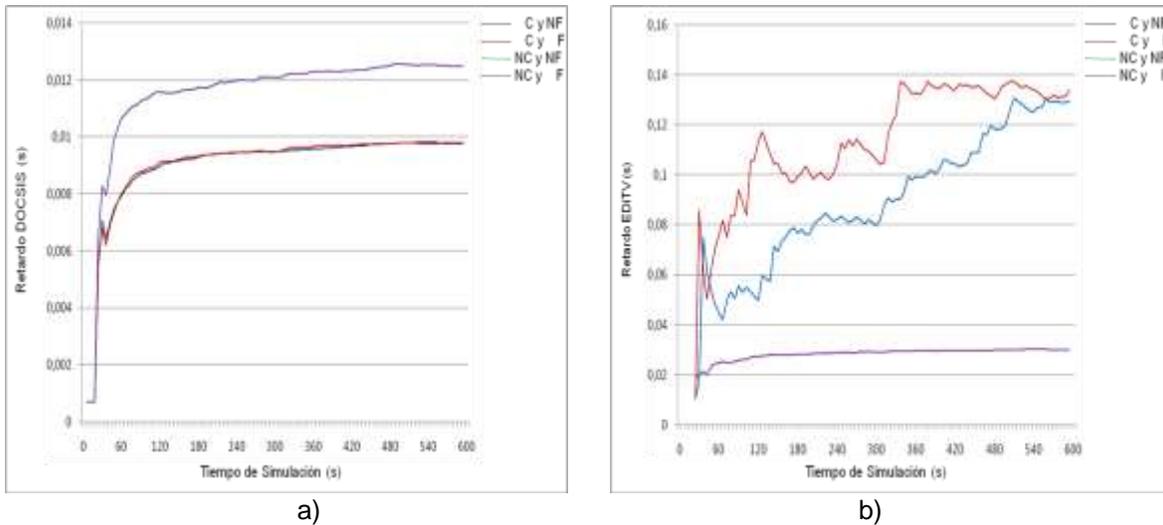
### 4.5.3 Efectos de la combinación entre fragmentación y concatenación sobre la transmisión de aplicaciones de iTV

Para analizar los efectos que los parámetros de calidad de servicio como la fragmentación y concatenación puedan tener sobre la transmisión de información de las aplicaciones de iTV objeto de estudio, se realizaron la simulación de diferentes escenarios habilitando y deshabilitando estos dos mecanismos con la configuración del protocolo DOCSIS de la tabla 4-8 para 125 usuarios. En las gráficas que se presentan a continuación se tienen las siguientes convenciones: C: Concatenación Habilitada, NC: Concatenación Deshabilitada, F: Fragmentación Habilitada y NF: Fragmentación Deshabilitada.

#### 4.5.3.1 Efectos de la combinación entre fragmentación y concatenación sobre la aplicación EDiTV0

Para la aplicación EDiTV0, se establecen las posibles combinaciones y se observa que el mecanismo de concatenación es quien domina el comportamiento de las graficas, en tanto que habilitar o deshabilitar el mecanismo de fragmentación no genera diferencias apreciables en el retardo. La figura 4-19a muestra que con el mecanismo de concatenación habilitado se disminuye el retardo DOCSIS sin importar el estado del mecanismo de fragmentación. En los escenarios que tienen deshabilitada la concatenación el retardo DOCSIS se incrementa hasta 12.5 ms, y como se puede ver, las gráficas resultantes están traslapadas. Caso contrario ocurre con el retardo EDiTV (figura

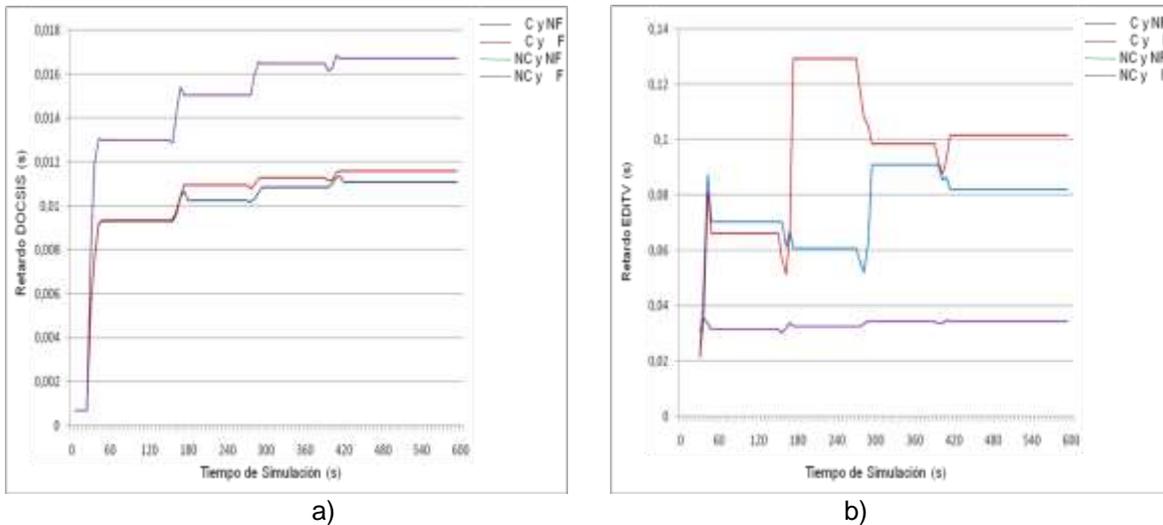
4-19b), donde se observa que la concatenación afecta a la aplicación EDiTV incrementando el retardo de los paquetes de petición y respuesta.



**Figura 4-19.** Retardo a) DOCSIS y b) EDiTV para diferentes combinaciones entre concatenación y fragmentación para la aplicación EDiTV0

#### 4.5.3.2 Efectos de la combinación entre fragmentación y concatenación sobre la aplicación EDiTV1

Con la aplicación EDiTV1 los resultados son similares a los de la aplicación EDiTV0, en la figura 4-20a se muestra que con el mecanismo de concatenación habilitado el retardo DOCSIS disminuye indicando una ligera ventaja al no activar fragmentación, mientras que para las dos combinaciones restantes este se incrementa hasta 16.5 ms correspondiente a las graficas traslapadas para las cuales se ha desactivado la concatenación. Por su parte, se obtienen los peores resultados en el retardo EDiTV (figura 4-20b) cuando se habilita la concatenación alcanzándose valores cercanos a los 100 ms; entre tanto la fragmentación no tiene efectos y mantiene el retardo EDiTV con valores alrededor de 35 ms.



**Figura 4-20.** Retardo a) DOCSIS y b) EDiTV para diferentes combinaciones entre concatenación y fragmentación para la aplicación EDiTV1

Para todos los escenarios simulados con diferentes combinaciones entre fragmentación y concatenación, el *throughput* y el tráfico de las aplicaciones EDiTV tanto en sentido ascendente como en sentido descendente no tuvieron variaciones significativas lo que garantiza que no se produjeron retransmisiones.

El mecanismo de concatenación al hacer uso de una sola oportunidad de transmisión para enviar una determinada cantidad de tramas, reduce el número de solicitudes de concesión y con ello el número de colisiones ocasionadas en los slots de contienda viéndose esto reflejado en la disminución en el retardo promedio DOCSIS.

#### 4.5.4 Efectos de la variación del tamaño del *minislot* sobre la transmisión de aplicaciones de iTV

Teniendo en cuenta los resultados mostrados en las figuras 4-19 y 4-20 en donde con los mecanismos de fragmentación y concatenación habilitados por un lado se mejora el rendimiento de la red con la disminución del retardo DOCSIS, pero por otro lado se perjudica a las aplicaciones EDiTV con el incremento del retardo de los paquetes de petición y respuesta, se plantearon diferentes escenarios en los que se varió el tamaño de los *minislots* para observar el efecto de la variación de este tamaño sobre la transferencia de información de las aplicaciones de iTV teniendo en cuenta la configuración del protocolo DOCSIS mostrada en la tabla 4-8 para 125 usuarios con los mecanismos de fragmentación y la concatenación habilitados.

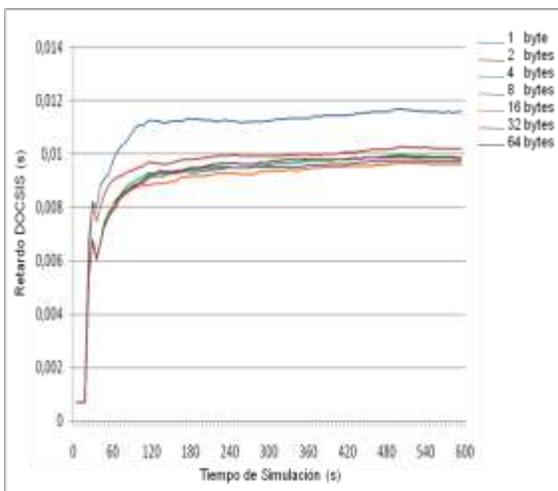
Este escenario se hizo necesario dado que la fragmentación y la concatenación están pensadas para mejorar el rendimiento del canal ascendente [75] y por ende debe

encontrarse una coherencia entre el retardo DOCSIS y EDiTV cuando se habilitan estos mecanismos.

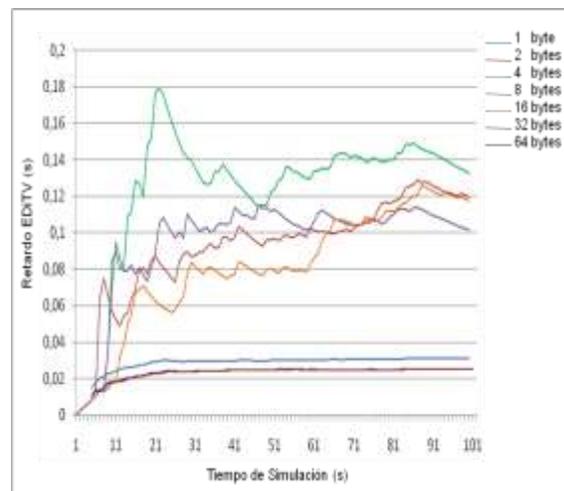
#### 4.5.4.1 Efectos de la variación del tamaño del *minislot* sobre la transmisión de paquetes EDiTV0

Para la aplicación EDiTV0, en la figura 4-21a se encuentra que para un tamaño de *minislot* de 1 byte el retardo DOCSIS se incrementa hasta los 11.5 ms, mientras que para el resto de tamaños el retardo no tiene variaciones significativas y se mantiene cercano a los 10ms. De la misma forma, el retardo EDiTV se reduce hasta 25 ms si se escoge un tamaño de *minislot* de 32 o 64 bytes en tanto que para los otros tamaños el retardo de la aplicación se incrementa considerablemente como se puede observar en la figura 4-21b oscilando entre 100ms y 140ms. Por su parte, la menor razón de pérdida de paquetes (5%) se obtiene con un tamaño de *minislots* de 32 bytes, mientras que para los demás tamaños la variación no es muy representativa (ver figura 4-15c) alcanzándose una razón de pérdida de paquetes máxima del 10%.

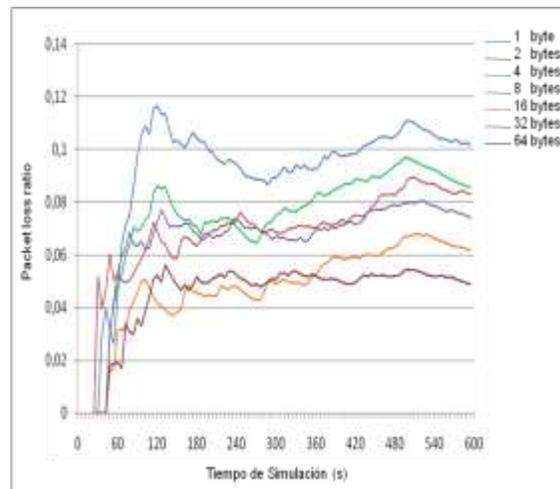
De lo anterior puede concluirse que ajustar el tamaño de los *minislots* a 32 bytes es recomendable para obtener el menor retardo MAC, el menor retardo en los paquetes de la aplicación y la menor razón de pérdida de paquetes.



a)



b)

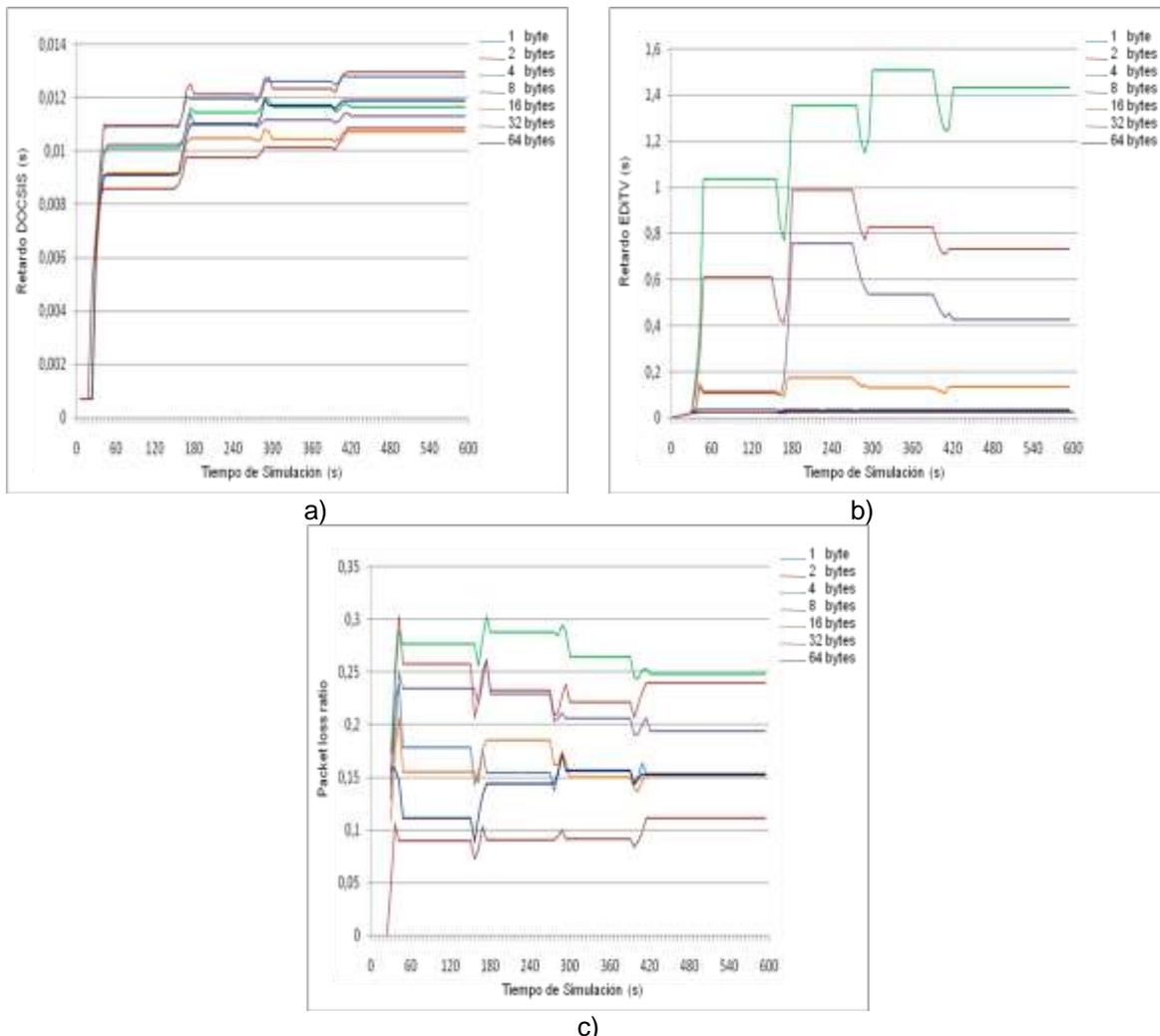


c)  
**Figura 4-21.** Retardo a) DOCSIS, b) EDiTV y c) razón de pérdida de paquetes para diferente tamaño de *minislot* para la aplicación EDiTV0.

#### 4.5.4.2 Efectos de la variación del tamaño del *minislot* sobre la transmisión de paquetes EDiTV1

En cuanto a la aplicación EDiTV1, nótese en la figura 4-22a que el retardo DOCSIS toma valores cercanos a los 11 ms cuando se elige un tamaño de *minislot* de 16 y 32 bytes siendo estos los casos más convenientes para el retardo DOCSIS. Algo similar ocurre con el retardo EDiTV donde los valores más bajos se obtienen si se elige un tamaño de *minislot* de 1, 32 o 64 bytes para los cuales el retardo permanece por debajo de los 30 ms obtenidos en la figura 4-20b en donde la concatenación y la fragmentación se mantenían deshabilitados. Entre tanto, con tamaño de 32 bytes se consigue la menor razón de pérdida de paquetes, siendo del 10 %.

Al igual que en la aplicación EDiTV0, elegir un tamaño de *minislots* de 32 bytes resulta favorable para la transmisión de paquetes de EDiTV1 ya que se reduce el retardo MAC, el retardo de los paquetes de aplicación y la razón de pérdida de paquetes.



**Figura 4-22.** Retardo a) DOCSIS, b) EDiTV y c) razón de pérdida de paquetes para diferente tamaño de *minislot* para la aplicación EDiTV1

Después de realizar el análisis a los resultados de las simulaciones presentados en este capítulo, la mejor configuración del protocolo DOCSIS para dar soporte a las aplicaciones de iTV objeto de estudio se logró con los mecanismos de fragmentación y concatenación habilitados, para un tiempo entre MAP entre 10 y 20ms y un tamaño de *minislot* de 32 bytes. Sin embargo, esta configuración debe ser evaluada cuando las aplicaciones de iTV se implementan en conjunto con otras aplicaciones y servicios dado que la mayoría de los parámetros son configuraciones globales del sistema.

## CAPÍTULO V

### 5 EVALUACIÓN DE LA RED DE ACCESO HFC PARA LA DISTRIBUCIÓN DE CONTENIDOS DE ITV

El capítulo V se muestran y analizan los resultados obtenidos de la simulación del tráfico generado por las aplicaciones de iTV en el modelo de red HFC, evaluando los parámetros de desempeño de la red cuando se comparte los recursos de red con otras aplicaciones tales como HTTP, FTP y VoIP las cuales según sus características tienen asignado un tipo de tratamiento específico por parte de la red. Teniendo en cuenta lo anterior, se plantearon escenarios en los que se apreció el comportamiento de la pérdida de paquetes, retardo y *jitter* de las aplicaciones, ensayando para EDiTV la configuración de diferentes flujos de servicio que ofrece el protocolo DOCSIS para establecer QoS.

#### 5.1 CONSIDERACIONES GENERALES PARA LA SIMULACIÓN

En los escenarios planteados, se asigna a los servicios de HTTP, FTP y VoIP configuraciones del protocolo DOCSIS que garantizan un adecuado funcionamiento de las mismas, lo cual fue determinado a partir de las consideraciones de [13] y de las simulaciones realizadas en este apartado. En cuanto a las aplicaciones de iTV la mejor configuración del protocolo se determinó a partir del análisis de las simulaciones previas sin tener en cuenta la configuración de flujos de servicio. Los parámetros de configuración para cada servicio se presentan en la tabla 5-1. El flujo de servicio para los clientes EDiTV, HTTP y FTP fue *Best Effort* (BE) con una prioridad 7 (la más baja) mientras que para los usuarios VoIP el flujo de servicio fue UGS con *Grant Size* = 256 bytes y *Nominal Grant Interval* = 10ms.

**Tabla 5-1.** Configuración de los parámetros DOCSIS para la simulación del tráfico de iTV, HTTP, FTP y VoIP

Parámetro	Valor
Tiempo entre MAP	10 ms
Tamaño <i>minislot</i>	32 bytes
<i>Minislot</i> por MAP	200
<i>Slots</i> de contención por MAP	32
<i>Piggybacking</i> ,	Habilitado
Fragmentación	Habilitado
Concatenación	Habilitado

Nótese que los mecanismos de concatenación y fragmentación están habilitados. De esta manera, la concatenación facilita la transmisión de los pequeños paquetes ACK de TCP en una única oportunidad de transmisión y la fragmentación permite un manejo adecuado de los paquetes de tamaño grande generados por FTP, de esta forma la activación de las dos posibilidades provoca que los retardos en el acceso a la información alcancen los mínimos valores. Los perfiles de usuario configurados en la herramienta de simulación para los servicios HTTP, FTP y VoIP se observa en la tabla 5-2.

**Tabla 5-2.** Perfiles de usuario para los servicios HTTP, FTP y VoIP

Servicio	Parámetro	Valor
HTTP	Tiempo entre arribo de páginas	Exponencial (10)
	Tamaño del objeto 1	1000 bytes
	Tamaño del objeto 2	<i>Large Image</i>
	Tipo de servicio (ToS)	<i>Best Effort(0)</i>
FTP	<i>Command Mix (Get/Total)</i>	75%
	Tiempo entre solicitudes	20 s
	Tamaño del archive	50000 bytes
	Tipo de servicio (ToS)	<i>Best Effort(0)</i>
VoIP	Esquema de codificación	G 711 ( <i>silence</i> )
	Tipo de servicio (ToS)	<i>Interactive voice (6)</i>

La VoIP fue configurada de tal forma que se establecen dos conexiones activas de 3 minutos, con 1 minuto de separación entre ellas, esta configuración tiene como objetivo observar el comportamiento de las aplicaciones BE en los intervalos de conexión o desconexión de la aplicación VoIP con UGS y no obedece al perfil de un usuario en particular. Adicionalmente, en el modelo de red se consideró un solo canal *upstream* de 2.56Mbps con modulación QPSK asociado a un canal *downstream* de 55 Mbps con 256QAM. El número de usuarios EDiTV fue 20, de HTTP 20, de FTP 10 y de VoIP 4. La cantidad de estaciones ejecutando cada aplicación se estableció de acuerdo con la cantidad de tráfico que genera cada aplicación, la proporción de entre estas aplicaciones no está ligada a estadísticas de redes reales.

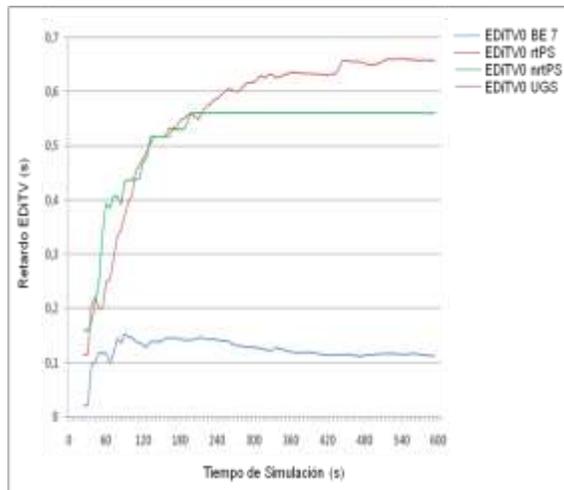
## 5.2 ASIGNACIÓN DE FLUJOS DE SERVICIO A LAS APLICACIONES DE iTV

Inicialmente se plantea un escenario en donde tanto la aplicación EDiTV0 y EDiTV1 se configuran con cada uno de los diferentes flujos de servicios (BE, nrtPS, rtPS y UGS) para comparar el funcionamiento de las aplicaciones EDiTV con el resto de aplicaciones y evaluar el rendimiento de la red HFC. La configuración del protocolo DOCSIS y de los

perfiles de usuario para los diferentes servicios fueron las presentadas en las tablas del literal 5.1.

### 5.2.1 Efectos de la asignación de flujos de servicio a la aplicación EDiTV0

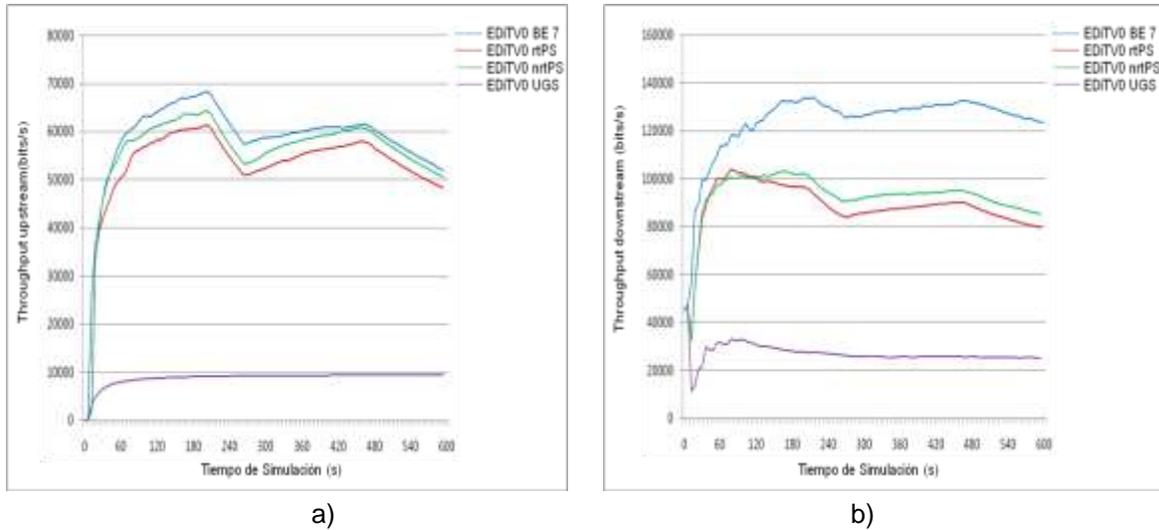
En la figura 5-1 se muestra diferentes resultados en el retardo EDiTV cuando se varía la configuración de flujo de servicio en la aplicación de solicitud de información (EDiTV0). La gráfica de la configuración BE 7 corresponde a la configuración por defecto del protocolo en la herramienta de simulación y constituye una referencia que se busca mejorar. De esta forma, el retardo EDiTV, se incrementa hasta 560ms para rtPS y 660ms para nrtPS, y para UGS no existe la gráfica de retardo porque en ningún momento se estableció la conexión, lo cual evidencia la incompatibilidad de la aplicación EDiTV0 con los flujos de servicio rtPS, nrtPS y UGS. Esto se debe a que estos flujos de servicio fueron pensados para aplicaciones que necesitan de un acceso periódico para la transmisión información, algo que no ocurre con el tráfico generado por la aplicación de EDiTV0. Por lo tanto, la mejor opción para la aplicación EDiTV0 continúa siendo la configuración de un flujo de servicio BE donde el retardo EDiTV llega 11 ms.



**Figura 5-1.** Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV sobre el retardo EDiTV

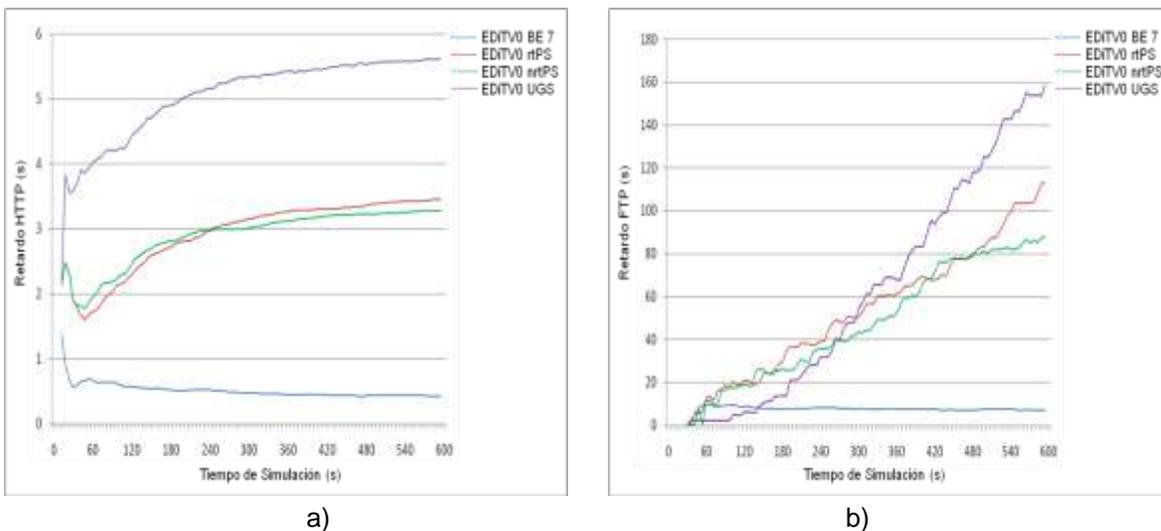
Asimismo, los servicios BE como HTTP y FTP se ven afectados con la configuración de flujo de servicio rtPS, nrtPS o UGS en la aplicación EDiTV0, debido a que los *slots* de contienda se ven reducidos cuando se asignan concesiones por sondeo periódico o concesiones periódicas ocasionando una reducción de las oportunidades de transmisión para HTTP y FTP, por lo cual son muchas las tramas que se destruyen en el acceso al medio, agotando las retransmisiones permitidas. Por ello, los retardos se van acumulando y en consecuencia el número de CM solicitando permisos de transmisión disminuye y la carga de tráfico TCP decae, no siendo el sistema capaz de hacer frente al elevado número de peticiones de transferencia. Esta situación ocasiona que el *throughput* tanto en

sentido ascendente como descendente disminuya cuando la aplicación EDiTV0 tiene configurado un flujo de servicio nrtPS, rtPS y UGS, mientras que para *Best Effort* se obtiene la máxima transferencia de información para todos los servicios (ver figura 5-2).



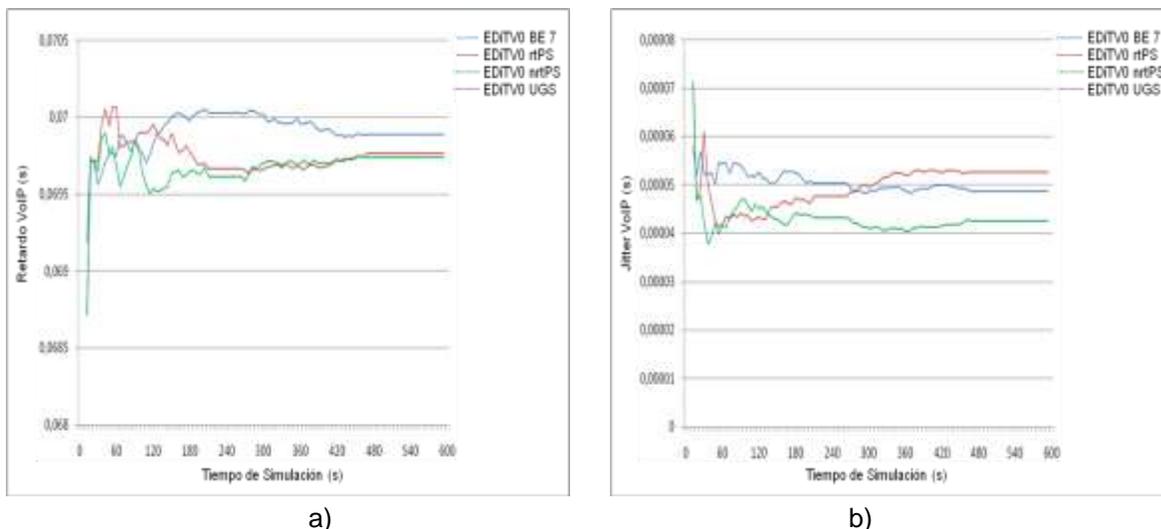
**Figura 5-2.** Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV0 sobre el *throughput* en el canal **a)** ascendente y **b)** descendente

En la figura 5-3a y 5-3b se puede ver que el valor mínimo del retardo HTTP es de 400ms y del retardo FTP es de 7s lo cual se obtiene cuando la aplicación EDiTV0 está configurada como un servicio BE. Para las configuraciones nrtPS, rtPS y UGS en la aplicación EDiTV0 el retardo HTTP oscila entre 3.3s, y 5.6s, mientras que para el retardo FTP existe una acumulación en los paquetes y por ende el retardo se incrementa excesivamente.



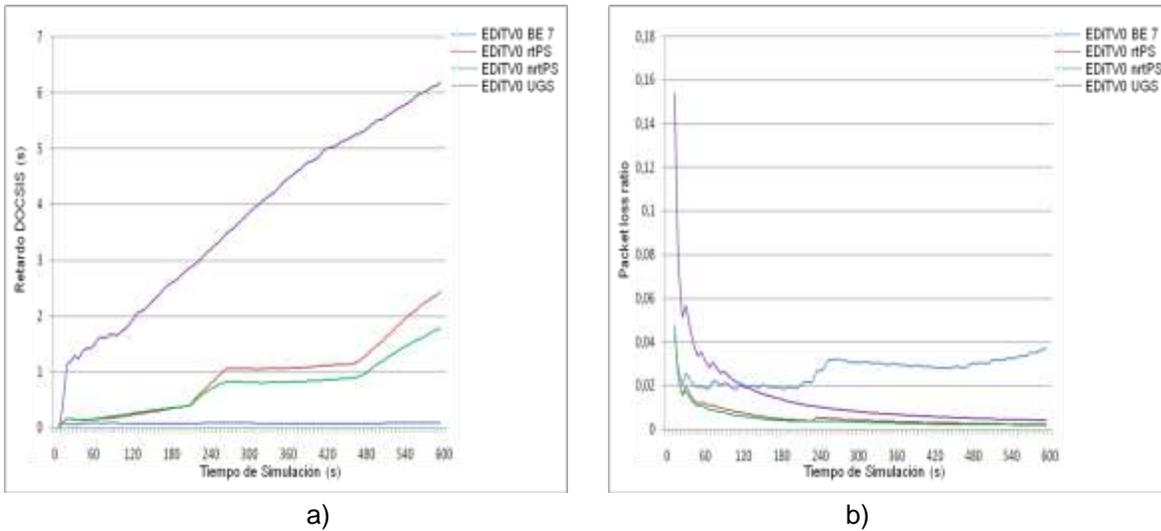
**Figura 5-3.** Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV0 sobre **a)** el retardo HTTP y **b)** retardo FTP

En cuanto a los efectos de la configuración de *Best Effort*, rPS y nrtPS en las aplicación EDiTV0 sobre el retardo y *jitter* VoIP se tiene que las variaciones no son muy representativas debido a que la VoIP está configurada con UGS, siendo este el flujo de servicio de mayor prioridad garantizando las oportunidades de transmisión mediante concesiones periódicas no solicitadas. Sin embargo, cuando se configura UGS a la aplicación EDiTV0 no existen conexiones de VoIP debido a que se incrementa el número de concesiones no solicitadas y el sistema no está listo para atender a todos los usuarios de este flujo de servicio. En la figura 5-4a se observa que retardo VoIP está alrededor de 7ms mientras que en la figura 5-4b el *jitter* se encuentra el rededor de 0.05ms, valores que están por debajo del límite para proporcionar una buena calidad de servicio para la voz [67], 150ms para el retardo y 1 ms para el *jitter*.



**Figura 5-4.** Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV0 sobre **a)** el retardo VoIP y **b)** *jitter* VoIP

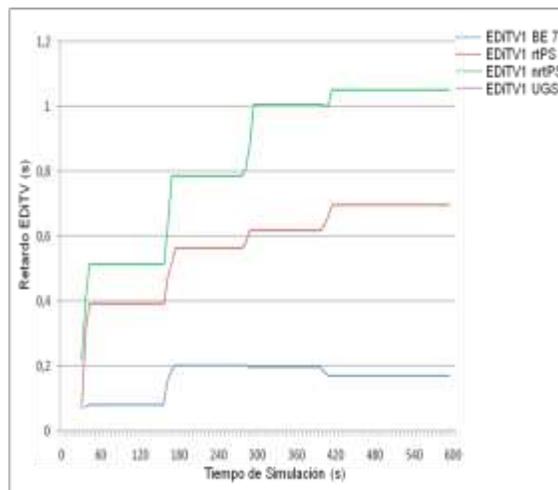
En la figura 5-5a se observa que el retardo DOCSIS aumenta cuando la aplicación EDiTV0 está configurada con los flujos de servicios de nrtPS, rPS y UGS dado que las estaciones de menor prioridad aumentan y no tienen las oportunidades de transmisión necesarias para transferir su información. Nótese en la figura 5-5a que el menor retardo DOCSIS de 110 ms se obtuvo cuando la aplicación EDiTV0 está configurada con el flujo de servicio BE. Entre tanto, la razón de pérdida de paquetes (figura 5-5b) disminuye cuando la aplicación EDiTV0 se maneja con los flujos de servicio nrtPS, rPS y UGS debido a que se reduce la transmisión de paquetes de otras aplicaciones de menor prioridad como se comprueba en la disminución del *throughput* de los canales ascendentes y descendentes (véase la figura 5-2). Entre tanto, con BE en la aplicación EDiTV0 la razón de pérdida de paquetes es en promedio del 3.8%, lo cual significa que existen un mayor número de colisiones en los *slots* destinados a solicitar oportunidades de transmisión ya que hay una mayor cantidad de estaciones que desean iniciar con una transferencia de información.



**Figura 5-5.** Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV0 sobre **a)** el retardo DOCSIS y **b)** la razón de pérdida de paquetes

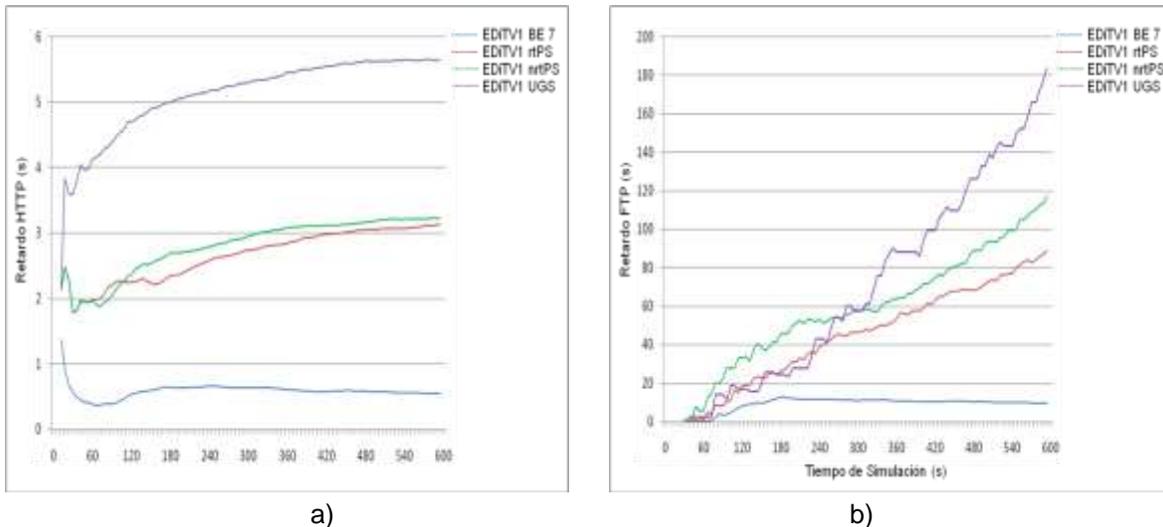
### 5.2.2 Efectos de la asignación de flujos de servicio a la aplicación EDiTV1

Por otro lado, en la figura 5-6 se pueden ver los efectos sobre el retardo EDiTV cuando se varía la configuración de los flujos de servicio a la aplicación de preguntas de selección múltiple (EDiTV1). Obsérvese al igual que con la aplicación EDiTV0 la incompatibilidad de la aplicación EDiTV1 con los flujos de servicios rtPS, nrtPS y UGS, dado que el tráfico generado por esta aplicación no es periódico. La mejor opción para la aplicación EDiTV1 continúa siendo la configuración de un flujo de servicio BE para la cual el retardo EDiTV llega a 19 ms, mientras que con rtPS el retardo aumenta hasta 700ms y con nrtPS hasta 1.05 s. La gráfica del retardo para UGS no aparece dado que no se presenta transferencia de información.



**Figura 5-6.** Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV1 sobre el retardo EDiTV

En la figura 5-7a se puede ver que el valor mínimo del retardo HTTP se obtiene cuando la aplicación EDiTV1 tiene configurada un flujo de servicio BE llegando a 600 ms, mientras que para los casos restantes el retardo oscila entre 3.1 s y 5.7 s. En cuanto al retardo FTP (figura 5-7b) el valor mínimo se obtiene para la configuración BE de la aplicación EDiTV0 llegando a 10s, mientras que para las configuraciones nrtPS, rtPS y UGS en la aplicación EDiTV0 existe una acumulación en el retardo y por ende se incrementa excesivamente.



**Figura 5-7.** Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV1 sobre **a)** el retardo HTTP y **b)** retardo FTP

De la misma forma que sucede con la aplicación EDiTV0, los efectos de la configuración de *Best Effort*, rtPS y nrtPS en la aplicación EDiTV1 sobre el retardo y *jitter* VoIP no son muy representativos y asimismo cuando se configura UGS a la aplicación EDiTV1 no existen conexiones de VoIP. En la figura 5-8a se ve que retardo VoIP está alrededor de 7ms mientras que en la figura 5-8b el *jitter* se encuentra el rededor de 0.05ms, valores que están por debajo del límite para proporcionar calidad de servicio.

En cuanto al retardo DOCSIS, se observa en la figura 5-9a que este se incrementa cuando la aplicación EDiTV1 se configura con los flujos de servicios nrtPS, rtPS y UGS. Nótese en la figura 5-9a que el menor retardo DOCSIS de 105 ms se obtuvo cuando la aplicación EDiTV1 está configurada con el flujo de servicio BE. Entre tanto, la razón de pérdida de paquetes (figura 5-9b) disminuye cuando la aplicación EDiTV1 se maneja con los flujos de servicio nrtPS, rtPS y UGS dado a que se reduce la transmisión de paquetes de otras aplicaciones de menor prioridad como se comprueba en la disminución del *throughput* en los canales ascendentes y descendentes (véase la figura 5-10). Con BE en la aplicación EDiTV1 la razón de pérdida de paquetes es en promedio del 3% lo cual significa que existen un mayor número de colisiones debido a que hay una mayor transferencia de información.

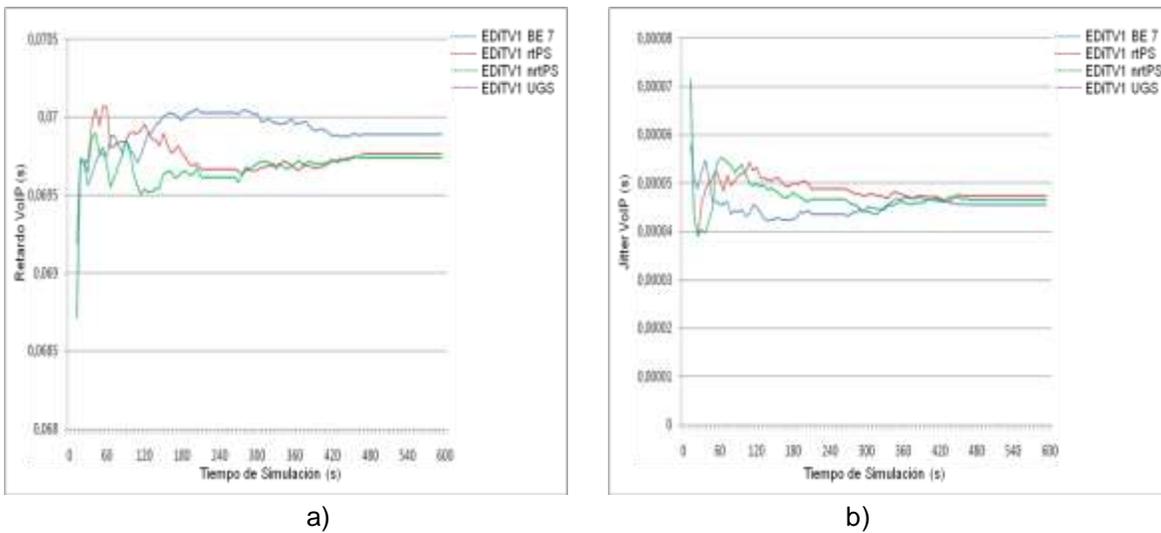


Figura 5-8. Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV1 sobre a) el retardo VoIP y b) jitter VoIP

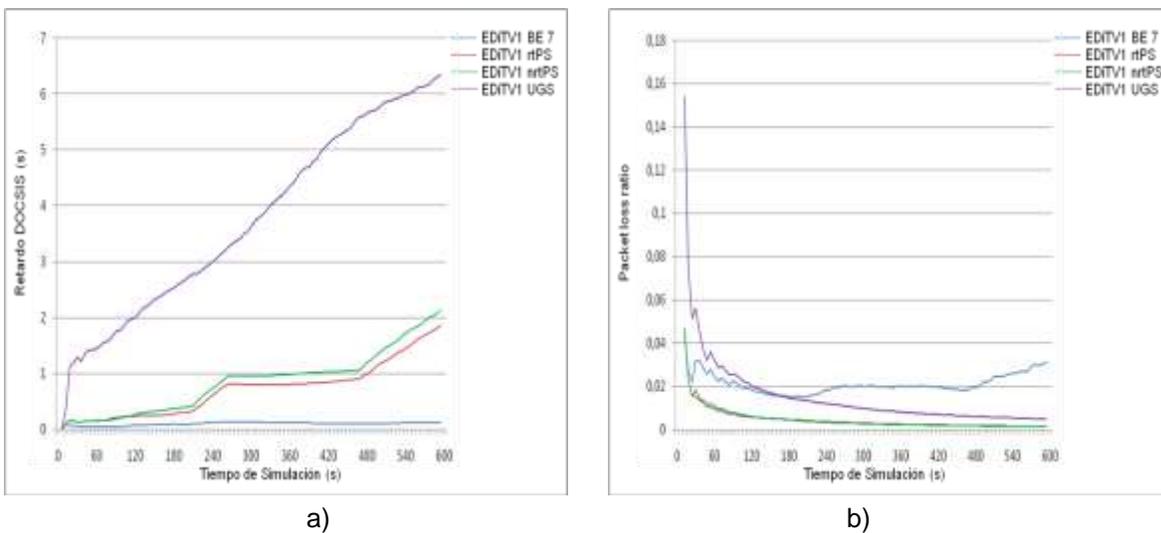


Figura 5-9. Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación de EDiTV0 sobre a) el retardo DOCSIS y b) la razón de pérdida de paquetes

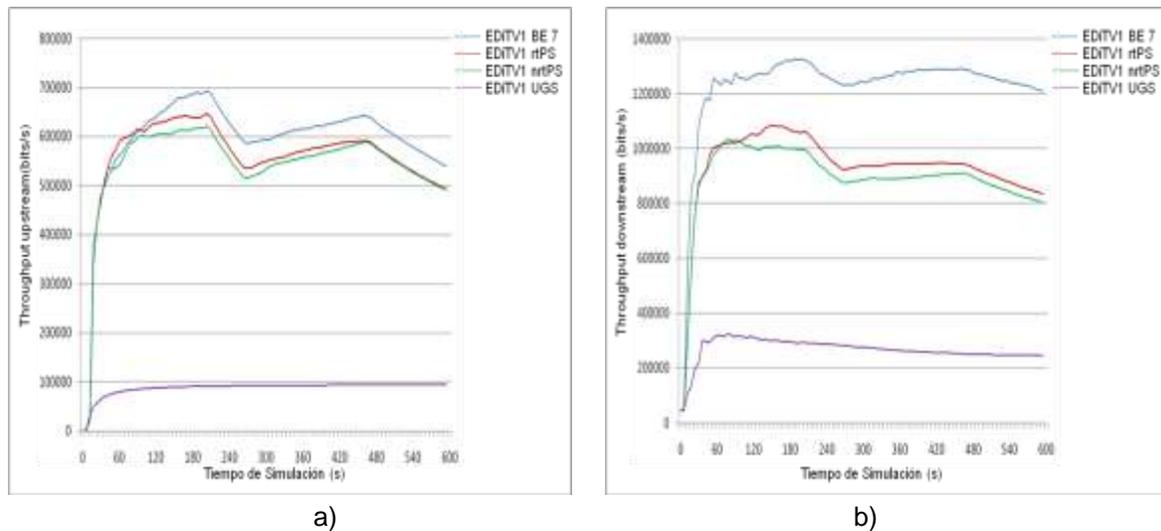


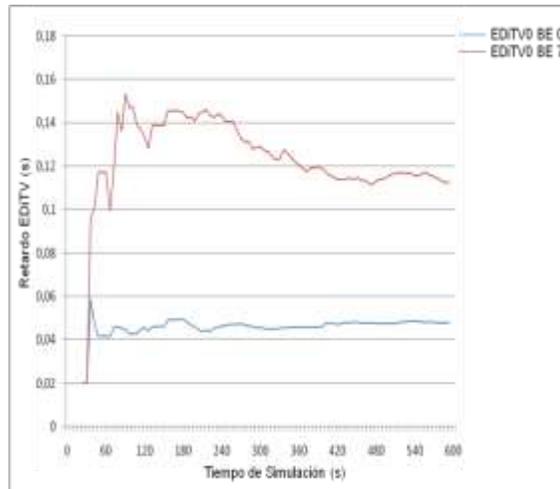
Figura 5-10. Efectos de la variación de los flujos de servicio de QoS en la aplicación EDiTV1 el *throughput* en el canal a) ascendente y b) descendente

### 5.3 ASIGNACIÓN DE LA PRIORIDAD DE TRÁFICO DEL SERVICIO *BEST EFFORT* A LAS APLICACIONES DE ITV

Como se ha podido observar hasta este punto, los flujos de servicio nrtPS, rtPS y UGS no proporcionan mejoras a la transmisión del tráfico de las aplicaciones de EDiTV, por lo cual en este literal se evalúa la configuración de las prioridades de tráfico en el flujo de servicio *Best Effort* sobre las aplicaciones de iTV. El flujo de servicio *Best Effort* cuenta con 7 niveles de prioridad del tráfico, los cuales se usan para diferenciar los flujos de servicio BE entre sí asignándoles una preferencia sobre el resto, de esta manera el CMTS puede prever las necesidades de ancho de banda y retardo del tráfico en sentido ascendente, y proporcionar peticiones y/o concesiones de acuerdo a esta prioridad [75]. Se plantea entonces un escenario donde se modificó la prioridad de tráfico del flujo de servicio *Best Effort* de DOCSIS asignado a las aplicaciones de iTV permitiendo evaluar el rendimiento de la red HFC y de los servicios que están establecidos en el escenario. La configuración del protocolo DOCSIS y de los perfiles de usuario para los diferentes servicios fueron las presentadas en las tablas del literal 5.1.

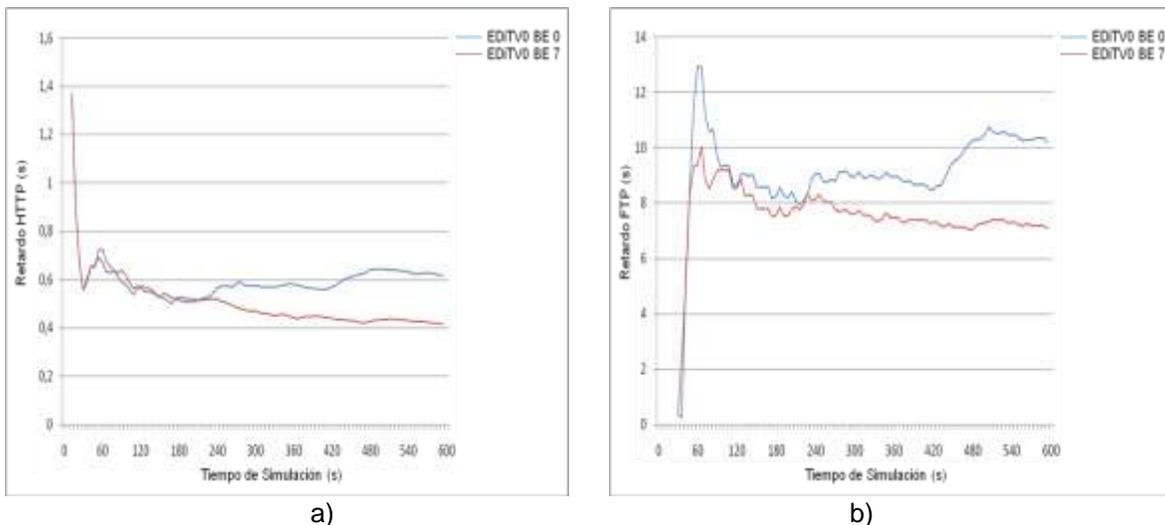
#### 5.3.1 Efectos de la asignación de prioridad de tráfico al servicio BE a la aplicación EDiTV0

En la figuras 5-11 y 5-12 se puede comprobar los efectos de la configuración de la prioridad comparando el retardo EDiTV con el retardo HTTP y FTP. Nótese en la figura 5-11 que al configurar la prioridad del flujo de servicio más baja (BE (7)), el retardo EDiTV alcanza un valor de 11.5 ms mientras que al configurar una prioridad más alta (BE (0)) el retardo disminuye hasta los 5 ms mejorando el rendimiento de esta aplicación.



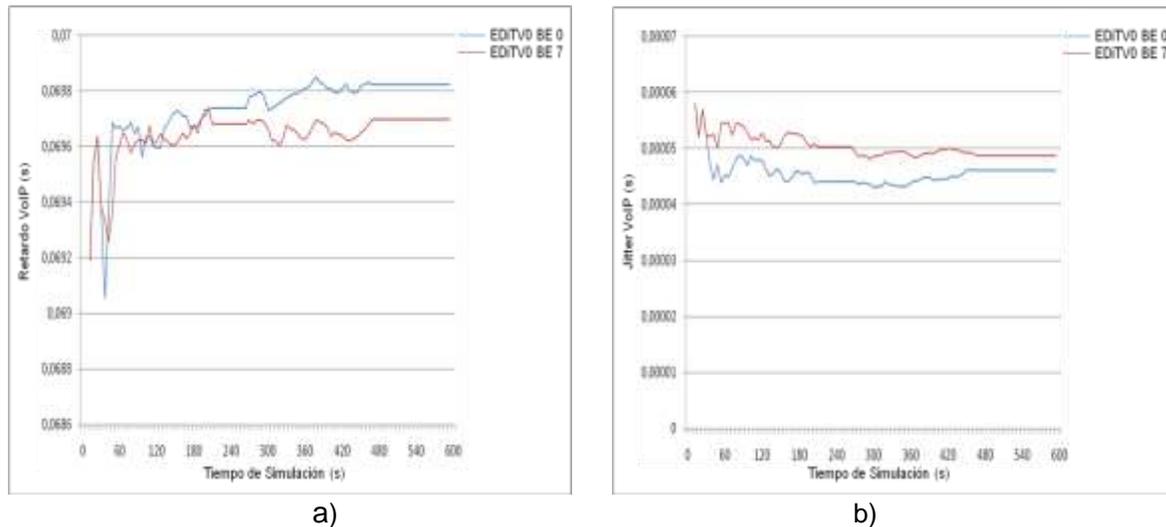
**Figura 5-11.** Efectos de la variación de la prioridad del tráfico *Best Effort* en la EDiTV0 sobre el retardo EDiTV

Ahora y cuando se configura a la aplicación EDiTV con BE (0), el retardo HTTP y FTP se incrementan dado que las estaciones HTTP y FTP tienen configurado un flujo de servicio BE con la prioridad más baja (BE (7)), resultado que obedece a la preferencia por parte del CMTS a los paquetes pertenecientes al flujo de servicio BE (0) sobre los paquetes BE (7). Esto se lo puede observar en las figuras 5-12a y 5-12b donde el retardo HTTP alcanzó los 600ms y el retardo FTP los 10 s. Entre tanto cuando la aplicación EDiTV0 tiene la configuración BE (7) el retardo HTTP y FTP disminuyen hasta 400ms y 7s respectivamente ya que el CMTS da la misma a todas las estaciones BE (7) para que compitan por el acceso al medio.



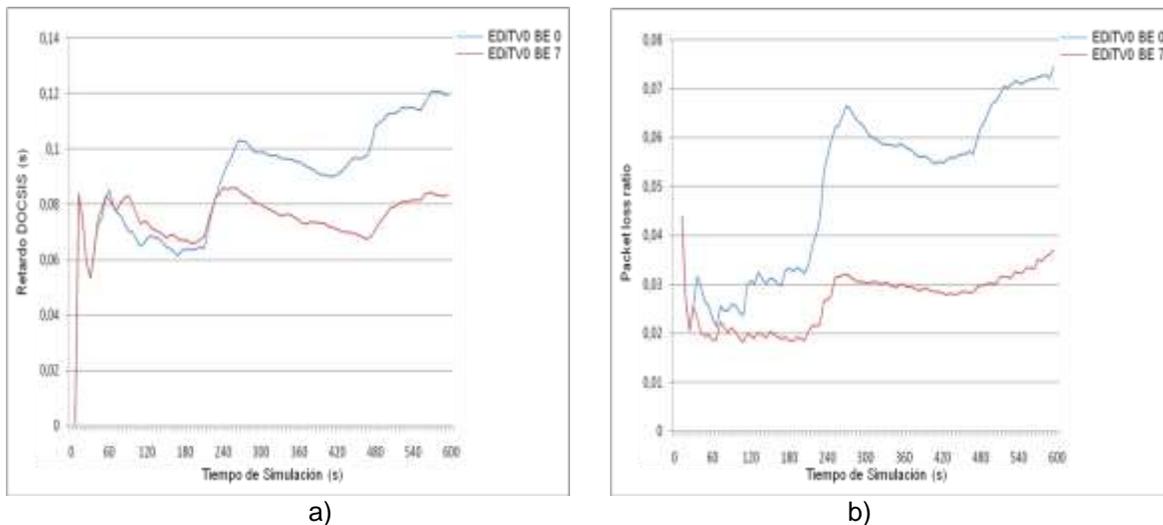
**Figura 5-12.** Efectos de la variación de la prioridad del tráfico *Best Effort* en la aplicación EDiTV0 sobre **a)** el retardo HTTP y **b)** retardo FTP

Sin embargo, el servicio de concesión no solicitada UGS asignado al las aplicaciones VoIP tiene privilegio sobre todos los niveles del servicio *Best Effort* que se configuren a cualquier aplicación por lo cual el retardo y *jitter* de VoIP no tuvieron variaciones significativas. Así en la figura 5-13 se aprecia que el retardo VoIP está entre 6,96 ms y 6,98 ms y en la figura 5-13b el *jitter* esta alrededor de 0,05 ms.



**Figura 5-13.** Efectos de la variación de la prioridad del tráfico *Best Effort* en la aplicación EDiTV0 sobre **a)** el retardo VoIP y **b)** *jitter* VoIP

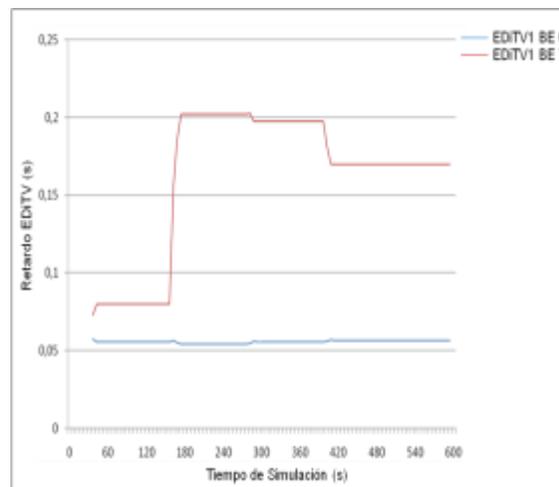
En la figura 5-14a se observa que el retardo DOCSIS varía entre 120ms y 83 ms, mientras que la razón de pérdida de paquetes lo hace desde 3.7% hasta 7.4%., además en los tiempos de simulación 240 s y 480 s las conexiones de VoIP dejan de establecerse y por ende se liberan los *slots* de concesiones periódicas no solicitadas aumentando el número de *slot* de contienda. Esta situación es aprovechada por las aplicaciones asignadas con BE para realizar peticiones de concesiones de ancho de banda con mayor frecuencia. Por lo tanto, al incrementarse los *slots* de contienda se incrementa también la probabilidad de colisión ocasionando un incremento en el retardo DOCSIS y en la razón de pérdida de paquetes como se puede ver en la figura 5-14. Adicionalmente se observa que cuando la aplicación EDiTV se configura con BE (0) hay un mayor incremento en el retardo DOCSIS y en la razón de pérdida de paquetes que cuando se configura como BE (7), lo cual se debe a que el sistema tiene que procesar dos subcolas asociadas a cada una de las prioridades.



**Figura 5-14.** Efectos de la variación de la prioridad del tráfico *Best Effort* en la aplicación EDiTV0 sobre **a)** el retardo DOCSIS y **b)** la razón de pérdida de paquetes

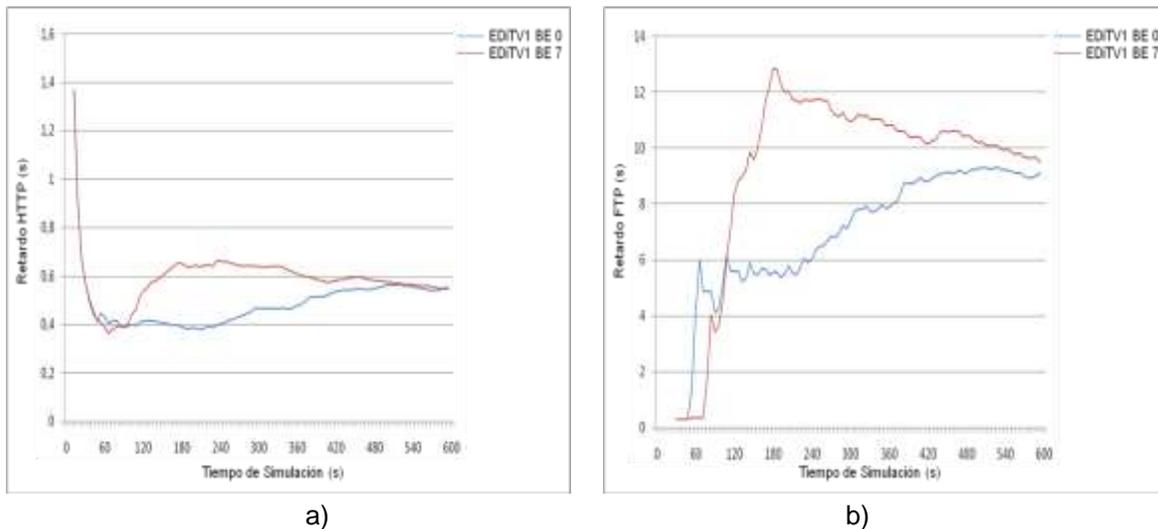
### 5.3.2 Efectos de la asignación de prioridad de tráfico al servicio BE a la aplicación EDiTV1

En cuanto a los resultados de la simulación cuando se varía la prioridad del tráfico del flujo de *Best Effort* (BE) asignado a la aplicación de preguntas de selección múltiple (EDiTV1), nótese en la figura 5-15 que al configurar la prioridad del flujo de servicio más baja (BE (7)), el retardo EDiTV alcanza un valor de 170 ms mientras que al configurar una prioridad más alta (BE (0)) el retardo disminuye hasta los 6 ms mejorando significativamente el rendimiento de esta aplicación.



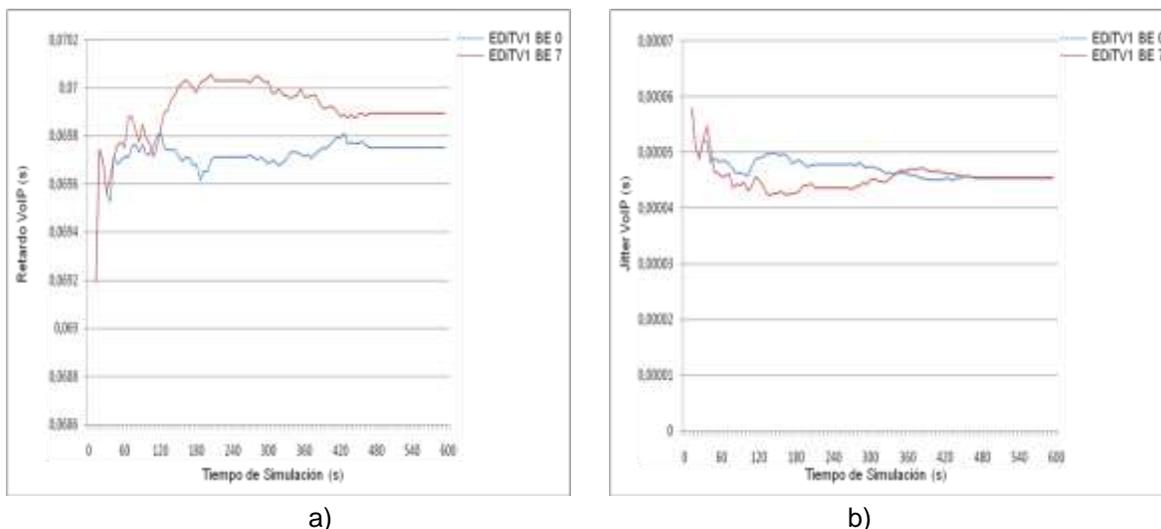
**Figura 5-15.** Efectos de la variación de la prioridad del tráfico *Best Effort* en la aplicación EDiTV1 sobre el retardo EDiTV

Al igual que el caso anterior, dado que los usuarios HTTP y FTP tiene configurado un flujo de servicio con la prioridad más baja (BE (7)) el retardo HTTP y FTP se incrementan cuando se configura a la aplicación EDiTV con un flujo de servicio BE (0) y disminuyen cuando tienen la misma la prioridad del flujo de servicio que los usuarios de las aplicación de EDiTV. Esto se lo puede observar en las figuras 5-16a y 5-16b.



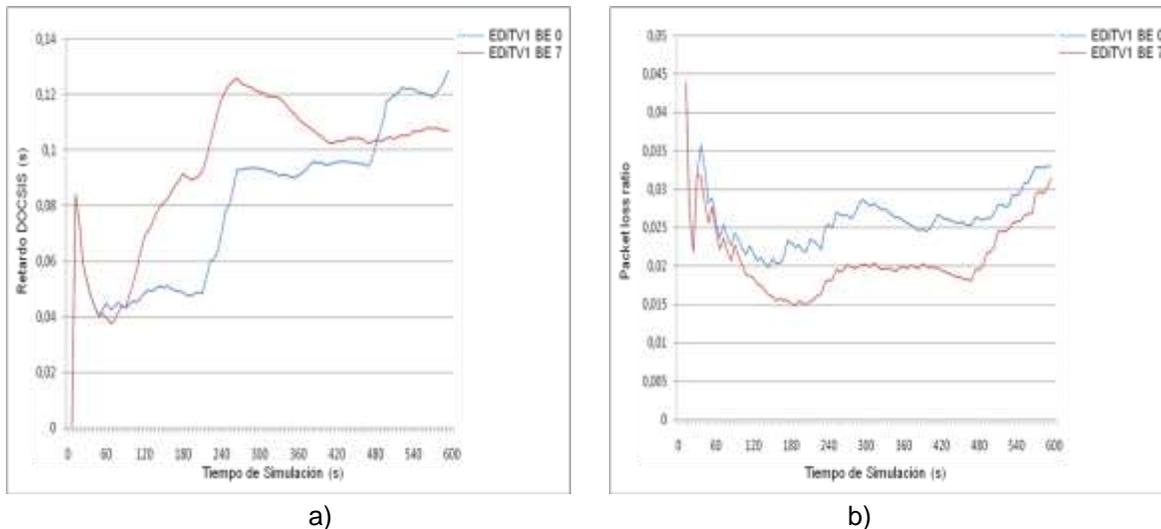
**Figura 5-16.** Efectos de la variación de la prioridad del tráfico *Best Effort* en la aplicación EDiTV0 sobre el retardo HTTP y FTP

Entre tanto, el retardo y *jitter* de VoIP no tienen variaciones significativas y se mantienen por debajo de los valores límites para garantizar una calidad de servicio. Así, el retardo VoIP está entre 6,97 ms y 6,99 ms (figura 5-17a) y el *jitter* alrededor de 0,045 ms (figura 5-17b).



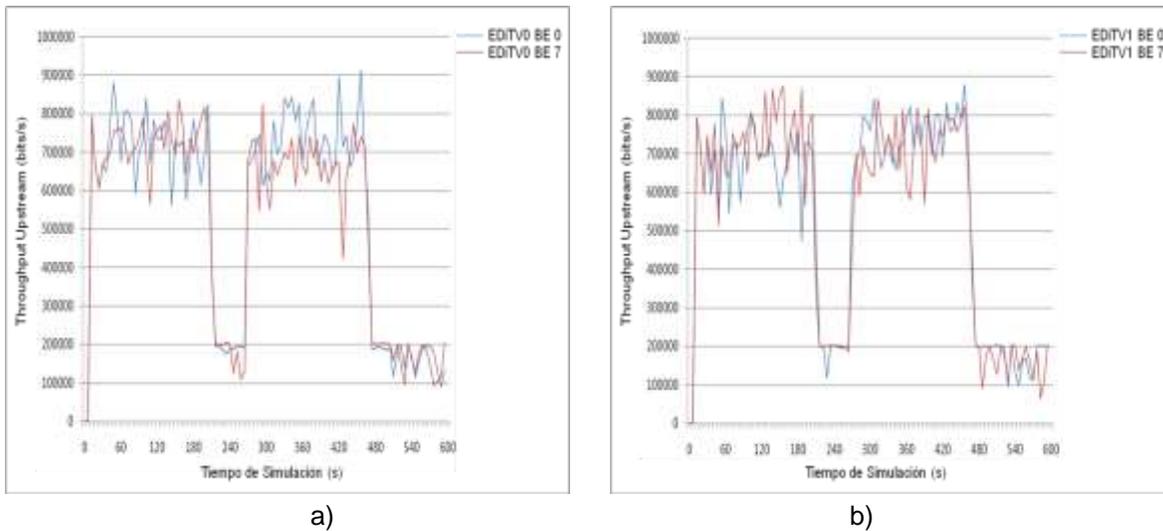
**Figura 5-17.** Efectos de la variación de la prioridad del tráfico *Best Effort* en la aplicación EDiTV0 sobre **a)** el retardo VoIP y **b)** *jitter* VoIP

Por su parte y al igual que para la simulación de la aplicación EDiTV0 el retardo DOCSIS (figura 5-18a) y la razón de pérdida de paquetes (figura 5-18b) presentan incrementos en los instantes para los cuales se terminan las conexiones de VoIP, dado que los *slots* de concesiones no solicitadas se dejan de asignar, y por ende quedan disponibles mas *slots* de contienda lo cual incrementa la probabilidad de colisión. Así, el retardo DOCSIS varía entre 107ms y 120 ms, mientras que la razón de pérdida de paquetes lo hace desde 3.7% hasta 7.4%.



**Figura 5-18.** Efectos de la variación de la prioridad del tráfico *Best Effort* en la aplicación EDiTV0 sobre **a)** el retardo DOCSIS y **b)** la razón de pérdida de paquetes

En cuanto al *throughput* tanto en el canal ascendente como descendente para todos los escenarios de las simulaciones realizadas en este apartado se mantuvieron sin variaciones considerables y por debajo de la capacidad de los enlaces. Como prueba de esto en la figura 5-19a y 5-19b se muestra el *throughput* en sentido ascendente para las aplicaciones de solicitud de información y de preguntas de selección múltiple respectivamente. Nótese que existen periodos de tiempo donde el tráfico en la red disminuye dado que no existen conexiones para VoIP.



**Figura 5-19.** Efectos de la variación de la prioridad del tráfico *Best Effort* sobre el *throughput* en sentido ascendente para **a)** la aplicación EDiTV0 y **b)** para la aplicación EDiTV1

Como se puede observar en los resultados de las simulaciones realizadas en este capítulo, una configuración adecuada del protocolo DOCSIS permite a la red HFC proporcionar los recursos necesarios, en términos de ancho de banda, retardo, *jitter* y pérdida de información, para que los servicios que se transmitan por la red tengan un adecuado funcionamiento garantizando una buena calidad de servicio.

## CAPITULO VI

### 6 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones a las que se llegó después de haber realizado el proyecto, teniendo en cuenta los objetivos propuestos en este proyecto; además, se plantean algunas recomendaciones para quienes deseen abordar y continuar con trabajos e investigaciones en análisis de tráfico, simulación de redes de telecomunicaciones y televisión digital interactiva, y los trabajos futuros que pueden ser abordados para continuar con la investigación en estas áreas.

#### 6.1 CONCLUSIONES

1. Del estudio realizado en los capítulos II y III, se tiene que la red de acceso HFC es idónea para una adecuada prestación del servicio de iTV haciendo uso de la misma infraestructura de red dado que reserva un segmento del espectro de frecuencia proporcionado por el cable coaxial tanto para el canal de difusión como para el canal interactivo, permitiendo la transmisión de servicios como TV, voz y datos simultáneamente, así utiliza el estándar DVB-MHP en la transmisión de televisión digital interactiva por el canal de difusión y las especificaciones DOCSIS para la provisión de un canal IP bidireccional entre los usuarios y el servidor de aplicaciones de iTV.
2. El estudio y modelado del tráfico generado por las aplicaciones de iTV realizado en el anexo A y en el capítulo IV permitieron encontrar el modelo matemático que mejor representa el comportamiento de los usuarios y que posteriormente fue programado en la herramienta de simulación OPNET *Modeler* para evaluar el desempeño de este tipo de tráfico en la red HFC.
3. El análisis realizado al protocolo de acceso DOCSIS en el capítulo IV permitió determinar la configuración óptima de sus parámetros para proporcionar una adecuada calidad de servicio a las aplicaciones de iTV objeto de estudio en términos de retardo y pérdida de información, sin perjudicar el funcionamiento de servicios como VoIP, HTTP y FTP, haciendo de la red de acceso HFC una red idónea para la distribución de contenidos de iTV cuando las aplicaciones entren a competir por lo recursos con dichos servicios. Otros posibles tráficos sobre la red HFC no se ha considerado pero puede estudiarse en futuros trabajos

4. El tráfico agregado generado por la aplicación de iTV de solicitud de información (EDiTV0) se asemeja a una navegación Web liviana dado que la transferencia de información usa el protocolo HTTP, por lo tanto la red debe proporcionar una adecuada entrega de la información (texto e imágenes) sin pérdidas de información ni retardos que afecten la entrega de los contenidos solicitados.
5. La aplicación iTV de preguntas con respuesta de selección múltiple (EDiTV1) tiene un comportamiento a ráfagas, que si bien genera paquetes pequeños exige un adecuado manejo de la red debido a las múltiples transmisiones que el CMTS y el servidor de aplicaciones debe atender simultáneamente en instantes de tiempo determinados. De esta manera al garantizar para esta aplicación los parámetros de desempeño establecidos por las recomendaciones, se asegura también un óptimo funcionamiento para otras aplicaciones de iTV menos exigentes.
6. El incremento del tiempo entre MAP afecta el *throughput*, el retardo de la red y el retardo de las aplicaciones de iTV, por lo tanto, para las aplicaciones de iTV en las que el tráfico tenga puntos de afluencia, como resultado que el tiempo entre respuestas este representado por una distribución normal, y para aplicaciones típicas de solicitud de información adicional, donde las peticiones se distribuye de manera exponencial, se recomienda configurar este parámetro entre 10ms y 20ms para obtener retardos que estén dentro de los límites establecidos por las recomendaciones y un consumo de ancho de banda aceptable.
7. Para lograr que los mecanismos de calidad de servicio proporcionados por el protocolo DOCSIS como la fragmentación y concatenación favorecieran el desempeño de las aplicaciones de iTV fue necesario la variación del tamaño del *minislot*, encontrándose que un tamaño de *minislot* del 32 bytes existe una coherencia entre el retardo DOCSIS y el retardo de las aplicaciones de iTV. A su vez esta configuración no afecto el desempeño de otros servicios como HTTP, FTP y VoIP verificándose que efectivamente los mecanismos de fragmentación y concatenación mejorar el rendimiento general de la red.
8. Los flujos de servicio de QoS como rtPS, nrtPS y UGS aplicados sobre los paquetes de EDiTV afectan la distribución de los contenidos aumentando el retardo y la pérdida de información, debido a que estos fueron pensados para servicios que necesitan de un acceso periódico para la transmisión de información, lo cual no ocurre con el tráfico generado por las aplicaciones de iTV objeto de estudio. Por lo cual la mejor opción de configuración para este tipo de aplicaciones de iTV fue el flujo de servicio *Best Effort*, con lo cual se garantizan los parámetros desempeño para una adecuada calidad de servicio.

## **6.2 APORTES DEL TRABAJO DE GRADO**

Este proyecto generó aportes tanto a nivel académico, investigativo y social:

1. En este trabajo de grado se realizó la simulación del tráfico para iTV teniendo en cuenta los parámetros de QoS sobre la red de acceso HFC, lo que permitió analizar, evaluar y obtener, las condiciones necesarias para la implementación del servicio en entornos reales, garantizando que la red de acceso soporte diferentes números de usuarios con distintos requerimientos de información. Con esto se proporcionó un completo análisis del desempeño de la red de acceso para la distribución de contenidos educativos de iTV con QoS por el canal interactivo de la red HFC, ya que en el contexto mundial no se tenían estudios sobre el comportamiento de la red frente a este nuevo servicio.
2. La Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca tuvo una asimilación y monitoreo de las redes HFC para adaptar y generar soluciones en cuanto a los problemas de dimensionamiento y evaluación de prestaciones de los elementos de red, y su interconexión, como red de acceso para apoyar procesos educativos a distancia a través de contenidos de iTV. Permitiendo estar a la vanguardia con las tendencias del país, que marcha hacia una digitalización del servicio de televisión, y con las políticas de la educación superior que debe apoyar la descentralización.
3. El trabajo de grado permitió avanzar en el estudio de los problemas relacionados con los servicios de banda ancha, tales como mecanismos de control de tráfico y control de congestión en redes HFC para soportar el la distribución de contenidos de televisión interactiva, brindando los pilares en este tipo de redes para la evaluación de mecanismos de interfuncionamiento con otras redes, pruebas de conformidad e interoperabilidad de los protocolos.
4. La inclusión del tráfico generado por las aplicaciones de iTV en el canal interactivo de la red HFC y el análisis de sus prestaciones sobre redes HFC es otro de los aportes de este trabajo, por lo que los avances y experiencias logrados en el desarrollo del mismo serán útiles para posteriores proyectos académicos e investigativos que deseen aplicar estas temáticas.

## **6.3 RECOMENDACIONES**

1. Incluir en las materias del programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca el uso de herramientas de simulación de redes de telecomunicaciones dado que esto son un gran complemento para lograr una mejor formación en términos conceptuales,

especialmente cuando se toque el tema de redes de acceso como la red HFC, para la cual se considera muy beneficioso el uso de *OPNET Modeler* como una herramienta de simulación, especialmente para el estudio de los parámetros de configuración del protocolo DOCSIS ya que proporciona un modelo muy completo del funcionamiento del mismo así como de los dispositivos y servicios que pueden transmitirse sobre la red.

2. Para el modelado de tráfico de un nuevo servicio es necesario realizar un estudio previo del mismo para determinar las posibilidades del modelo a generar. Luego se debe realizar la captura del tráfico real generado por un prototipo por medio de un analizador de protocolo como por ejemplo *Wireshark*, con el fin de determinar su modelo matemático lo que permitirá la configuración del mismo en una herramienta de simulación adecuada para evaluar el rendimiento cuando se implementa en una red.

## 6.4 TRABAJOS FUTUROS

Como trabajos futuros para aquellas personas que deseen continuar con la investigación en las temáticas tratadas en este trabajo de grado se encuentran las siguientes propuestas:

1. En los mecanismos de acceso existe un algoritmo por medio del cual se mide el tamaño de la información a enviarse comparándose con un parámetro *request/data IE*, si el tamaño de la información es pequeño, la información es enviada en contienda sin necesidad de esperar por la concesión por parte del CMTS, quedando pendiente únicamente el mensaje de confirmación de envío ACK, sería conveniente estudiar este mecanismo para explotar su utilización en el envío de peticiones e información correspondiente a iTV ya que lo que caracteriza a estas aplicaciones es que el tamaño de los paquetes y la información transmitida es pequeña.
2. Implementar la configuración del protocolo DOCSIS encontrada como resultado de la investigación llevada a cabo en este trabajo de grado, en un ambiente real que involucre CMTS, CM y usuarios de las aplicaciones de iTV y servicios de voz y datos y así evaluar el consumo de recursos en dicha red.
3. Realizar la evaluación del modelo de tráfico de iTV encontrado en este trabajo de grado en otras redes de acceso con tecnologías diferentes a las redes HFC, tales como ADSL, UMTS, entre otras, de forma que se permita realizar un estudio comparativo entre ellas analizando su incidencia sobre el rendimiento de la red de acceso considerada.

4. La televisión digital interactiva proporciona nuevas posibilidades para el desarrollo de aplicaciones interactivas a sus abonados. En este trabajo de grado se abordó el estudio y modelado de aplicaciones de iTV aplicadas a la educación, por lo cual se puede extender el estudio y modelado que permitiría analizar la distribución de información, el consumo de recursos en la red, así como las garantías de calidad de servicio para otro tipo de aplicaciones en las áreas del comercio, salud, entretenimiento e información en ambientes de iTV.
  
5. Realizar un estudio y modelado de un servicio de video bajo demanda en ambientes de iTV, donde los flujos de video se descarguen por el canal interactivo para determinar las capacidades de la red de acceso HFC ante diferentes configuraciones del protocolo de acceso DOCSIS de tal forma que la calidad del servicio sea proporcionada adecuadamente.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Grupo de Análisis y Prospectiva del Sector de las Telecomunicaciones (GapTel), “*Televisión Digital*”. España, Marzo de 2005. Documento PDF disponible en: <http://www.red.es/media/registrados/2008-05/1211293387070.pdf> Consultado el 10 de Febrero de 2008.
- [2] “*Learning via interactive Digital TV - Big Potential particularly as Personalized TV services develop over the next 10 years*”. pjb Associates, UK, Septiembre de 2003. Artículo disponible en: <http://www.pjb.co.uk/pr080903.htm> Consultado el 13 Febrero de 2008.
- [3] Recomendación ITU-T J.112 (1998), “*Sistemas de transmisión para servicios interactivos de televisión por cable*”.
- [4] ETSI ES 200 800 V1.3.1 (2001), “*Digital Video Broadcasting (DVB); DVB interaction channel for Cable TV distribution systems (CATV)*”.
- [5] Schwalb E. M., “*iTV Handbook: Technologies and Standards*”. ED. Prentice Hall PTR, Estados Unidos de América, Junio de 2003.
- [6] Proyecto EDiTV, “*Educación Virtual basada en Televisión Digital Interactiva para apoyar procesos educativos a distancia*”. URL: <http://www.unicauca.edu.co/EDiTV> Consultado el 20 de Marzo de 2008.
- [7] Urbano F. A., Campo W. Y., Amaya J. P., “*Estado del arte de la Televisión Digital Interactiva*”. Reporte Técnico Proyecto EDiTV. Universidad del Cauca. Popayán, Colombia, Abril de 2008.
- [8] Jokipielto P., “*Modelling and content production of distance learning concept for interactive digital television*”. Tesis Doctoral. Universidad de Tecnología de Helsinki, Finlandia. Diciembre de 2006. Documento PDF disponible en: <http://lib.tkk.fi/Diss/2006/isbn9512285428/>. Consultado el 15 de Febrero de 2008.
- [9] Dosi, A., Prario, B., “*New Frontiers of T-Learning: the Emergence of Interactive Digital Broadcasting Learning Services in Europe*”. Proceedings of World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia & Telecommunications, ED-Media 2004, 2004, Pages: 4831-4836
- [10] DiSessa A., “*Changing Minds, Computers, Learning and Literacy*”. Cambridge: MIT Press, 2000.
- [11] Damásio M., Quico C., “*T-Learning and Interactive Television Edutainment: the Portuguese Case Study*”. Proceedings of World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia & Telecommunications, ED-Media 2004, 2004, Pages: 4511-4518
- [12] López J. A., Sánchez M., “*Evolución de las redes de acceso de los operadores de red fija para el mercado de banda ancha*”. Revista: Comunicaciones de Telefónica I+D, España, Octubre de 2006. Páginas: 27 – 42. Documento PDF disponible en:

- [http://www.telefonica.es/sociedaddelainformacion/html/publicaciones\\_revista\\_comunicacion.shtml](http://www.telefonica.es/sociedaddelainformacion/html/publicaciones_revista_comunicacion.shtml) Consultado el 15 de Febrero de 2008.
- [13] García R., “*Desarrollo de un modelo de red con tecnología FTTX para transmisión de voz y datos. Análisis del protocolo de acceso al medio y validación del tráfico generado*”. Tesis Doctoral, Área de Ingeniería Telemática, Universidad de Oviedo. España, 2005.
- [14] Sienra L. G., “*DOCSIS. El Conjunto de Estándares Cable Módem de CableLabs*”. Centro de Investigación e Innovación en Telecomunicaciones - CINIT, México, Noviembre de 2001. Artículo disponible en: <http://www.cinit.org.mx/articulo.php?idArticulo=4>. Consultado el 10 de Febrero de 2008.
- [15] “*Modeler Documentation Set. Version: 12.0*”. OPNET Technologies, 2006.
- [16] Amaya J.P, Urbano F.A, Campo W. Y, Arciniegas J. L, “*Infraestructura Tecnológica para un laboratorio experimental de Televisión Digital interactiva*”. Congreso colombiano de comunicaciones – Colcom 2008, Popayán, Colombia, Noviembre de 2008.
- [17] Navarrete A., “*Alternativas para ofrecer Servicios Bidireccionales en redes de Cable*”, Centro de Investigación e Innovación en Telecomunicaciones - CINIT, México, Febrero de 2003. Artículo disponible en: <http://www.cinit.org.mx/articulo.php?idArticulo=5> Consultado el 17 de Febrero de 2008
- [18] Burke D., “*Una guía hacia la Televisión Interactiva*”. Revista Miradas, Escuela Internacional de Cine y Televisión de San Antonio de los Baños, Cuba, 2003. Artículo disponible en: [http://www.eictv.co.cu/miradas/index.php?option=com\\_content&task=view&id=481&Itemid=999999999](http://www.eictv.co.cu/miradas/index.php?option=com_content&task=view&id=481&Itemid=999999999) Consultado el 23 de Febrero de 2008.
- [19] ITU-T (2007), “*FG IPTV-DOC-0199 IPTV vocabulary of terms*”. Focus Group On IPTV.
- [20] Meritxell E., “*Interactividad e interacción*”, RELATEC: Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa, ISSN 1695-288X, Vol. 1, Nº. 1, 2002, pags. 15-25.
- [21] Ojeda G., “*Informe de investigación para el análisis de tecnologías convergentes de información y comunicación en el ámbito educativo*”. Serie de Informes. Artículo disponible en: <http://ares.cnice.mec.es/informes/09/documentos/indice.htm>. Consultado el 20 de Febrero de 2008.
- [22] Garcia A., “*Los retos de la implantación de la televisión interactiva a la luz de su propia historia*”, Facultad de Comunicación de la Universidad de Navarra. Artículo disponible en: <http://www.ehu.es/zer/zer13/retos13.htm> Consultado el 20 de Febrero de 2008.
- [23] Lopez de Zuazo A., “*Teletexto y el pensamiento divergente*”. Facultad de Comunicación de la Universidad de Navarra. ISSN: 1134-1629. España, 2000. Documento PDF disponible en: <http://www.ucm.es/BUCM/revistas/inf/11341629/articulos/ESMP0000110259A.PDF> Consultado el 22 de Febrero de 2008.

- [24] Jensen J., "Interactivity. Tracking a New Concept in Media and Communication Studies", Nordicom Review, Vol, 19, No. 1, Junio de 1998.
- [25] "The MHP Guide". Portal MHP Knowledgebase. Marzo 30 de 2006. Documento PDF disponible en: <http://www.mhp-knowledgebase.org/publ/mhp-guide.pdf> Consultado el 25 de Febrero de 2008.
- [26] ETSI ES 201 812 V1.1.2 (2006), "Digital Video Broadcasting (DVB); Multimedia Home Platform (MHP) Specification 1.0.3".
- [27] ETSI TS 102 812 V1.2.2 (2006), "Digital Video Broadcasting (DVB); Multimedia Home Platform (MHP) Specification 1.1.1".
- [28] Fernandes J., Lemos G., Silveira G., "Introdução à Televisão Digital Interativa: Arquitetura, Protocolos, Padrões e Práticas". Brasil, Agosto de 2004. Documento PDF disponible en: <http://www.cic.unb.br/docentes/jhcf/MyBooks/itvdi/texto/itvdi.pdf> Consultado el 20 de Febrero de 2008. Consultado el 27 de Febrero de 2008.
- [29] ATSC A/53 Part 1 (2007), "Digital Television Standard, Part 1 – Digital Television System".
- [30] DVB, "History of the DVB Project". Documento disponible en: [http://www.dvb.org/about\\_dvb/history](http://www.dvb.org/about_dvb/history). Consultado el 17 de Junio de 2008.
- [31] ARIB STD-B31 V1.6 (2005), *Transmission System for Digital Terrestrial Television Broadcasting*.
- [32] ACIEM, "Recomendaciones para la implementación de la televisión digital Terrestre en Colombia". Asociación Colombiana de Ingenieros, Bogotá, Colombia, Agosto de 2006.
- [33] Peng CH., "Digital Television Applications". *Doctoral Dissertation* ISBN: 951-22-6171-5. Universidad de Tecnología de Helsinki, Finlandia. 2002.
- [34] Morris S., Smith-Chaigneau A. "Interactive TV Standards". Focal Press, EEUU, 2005.
- [35] ATSC A/101 (2005), "Advanced Common Application Platform (ACAP)".
- [36] Guibobono, J. C., "Informe Técnico de la conferencia: Porqué ATSC es el mejor estándar para la TV Libre y Gratuita en América". Subtel, Santiago de Chile, Octubre de 2006. Documento PDF disponible en: <http://atscforum.org/resources/pressreleases/2006/PR-061106-TechnicalReport-sp.pdf>
- [37] ARIB STD-B24 V5.1 (2008), "Data Coding and Transmission Specification for Digital Broadcasting".
- [38] ARIB STD-B23 V1.1 (2004), "Application Execution Engine Platform for Digital Broadcasting".
- [39] "Colombia ya tiene estándar de televisión digital terrestre: el europeo". CNTV. Bogotá, 28 de agosto de 2008. Artículo disponible en: [http://www.cntv.org.co/cntv\\_bop/noticias/2008/agosto/28\\_08\\_08.html](http://www.cntv.org.co/cntv_bop/noticias/2008/agosto/28_08_08.html). Consultado el 28 de agosto de 2008.
- [40] ETSI EN 300 429 V1.2.1 (1998), "Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for cable systems".
- [41] Pytelka T., "Interaction in Digital Television Environment". Bachelor Thesis. Czech Technical University in Prague. Agosto de 2007.

- [42] Brice R., “*Newnes Guide to Digital TV*”. Newnes, 2<sup>nd</sup> edition, 2003.
- [43] Wootton, C., “*A Practical Guide to Video and Audio Compression*”. Focal Press, EE.UU. 2005.
- [44] ISO/IEC 13818 (1995), “*Information Technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information (MPEG-2)*”.
- [45] ISO/IEC 13818-7 (1997), “*Information Technology – Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information – Part 7: Advanced Audio Coding (AAC)*”.
- [46] ITU-T Recommendation H.262 - ISO/IEC IS 13818-2 (1995), “*International Standard, Information Technology – Generic Coding of moving pictures and associated audio – Part 2: Video*”.
- [47] ISO/IEC 14496 (2002), “*Information Technology – Coding of audio-visual objects (MPEG-4)*”.
- [48] ISO/IEC 14496-3 (2005), “*Information technology – Coding of audio-visual objects – Part 3: Audio*”.
- [49] ISO/IEC 14496-10 (2005), “*Information technology – Coding of audio-visual objects – Part 10: Advanced Video Coding*”.
- [50] ITU-T Recommendation H.264 - ISO/IEC 14496-10 (2005), “*Advanced Video Coding*”.
- [51] Gutiérrez E., “*DVB-T/H, la solución para la Televisión Digital Terrestre*”. DVB, Foro de Televisión Digital CNTV. Bogotá, Agosto de 2008.
- [52] ETSI TR 101 154 V. 1.8.1 (2007), “*Digital Video Broadcasting (DVB); Specification for the use of Video and Audio Coding in Broadcasting Applications based on the MPEG-2 Transport Stream*”.
- [53] ISO/IEC IS 13818-1 (2000), “*International Standard, Information Technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information – Part 1: Systems*”.
- [54] “*How To Become An Expert In DSM-CC*”. Interactive TV Web. Junio de 2006. Artículo disponible en [http://www.interactivetvweb.org/tutorials/dtv\\_intro/dsmcc](http://www.interactivetvweb.org/tutorials/dtv_intro/dsmcc) Consultado el 20 de Agosto de 2008.
- [55] Proyecto iLAB, “*Análisis de Funcionalidades MHP*”. España, 2007.
- [56] ETSI EN 300 468 V 1.8.1 (2007), “*Digital Video Broadcasting (DVB); Specification for Service Information (SI) in DVB systems*”.
- [57] ETSI EN 301 192 V1.4.2 (2008), “*Digital Video Broadcasting (DVB); DVB specification for data broadcasting*”.
- [58] ETSI TS 102 812 V 1.2.2 (2006), “*Digital Video Broadcasting (DVB): Multimedia Home Platform (MHP) Specification 1.1.1*”.
- [59] ETSI ETS 300 800 V1, “*Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction Channel for Cable TV distribution systems*”.
- [60] ETSI ETS 300 801 V1, “*Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction Channel through PSTN/ISDN*”.
- [61] ETSI EN 301 193 V1.1.1, “*Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction Channel through DECT*”.

- [62] ETSI EN 301 195 V1.1.1, “*Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction Channel through GSM*”.
- [63] ETSI EN 301 199 V1.2.1, “*Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for LMDS distribution systems*”.
- [64] ETSI TR 101 201 V1.1.1, “*Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for SMATV systems*”.
- [65] ETSI EN 301 790 V1.2.2, “*Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems*”.
- [66] “*Introduction to Quality of Service (QoS)*”. Nortel Networks. EE.UU. 2003.
- [67] Recomendación ITU-T G.1010 (2001), “*Categorías de calidad de servicio para los usuarios de extremo de servicios multimedia*”.
- [68] “*Testing Digital Video*”. The international Engineering Consortium – IEC. Documento PDF disponible en: [http://www.iec.org/online/tutorials/test\\_dv](http://www.iec.org/online/tutorials/test_dv). Consultado el 5 de Agosto de 2008.
- [69] Berrocal J., Vázquez E., González F., Álvarez M., Vinyes J., Madinabeitia G., García V., “*Redes de Acceso de Banda Ancha: Arquitectura, Prestaciones, Servicios y Evolución*”. Madrid, España, Febrero de 2003.
- [70] Recomendación ITU-T G.1541 (2006), “*Objetivos de calidad de funcionamiento de red para servicios basados en el protocolo Internet*”.
- [71] Recomendación ITU-T J.241 (2005), “*Clasificación y métodos de medición de la calidad del servicio para servicios de vídeo digital ofrecidos a través de redes IP de banda ancha*”.
- [72] Sienna, L., G., “*Midiendo la calidad de señales digitales: Una orientación práctica*”. CINIT, México, 1 de Febrero de 2003. Artículo disponible en: <http://www.cinit.org.mx/articulo.php?idArticulo=16>. Consultado el 5 de Agosto de 2008.
- [73] García G., V. G., “*Redes de cable HFC*”. Universidad de Oviedo. Arquitectura de Redes Sistemas y Servicios. España, 2001.
- [74] Recomendación ITU-T J.112 - Anexo B (2003), “*Sistemas de transmisión para servicios interactivos de televisión por cable Anexo B: Especificaciones de interfaces de servicios de datos por cable: Especificación de la interfaz de radiofrecuencia*”.
- [75] Cable Television Laboratories, Inc. (2007), “*Data-Over-Cable Service Interface Specification, DOCSIS 1.1, Radio Frequency Interface Specification*”.
- [76] Recomendación ITU-T J.93 (1998), “*Requisitos del acceso condicional en la distribución secundaria de televisión digital por sistemas de televisión por cable*”.
- [77] Recomendación ITU-T J.122 (2007), “*Sistemas de transmisión de segunda generación para los servicios interactivos de televisión por cable - Módems de cable para protocolo Internet*”.
- [78] Recomendación ITU-T J.222 (2007). “*Consideraciones generales sobre los sistemas de transmisión de tercera generación para servicios interactivos de televisión por cable - Módems de cable IP*”.

- [79] Recomendación ITU-T J.83 (1995). “*Sistemas digitales multiprogramas para servicios de televisión, sonido y datos de distribución por cable*”.
- [80] IETF RFC 1157 (1990), “*A Simple Network Management Protocol (SNMP)*”.
- [81] IETF RFC 1350 (1992), “*The TFTP Protocol (Revision 2)*”.
- [82] IETF RFC 2131 (1997), “*Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)*”.
- [83] IETF RFC 868 (1983), “*Time Protocol*”.
- [84] ISO/IEC IS 13818-6 (1998), “*Information technology – Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio information – Part 6: Extensions for DSM-CC*”.
- [85] Sitio Web del analizador de protocolos *Wireshark*: <http://www.wireshark.org>
- [86] Crovella, M.E., Taqqu, M.S., Bestavros, A. “*Heavy-tailed Probability Distributions in the World Wide Web*”. In *A Practical Guide To Heavy Tails*, chapter 1, Chapman and Hall, New York, pp. 3–26. 1998.
- [87] Pitkow, J. E., “*Summary of WWW Traffic Characterizations*”, *Computer Networks and ISDN Systems*, Vol. 30, 1998, pp. 551-558.
- [88] García, R., “*Implementación mediante OPNET de un modelo de red de cable*”. Universidad de Oviedo. España, 2004. Documento PDF disponible en: [www.it.uniovi.es/investigacion/lineas/opnet/material/document\\_1.pdf](http://www.it.uniovi.es/investigacion/lineas/opnet/material/document_1.pdf). Consultado el 10 de Agosto de 2008.
- [89] Aztaiza H., Bermudez H., Muñoz P., “*Simulación de Sistemas de Telecomunicaciones*”. Arte Imagen, 1<sup>ra</sup> Edición. Armenia, Colombia, 2007.
- [90] Martínez I., “*Contribuciones a modelos de tráfico y controles de QoS en los nuevos servicios sanitarios basados en telemedicina*”. Tesis doctoral en Ingeniería Biomédica. Universidad de Zaragoza. España, Julio de 2006.
- [91] OPNET Documentation, “*Data Over Cable System Interface Specifications Model Description*”. *OPNET Technologies, Inc.* 2002.