

Análisis de Tráfico para una Red HFC Generado por la Distribución de Contenidos Educativos para la Televisión Digital Interactiva



Tesis de Maestría
Ing. Wilmar Yesid Campo Muñoz

Director: Mag. Andrés Lara Silva

Universidad del Cauca
Instituto de Postgrados en Electrónica y Telecomunicaciones
Maestría en Ingeniería, Área Ingeniería Telemática
Departamento de Telemática
Línea de Investigación en Servicios Avanzados de Telecomunicaciones
Popayán, Junio de 2009

*A Dios por sus bendiciones recibidas,
A mi Madre Lilia Muñoz, por ser el claro ejemplo de tenacidad,
lucha y responsabilidad, motor de mis sueños.
A mi familia, por su apoyo incondicional.*

Agradecimientos

Agradecimientos a mi tutor Ingeniero Andrés Lara, por brindarme su confianza para realizar mis estudios de Maestría, y contar siempre con su apoyo en cada uno de los procesos dentro de la Universidad del Cauca. Al Doctor Roberto García Fernández, profesor titular del Departamento de Informática de la Universidad de Oviedo (España), por sus valiosos aportes que contribuyeron en la realización de este trabajo. A todos los compañeros del Departamento de Telemática, por hacerme sentir miembro de una familia, compartiendo un cálido ambiente de trabajo.

Agradecer de manera especial al Ingeniero Víctor Manuel Mondragon, quien gracias a su liderazgo logro la aprobación del Proyecto EDiTV donde desarrolle mi trabajo de Maestría, y me brindo la posibilidad de realizar mi pasantía en la Universidad de Oviedo. Además de su apoyo incondicional durante mi estancia en Gijón España.

Quiero extender mis agradecimientos al equipo de trabajo del Proyecto EDiTV. Doy las gracias a mis amigos de Maestría, especialmente a Juan Pablo Amaya, Juan Carlos Arteaga, Franco Urbano, Natalia Maya, Eva Maya y Armando Ordoñez por su valiosa amistad.

Tabla de Contenido

Capítulo 1	1
Introducción	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Motivación	2
1.3 Planteamiento del problema.....	2
1.4 Objetivos y alcance del trabajo de grado	3
1.5 Antecedentes.....	4
1.5.1 Antecedentes de Tráfico sobre redes HFC	4
1.5.2 Antecedentes sobre DOCSIS.....	6
1.6 Estructura del trabajo de grado	11
Capítulo 2	13
Diseño y Generación de Contenidos de TDi para una red HFC.....	13
2.1 Tecnologías de la Televisión Digital Interactiva.....	13
2.1.1 DVB-C.....	13
2.1.2 DOCSIS.....	18
2.2 Parámetros de Desempeño de las redes HFC.....	26
2.2.1 Parámetros de desempeño en el canal interactivo.....	26
2.2.2 Parámetros de desempeño en el canal de difusión.....	27
2.3 Infraestructura tecnológica del laboratorio de EDiTV de la Universidad del Cauca	27
2.3.1 Análisis de Requerimientos Hardware	28
2.3.2 Infraestructura del Laboratorio de EDiTV.....	29
2.3.3 Análisis y Diseño de la Aplicación EDiTV	31
2.3.4 Curso Piloto	32
2.4 Construcción de Contenidos de EDiTV	35
2.5 Componentes de los Contenidos de EDiTV	35
2.5.1 Audio y Video	37
2.5.2 Gráficos	37
2.5.3 Texto.....	38
2.5.4 Otros Formatos	38
2.5.5 Transporte de contenidos.....	39
2.6 Aportes y conclusiones de este capítulo.....	39
Capítulo 3	41
Ingeniería de Tráfico	41
3.1 Ingeniería de Tráfico.....	41
3.1.1 Escenario de Pruebas - Laboratorio de ITV en la Universidad de Oviedo.	41
3.1.2 Capturas de Tráfico en el Laboratorio de la Universidad de Oviedo.....	42

3.1.3	Análisis de datos de VoD sobre el canal descendente de la red HFC.....	43
3.1.4	Modelo Matemático de VoD sobre el canal descendente de la red HFC.....	45
3.1.5	Escenario de Pruebas - Laboratorio de EDiTV en la Universidad del Cauca.....	54
3.2	Aportes y conclusiones de este capítulo.....	55
Capítulo 4	57
Simulación del Modelo de Tráfico		57
4.1	Construcción del modelo de Simulación.....	57
4.2	Construcción del modelo de Simulación bajo OPNET Modeler.....	57
4.2.1	Aplicaciones	58
4.2.2	Perfiles.....	58
4.2.3	Tareas	59
4.2.4	Fases	60
4.3	Extrapolación del modelo Matemático para el desarrollo del modelo de simulación de las aplicaciones de VoD	61
4.3.1	Definiendo Tareas	62
4.3.2	Definiendo Fases	62
4.3.3	Programación del Modulo STB sobre OPNET Modeler	63
4.3.4	Validación del Modelo Simulado para el laboratorio de ITV.....	64
4.4	Validación del Modelo Simulado para las aplicaciones de EDiTV	67
4.5	Aportes y conclusiones de este capítulo.....	68
Capítulo 5	69
Evaluación de la red HFC		69
5.1	Análisis de Desempeño de las aplicaciones de TDi en redes DOCSIS.....	69
5.1.1	Configuración Básica de DOCSIS.....	69
5.1.2	Medidas de tráfico para VoD.....	70
5.2	Medidas de tráfico para las aplicaciones de EDiTV en conjunto con VoD	79
5.2.1	Escenario completo	79
5.2.2	Efectos de la variación del tiempo entre MAP sobre la transmisión de aplicaciones de TDi.....	80
5.2.3	Efectos de Concatenación y Fragmentación para el retardo sobre la red HFC.....	83
5.2.4	Efectos del Piggybacking sobre la red HFC	84
5.3	Desempeño de la red HFC en presencia de otras aplicaciones	87
5.3.1	Asignación de otras Aplicaciones al escenario Completo	88
5.3.2	Asignación de flujos de servicio a las Aplicaciones de TDi.....	89
5.4	Aportes y conclusiones de este capítulo.....	92
Capítulo 6	94
Conclusiones y Trabajos Futuros		94
6.1	Conclusiones	94
6.2	Aportes.....	96
6.3	Publicaciones	98
6.4	Trabajos futuros	98
Referencias	100

Lista de Figuras

Figura 1. Tráfico IP a través del sistema de datos sobre cable	6
Figura 2. Estándar ETSI 300 429: Diagrama de Bloques de transmisión del estándar DVB-C (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998)	14
Figura 3. Diagrama Esquemático del Aleatorizador (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998).....	15
Figura 4. Diagrama conceptual del entrelazado y desentrelazado convolucional (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998).16	
Figura 5. Mapeado de Bytes a Símbolos (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998)	17
Figura 6. Característica de Amplitud del filtro “Half-Nyquist”(ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998)	17
Figura 7. Constelación 16 QAM	18
Figura 8. Velocidades de transmisión EN 300 429	18
Figura 9. Pila de protocolos en la interfaz RF (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998).....	19
Figura 10. Arquitectura de referencia de datos por cable R.J112 (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998)	20
Figura 11. Pila de protocolos DOCSIS (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998).....	21
Figura 12. Lógica del subnivel MAC en DOCSIS	23
Figura 13. Distribución de celdas en canales DOCSIS (CableLabs, 2006).....	24
Figura 14. Cadena extremo a extremo de la TDi	28
Figura 15. Diagrama de Despliegue – Laboratorio experimental de EDiTV.....	30
Figura 16. Arquitectura Software de la Aplicación	32
Figura 17. Diagrama de Despliegue aplicación piloto	33
Figura 18. Diagrama de Clases Curso Piloto	33
Figura 19. Diagrama de Colaboración Sección Introducción.....	35
Figura 20. Arquitectura de TDi	36
Figura 21. Tecnologías en TDi	36
Figura 22. Red del laboratorio de ITV- Universidad de Oviedo	42
Figura 23. Tráfico de VoD	42
Figura 24. Capturas de tráfico para diferentes calidades de VoD	44
Figura 25. Proceso para la obtención del modelo matemático de Vod	45
Figura 26. Tamaño de los Paquetes.....	46
Figura 27. Comportamiento a ráfagas del tráfico.....	48
Figura 28. Histograma versus Función de densidad de probabilidad de Laplace.....	49
Figura 29. Histograma versus Función de densidad de probabilidad Lógica.....	49
Figura 30. Histograma versus Función de densidad de probabilidad Gamma	50
Figura 31. Histograma versus Función de densidad de probabilidad de Laplace.....	50
Figura 32. Histograma versus Función de densidad de probabilidad de Chi- Cuadrado	51
Figura 33. Histograma versus Función de densidad de probabilidad Normal.....	51
Figura 34. Tiempo entre ráfagas versus Función de densidad de probabilidad Normal.....	52
Figura 35. Tiempo entre ráfagas para A32V528 versus Función de densidad de probabilidad Normal	52
Figura 36. Tiempo entre ráfagas para A32V1008 versus Función de densidad de probabilidad Normal	53
Figura 37. Tiempo entre ráfagas para A64V144 versus Función de densidad de probabilidad Normal	53
Figura 38. Tiempo entre ráfagas para A64V528 versus Función de densidad de probabilidad Normal	53
Figura 39. Tiempo entre ráfagas para A64V1008 versus Función de densidad de probabilidad Normal	54
Figura 40. Arquitectura de las aplicaciones en OPNET	57
Figura 41. Arquitectura de red básica	58
Figura 42. Creación de aplicaciones	59
Figura 43. Creación de Perfiles	59
Figura 44. Creación de tareas.....	60
Figura 45. Creación de fases.....	60
Figura 46. Modelado de las tareas de VoD.....	62
Figura 47. Escenario básico para verificación del modelo simulado	64
Figura 48. Validación de las fases.....	65
Figura 49. Validación del tamaño de los paquetes.....	65

Figura 50. Tamaño de las ráfagas en Wireshark.....	66
Figura 51. Validación del tiempo y número de de ejecuciones.....	66
Figura 52. Comparación del tiempo entre peticiones	67
Figura 53. Comparación del tiempo de inicio de respuesta	67
Figura 54. Retardo streaming uno	71
Figura 55. Tráfico sobre los streaming uno, dos y tres.....	72
Figura 56. Retardo sobre los streaming uno, dos y tres.....	72
Figura 57. Throughput streaming uno, dos y tres	73
Figura 58. Tráfico de los streaming cuatro, cinco y seis	73
Figura 59. Retardo sobre los streaming cuatro, cinco y seis	74
Figura 60. Throughput streaming cuatro, cinco y seis.....	74
Figura 61. Retardo sobre los streaming uno, dos, tres, cuatro, cinco y seis	75
Figura 62. Razón de pérdida de paquetes y BER	76
Figura 63. Throughput streaming uno, dos, tres, cuatro, cinco y seis.....	76
Figura 64. Tráfico Custom Application	77
Figura 65. Throughput para catorce usuarios	78
Figura 66. Retardo para catorce usuarios.....	78
Figura 67. Throughput escenario completo	79
Figura 68. Retardo escenario completo	80
Figura 69. Log para tiempo entre MAP de 5 ms	81
Figura 70. Throughput para diferentes tiempos entre MAP	81
Figura 71. Retardo para diferentes tiempos entre MAP	82
Figura 72. Retardo para tiempos entre MAP de 5 ms	82
Figura 73. Retardo DOCSIS con/sin, concatenación y fragmentación	83
Figura 74. Retardo TDi con/sin concatenación y fragmentación	84
Figura 75. Efectos del Piggybacking.....	85
Figura 76. Tráfico ITV con Piggybacking	85
Figura 77. Piggybacking vs Concatenación	86
Figura 78. Retardo con Piggibacking y concatenación habilitados.....	86
Figura 79. Tráfico TDi con Piggibacking y concatenación habilitados	87
Figura 80. Throughput con otras aplicaciones agregadas	88
Figura 81. Retardo TDi con otras aplicaciones agregadas	89
Figura 82. Efectos de la variación de los flujos de servicio sobre el retardo TDi.....	89
Figura 83. Efectos de la variación de los flujos de servicio sobre el throughput.....	90
Figura 84. Efectos de la variación de los flujos de servicio sobre http	90
Figura 85. Efectos de la variación de los flujos de servicio sobre FTP	91
Figura 86. Efectos de la variación de los flujos de servicio sobre VoIP	92

Lista de Tablas

Tabla 1. Especificaciones de la capa física en DOCSIS	21
Tabla 2. Downstream Interleaver Delay en microsegundos (μ s)	22
Tabla 3. Parámetros de nivel de transporte para una adecuada QoS en TD.....	27
Tabla 4. Elementos HW para el laboratorio de TDi	31
Tabla 5. Parámetros para la distribución de Laplace.....	52
Tabla 6. Parámetros para la distribución Normal.....	54
Tabla 7. Tamaño de las solicitudes, respuestas y archivos (XML e imagen) para las aplicaciones de TDi	55
Tabla 8. Parámetros de cada Fase	61
Tabla 9. Parámetros de Modelado de paquetes en la Fase de conexión	62
Tabla 10. Parámetros de Modelado de paquetes en la Fase de Streaming	62
Tabla 11. Parámetros de Modelado de paquetes en la Fase de Desconexión	63
Tabla 12. Parámetros TCP/IP STB	63
Tabla 13. Configuración básica de DOCSIS	69
Tabla 14. Perfiles de usuario para los servicios HTTP, FTP y VoIP	88
Tabla 15. Parámetros DOCSIS para la simulación de tráfico TDi, HTTP, FTP y VoIP	88
Tabla 16. Parámetros de configuración encontrados para la red HFC, soportando aplicaciones de TDi.....	92

LISTA DE ACRÓNIMOS

ACK:	<i>Acknowledgement (acuse de recibo)</i>
API:	<i>Application Programming Interface (Interfaz de Programación de Aplicaciones)</i>
ASK:	<i>Amplitude Shift Keying (Modulación por Desplazamiento en Amplitud)</i>
BE:	<i>Best Effort (Mejor Esfuerzo)</i>
BER:	<i>Bit Error Rate (Tasa de Bits Erróneos)</i>
BMP:	<i>bitmap</i>
CATV:	<i>Community Antenna Television (Televisión por Cable)</i>
CDF:	<i>cumulative density function</i>
CM:	<i>Cable Modem (Módem de Cable)</i>
CMTS:	<i>Cable Modem Termination System (Sistema de Terminación de Módem de Cable)</i>
CMCI:	<i>Cable-Modem-to-Customer-Premises-Equipment</i>
CNTV:	<i>Comisión Nacional de Televisión</i>
COFDM:	<i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal Codificada)</i>
CRA:	<i>Contention Resolution Algorithm (Algoritmo de Resolución de Contienda)</i>
CS:	<i>Contention Slots</i>
DBE:	<i>Data Backoff End</i>
DBS:	<i>Data Backoff Start</i>
DHCP:	<i>Dynamic Host Configuration Protocol (Protocolo de Configuración Dinámica de Anfitrión)</i>
DOCSIS:	<i>Data Over Cable Service Interface Specifications (Especificaciones de la Interfaz del Servicio de Datos Sobre Cable)</i>
DSL:	<i>Digital Subscriber Line (Línea Digital de Abonado)</i>
DSMCC:	<i>Digital Storage Media Command and Control</i>
DSP:	<i>Digital Signal Processor</i>
DUGS:	<i>Dynamic Unsolicited Grant Service</i>
DVB:	<i>Digital Video Broadcasting (Difusión de Video digital)</i>
DVB-C:	<i>DVB-Cable</i>
DVB-J:	<i>DVB-Java</i>
DVB-T:	<i>DVB-Terrestrial</i>
DVB-H:	<i>DBV-Handheld</i>
EDiTV:	<i>Educación Virtual Basada En Televisión Interactiva Para Apoyar Procesos Educativos A Distancia</i>
EPG:	<i>Electronic Program Guide (Guía Electrónica de Programas)</i>
ES:	<i>Elementary Stream</i>
ETSI:	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FDMA:	<i>Frequency Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División en Frecuencia)</i>
FEC:	<i>Forward Error Correction (Corrección de Errores Hacia Adelante).</i>
FIFO:	<i>Firts in, Firts out</i>
FPGA:	<i>Field Programmable Gate Array</i>
F-TBEB:	<i>Frame-based en TBEB</i>
FTP:	<i>File Transfer Protocol (Protocolo de Transferencia de Archivos)</i>
FTTx:	<i>Fiber to the any (Fibra hasta cualquier ubicación)</i>
GIF:	<i>Graphics Interchange Format</i>
HFC:	<i>Hybrid Fiber – Coaxial (Hibrido de Fibra y Coaxial)</i>
HTTP:	<i>HyperText Transfer Protocol (Protocolo de Transferencia de Hipertexto)</i>
IE:	<i>Information Elements</i>
IEC:	<i>International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional)</i>
IEEE:	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)</i>
IP:	<i>Internet Protocol (Protocolo de Internet)</i>
IPTV:	<i>Internet Protocol Television (Protocolo de Televisión por Internet)</i>
ISDB:	<i>Integrated Services Digital Broadcasting (Difusión Digital de Servicios Integrados)</i>

ISO:	<i>International Organization for Standardization (Organización Internacional de Estandarización)</i>
ITU:	<i>International Telecommunications Union (Unión Internacional de Telecomunicaciones)</i>
ITV:	<i>Interactive Television (Televisión Interactiva)</i>
JMF:	<i>Java Media Framework</i>
JPEG:	<i>Joint Photographic Experts Group</i>
LLC:	<i>Logical Link Control (Control de enlace lógico)</i>
MAC:	<i>Media Access Control (Control de Acceso al Medio)</i>
MHP:	<i>Multimedia Home Protocol</i>
MPEG:	<i>Moving Pictures Experts Group (Grupo de expertos en video)</i>
MPLS:	<i>Multiprotocol Label Switching</i>
NIT:	<i>Network Information Table (Tabla de Información de la Red)</i>
nrtPS:	<i>non-real-time Polling Service) (Servicio de Interrogación Secuencial No en Tiempo real)</i>
NSI:	<i>Network Side Interface</i>
NTSC:	<i>National Television Systems Committee (Comité del Sistema de Televisión Nacional)</i>
PAL:	<i>Phase Alternate Line (Línea de Fase Alternada)</i>
PAT:	<i>Program Association Table (Tabla de Asociación de Programa)</i>
PC:	<i>Personal Computer (Computador Personal)</i>
PES:	<i>Packetized Elementary Stream (Flujo Elemental Paquetizado)</i>
PID:	<i>Packet Id (Identificador de Paquete)</i>
PMD:	<i>Physical Media Dependent (Dependiente del Medio Físico)</i>
PMT:	<i>Program Mapping Table (Tabla de Mapeo de Programa)</i>
PNG:	<i>Portable Network Graphics</i>
PPV:	<i>Pay Per View (Pago por Ver)</i>
PRBS:	<i>Pseudo random Binary Sequence</i>
PRC:	<i>Program Clock Reference (Referencia del Reloj de Programa),</i>
PSI:	<i>Program Specific Information (Información Específica de Programa)</i>
QAM:	<i>Quadrature Amplitude Modulation (Modulación de Amplitud en Cuadratura)</i>
QoS:	<i>Quality of Service (Calidad de Servicio)</i>
QPSK:	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RGB:	<i>Red, Green, Blue</i>
RS:	<i>Reed-Solomon</i>
rtPS:	<i>real-time Polling Service (Servicio de Interrogación Secuencial en Tiempo Real)</i>
RTT:	<i>Round Trip Time</i>
SDT:	<i>Service Description Table (Tabla de Descripción del Servicio)</i>
SDTV:	<i>Standard Definition Television (Televisión de Definición Estándar)</i>
SID:	<i>Service Identifier (Identificador de Servicio)</i>
SNMP:	<i>Simple Network Management Protocol (Protocolo Simple de Gestión de Red)</i>
STB:	<i>Set Top Box (Decodificador de Usuario Final)</i>
TBEB:	<i>Truncated Binary Exponential Backoff</i>
TC:	<i>Transmission Convergence (Convergencia de la Transmisión)</i>
TCP:	<i>Transmission-Control Protocol (Protocolo de Control de la Transmisión)</i>
TD:	<i>Televisión Digital</i>
TDi:	<i>Televisión Digital Interactiva</i>
TDM:	<i>Time División Multiplexing (Multiplexación por División de Tiempo)</i>
TDMA:	<i>Time Division Multiple Access (Acceso Múltiple por División de Tiempo)</i>
TDT:	<i>Time and Data Table (Tabla de Fecha y Tiempo)</i>
TDT:	<i>Televisión Digital Terrestre</i>
TFTP:	<i>Trivial File Transfer Protocol (Protocolo de Transferencia de Archivos Trivial)</i>
TIC:	<i>Tecnologías de Información y Comunicación</i>
TIFF:	<i>Tagged Image File Format</i>
TS:	<i>Transport Stream (Flujo de Transporte)</i>
TV:	<i>Televisión</i>
UGS:	<i>Unsolicited Grant Service (Servicio de Concesión No Solicitada)</i>
UGS-AD:	<i>Unsolicited Grant Service with Activity Detection (Servicio de Concesión No Solicitada con Detección de Actividad)</i>

UMTS:	<i>Universal Mobile Telecommunications System (Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universal).</i>
VBR:	<i>Variable Bit Rate</i>
VoD:	<i>Video on Demand (Video bajo demanda)</i>
VoIP:	<i>Voice over IP (Voz sobre IP)</i>
xDSL:	<i>Any Digital Subscriber Line (Cualquier Línea Digital de Abonado)</i>
XML:	<i>Extensible Markup Language (Lenguaje de Marcado Extendido)</i>

Capítulo 1

Introducción

1.1 Contexto

Sin duda uno de los hitos más relevantes en el desarrollo de la televisión (TV) ha sido el desarrollo de la Televisión Digital (TD). Su importancia y repercusión es comparable a la introducción de la televisión a color e incluso al comienzo de las transmisiones de televisión a través de satélite (Televés, 2006). En Colombia dicho hito empieza a hacerse realidad el 28 de agosto de 2008 cuando La Comisión Nacional de Televisión escogió el estándar de televisión digital terrestre desarrollado por Europa (DVB-T Digital Video Broadcasting Terrestrial) para Colombia (CNTV, 2008).

La puesta en escena de la TD ha sido posible gracias a las nuevas tecnologías de tratamiento digital de la señal. Propiciadas por el desarrollo de nuevos estándares de codificación, transmisión compresión y producción de contenidos audiovisuales digitales que pasan a convertir al espectador en un agente activo e incluso interactivo. Esta nueva tecnología está llamada a revolucionar el mundo de la televisión y el concepto que hoy en día se tiene sobre ella.

La TD, inicialmente se ha concebido para propósitos de entretenimiento pero abre la posibilidad de varias formas de interactividad convirtiéndose en una verdadera oportunidad de aprendizaje, formando parte de la sociedad de la información. En este sentido, se espera que las redes de computadores unidas con las emisiones de TD, permitan el desarrollo de sistemas interactivos que se puedan aplicar tanto en la vida cotidiana como en la educación formal y no formal (González, 2008). En Latinoamérica incluso en Europa la penetración de la TV es mucho mayor comparada con la penetración alcanzada por computadores conectados a Internet; por lo tanto la exploración de la Televisión Digital Interactiva (TDi) constituye una alternativa para contribuir a solucionar las necesidades que demanda la sociedad de la información en el campo de la educación (Pulkkinen, 2006), particularmente en el caso regional debería potenciar el acceso a la educación superior en las zonas menos favorecidas.

Una de las arquitecturas de red de acceso que mejor se adapta a los requerimientos de ancho de banda de la TDi son las redes Híbridas Fibra Coaxial (HFC, Hybrid Fiber Coaxial). Los operadores de cable con el fin de brindar a los usuarios más ancho de banda y con la disminución en el costo de la fibra óptica, tienden a reemplazar porciones de cable coaxial por fibra óptica para conseguir las ventajas de una mayor calidad, flexibilidad, alcance y eficiencia de la tecnología óptica (García R. , 2005), en las que se hace posible la creación de topologías de red susceptibles de transportar señales bidireccionales.

Los modelos de tráfico son fundamentales para la evaluación del rendimiento en las redes de telecomunicaciones. Una estimación precisa del rendimiento de la red es crítica para el éxito de la implantación de la redes de banda ancha. Tales redes necesitan garantizar un nivel aceptable de Calidad de Servicio (QoS) a los usuarios, por consiguiente, los modelos de tráfico necesitan ser precisos y capaces de capturar las características estadísticas del mismo (García R. , 2005). Un modelo de tráfico solo puede considerarse correcto si las técnicas de inferencia estadística utilizadas sobre trazas de tráfico real permiten concluir que estas muestras son consistentes con el modelo.

Para estudiar el tráfico, esto es, la medida de la demanda que los usuarios de una red de comunicaciones imponen sobre sus recursos, se utilizan modelos matemáticos del comportamiento de los usuarios. En particular, se representan los patrones de llegada de las demandas que los usuarios producen, donde estas demandas se pueden medir en términos de paquetes, celdas, llamadas, bits, o cualquier otra unidad de información adecuada (Alzate, 2001). Además, cualquier modificación realizada en el entorno del servicio real es especialmente delicada, en caso de cometer algún error en esta fase, la experiencia de los usuarios puede verse afectada negativamente o, en el peor de los casos, puede provocar la caída del servicio.

El entorno general de la tesis de maestría es el análisis de tráfico orientado al estudio de las redes de acceso por cable basadas en tecnologías HFC capaz de soportar contenidos educativos a través de la TDi. Sumado a lo anterior, el análisis de tráfico para una red HFC generado por la distribución de contenidos educativos para la TDi impone nuevos desafíos a nivel de modelos matemáticos y prestaciones de la redes HFC, además del conocimiento de cómo los procesos de educación a través del televisor (t-learning) deben ser diseñados, desplegados y mantenidos.

1.2 Motivación

El acceso a los computadores es el principal problema de las TIC¹, más del 50% de la población mundial no tiene acceso a Internet. Además los cursos por Internet en general tienen el inconveniente de la descarga de archivos audiovisuales debido a su tamaño. Otro problema ha sido la dificultad para entregar video de alta calidad y ajustarlo a las preferencias del usuario (Arreniemi, 2006).

La TDi busca reducir los problemas existentes en las zonas apartadas donde el acceso a Internet es muy limitado o interrumpido, presentándose la televisión como el representante más importante de las TIC antes que el computador, proporcionando un inmenso beneficio a una población que no tiene más alternativas. Esto debe conducir a una integración de medios para ofrecer un abanico de oportunidades para llevar procesos de enseñanza-aprendizaje a distancia. Actualmente existen proyectos que apuestan a una fusión entre la educación y la TDi surgiendo el T-learning como el aprendizaje interactivo a través del TV (Dosi, 2004) (diSessa, 2004). Por lo tanto, la TDi debe permitir el aprovechamiento de la infraestructura tecnológica propia de estas redes teniendo en cuenta el alto grado de penetración de la televisión, reduciendo así las diferencias y desigualdades, entre regiones rurales y urbanas, optimizando el uso de las infraestructuras tecnológicas que permiten disminuir la brecha digital y mejorar la calidad de vida de la sociedad.

La TDi permitirá integrarse a los nuevos modelos de negocio que propone la llamada sociedad de la información debido a: el potencial de crecimiento que presenta a nivel mundial, la alta penetración de las redes de cable y la enorme contribución que puede representar en países en desarrollo como el nuestro. En este sentido, los gobiernos no quieren que sus regiones pierdan competitividad en un mercado en el cual las fronteras geográficas tienden a desaparecer, siendo la TDi una posible vía de mejorar su posición competitiva.

Es clara la importancia de generar proyectos de investigación en torno al análisis de tráfico para el servicio de TDi, dada la inminente implantación en Colombia. La ingeniería de tráfico para la TDi, permitirá analizar, evaluar y obtener, las condiciones necesarias para la implementación del servicio de educación a través del televisor o T-learning en entornos reales, garantizando que la red de acceso soporte diferentes números de usuarios con distintos requerimientos de información. Con lo cual se proporcionará un completo análisis del desempeño de la red de acceso HFC para la distribución de contenidos de TDi.

Así, esta investigación permite obtener el conocimiento sobre las redes HFC ampliamente distribuidas en nuestro país, para adaptar y generar soluciones para el 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 TDi. 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. Además, permite 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 servicio de TDi, brindando los cimientos en este tipo de redes y servicios para la evaluación de mecanismos de interfuncionamiento con otras redes, pruebas de conformidad e interoperabilidad de los protocolos.

1.3 Planteamiento del problema

De forma concreta, el presente trabajo de grado pretende resolver el siguiente interrogante: ¿Cuáles son las condiciones de tráfico que debe soportar una red HFC capaz de brindar las funcionalidades mínimas de la TDi?

¹ TIC: Tecnologías de información y comunicación

Un sistema de TDi requiere arquitecturas de red capaces de manejar grandes anchos de banda como aspecto de vital importancia para la interactividad que marca la experiencia del usuario final. Esto será cada vez más evidente con la aparición de nuevos servicios. El inconveniente principal de estos nuevos servicios es el elevado consumo de recursos necesarios para su procesamiento y transmisión. La evolución tecnológica ha permitido incrementar el ancho de banda de las tecnologías utilizadas para la transmisión y de los recursos disponibles. Sin embargo, este incremento también sucederá en la parte de los usuarios debido a la alta penetración que se espera para la TD, provocando que este elevado consumo de recursos sea un factor de especial relevancia. Además, los administradores ofrecerán cada día contenidos de mayor calidad, adaptados a las nuevas líneas de los usuarios, provocando un incremento en el consumo de ancho de banda, los servicios que debe soportar la TDi dependerán en gran medida del comportamiento de los usuarios.

Otro aspecto relevante en el rendimiento de las redes de cable es el protocolo de acceso al medio compartido que utilizan. Después de varias propuestas por parte del ITU-T, los operadores de cable han optado por el protocolo DOCSIS (Data-Over-Cable Service Interface Specifications), que define las especificaciones de radio frecuencia para sistemas de alta velocidad sobre redes de cable. Las recientes versiones de DOCSIS han sido mejoradas con la inclusión de características QoS para soportar los requerimientos del tráfico en tiempo real.

Actualmente no existen estudio de teletráfico sobre redes HFC para la TDi, que brinden información sobre las características diferenciadoras que presenta el tráfico generado por este tipo de servicios, o los patrones de llegada de las demandas que los usuarios imponen sobre los recursos de la red, tampoco existen modelos de red que permitan dimensionar la infraestructura de red HFC capaz de brindar soporte al comportamiento real del sistema, ante diferentes escenarios. Esto es, diferente número de usuarios con distintos requerimientos de solicitud de información.

Los estudios no se pueden realizar sobre un servicio implementado, ya sea para evaluar nuevas soluciones o para recopilar información sobre el funcionamiento, por no existir en Colombia redes desplegadas para prestar el servicio de TDi. Surge entonces la necesidad del uso de herramientas de simulación que aprovechan las capacidades de cálculo de los computadores actuales, la herramienta de simulación OPNET Modeler² se utiliza para el desarrollo de este trabajo, gracias a las siguientes características: la gran variedad de dispositivos disponibles, la posibilidad de modificar y crear nuevos elementos y el tratamiento gráfico de los resultados. Además, OPNET Modeler posee una extensa librería de protocolos entre los que se incluye la especificación DOCSIS (Sienra L. G., 2001) (Data Over Cable Service Interface Specifications) para redes HFC y brinda la posibilidad de controlar los modelos existentes y diseñar nuevos dispositivos mediante la programación con C/C++ de máquinas de estados finitos para dotar de funcionalidad a los nodos.

1.4 Objetivos y alcance del trabajo de grado

El propósito de este trabajo de grado es caracterizar el tráfico generado por la distribución de contenidos educativos que debe soportar una red HFC para brindar las funcionalidades básicas de la TDi. En este sentido se analiza las características del tráfico intercambiado a través de eventos³ en la red HFC que permitan conocer los diferentes parámetros de desempeño que caracterizan el servicio de TDi. Definiendo o adaptando un modelo de tráfico que refleje el uso que los usuarios del sistema hacen del servicio. La validez y utilidad del modelo que se desarrolle dependen enteramente de cuan satisfactorio es el modelo y no de lo altamente sofisticado que puedan llegar a ser los conceptos matemáticos empleados. Así, se pretende que éste capture las principales características estadísticas del tráfico, que permita la optimización en el uso de los recursos en la red HFC, al tiempo que se garantice una calidad de los servicio de TDi.

El rendimiento de la red se evalúa ante el constante aumento de usuarios y tráfico, mediante simulaciones que respondan al funcionamiento del sistema real. Finalmente se valida el modelo de tráfico contrastando los datos obtenidos en la simulación con los datos reales del laboratorio. Donde un modelo de tráfico solo puede considerarse correcto si las técnicas de inferencia estadística utilizadas sobre trazas de tráfico real permiten

² OPNET Modeler: página oficial <http://www.opnet.com>

³ Evento: en el contexto de la TDi es lo que en lenguaje coloquial se conoce como un “programa de televisión”. En cada evento pueden existir varios flujos de video, audio o datos binarios codificados.

concluir que estas muestras de tráfico son consistentes con el modelo. El hecho de que estadísticamente se pueda encontrar consistencia entre un modelo y una traza muestral no significa que no existan otros modelos que se ajusten igualmente bien (o mejor).

En cuanto al alcance del presente trabajo de grado, es importante tener en cuenta que un Análisis de Tráfico para una Red HFC Generado por la Distribución de Contenidos Educativos para la Televisión Digital Interactiva en el contexto colombiano, implica el estudio de diversos factores de tipo tecnológico, económico, social, cultural, comercial e incluso legal acorde a los retos que plantea la nueva economía de la sociedad de la información. Este proyecto se enfoca en el contexto tecnológico.

En esta tesis se propone un modelo de tráfico a partir de la caracterización de las trazas de tráfico generado por aplicaciones interactivas de educación, capturadas en los laboratorios de la Universidad de Oviedo - España y la Universidad del Cauca. Se analiza el tráfico en la red y el comportamiento de sus prestaciones ante diferentes escenarios, en los que se quiera evaluar su rendimiento y cuyo análisis de resultados evite los costos asociados al despliegue de grandes infraestructuras de red.

1.5 Antecedentes

A continuación se describen los trabajos de otros investigadores relacionados con las características propias del escenario en el que se enmarca el presente trabajo de investigación con respecto a la tecnología utilizada. Para un mejor entendimiento se han clasificado los trabajos en dos grandes grupos sin ser excluyentes, el primer grupo relacionado con modelos de tráfico, el siguiente relacionado con el protocolo de acceso al medio DOCSIS.

1.5.1 Antecedentes de Tráfico sobre redes HFC

A continuación se presentan trabajos de investigación de utilidad para el desarrollo del trabajo de grado, mostrando que no se han encontrado publicaciones que aborden el estudio en un campo tan específico como es el de la evaluación de prestaciones y modelado de tráfico para redes de acceso HFC para la transmisión de contenidos educativos sobre un sistema de televisión digital con capacidades de interactividad.

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 (García R. , 2005): El trabajo presentado en esta tesis doctoral se enmarca dentro del campo de la evaluación de prestaciones de los sistemas de telecomunicaciones. El objetivo de esta tesis doctoral es modelar una red de acceso FTTx para transmisión de voz y datos, considerando aspectos relacionados a la implementación de diferentes calidades de servicio, y luego la verificación y validación de los resultados obtenidos. Puesto que el protocolo de acceso al medio más extendido en este tipo de redes es el protocolo DOCSIS, fue realizado un exhaustivo análisis del protocolo a partir de sus estándares. En este estudio se ha considerado la transmisión de voz (VoIP) y de datos. Los resultados teóricos han sido complementados con simulaciones de diferentes escenarios que avalan los cálculos realizados. Finalmente, se ha realizado un modelo de un servicio de video bajo demanda sobre redes de cable. La simulación del modelo del servicio sobre el modelo de red permitió la evaluación de las prestaciones de ambos, además de prever su comportamiento y rendimiento ante situaciones diversas, distintas del funcionamiento habitual. El autor presenta un artículo titulado **Aggregated traffic generation in FTTx networks** (García R. , García, Pañeda, Melendi, & Neira, 2004), donde se presentan los resultados del anterior trabajo, aquí se presenta el modelo de tráfico generado en una red FTTx para la transmisión de voz y datos. Para esto se hizo un modelo de tráfico que representaba el uso que los suscriptores de la red hacen del sistema, permitiendo la generación de las solicitudes enviadas por los usuarios que están conectados a los canales de retorno. Los resultados obtenidos en estos procesos pueden ser validados utilizando los datos reales proporcionados por un operador de cable FTTx. Para la realización del modelo, se usó el lenguaje de simulación OPNET. Además, los resultados fueron exportados a MATLAB, para realizar el análisis estadístico, con el fin de verificar los resultados y validar el modelo.

A simple analytical model to estimate VoIP signaling delays in an HFC access network (Rege & Sun, 2005): Este trabajo partió del hecho que los servicios de Voz sobre IP (VoIP, Voice over IP) están surgiendo como una prometedora oportunidad de negocio para los Operadores de Sistemas Múltiples (MSO, Multiple System Operators). El retardo de la señalización es uno de los más importantes parámetros de calidad para los servicios de VoIP. Para los servicios de VoIP sobre redes con acceso por HFC, el retardo de contención experimentado por las

solicitudes asociadas a los paquetes de señalización a menudo dominan todo el retardo de señalización global. En este artículo, se presentó un sencillo método de análisis para caracterizar este retardo. El método de análisis combina un modelo de red de colas cerradas con una saturación del modelo para la caracterización del retardo de contención. La media de los retardos que se obtuvieron mediante este método se compararon con los resultados de una simulación.

Modelado de prestaciones de Redes de área metropolitana para la transmisión de datos, basadas en tecnología hibrida fibra-coaxial (García M. , 2002): El trabajo presentado en esta tesis doctoral desarrolla un modelo de simulación de red de cable basada en tecnología HFC, particularizando el estudio para el uso de esta red de cable en la transmisión de datos que permite predecir sus prestaciones. El autor presenta dos artículos: **Traffic Analysis of Data Transmission on Hybrid Fiber Coax Network** (García M. , García, García, & Bonis, 2002) y **Analysis and Modeling of Traffic on a Hybrid Fiber-Coax Network** (García M. , García, García, & Bonis, 2004), donde se presentan los resultados del trabajo de tesis doctoral. En el primero de ellos se describe el análisis de tráfico de la red de telecomunicaciones de un operador de cable ofreciendo servicios de datos, verificándose que la propiedad estadística de auto-similitud está presente en el flujo de datos descendente (downstream) y ascendente (upstream). El operador se basa en una red HFC utilizando la tecnología ATM. El análisis se basó en las mediciones de tráfico de toda la red HFC, tomadas en dos fechas diferentes, con aproximadamente un año de diferencia. El segundo artículo presenta el estudio realizado sobre el tráfico de datos recogidos en la red de un operador de cable basada en la tecnología HFC, y el posterior modelo de simulación desarrollado para predecir los requisitos de ancho de banda de los canales. El principal desafío de este modelo fue predecir el tráfico en cada uno de los canales de la red de cable, en relación con parámetros de configuración de la red, tales como el número de suscriptores asignados al canal y la hora del día.

Delay characterization of cable access networks (Barakat & Darcie, 2007): Este trabajo presenta una caracterización detallada del retardo en la transmisión en una red de acceso por cable. Se analizaron los datos obtenidos de las mediciones en redes de acceso operacionales, examinando tanto una carga moderada como una gran carga en la red de cable. Se encontró que el algoritmo de control de acceso al medio utilizado en redes de cable se traduce en un retraso de distribución multimodal, con medidas de retardos agrupados en torno a unos valores discretos. En una red de cable fuertemente cargada, una parte importante de los paquetes experimentaron retardos varias veces mayores que la media. Los resultados sugieren que la media del retardo es un mal indicador para medir el desempeño de las redes de cable, en especial cuando la red está muy cargada.

Análisis, modelado y configuración de servicios de video bajo demanda sobre redes de cable (García X. , 2004): Esta tesis doctoral se enmarca de forma general dentro del campo del análisis de prestaciones y calidad de servicio. Con este trabajo se consiguió el conocimiento y la herramienta que permite a los operadores de redes de cable predecir el impacto de estos novedosos servicios en sus redes y configurarlos de forma efectiva.

Transmisión de voz sobre IP en redes de cable (Martínez, 2005): El propósito de este proyecto fue modelar la implementación de la Telefonía IP en una red de cable FTTx. Para esto, inicialmente se hizo un estudio de las características de la transmisión de voz según las recomendaciones de la ITU-T. Luego, se diseñó una red FTTx similar a la topología física del operador TELECABLE, SAU, con el objetivo de transmitir VoIP sobre esta red y observar, por medio de la simulación con OPNET, las propiedades de transmisión (retardo, jitter, pérdida de paquetes, calidad de la transmisión, etc.).

En el ámbito nacional no se han encontrado estudios orientados al análisis de tráfico de redes HFC para la distribución de servicios de TDi. Algunos trabajos en áreas afines son: Análisis y Diseño de una Red HFC para la ciudad de Popayán, desarrollado por la Universidad del Cauca en el año 2002 (Vera, 2002), y los trabajos de grado desarrollados por la Universidad Industrial de Santander como son: “Estudio de Transmisión Digital en el Retorno para la aplicación de Redes HFC del Sistema de Televisión por Cable de TELEDINAMICA S. A” (Reyes, 2001) y “Estudio y Diseño del Procesamiento Digital de Señales para su uso en Aplicaciones del forward del sistema de Televisión por Cable de TELEDINAMICA S. A” (Reyes, 2002). Estos trabajos no consideran el modelado de tráfico interactivo generado por contenidos educativos, el segundo trabajo de la Universidad Industrial de Santander está orientado hacia el procesamiento de señales.

1.5.2 Antecedentes sobre DOCSIS

Se presenta una breve introducción al protocolo DOCSIS (Data-Over-Cable Service Interface Specifications), que permite abordar la revisión del estado del arte con mayor facilidad. En el capítulo dos se lo describe el detalle.

El protocolo DOCSIS propuesto permite 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. En la Figura 1 se ilustra esta situación.

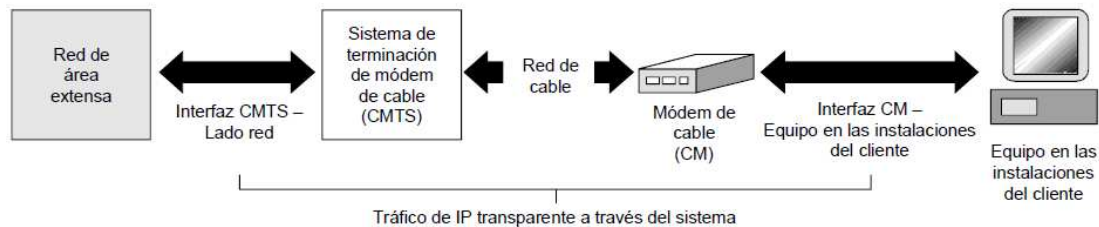


Figura 1. Tráfico IP a través del sistema de datos sobre cable

La transmisión por el sistema de cable es realizada en la cabecera por un Cable Modem Termination System (CMTS) y en cada localización del usuario por un Cable Modem (CM). En cabecera, la interfaz con el sistema de datos sobre cable se conoce como Cable Modem Termination System-Network-Side Interface (CMTS-NSI) y está especificada en (CableLabs C. T., 1996). En la parte del cliente, la interfaz se conoce como Cable-Modem-to-Customer-Premises-Equipment (CMCI) y está especificada en (CableLabs, 2003).

DOCSIS es el conjunto de estándares, aprobado por CableLabs, que garantiza la interoperabilidad de la tecnología cablemodem, con el objetivo de proporcionar acceso conmutado de datos en infraestructuras CATV (Community Antenna Television – Televisión por Cable) sobre redes HFC inicialmente diseñadas para el transporte de señales de televisión, y de ahí su fuerte asimetría.

En una red HFC los cables de fibra óptica se extienden desde el CMTS y los nodos de fibra, mientras que éstos se conectan a los Cable Modem (CM) por medio de cable de cobre, y de ahí su nombre de redes híbridas de cable de fibra óptica y el cable de cobre. El CMTS será el equipo que gestiona los CM, siendo estos últimos los que proporcionan a los usuarios el punto de acceso a la red.

En este apartado se pretende reflejar los trabajos por parte de la comunidad científica en la búsqueda de la configuración óptima de la arquitectura DOCSIS.

1.5.2.1 Evaluación del rendimiento de las redes HFC

La literatura científica parte de las bases tecnológicas aplicadas en DOCSIS, basada en la norma IEEE 802.14 y MCNS (Multimedia Cable Network System). En (Lin, Huang, & Yin, 1998) los autores muestran la importancia en cuanto a la asignación correcta de los valores de DBS-DBE (Data Backoff Start-Data Backoff End) en los mecanismos de acceso por contienda basados en el algoritmo TBEB (Truncated Binary Exponential Backoff), en relación al impacto que pueda obtenerse en el rendimiento de la red, sobre todo a grandes cargas de tráfico. En (Golmie, Mouveaux, & Su, 1999) se llevan a cabo diferentes mediciones de tasas de ocupación y retardo de acceso a los canales mediante simulación de tráfico y para diferentes valores de DBS-DBE. Las conclusiones del trabajo, obtienen que para los parámetros de carga definidos, los valores óptimos de la dupla anterior son (4,8). También se analizan numerosos aspectos de rendimiento en los artículos (Sdralia, Smythe, Tzerefos, & Cvetkovic, 1999), (Sdralia V. , Tzerefos, Cvetkovic, & Smythe, 2000 a), (Sdralia V., Tzerefos, Cvetkovic, & Smythe, 2000a), (Tzerefos, Sdralia, Smythe, & Cvetkovic, 1999) tales como el algoritmo de programación de ciclos por parte de los controladores por medio de FCFS (First Come First Serve), tolerancia y recuperación ante fallos de la primera versión de DOCSIS, y la eficiencia de envío de diferentes patrones de tráfico.

Uno de los primeros análisis de rendimiento de los niveles de QoS introducidos en la versión DOCSIS 1.1 se lleva a cabo en (Chandrasekaran, Hawa, & Petr, 2003), por medio de simulaciones OPNET se analiza en detalle el

rendimiento de los servicios de tipo Best Effort (BE) y Unsolicited Grant Service (UGS), así como las mejoras de rendimiento en relación al uso de las opciones de piggybacking, concatenación y fragmentación evaluadas para escenarios con diferentes cargas de tráfico. Los resultados obtenidos muestran que a medida que se aumenta el número de Cable Modems (CMs) en la red descargando datos, el número de peticiones que se cursan por el método de contienda aumentan. En el caso particular del estudio, el límite en el que el número de peticiones por contienda supera a las piggybacking se sitúa en torno a los 20 CMs.

En (Martin, 2004) y (Martin & Shrivastav, 2003) se muestra un análisis de funcionamiento de las capas física y MAC además de la eficiencia obtenida en DOCSIS por medio del desarrollo de un modelo DOCSIS mediante el paquete NS-2. El tráfico de aplicación seleccionado para la realización de las simulaciones fue tráfico web por lo que parte del trabajo desarrollado analiza las particularidades de funcionamiento de la capa MAC con el transporte TCP de este tipo de tráfico, concluyendo que DOCSIS no transporta de una manera eficiente el tráfico web. Se realiza por tanto una primera aproximación a la problemática del transporte TCP sobre redes asimétricas y la dificultad de encontrar un equilibrio entre el número de slots dedicados al acceso por contención en cada ciclo MAP (Bandwidth Allocation Map MAC Message DOCSIS) y el ancho de banda restante libre para el transporte de datos.

En (Shah, Kouvatso, Martin, & Moser, 2005) se aborda un estudio detallado sobre funcionamiento y eficiencia de las opciones de reserva de ancho de banda (piggybacking, concatenación y fragmentación) introducidas en la versión 1.1 de DOCSIS. Una conclusión muy importante extraída de dicho trabajo, muestra que la cabecera Concatenation MAC Header impide el uso del campo Extended Header y por tanto impide que se realicen peticiones de este tipo cuando el frame actual ha sido concatenado. Este comportamiento puede impactar directamente en la cantidad de request piggybacked que se pueden llevar a cabo debido a que dada la naturaleza asimétrica de la red HFC llevará a que los ACKs en cada CM sean concatenados. En (Bushmitch, Mukherjee, Narayanan, Ratty, & Shi, 2000) se propone un modificación del servicio UGS para incorporar el mecanismo de piggybacking como método eficiente de transporte de cargas de tráfico variable, video MPEG (Moving Picture Experts Group) en este caso, frente al tradicional UGS, que prohíbe el uso de piggybacking.

El valor óptimo de DBS-DBE ha sido largamente tratado por la comunidad científica. En (Chu, Tai, Lee, & Chung, 2002) se advierte que los valores óptimos para estos parámetros están fuertemente relacionados con el número de CMs presentes en la red. Se obtiene bajo simulación y para una carga de 20 CMs (BBS = 2, DBE =5) como combinación óptima entre número de colisiones/retardo. El límite de carga del canal para la obtención de este comportamiento óptimo se sitúa alrededor del 40%, concluyéndose que para altas cargas el valor DBS=2 resulta demasiado pequeño. Para cargas mayores, el valor (4,8) muestra buenos resultados. Pero en (Lee, Chung, Chu, & Pan, 2006) desarrollan un modelo de Markov en 2 dimensiones del algoritmo TBEB, desarrollando fórmulas que permiten predecir el rendimiento y el retardo de envío de PDUs en el canal ascendente para diferentes combinaciones de DBS-DBE. A través de dichas fórmulas se llega a la conclusión mediante simulación que los mejores resultados se obtienen para la combinación (7,9).

En (Chunpeng & Benny, 2004), se estudia la caracterización de la red en términos de throughput, tasa de pérdida de paquetes y el retardo promedio bajo diferentes grados de carga de red y priorización de perfiles. El artículo muestra que los resultados cuantitativos pueden ser derivados usando un analizador Smartbits network. Basado en los resultados de las medidas obtenidas, utilizando un algoritmo de weighted fair queuing, un modelo de QoS fue desarrollado para la programación del CMTS. Los resultados de la simulación desde OPNET demostraron una gran coincidencia entre este modelo y los resultados medidos. Los resultados empíricos y el modelo de QoS presente en este artículo son importantes en la investigación y diseño de redes para quien desee entender de manera práctica las características de la red DOCSIS.

En (Seung-Eun & Oh-Hyeong, 2006) se estudia la función del control de acceso al medio (MAC), como es el algoritmo de resolución de la contención (CRA) llamado F-TBEB (frame-based truncated binary exponential back-off) para petición de ancho de banda desde el cable modem. Este artículo provee un modelo simple analítico para computador del F-TBEB para el retardo y throughput en un canal DOCSIS. Además se dan dos soluciones para el problema de CRA sobre múltiples canales y usa un modelo analítico para determinar qué solución es superior para cada condición. Las contribuciones son: primero proveer un modelo analítico el cual permite calcular el tiempo de servicio de los paquetes en la capa MAC; y segundo adaptar el análisis para multicanal CRA y la comparación del

retardo. Los autores no tienen en cuenta los efectos del piggybacking y los errores en el canal con el objeto de enfocarse en los mecanismos de contención.

Existe también un trabajo sobre “Simulación de la subcapa PMD en sentido de retorno según la especificación DOCSIS 3.0” (Puche, Amaya, & Cárdenas, 2008), en el cual los autores desarrollan una herramienta computacional empleando Matlab debido a su capacidad en el procesamiento de señales y a la facilidad de obtener resultados gráficos. Se desarrollaron los algoritmos de procesamiento de señal del receptor que se encuentra en el CMTS. La herramienta computacional se diseñó considerando la futura implementación de todo el procesamiento de la señal en un dispositivo digital como un DSP (Digital Signal Processor) o un FPGA (Field Programmable Gate Array).

1.5.2.2 Nuevos MAP scheduling y mecanismos de contienda en el acceso al canal de subida

A continuación se presentará la literatura científica existente relacionada con nuevos algoritmos de contienda y programación de las concesiones de acceso, en (Golmie, Saintillan, & Su, 1999) se recoge una descripción completa del algoritmo de contienda, sus particularidades y posibles alternativas. En (Sala, Limb, & Khaunte, Adaptive MAC protocol for a Cable Modem, 1997) se introduce el concepto de “mar de miniceldas” como mecanismo dinámico autorregulado del número de miniceldas de contención (CS Contention Slots) presentes en cada ciclo. El funcionamiento consiste en utilizar todas las miniceldas no utilizadas de cada ciclo como miniceldas, aliviando el número de colisiones que se producirán. En el caso contrario, si un determinado ciclo posee muchos minislots CS se cursarán muchas peticiones de ancho de banda en el ciclo siguiente, lo que hará que este siguiente ciclo se asigne gran parte de los minislots para datos y se reduzca el número de minislots CS. Los mismos autores en (Sala & Limb, 1998) proponen un algoritmo de contienda denominado p-persistence por el que cada CM transmitirá en el siguiente minislot CS con una probabilidad p.

Varios algoritmos de selección del número de minislots de contención son propuestos en (Lin, Huang, & Yin, 1998), el algoritmo S en el que se reserva el valor de DBS, el algoritmo E en el que se reserva el valor de DBE, el algoritmo Media ES en el que se reservan $(E+S)/2$ y SE en el que se reservan DBS minislots si no hubo colisión en el ciclo anterior y DBE minislots si hubo colisión. Los resultados presentados concluyen que el algoritmo SE presenta mejores resultados en cuanto al throughput conseguido dada su mayor capacidad en cuanto a la resolución rápida de colisiones. En (Abi-Nassif, Lee, & Stavrakakis, 1999) los autores describen un estimador de carga ofrecida basado en promedio de colisiones en una ventana de ciclos MAP, que permite una estimación del número máximo de minislots de datos necesarios en un futuro próximo y maximizando el número de minislots dedicados a contención. Este estimador sólo resulta útil a bajas cargas del canal ascendente ya que para altas cargas la opción de piggybacking hace que se infrutilicen las celdas dedicadas al acceso por contienda. En (Yin & Lin, 2000) los autores proponen 2 métodos predictivos para mejorar el uso de celdas destinadas a contención. Para obtener los mejores resultados los autores proponen que dicho número debe ser igual al número de peticiones a resolver proponiendo por tanto un mecanismo de predicción del mismo basado en la observación estadística en la que el número de peticiones que transporta un ciclo MAP es proporcional al tamaño del mismo.

En (Martin, 2004) el autor propone un escenario de simulación de tráfico web en el que se comprueba bajo simulación el mínimo valor óptimo del número de minislots CS en cuanto al throughput del canal descendente obtenido. En (Droubi, Idirene, & Chen, 2000) se presenta el algoritmo Self Clocked Weighted Fair Queuing como mecanismo de garantía en la reserva de ancho de banda así como el algoritmo Shaped Virtual Clock para proporcionar garantías bajo servicios UGS. Técnicas adicionales son estudiadas en (Wen, Sunil, & Jay, 2003) y (Wen, Sunil, & Jay, 2002) donde se propone un esquema de algoritmo de backoff dinámico, en el que la ventana se va ajustando dinámicamente en función de las diferentes prioridades de tráfico y el algoritmo de programación de colas de prioridad múltiple. El autor además propone una modificación del algoritmo TBEB por prioridades, minimizando el tiempo de acceso por contienda de aquellas estaciones que demanden servicios tales como telefonía, streaming, etc. Las modificaciones necesarias para la implementación afectan tanto a la lógica del CMTS como del CM, además de una modificación en el formato del mensaje MAP. En (Chu, Tai, Lee, & Chung, 2002) y (Rabbat & Siu, 1999) se describen diferentes esquemas para proporcionar servicios diferenciados en cuanto a la capacidad de acceso al canal de subida.

1.5.2.3 Estudio del rendimiento de TCP en redes HFC.

Con el crecimiento de los servicios en Internet sobre redes con enlaces asimétricos, tales como las redes HFC, es crucial evaluar el desempeño de los protocolos basados en tamaños de ventanas. El concepto de asimetría de red como arquitecturas que introducen un efecto indeseable en el funcionamiento de TCP aparece en (Lakshman, Madhow, & Suter, 1997), donde se analiza el rendimiento TCP con arreglo a la capacidad de recuperación ante errores en canales de baja capacidad. Dos implementaciones diferentes de TCP, como son Reno y Tahoe, son evaluadas resultando más eficiente la versión Tahoe para conexiones simples dado que el enlace de baja capacidad sobre el que circulan los ACKs impide el correcto funcionamiento de la recuperación ante errores de la versión Reno, lo cual resulta en un timeout en cada pérdida de segmento producida. En (Chatterjee, 1999) se particularizan los estudios de los efectos de redes asimétricas al caso de HFC, donde se llevan a cabo simulaciones de rendimiento de descarga de tráfico interactivo y masivo. Los autores advierten que el tamaño de ventana de transmisión tiende a mantenerse pequeña lo que reduce considerablemente el producto ancho de banda por retardo. En este trabajo ya se advierte que el acceso al canal por el mecanismo de piggybacking reduce considerablemente la latencia comparado con el acceso por contienda.

En el trabajo titulado "The behavior of TCP over DOCSIS-based CATV networks" (Wanjiun, 2006), se estudió el impacto del protocolo DOCSIS en el desempeño de TCP en una red de acceso de banda ancha HFC. Se encontró que la asimetría de la relación expresada en los trabajos existentes no podía explicar de manera adecuada el comportamiento de TCP en redes basadas en DOCSIS. Para captar mejor el efecto de DOCSIS sobre TCP, se expresó la razón de asimetría (denotada con η) de otra manera (denotada con k), considerando el acceso múltiple por división de tiempo como operación de la capa MAC de DOCSIS. Cuando $\eta > 1$, TCP se comporta como en una red simétrica, y cuando $\eta \leq 1$, el sistema actúa como en una red asimétrica, y el rendimiento de TCP se degrada. El estudio señala que el número de transferencias simultáneas de TCP afecta significativamente la relación de asimetría.

En (Cohen & Ramanathan, 1998) se analiza el impacto que el nivel físico en redes HFC puede tener con arreglo al número de pérdidas de paquetes, y las consecuencias sobre el mecanismo de recuperación ante errores de TCP sobre este tipo de redes. La pérdida de un ACK provoca que venza el timeout en el lado emisor, lleve a cabo el reenvío del segmento considerado como perdido, y reduzca su ventana de transmisión a la mitad entrando en la fase de "congestion avoidance" lo que repercute en el throughput obtenido en el canal de bajada. En el artículo se proponen ajustes en los parámetros y pequeñas variaciones sobre la implementación del protocolo de forma que se sincronicen los buffers TCP y de envío del CM y se evite la pérdida o timeout de ACKs en el canal ascendente. Los estudios en (Kaza, 2001) concluyen que el subnivel MAC tiene poco efecto en el RTT (Round Trip Time) de TCP, pero también advierte de los serios efectos negativos en el rendimiento general que se producen en un entorno con un canal de bajada que presente numerosas pérdidas.

En (Ming, 1999,) se analizan los efectos del transporte TCP sobre redes HFC cuando el tráfico de aplicación que se transporta es http. La justificación en esta elección se debe a que es el protocolo de nivel de aplicación más extendido en la actualidad. En el trabajo se concluye que desde el punto de vista del retardo en el acceso al canal ascendente, resulta beneficioso el uso de clientes web que minimicen el número de conexiones simultáneas abiertas por página web.

En (Siahaan & Hamdani, 2002) los autores muestran como los archivos de configuración DOCSIS dan al proveedor de servicio el poder para controlar virtualmente cada aspecto de la operación de los CMs. La configuración simple de DOCSIS generalmente solo especifica un máximo throughput y el número de dispositivos CPE soportados. Los autores generan un nuevo archivo de configuración DOCSIS para usar en redes en producción. Siendo sumamente importante que antes de desplegar el archivo se prueben los efectos de los archivos sobre los diferentes vendedores de CM. Ya que los CM de distintos vendedores y las diferentes versiones de firmware puede comportarse de manera diferente ante diferentes parámetros de configuración.

En (Al-Khatib, Rajeswari, & Gunavathi, 2007) se propone un algoritmo para un nuevo mecanismo de programación y de asignación de ancho de banda para soportar tráfico VBR (Variable Bit Rate) multimedia sobre DOCSIS. El algoritmo de programación Dynamic Unsolicited Grant Service (DUGS) hace uso de solicitudes piggybacking y cambia la asignación del tamaño del unsolicited grant dinámicamente. Muestra los resultados a través de

simulación donde el throughput, la utilización del canal y el retardo han sido mejorados con DUGS, comparado con los parámetros propios del protocolo DOCSIS. DUGS es nuevo mecanismo para garantizar QoS en la transmisión de tráfico VBR en tiempo real sobre redes de cable, para lo que usa piggybacking para la asignación de los anchos de banda. Las peticiones de ancho de banda usan una pequeña parte del ancho de banda de los datos para hacer por otro lado las peticiones y así evitar retardos en adquirir el ancho de banda debido al retardo de los mensajes de petición de polling. En resumen lo que permite DUGS es una asignación de ancho de banda dinámicamente a cada CM dependiendo del valor de la petición piggyback.

En (Balakrishnan, Padmanabhan, & Katz, 1999) se trata de obtener una expresión del grado de asimetría de una red como la relación entre las diferencias de ancho de banda y tamaño de los paquetes que circulan por cada canal y la dependencia que la tasa de transferencia en el canal de bajada (supuestamente de más capacidad) tiene sobre la capacidad efectiva del canal de subida (de menor capacidad) por el que circulan los ACKs correspondientes. Se presentan además soluciones orientadas a una mejora de la tasa de descarga basadas en filtrado efectivo de ACKs y priorización de tráfico para estos segmentos frente a los segmentos que transportan los datos de usuario en contraposición al algoritmo simple de encolado FIFO por parte del elemento programador del acceso al canal de subida. Los mismos autores en (Balaluishnan & Padmanabhan, 2001) proporcionan una expresión matemática del grado de asimetría de una red genérica expresada como:

$$k = (\text{ancho banda upstream} / \text{ancho banda downstram}) / (L_{\text{datos}} / L_{\text{ack}})$$

En el mismo artículo los autores afirman que TCP mantiene un comportamiento óptimo mientras el valor de $k \leq 1$. Con valores mayores de 1 la red se convierte en asimétrica y el canal ascendente no puede soportar el período óptimo de envío de ACKs empujando al servidor a un menor crecimiento de su ventana de congestión y por consiguiente una menor tasa de envío de lo que en teoría podría alcanzar.

En (Elloumi, Golmie, Afifi, & Su, 2000) la asimetría k puede conducir a períodos de inactividad o baja actividad en lado servidor que lleva a medir unos peores índices de utilización del canal descendente. Además se introduce el efecto de ack compression introducido en (Zhang, Shenker, & Clark, 1991), y (Kalampoukas, Varma, & Ramakrishnan, 1996) por el cual, debido a la acumulación por la espera en el acceso al canal ascendente, las confirmaciones de los segmentos recibidos se acumulan en la cola de transmisión del CM sufriendo un efecto de compresión en el espaciado que de una forma natural el CM impondría en sincronía con los segmentos recibidos. El resultado en el envío a ráfagas por parte del servidor por encima del valor que se debería obtener en el tamaño de la ventana de transmisión dada la recepción más frecuente de los ACKs enviados por el CM. Esta sobrecarga producida por la ráfaga inyectada por el servidor puede provocar congestión en las colas de algunos de los elementos de red presentes en el enlace de descarga, con la consiguiente pérdida de tasa de recepción. En este artículo también se presentan técnicas que tratan de preservar el espaciado natural de los ACKs en las colas de transmisión de los CMs mediante la maximización en el uso de técnicas de piggybacking (las cuales introducen de manera natural un espaciado a los paquetes transmitidos igual a un ciclo MAP) y al uso del algoritmo Round Robin⁴ en la programación en las asignaciones de ancho de banda por parte del CMTS.

La expresión del grado de asimetría para redes HFC DOCSIS se particulariza en (Liao & Ju, 2004) y (Ju & Liao, 2002) de la siguiente manera:

$$n = \alpha * (C_d * T_{usv}) / (d * L_{data} * N_{dcm})$$

$\alpha = 1$ para transferencias unidireccionales

C_d = Ancho de banda del canal de bajada

T_{usv} = tiempo medio transcurrido entre el envío de 2 paquetes consecutivos por el CM

d = número máximo de segmentos recibidos por ACK enviado

L_{data} = Longitud del paquete de datos en el canal descendente

N_{dcm} = Número de transferencias simultáneas por CM

⁴ Round Robin: es un método para seleccionar todos los elementos en un grupo de manera equitativa y en un orden racional, normalmente comenzando por el primer elemento de la lista hasta llegar al último y empezando de nuevo desde el primer elemento.

Además las autoras estudian los retardos de acceso de solicitudes piggybacking, proponiendo también un mecanismo de mejora en cuanto al tiempo T_{usv} necesario para aquellas peticiones de reserva llevadas a cabo por un CM en momentos posteriores a la generación por parte del CMTS del paquete MAP que describe la utilización del siguiente frame en el canal ascendente. Estas peticiones deberán por tanto ser retrasadas hasta la generación del siguiente paquete MAP (que corresponderá a frame+2) produciéndose en este caso un incremento de T_{usv}. En este artículo se propone una modificación de MAP para albergar una cantidad de minislots que preceden a los de contención denominados Unicast Request IE (Information Elements) y destinados a aquellos CM cuyo período de data grant se encuentra al final de un determinado frame y presumiblemente su petición piggybacking sea retrasada 2 frames. De esta manera y mediante simulación demuestran conseguir que casi todas las peticiones piggybacked obtienen un data grant en el siguiente frame, mejorando de esta manera el tiempo T_{usv} y consiguiendo por tanto una mayor simetría de la red HFC. Además proponen un nuevo mecanismo de programación (schedule) en la asignación de slots por parte del CMTS, en el que por medio de colas priorizarán las peticiones de reserva para los paquetes de menor longitud frente a aquellos de gran tamaño. De esta manera se pretende minimizar el retardo de acceso al canal por parte de los ACKs frente al resto de paquetes de datos que serán mayores, consiguiendo mejorar el throughput obtenido del canal de bajada dado el incremento del self-clocking en los servidores. Una crítica a ese sistema surge dado que contribuye a una mejora sólo para tráfico unidireccional, empeorando los retardos de aplicaciones bidireccionales con parámetros estrictos en tiempos de acceso (como el caso de videojuegos en red).

Tal y como se nombro anteriormente, J.Martin a través de (Martin, 2004) y (Martin & Shrivastav, 2003) contribuye con las simulaciones de tráfico web. En él se realiza por tanto una primera aproximación a la problemática de la dificultad de encontrar un equilibrio entre el número de slots dedicados al acceso por contención en cada ciclo MAP y el ancho de banda restante libre para el transporte de datos.

En esta investigación se presentan los artículos e investigaciones que ayudan o brindan información para el desarrollo del presente trabajo de grado. La investigación que aquí se plantea, el análisis de tráfico para una Red HFC generado por la Distribución de Contenidos Educativos⁵, constituye un aporte relevante con el objeto de satisfacer la necesidad latente de integrar la TDi como parte activa y fundamental de las TICs y en los nuevos modelos que emergen en la sociedad del conocimiento.

1.6 Estructura del trabajo de grado

El presente trabajo de grado esta en marcado dentro del Proyecto Macro “Educación Virtual Basada En Televisión Interactiva Para Apoyar Procesos Educativos A Distancia – EDiTV (EDiTV, 2008)” del cual hacen parte la Universidad del Cauca, Universidad Autónoma de Occidente y Universidad de Oviedo, que fue aprobado por el Comité Técnico del Ministerio de Educación Nacional y COLCIENCIAS con cofinanciación del Ministerio de Educación Nacional. Él cual fue presentado como respuesta a la convocatoria 393-2006 de COLCIENCIAS para hacer uso de la red RENATA. Así pues, la propuesta de trabajo de grado aquí presentada da respuesta a uno de los objetivos adquiridos en dicho Proyecto Macro.

Finalmente, el contenido de la monografía se ha organizado en seis capítulos como se muestra a continuación:

Capítulo 2: se construye la base de conocimiento respecto a las tecnologías involucradas dentro del desarrollo del proyecto, el sistema de TD DVB-C (Digital Video Broadcasting – Cable) y el protocolo de la capa de acceso DOCSIS para la red HFC. Adicionalmente, se expone la generación de contenidos de EDiTV, considerando el entorno de desarrollo, los componentes, el análisis y diseño de la aplicación para el laboratorio de EDiTV.

Capítulo 3: Se presentan las capturas de tráfico en el laboratorio de ITV de la Universidad de Oviedo, su análisis y caracterización estadística, obteniendo el modelo matemático de dicho tráfico.

Capítulo 4: se simula el modelo matemático sobre la herramienta OPNET Modeler, y se valida el modelo simulado contrastando los datos obtenidos en la simulación con los datos reales del laboratorio.

⁵ Contenidos educativos: En el contexto de este trabajo de grado se entenderá como el broadcast generado por la televisión digital más las aplicaciones (audio, video, texto, hipervínculos, imágenes) que brindan la interactividad.

Capítulo 5: se construyen diferentes escenarios, se varían parámetros y se evalúa el rendimiento de la red ante el constante aumento de abonados y tráfico, mediante simulaciones que respondan al funcionamiento del sistema real.

Capítulo 6: Se presentan las conclusiones a las que se llegó con el desarrollo de esta tesis, teniendo en cuenta los objetivos planteados al inicio del proyecto, así como también los trabajos futuros y los aportes del trabajo de grado.

Adicionalmente, en los anexos se encuentra información complementaria sobre los temas tratados de la siguiente manera:

Anexo A: Tecnologías Relacionadas.

Anexo B: Configuración de herramientas.

Anexo C: Montaje del laboratorio de ITV de la Universidad de Oviedo.

Anexo D: Artículos publicados en eventos y revistas, sobre las contribuciones del presente trabajo de grado.

Capítulo 2

Diseño y Generación de Contenidos de TDi para una red HFC

2.1 Tecnologías de la Televisión Digital Interactiva

En esta época ha tomado importancia la digitalización de las señales analógicas de televisión, ya que hasta mediados de los años 90 la cantidad de información que se necesitaba para transmitir una imagen de video digitalizada constituía un flujo demasiado grande de información (de 108 a 270 Mbits/s para un sistema de TV de 525 o 625 líneas)(Brice, 2003). Así, para que la televisión digital sea viable el primer paso es contar con algoritmos adecuados de compresión tanto de vídeo como de audio que permitan reducir la velocidad de transmisión necesaria de 4 a 31,67 Mbps (Marianov, Oberli, & Rios, 2006). En segundo lugar, es necesario definir cómo se va a enviar esta información por el canal de transmisión de manera que los decodificadores sean capaces de recuperar el vídeo y el audio de uno o varios programas. Estas condiciones deben ser soportadas hasta el usuario final por la arquitectura de red HFC para soportar los servicios de TDi siguiendo el estándar de TD DVB-C

Ya que son muchas las tecnologías involucradas para el desarrollo de este trabajo, a continuación se exponen los conceptos relacionados con el sistema de TD DVB-C y el protocolo de la capa de acceso DOCSIS propio de las redes HFC. En el Anexo A se presentan los conceptos relacionados con las redes HFC y el sistema de codificación de imágenes en movimiento y audio asociado MPEG-2 (Moving Picture Experts Group-2), conceptos necesarios para una mejor comprensión de esta tesis.

Adicionalmente se expone la generación de contenidos de EDiTV, considerando el entorno de desarrollo, los componentes, el análisis y diseño de la aplicación para el laboratorio de EDiTV.

2.1.1 DVB-C

El sistema de TV digital denominado DVB-C (Digital Video Broadcasting–Cable), definido en (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998), especifica los procesos de codificación de canal y de modulación para un adecuado funcionamiento cuando se usan los mecanismos de difusión de televisión digital por cable como en el caso de la red HFC, donde la señal de entrada normalizada es la denominada MPEG-2 Transport Stream (MPEG-2/TS) o Flujo de transporte MPEG-2, como en el resto de los estándares DVB. Dicho TS es obtenido mediante el proceso denominado Codificación de Fuente, descrito en el anexo A. La norma también describe el Esquema de Modulación usado en la transmisión, en la que se utiliza una técnica de modulación QAM. En la Figura 2 se muestra el esquema de transmisión del estándar DVB-C. La descripción de cada uno de los módulos que componen el sistema de transmisión DBV-C que se muestra a continuación corresponde básicamente a la información contenida en la norma (ETSI, EN 300 429 V1.2.1, 1998 - 04).

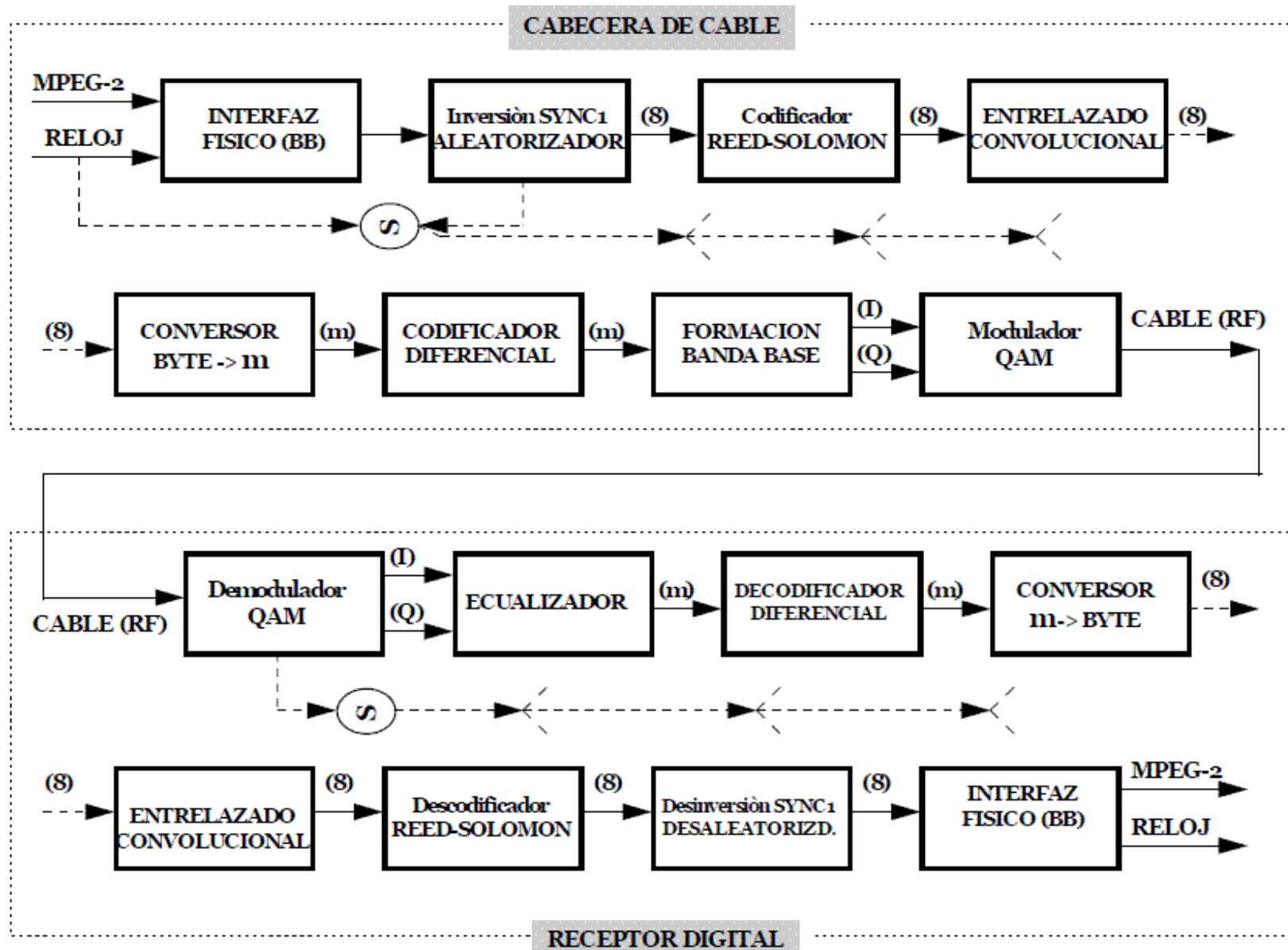


Figura 2. Estándar ETSI 300 429: Diagrama de Bloques de transmisión del estándar DVB-C (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998)

2.1.1.1 Codificación de Canal

- **Interfaz Banda Base y sincronización:** Esta unidad inicia con la formación de la Banda Base de entrada, donde la estructura de los datos son adaptados al formato de la fuente de la señal. La estructura de la trama estará en concordancia con la capa de transporte MPEG-2.
- **Aleatorización e inversión de sincronización 1:** para asegurar la dispersión de energía del espectro radiado, la señal de entrada debe hacerse cuasi-aleatoria, de forma que se eviten largas series de ceros o de unos. Por esta razón, el flujo de entrada debe ser aleatorizado (randomized). Esta unidad invierte el byte de sincronización de acuerdo a la estructura de la trama MPEG-2. El flujo de entrada del sistema será organizado en paquetes de longitud fija, siguiendo la estructura de la trama MPEG-2, cuya longitud total es de 188 bytes. Esto incluye una palabra de sincronismo de 1 byte el cual es 47HEX. Entonces, es preciso generar una Secuencia Binaria Seudo Aleatoria (PRBS - Pseudo Random Binary Sequence), lo cual se realiza con un registro de desplazamiento de varias etapas y con algún tipo de realimentación, ver Figura 3. Los datos de salida del multiplexor de paquetes de transporte MPEG-2 será aleatorizado de acuerdo con la configuración mostrada en la Figura 3, el polinomio de generación de secuencia binaria esta dado por la ecuación 1.

$$1 + x^{14} + x^{15} \tag{1}$$

Cargando la secuencia “100101010000000” dentro del registro como se indica en la Figura 3 se da inicio al proceso. El byte de sincronismo del paquete MPEG-2/TS no se aleatoriza, dicho byte se invierte cada ocho paquetes, a fin de reiniciar el proceso de aleatorización. A fin de controlar la interferencia (evitando la emisión de una portadora no modulada), la norma especifica que el anterior proceso deberá estar activo también en ausencia de señal o, incluso, cuando ésta no responda al formato MPEG-2/TS.

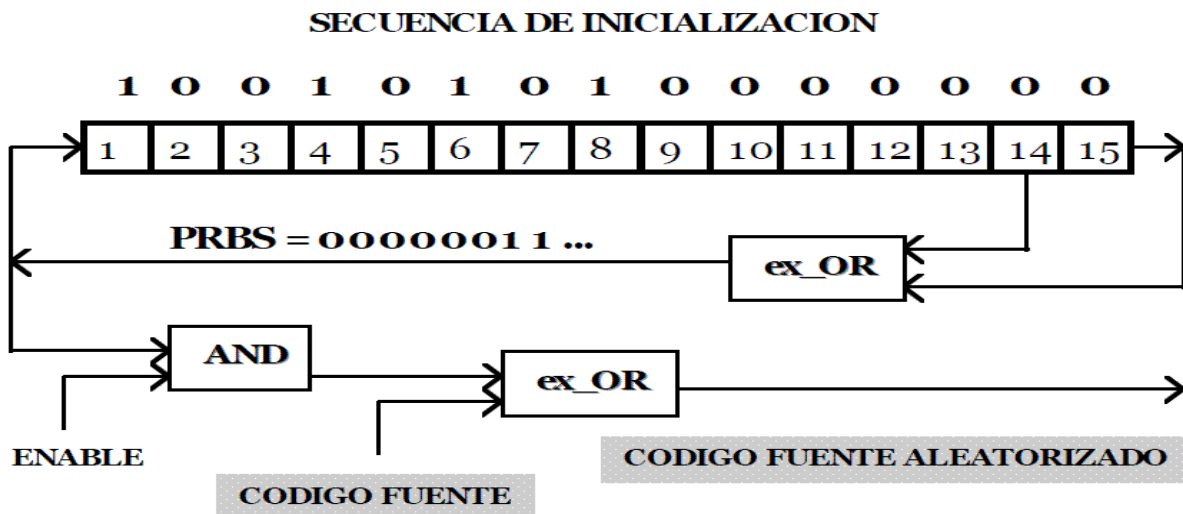


Figura 3. Diagrama Esquemático del Aleatorizador (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998)

- **Codificación Reed-Solomon:** Para permitir la corrección de errores (FEC) en la recepción, se introduce una cierta redundancia en la estructura de los paquetes de transporte, procedimiento que se conoce como codificación. La codificación llamada “externa” se emplea en todos los estándares DVB y se complementa con otra llamada “interna” en el caso de los estándares de transmisión vía satélite y terrestre. La codificación externa usada es de tipo Reed-Solomon, un código Reed-Solomon (N,K) es aquel que transforma una palabra, entrante, de K símbolos en otra palabra, saliente, de N símbolos. Consecuentemente, un código Reed-Solomon es capaz de corregir una combinación de hasta T símbolos erróneos, tal que $T = (N - K)/2$. La norma especifica un código del tipo (204,188) símbolos, donde cada símbolo es un octeto $m = 8$, que es una versión acortada de la codificación original RS (255,239). Esta codificación se aplicara también al byte de sincronismo, tanto al no invertido como al invertido. Con $T = 8$ ($T = (204-188)/2$) se añaden 16 bytes de paridad a los iniciales 188 de cada paquete de transporte, resultando un total de 204 bytes.

- **Entrelazado Convolutivo:** El proceso de entrelazado, “interleaving”, se aplica a los paquetes ya codificados (Reed-Solomon) con objeto de segmentar y repartir las ráfagas prolongadas de errores, facilitando así su posterior detección y corrección en recepción.

La Figura 4 muestra el esquema de concepto del “entrelazado convolutivo”, relativo al byte y con profundidad $l=12$, a que se someten los datos que han sido previamente protegidos mediante la codificación Reed-Solomon. El entrelazador se compone de $l=12$ ramas, cíclicamente conectadas al flujo de datos de entrada mediante el conmutador de entrada. Cada rama “ j ” constituye un registro de desplazamiento FIFO (First-In, First-Out) con profundidad “ $j \times M$ ” células, donde $M = 17 = N/l$; siendo: $N = 204$. Los bytes SYNC invertidos y no invertidos, para poder ser localizados, deben dirigirse siempre por la rama “0” del entrelazador, la cual corresponde a retardo nulo.

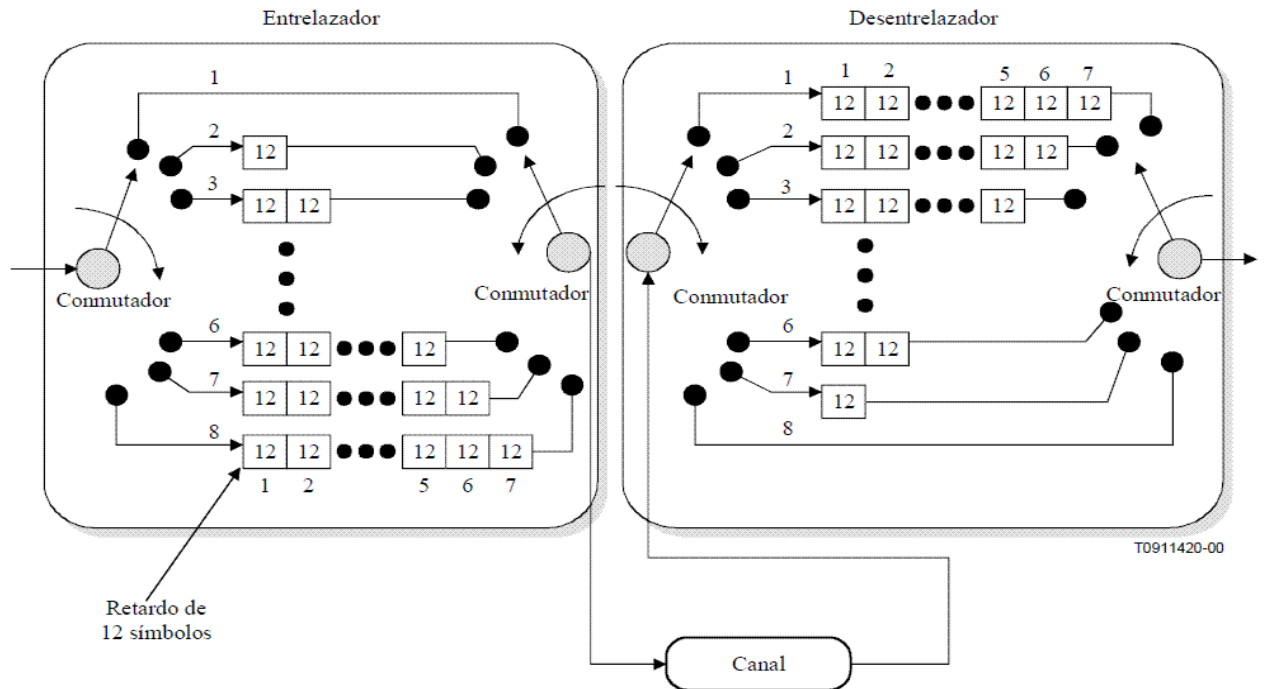


Figura 4. Diagrama conceptual del entrelazado y desentrelazado convolutivo (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998)

El resultado del proceso de entrelazado es que cada byte de los paquetes de transporte se encuentra desplazado en el tiempo un número de posiciones igual a $j \times 17$, con lo que los bytes originales de un paquete de transporte quedarán repartidos entre dos paquetes consecutivos. El desentrelazador tiene un principio similar al entrelazador, salvo que los índices de las ramas están invertidos, es decir: “ $j=0$ ” se corresponde con el máximo retardo. En estas condiciones, en el desentrelazador cada byte se retarda $(11-j) \times 17$ posiciones, con lo que el retardo total entre emisión y recepción es de $(j+11-j) \times 17 = 187$, valor que por ser idéntico para todos los bytes permite recuperar en la recepción el orden original.

Todo este proceso reduce los errores por ráfagas introducidos por el canal de transmisión, ya que después de la reordenación de los datos en el receptor, estos errores se habrán distribuido entre paquetes sucesivos, lo que favorecerá que no se excedan los límites en los que la codificación Reed-Solomon puede recuperar la información original.

- **Mapeado de símbolos y codificación diferencial:** una vez obtenidos el flujo de bytes a la salida de la etapa de entrelazado, éstos deben ser agrupados en símbolos para su posterior modulación. En el caso de una modulación 2^m QAM el sistema mapeará k bytes en n símbolos de forma: $8k = n \times m$, en la Figura 5 se ilustra el caso para 64 QAM se tiene $m=6$, $k=3$ y $n=4$ (cada 3 bytes del flujo se transforman en 4 símbolos de 6 bit cada uno).

SALIDA DEL ENTRELAZADOR CONVOLUCIONAL (OCTETOS)																															
Byte V								Byte V+1								Byte V+2															
b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0	b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0	b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0								
MSB																LSB															
b5	b4	b3	b2	b1	b0	b5	b4	b3	b2	b1	b0	b5	b4	b3	b2	b1	b0	b5	b4	b3	b2	b1	b0								
Símbolo Z								Símbolo Z+1								Símbolo Z+2								Símbolo Z+3							
AL CODIFICADOR DIFERENCIAL (6 Bits por SIMBOLO)																															

Figura 5. Mapeado de Bytes a Símbolos (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998)

Los 2 bits MSB de cada símbolo serán posteriormente codificados diferencialmente de forma que se obtenga una constelación QAM invariante con rotación $\pi/2$.

Como resumen de cuanto antecede sobre la Codificación de Canal, cabe señalar que la conjunción del código Reed-Solomon (de eficiencia $T=8$) con un entrelazado convolucional (de profundidad $l=12$) posibilita la corrección de hasta $Txl = 8 \times 12 = 96$ símbolos erróneos (es decir, $96 \times 8 = 768$ bits).

2.1.1.2 Modulación

La técnica de modulación a utilizar será una modulación por amplitud en cuadratura (QAM) con 16, 32, 64, 128 o 256 puntos de constelación. Antes de ser modulada, las señales I y Q procedentes de la etapa de codificación diferencial deberán ser filtradas ver Figura 6, para reducir la probabilidad de error entre símbolos, mediante un filtro en coseno alzado con un factor de redondeo o roll-off de $\alpha = 0,15$ y la función de transferencia del filtro esta dada por la ecuación 2:

$$H(F) \begin{cases} = 1 & \text{para } |f| < f_N(1 - \alpha) \\ = \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{2f_N} \left[\frac{f_N - |f|}{\alpha} \right] \right\}^{1/2} & \text{para } f_N(1 - \alpha) \leq |f| \leq f_N(1 + \alpha) \\ = 0 & \text{para } |f| > f_N(1 + \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

donde f_N representa la frecuencia de Nyquist, que es igual a la mitad de la velocidad de modulación, $f_N = 1/(2TS) = RS/2$, siendo $TS = 1/RS$ el período de símbolos, y el factor de roll-off $\alpha = 0,15$.

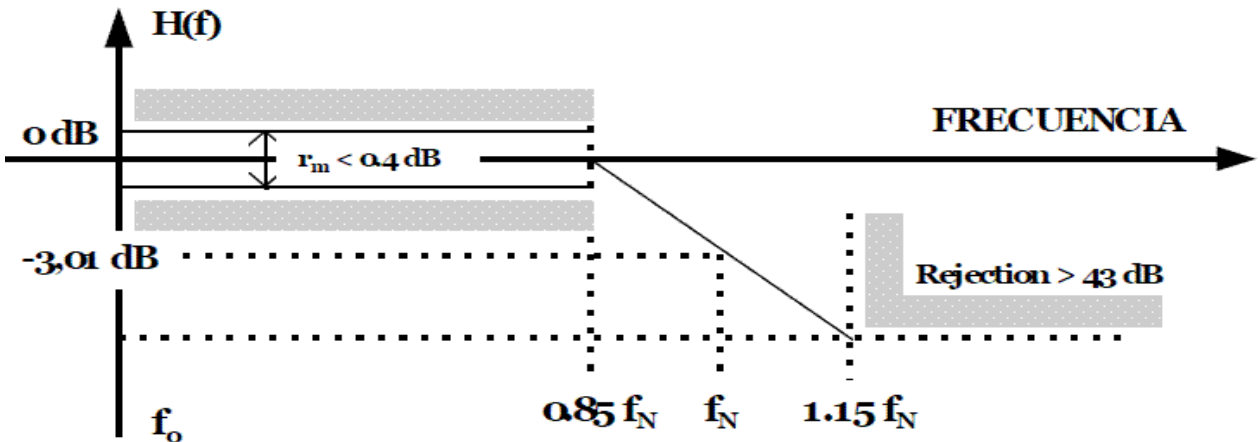


Figura 6. Característica de Amplitud del filtro "Half-Nyquist"(ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998)

La modulación QAM consiste en modular por desplazamiento en amplitud (ASK) de forma independiente, dos señales portadoras que tienen la misma frecuencia pero que están desfasadas entre sí 90° (las señales Q e I procedentes de la etapa de codificación). La señal modulada QAM es el resultado de sumar las dos señales ASK. Estas pueden operar por el mismo canal sin interferencia mutua porque sus portadoras estarán en cuadratura. Además de la codificación diferencial que se sigue en este sistema, los puntos del cuadrante primero de la constelación-QAM se pueden convertir en los del cuadrante segundo, tercero o cuarto, sin más que cambiar los dos bits más significativos (I_k y Q_k) y rotar, respectivamente, $\pi/2$, π , o $3\pi/2$ el resto de los bits ($q-2$) del símbolo. En la Figura 7 se muestra la constelación 16QAM y en la Figura 8 se muestra las velocidades de transmisión.

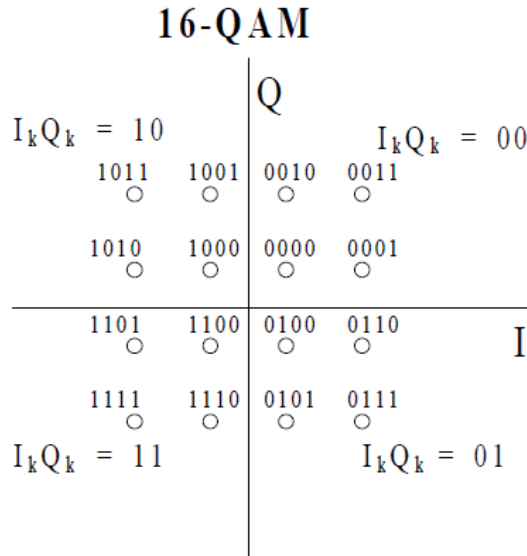


Figura 7. Constelación 16 QAM

REGIMEN EFECTIVO MPEG-2/TS (Mbps)	REGIMEN tras RS(204,188) (Mbps)	VELOCIDAD MODULACION (Mbaudios)	BANDA OCUPADA (MHz)	TIPO de MODULACION
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

Figura 8. Velocidades de transmisión EN 300 429

2.1.2 DOCSIS

DOCSIS (Data-Over-Cable Service Interface Specifications) es el conjunto de estándares, aprobado por CableLabs, que garantiza la interoperabilidad de la tecnología cablemodem, con el objetivo de proporcionar acceso

conmutado de datos en infraestructuras CATV (Community Antenna Television – Televisión por Cable) sobre redes HFC inicialmente diseñadas para el transporte de señales de televisión, y de ahí su fuerte asimetría.

En una red HFC los cables de fibra óptica se extienden desde el CMTS y los nodos de fibra, mientras que éstos se conectan a los Cable Modem (CM) por medio de cable de cobre, y de ahí su nombre de redes híbridas de cable de fibra óptica y el cable de cobre. El CMTS será el equipo que gestiona los CM, siendo estos últimos los que proporcionan a los usuarios el punto de acceso a la red.

La arquitectura de protocolos empleada en DOCSIS, tanto en CMs como en CMTS es la indicada en la Figura 9. y la arquitectura de servicios e interfaces para datos sobre cable se muestra en la Figura 10

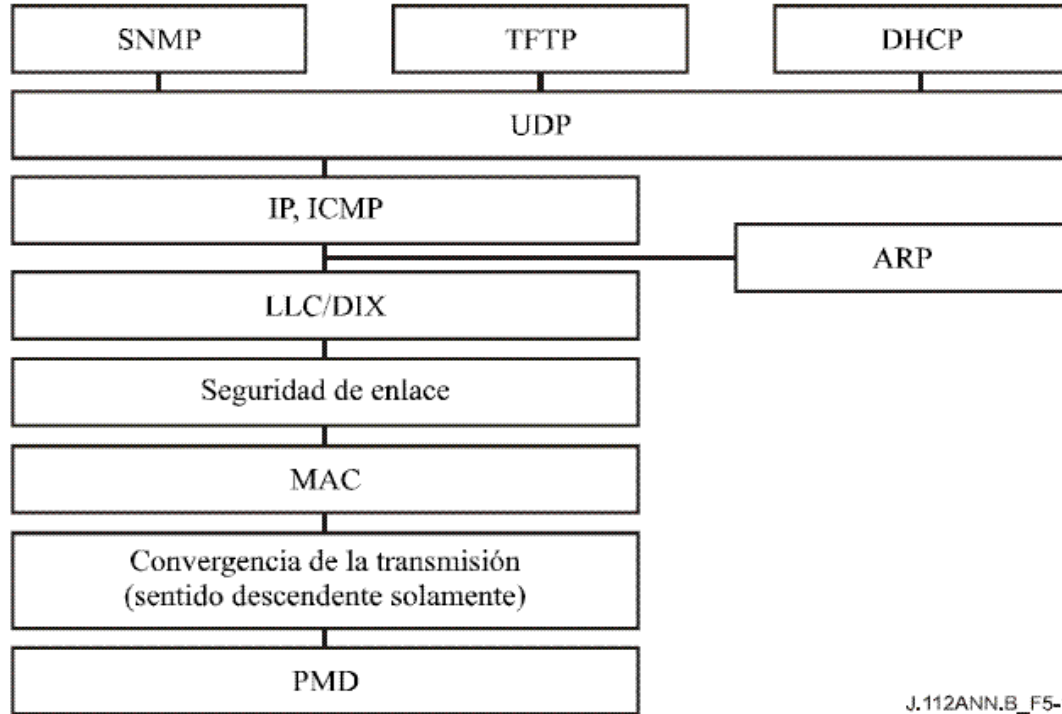


Figura 9. Pila de protocolos en la interfaz RF (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998)

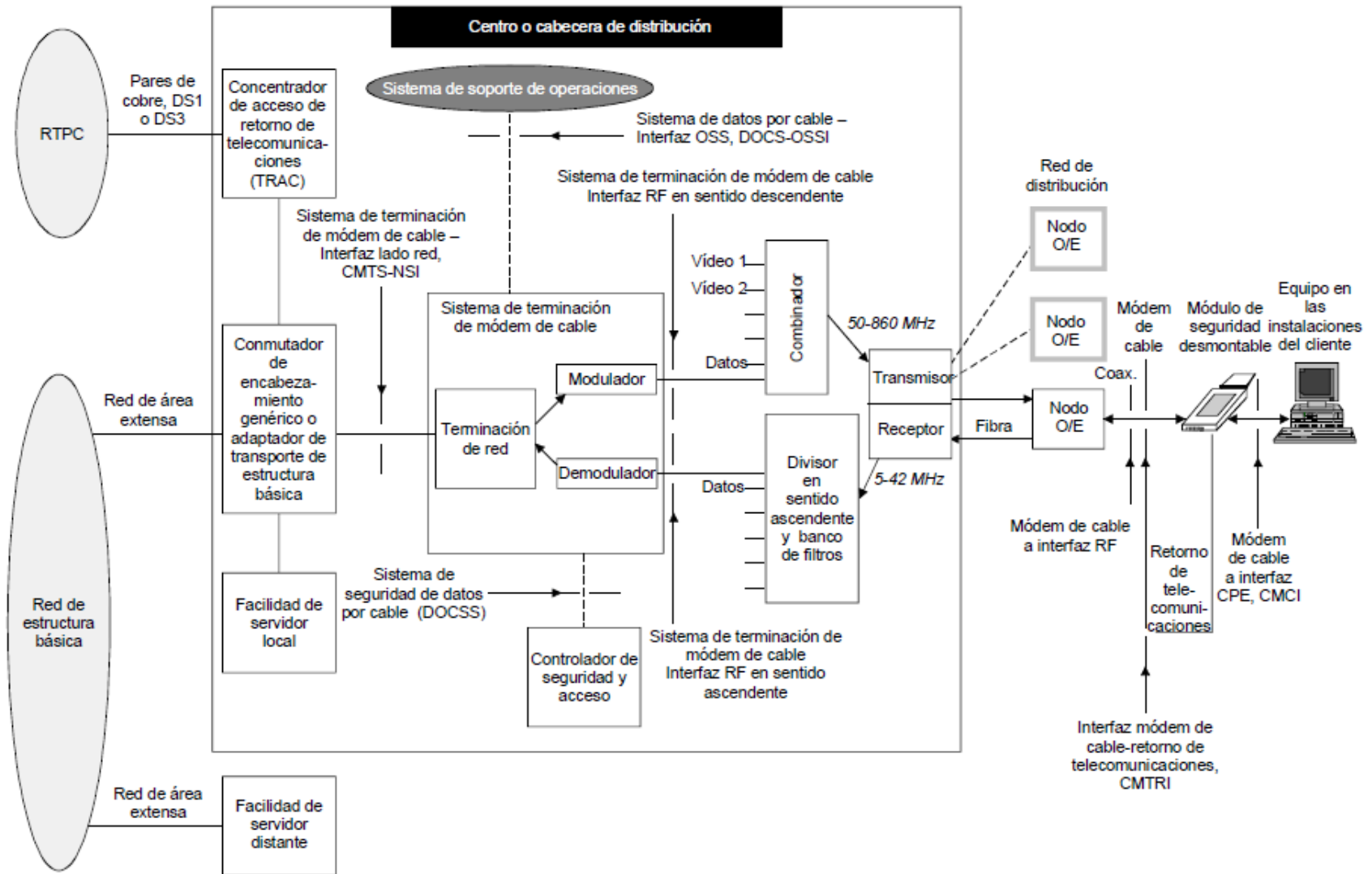


Figura 10. Arquitectura de referencia de datos por cable R.J112 (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998)

En la Figura 11 se presentan los protocolos empleados en la transferencia de datagramas IP entre CMTS y CM. La primera versión del protocolo, DOCSIS 1.0, se incluyen colas virtuales, minislots, formato MPEG-2 en el canal descendente, módulo de seguridad, piggybacking, procedimiento de sincronización y esquemas de modulación. Sin embargo, en DOCSIS v1.1 se permiten tramas de longitud variable y los esquemas de resolución de colisiones se simplifican. Para soportar QoS, en DOCSIS v1.1 se incluyen seis servicios. Además, se especifican la segmentación y concatenación de tráfico IP para incrementar el throughput en esta versión. La pila de protocolos que se definen en DOCSIS incluye al nivel físico y enlace según el modelo de referencia OSI.

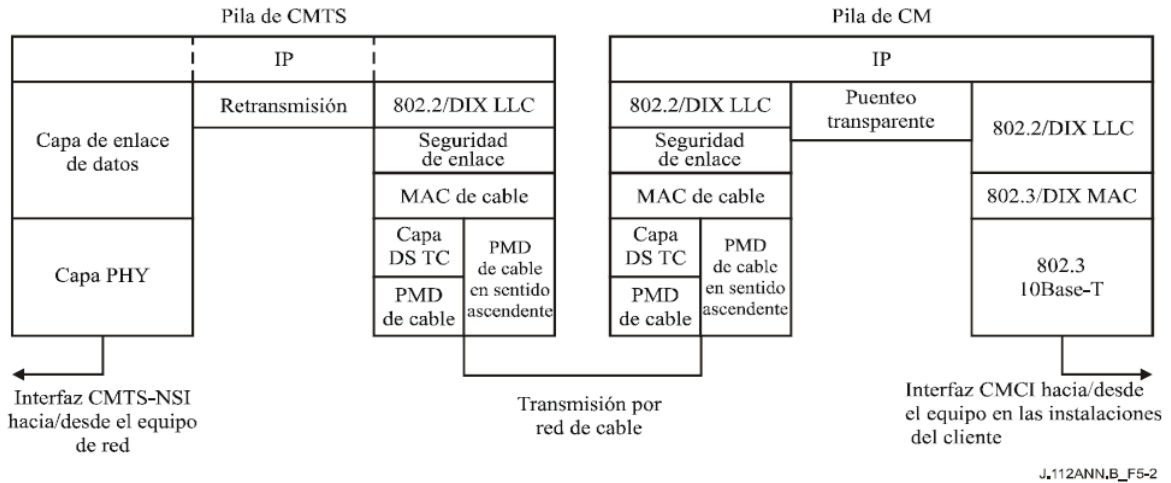


Figura 11. Pila de protocolos DOCSIS (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998)

2.1.2.1 Nivel Físico

Tal y como se puede observar en la Figura 11 el nivel físico se divide en dos subniveles, la capa de convergencia DS TC (Downstream Channel Transmission Convergence) y el nivel Dependiente del Medio Físico PMD (Physical Medium Dependent).

El subnivel DS TC se encarga de empaquetar la información procedente del subnivel MAC en trozos de 188 bytes encapsulados según ITU-T H.222.0 MPEG, también conocido como MPEG-TS. El propósito de este encapsulado es la posibilidad de intercalar estos paquetes de datos con paquetes que transportan las señales de TV digital en el mismo canal descendente. A nivel de la capa DS se produce el proceso de entrelazado convolucional o interleaving.

En la subcapa Transmision Convergence (TC) DOCSIS emplea MPEG-2. El flujo de bits en el canal descendente se define como una serie continua de paquetes MPEG de 188 bytes. Los paquetes constan de una cabecera de 4 bytes seguida por la carga útil de 184 bytes. La cabecera identifica la carga útil como perteneciente a la MAC del sistema de cable.

En el subnivel PMD para la transmisión tanto en el canal ascendente como en el canal descendente se utiliza acceso múltiple por división en frecuencia (FDMA). Además, cada canal FDMA se divide en celdas de tiempo originando una multiplexación por división en el tiempo (TDMA). Los datos característicos de este subnivel aparecen en la Tabla 1.

DOCSIS			
SUBCAPA TC		MPEG-2	
Subcapa PMD	Descendente	Rango RF	50/54 Mhz ~ 860 MHz
		Modulación	64 y 256 QAM
		Anchura canal	6, 7 y 8 MHz
	Ascendente	Rango RF	5 ~ 30 MHz ó 5 ~ 42 MHz
		Modulación	QPSQ y 16 QAM
		Velocidad de símbolos	160 .M Kbaudios (M= 1,2,4,8,16)

Tabla 1. Especificaciones de la capa física en DOCSIS

Las ráfagas de ruido procedentes de amplificadores de potencia y fuentes de alimentación afectan al canal descendente y pueden causar errores en bloque. Para minimizar el efecto de las ráfagas de error se emplea la técnica de *interleaving*, consistente en dispersar los datos sobre el tiempo. Mezclando los datos en el lado transmisor y reensamblándolos en el extremo receptor, los errores de ráfaga aparecerán dispersados. De esta forma, una ráfaga de interferencias relativamente larga puede causar errores que serán corregidos mediante FEC cuando se utiliza *interleaving*. Como la mayoría de los errores aparecen en ráfagas, esta es una forma eficiente de mejorar la tasa de errores. DOCSIS especifica 5 niveles diferentes de *interleaving*, siendo 128:1 el de mayor grado y 8:16 el menor. El proceso de *interleaving* no añade bits de redundancia como FEC, pero añade latencia, lo cual puede afectar a la transmisión de voz y video en tiempo real. La latencia producida también puede afectar el *throughput* en el canal de retorno, al incrementar el RTT (*Round Trip Time*) de Solicitud/Concesión. En la Tabla 2 se indican los diferentes niveles de *interleaving*, cuyo valor por defecto es 32:4, y la latencia asociada dependiendo del tipo de modulación.

I	Q	Latencia 64 – QAM	Latencia 256 – QAM
8	16	220	150
16	8	480	330
32	4	980	680
64	2	2000	1400
128	1	4000	2800

Tabla 2. Downstream Interleaver Delay en microsegundos (μ s)

2.1.2.2 Nivel de enlace (MAC/LLC)

El nivel de enlace DOCSIS, se subdivide en dos subniveles MAC y LLC, DOCSIS es el responsable del direccionamiento de enlaces, el control de acceso al medio, el control de flujo, el entramado de datos, y la detección y corrección de errores. De manera específica en DOCSIS, este nivel proporciona un mecanismo de reserva y concesión de ancho de banda, diferenciación de servicios (QoS), y acceso eficiente al nivel físico.

El direccionamiento será implementado por medio de SIDs (*Service Identifiers*). Cada CM será identificado por uno o varios SIDs directamente relacionados con un determinado servicio entre éste y el CMTS. Los SIDs son, por tanto, los identificadores LLC y dado que serán identificadores locales para cada CMTS su significado será parecido al de las direcciones MAC Ethernet.

En la Figura 12 se resume de manera general la lógica del subnivel de control de acceso al medio o MAC. Las tramas DOCSIS, denominadas ciclos o MAPS, se dividen en dos regiones de operación denominadas región de contención (CS) y región de datos (DS). Cada una de estas dos regiones podrán estar formadas por un número variable de celdas del nivel físico, por lo que la sincronización de todos los CMs que comparten el medio de qué celdas corresponden a una determinada región en un determinado ciclo se implementa por medio del envío del CMTS de un paquete especial donde se describen dichas asignaciones. Este paquete enviado por el canal descendente se denomina anuncio MAP. La lógica de control se resume en los siguientes pasos:

- ✓ Cuando un CM recibe datos para ser transmitidos por el canal ascendente, espera a la recepción de un mensaje MAP procedente del CMTS donde se describan las celdas reservadas para peticiones de reserva de ancho de banda, En la figura se corresponde con el mensaje Map1 que describirá la región CS del ciclo Map1
- ✓ Una vez recibido el mensaje, el CM selecciona una celda de la región CS e inserta una petición de reserva de ancho de banda para el envío de sus datos. Dado que todos los CMs de una misma red comparten el mismo medio, y que varios de ellos pueden seleccionar la misma celda para transmitir su petición, se esta ante una arquitectura que deberá contar con un mecanismo de detección y recuperación ante colisiones en el acceso al medio.
- ✓ Si la petición de reserva (*request*) tiene éxito y no colisiona con la petición de otro CM, su espacio reservado le será anunciado por el CMTS en el siguiente mensaje que emita (Map 2).
- ✓ Una vez recibido el Map2 por parte del CM, éste deberá esperar al comienzo de las celdas de la región DS reservadas en el ciclo Map2 hasta que finalmente consigue transmitir sus datos.

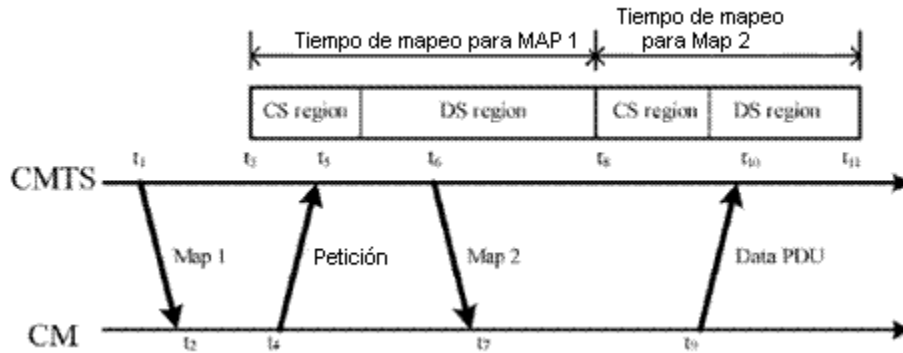


Figura 12. Lógica del subnivel MAC en DOCSIS

Por tanto, el funcionamiento del subnivel MAC descrito anteriormente impone un retardo en el acceso al medio de 2 ciclos MAP cada vez que un CM tiene datos para transmitir.

2.1.2.3 Canal Ascendente

El canal de subida será compartido por todos los CMs presentes en la red y gestionados por un CMTS común encargado de planificar los accesos al canal ascendente. Esta planificación en el acceso a este canal compartido será comunicada a los CMs mediante un mensaje especial por parte del CMTS denominado mensaje MAP.

La transmisión en este canal se realizará mediante TDMA (*Time Division Multiple Access*) en el que el tiempo se divide en celdas de $6,25 \cdot 2^n$ ($n=1..7$) microsegundos. Debido a las diferentes velocidades de símbolo y modulaciones utilizadas en el nivel físico, cada celda podrá contener entre 1 y 1024 bytes. Sin embargo, desde el punto de vista de que se trata de la unidad mínima de información, cuanto más información sea capaz de transportar cada celda mayor será el desperdicio de ancho de banda en la transmisión de paquetes de pequeña longitud. Por ello en la práctica, cada celda suele transportar 8 o 16 bytes.

Las celdas del canal ascendente serán agrupadas de manera lógica en ciclos repetitivos denominados tiempos MAP (definidos en el mensaje MAP), conteniendo cada uno de ellos una serie de celdas destinadas a la gestión de la red, al acceso por contienda y a las diferentes concesiones de transmisión de datos a los CMs por parte del CMTS. Ver Figura 13.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, cada CM posee un identificador único que hace las veces de dirección MAC denominado Service Flow ID (SID) y que a su vez está directamente relacionado con la asignación de una determinada QoS en la transmisión de datos entre cada CM y el CMTS. Cada CM podrá tener más de un SID en el que se describirá el mecanismo de solicitud y acceso al medio de transmisión. Los diferentes tipos de Service Flow definidos en DOCSIS y que a la postre introducen la diferenciación en cuanto a la calidad de servicio en DOCSIS son: Unsolicited Grant Service (UGS), Real-Time Polling Service (rtPS), Non-Real-Time Polling Service (nrtPS), Best Effort (BE), Unsolicited Grant Service with Activity Detection (UGS-AD).

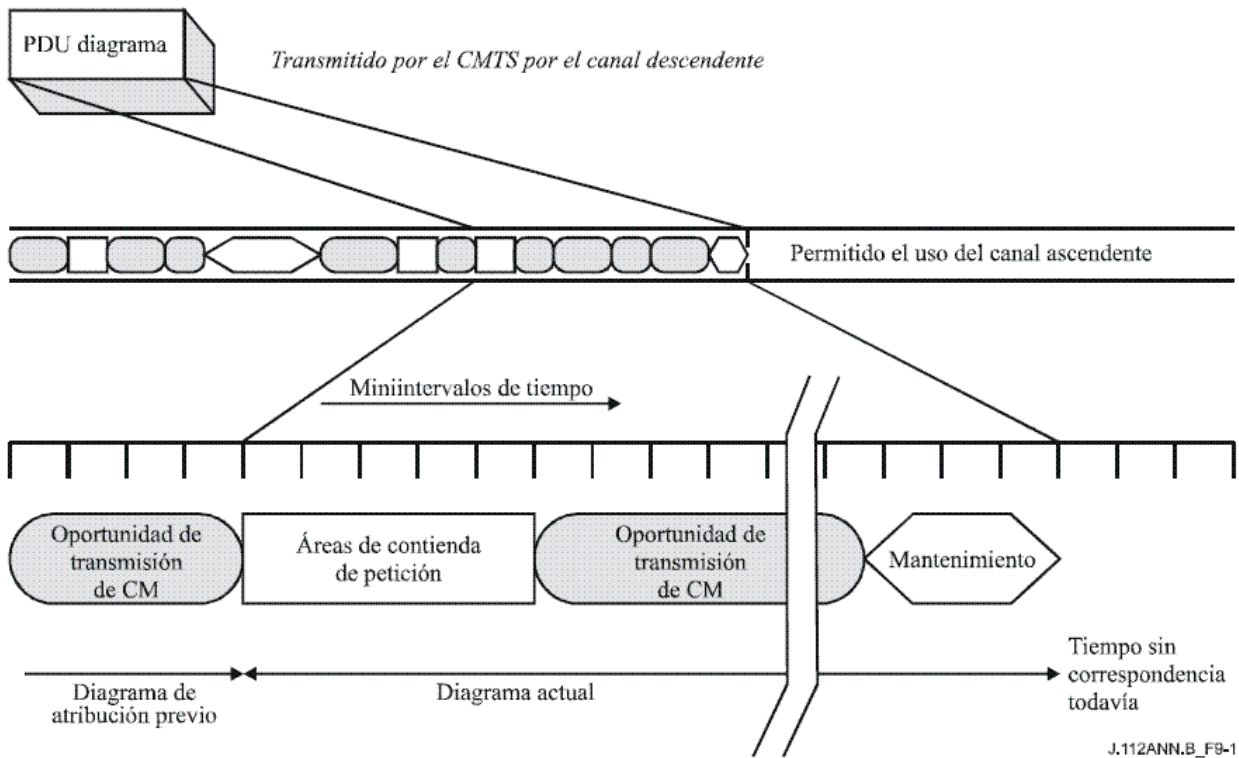


Figura 13. Distribución de celdas en canales DOCSIS (CableLabs, 2006)

- **Acceso por contienda, Contention Resolution Algorithm**

Cuando el SID asociado a un determinado CM se gestiona mediante el nivel de calidad de servicio Best Effort, las solicitudes de reserva que realice deberán contar con un mecanismo de detección y recuperación de colisiones (Contention Resolution Algorithm). El acceso, comienza con la recepción de un mensaje MAP por parte del CMTS donde se describen qué celdas pertenecen a la región de contención (CS). Cada CM seleccionará una determinada celda dentro de dicha región por medio del algoritmo TBEB. El *Truncated Binary Exponential Backoff* consiste en una espera binaria exponencial, cuyos límites de inicio y fin (DBS-DBE) son impuestos por el CMTS y anunciado dentro de los mensajes MAP que se emiten en el canal descendente.

- ✓ Cada CM comienza seleccionando una celda CS aleatoriamente comprendido entre 0 y 2^{DBS-1} , espera a que se produzca el instante asociado a la misma y realiza su solicitud.
- ✓ Espera a la recepción del siguiente MAP donde el CMTS anunciará si la petición ha tenido éxito o a colisionado con la petición de otro(s) CMTS.
- ✓ Si se produce colisión se aumenta el valor de DBS y vuelve a seleccionar una nueva celda CS aleatoriamente pero en este caso dentro de un rango mayor.
- ✓ Este crecimiento exponencial del rango permitido para la selección de un minislot CS se detiene cuando se alcanza el valor DBE, que impone el valor de ventana máxima en la que realizar la selección. El proceso de intentos de acceso está limitado a un número máximo de intentos, generalmente 16.

- **Acceso Piggybacking**

Este tipo de acceso se implementa en todas las versiones de DOCSIS. Con el objetivo de minimizar el número de peticiones que se realizan por medio del mecanismo de contienda, DOCSIS implementa este método de acceso mediante el que un CM podrá adjuntar una nueva reserva de ancho de banda durante el período de concesión dentro de una región de datos y, dado que esta zona ya ha sido concedida al CM estas peticiones estarán libres de colisiones. En algunos escenarios y bajo determinadas condiciones de carga este tipo de acceso puede llegar incluso a eliminar la necesidad del uso de acceso por contienda. La cabecera MAC tiene la capacidad de definir un campo denominado *Extended Header* el cual es usado para adjuntar las peticiones denominadas *piggybacked*.

- **Acceso Concatenado y Fragmentado**

Estos dos tipos de acceso sólo están disponibles a partir de la versión 1.1 de DOCSIS. El objetivo del acceso concatenado es el de permitir que diferentes unidades de datos (PDUs) pendientes de transmisión en el CM puedan ser enviadas juntas dentro de la misma concesión. Mediante este mecanismo se consigue reducir el número de veces que cada CM debe recurrir al mecanismo de acceso por contienda y con ello el número de colisiones que se produzcan. Cuando un CM decida empaquetar varias PDUs dentro del mismo periodo de transmisión, deberá indicarlo mediante el uso de la cabecera Concatenation MAC Header de forma que el CMTS pueda desempaquetar y procesar correctamente los datos de usuario. Las cabeceras Concatenation MAC Header y Extended Header son excluyentes entre sí, por lo que si un CM decide concatenar datos dentro de un mismo periodo de concesión no podrá solicitar un acceso *piggybacked* en el siguiente ciclo MAP

El objetivo del acceso fragmentado es el de reducir los tiempos de espera que un CM debe esperar a que le sea concedido espacio para transmitir si el espacio demandado por éste es superior al espacio libre en el ciclo que se encuentra programando el CMTS. En lugar de diferir la concesión hasta el siguiente ciclo que se presume libre de accesos, el CMTS que implementa el acceso fragmentado podrá asignar una parte del espacio requerido en la programación del ciclo actual consiguiendo mejorar la gestión de la utilización del canal. Este mecanismo resulta especialmente útil cuando los datos a transmitir por los CMs son grandes y son más difíciles de acomodar a medida que las peticiones de otros CMs van ocupando el espacio disponible de cada ciclo.

2.1.2.4 Canal Descendente

DOCSIS define un conjunto de cabeceras en las tramas MAC que permiten diferenciar las tramas de datos de aquellas que transportan mensajes de gestión de la red. Tan sólo estas cabeceras son comunes tanto en las tramas del canal ascendente como las del canal descendente. La naturaleza del canal descendente es broadcast en el sentido que todos los CMs son capaces de escuchar todo el tráfico que circula por la red HFC. Por tanto, los valores de SIDs serán los que permiten llevar a cabo la diferenciación del destinatario real de la trama en el canal descendente. Como en otras arquitecturas de red, existirán identificadores especiales denominados SIDs broadcast cuando los datos que viajan en una determinada trama van destinados a todos los CMs de la red.

La transmisión en el canal descendente es mucho más sencilla que en el caso del canal ascendente, tanto en concepto como en implementación. Tal y como se ha visto anteriormente, las capacidades de ambos canales son asimétricas siendo mucho mayor el ancho de banda del canal descendente, pero debido a que el CMTS es el único elemento que envía datos a todos los CMs presentes en la red, cabe la posibilidad de aparición de latencia en la recepción de datos provocada por el encolado de datos que el CMTS debe llevar a cabo. Dado que tanto el canal ascendente como el canal descendente siguen el mismo camino físico (usan el mismo cable de coaxial de cobre) el retardo de propagación en el medio es esencialmente el mismo en ambas direcciones y dada la gran longitud que estos pares pueden llegar a tener, este retardo de propagación puede alcanzar valores considerables que tendrán que ser tenidos en cuenta.

2.1.2.5 Planificación del canal ascendente. Creación de MAPs

Los mensajes MAP son mensaje de gestión de longitud variable transmitidos por el CMTS en el canal *descendente* con el objetivo de planificar los intervalos de transmisión en el canal *ascendente* que es compartido por todos los CMs presentes en la red.

La definición de una estrategia de planificación (*scheduling*) concreta en el reparto del ancho de banda por parte del CMTS ha sido evitada deliberadamente como una marca de distinción entre los diferentes fabricantes, aunque de manera general se incluyen las estrategias FIFO, la más pequeña antes, y Round-Robin.

Los mensajes MAP incluyen una cabecera de longitud fija seguida por un número variable de elementos de información (IE) compuestos por un determinado número de *minislots*. Cada mensaje MAP no podrá contener más de 240 IEs, y estará limitado a un número máximo de 4096 celdas. Dado que el campo en los mensajes de solicitud de ancho de banda destinado a especificar el número de minislots necesarios tiene una longitud de 1 byte, el máximo número de minislots que podrán ser asignados a cada CM será de 255.

2.1.2.6 Calidad de Servicio en DOCSIS

Con el objetivo de proporcionar calidad de servicio en el acceso al canal ascendente por parte de los CMs, DOCSIS v1.1 definen 6 niveles de QoS. El subnivel LLC define el concepto de SID como identificador de enlace lógico al que también se asocia con una determinada calidad de servicio, permitiéndose además a cada CM contar con varios SIDs simultáneamente. A continuación se recogen los diferentes niveles de calidad de servicio que se soportan a partir de la versión 1.1 de DOCSIS:

- ✓ Unsolicited Grant Service (UGS): Este servicio está diseñado para soportar flujos de datos en tiempo real que generan periódicamente paquetes de datos de tamaño fijo, como la transmisión de vídeo desde una cámara instalada en el equipo del usuario y encapsulada sobre un flujo MPEG-TS. Se pretende de esta forma reducir la latencia y la sobrecarga de las peticiones de acceso por contienda, asegurando el ancho de banda necesario para este tipo de transmisiones.
- ✓ Real-Time Polling Service (rtPS): Este servicio está diseñado para proporcionar acceso al canal ascendente en tiempo real para flujos que generan periódicamente paquetes de datos de tamaño variable, como video directamente codificado en MPEG. El servicio ofrece oportunidades periódicas *unicast*. Los CM podrán especificar el tamaño de ancho de banda necesario pudiendo definirse un mínimo y máximo por concesión. Este servicio requiere más sobrecarga de mensajes de mantenimiento que UGS.
- ✓ Unsolicited Grant Service with Activity Detection (UGS-AD): El servicio UGS-AD soporta 2 flujos alternativamente: UGS (*Unsolicited Grants*) cuando el flujo está activo y sondeos *unicast* (*unicast polls*) cuando el flujo está inactivo. Este servicio resulta atractivo para los sistemas VoIP con supresión de silencio.
- ✓ Non-Real-Time Polling Service (nrtPS): Este servicio está pensado para tráfico que no es en tiempo real y que requiere concesiones de datos de tamaño variable de forma regular debido a que requieren gran ancho de banda. El servicio ofrece sondeos *unicast* (*unicast polls*) para asegurar que el flujo recibe suficientes oportunidades de transmisión de datos en el canal ascendente.
- ✓ Best Effort Service (BE): El objetivo es proporcionar servicio eficiente al tráfico *best effort*. El acceso al canal ascendente en este caso se llevará a cabo mediante el mecanismo de contienda y, por tanto, no se garantiza ancho de banda a estos tipos de flujos de manera constante. Para mejorar la eficiencia en el acceso mediante este servicio, se han desarrollado las opciones de *piggybacking*, *concatenation* y *fragmentation*.
- ✓ Committed Information Rate (CIR): Este servicio puede ser definido de diferentes formas. Por ejemplo, podría ser configurado usando *Best effort* con una garantía mínima de tráfico o bien nrtPS también reservando una velocidad de tráfico mínima.

2.2 Parámetros de Desempeño de las redes HFC

Con las bases teóricas estudiadas anteriormente, en este apartado se presentan los parámetros de desempeño que se deben tener en cuenta tanto para el canal interactivo como para el canal de broadcast, tal que conforman los parámetros a tener en cuenta dentro del estudio de la red HFC ante el aumento de tráfico y variación de los parámetros DOCSIS que se llevara a cabo en el capítulo 5 de esta Tesis.

2.2.1 Parámetros de desempeño en el canal interactivo

El canal interactivo es un medio compartido y utilizado por las aplicaciones que compiten por los recursos de la red (Nortel, 2003). En el caso de aplicaciones de TDi que hagan uso del canal interactivo, las solicitudes o envío de información necesitan ser atendidas con una alta prioridad por parte de los equipos de red para cumplir con los parámetros de retardo y pérdida de paquetes que requiere el servicio y de esta forma proporcionar una interactividad adecuada.

Desde el punto de vista del usuario, uno de los factores de calidad de funcionamiento es la rapidez con que se presenta el contenido una vez se lo ha solicitado (ITU-T_G.1010, 2001). Para los servicios interactivos, como la TDi 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 paquetes tiene que ser nula (ITU-T_G.1010, 2001).

2.2.2 Parámetros de desempeño en el canal de difusión

Las aplicaciones de video son sensibles al retardo y a la pérdida de paquetes (ITU-T_G.1010, 2001). Sin embargo, las red HFC, como evolución de las redes de cable tradicionales han sido pensadas para la distribución de canales de TD, que garanticen los niveles mínimos de calidad de servicio para su adecuada transmisión y recepción. Entre los aspectos que hacen a las redes HFC idóneas para la difusión de televisión digital están:

- El 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 (García R. , 2005), (Berrocal, 2003).
- 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 (ISO/IEC_13818-1, 2000).
- 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.
- 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 (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998).
- La difusión de TD 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 (MHP T. M., 2006).

Las anteriores consideraciones permitirán a la red HFC satisfacer los requerimientos de calidad de servicio para la difusión de TD mostradas en la Tabla 3, (ITU-T_IPTV, 2007) (ITU-T_H.262, 1995)(ITU-T-H.264, 2003), (ETSI_EN_300_429_V1.2.1, 1998), (Sienra L. G., 2003). Con el cumplimiento de dichos parámetros no existirá una degradación visible de la imagen de video ni en el audio del programa de televisión.

Tipo de codificación	Retardo (Dalay)	Variación del Retardo (Jitter)	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

Tabla 3. Parámetros de nivel de transporte para una adecuada QoS en TD.

El no cumplimiento de las anteriores consideraciones no permitirán a la red HFC satisfacer los requerimientos de calidad de servicio para la difusión de TD mostradas en la Tabla 3, el no cumplimiento de dichos parámetros genera una degradación visible de la imagen de video y del audio del programa de televisión.

2.3 Infraestructura tecnológica del laboratorio de EDiTV de la Universidad del Cauca

En este apartado se presenta en detalle los componentes mínimos hardware que permitieron la construcción del laboratorio de EDiTV donde se desarrollan los diferentes procesos, como construcción de aplicaciones, medidas de tráfico, puesta en funcionamiento y pruebas para todo el proceso desarrollado dentro del proyecto EDiTV (EDiTV, 2008).

Teniendo en cuenta las potencialidades de la TDi en el ambiente académico de las Universidades es apenas lógico que se piense en la construcción de una infraestructura para el soporte y construcción de los servicios que se planean implantar. Por esta razón, se ha definido un escenario propicio para la construcción de servicios sobre la

red de TDi, para propósitos educativos, es decir en el campo de “T-learning”. Es en este contexto, donde ha surgido la necesidad de realizar un estudio de los requerimientos para la implementación de un laboratorio experimental de TDi dentro del proyecto EDiTV, que permita construir y experimentar los nuevos servicios que se podrán desplegar sobre esta nueva televisión.

La Figura 14 muestra la cadena extremo-extremo para TDi donde se observan cuatro tipos de actores con funciones bien diferenciadas: el proveedor de contenidos y servicios, el broadcaster, el operador de red y el usuario final.

El proveedor de contenidos y servicios se encarga de la producción de contenidos de audio/video digitales basado en el estándar MPEG-2. Estos contenidos son almacenados en sistemas tipo CMS (Content Management System) para su gestión. Además existen proveedores de servicios que desarrollan y mantienen aplicaciones interactivas desarrolladas bajo el estándar Multimedia Home Platform - MHP(ETSI_TS_102_812, 2006), para más detalles sobre MHP ver anexo A.

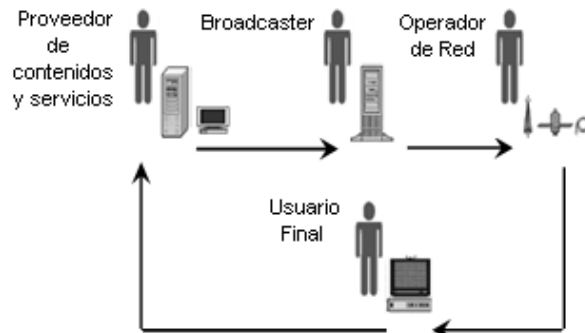


Figura 14. Cadena extremo a extremo de la TDi

Los contenidos de audio y video son adaptados y multiplexados en un flujo de transporte MPEG-2 por el broadcaster, así mismo este se encarga de generar e inyectar en el flujo MPEG-2 el carrusel de objetos que transporta las aplicaciones interactivas. El broadcaster se encarga de enriquecer el flujo MPEG-2 con un conjunto de tablas de datos que permitirán la correcta selección de servicios y aplicaciones por parte del usuario.

El flujo de transporte es entonces adaptado y difundido a través de una red de televisión digital ya sea satelital, terrestre o de cable, siguiendo las especificaciones del respectivo estándar de televisión digital.

Por último el usuario final a través del equipo terminal (televisor y/o set-top box) recibe y controla los contenidos y servicios. Además puede enviar y/o recibir información a través de un canal de retorno de vuelta hacia el proveedor de contenidos y servicios interactuando remotamente con este.

2.3.1 Análisis de Requerimientos Hardware

Para los objetivos de este trabajo de grado el laboratorio debe soportar las funcionalidades mínimas de la televisión digital más el acceso a servicios enfocados al t-learning. Así se han definido los requisitos funcionales dentro del proyecto EDiTV los cuales son:

- ✓ Soporte de contenidos de Televisión Digital: debe soportar el despliegue de contenidos audiovisuales.
- ✓ Soporte de aplicaciones interactivas: Debe soportar el desarrollo de aplicaciones del lado del proveedor de servicios; y la ejecución de las mismas tanto del lado del usuario final como del proveedor de servicios.
- ✓ Despliegue real: Los componentes deben permitir validar los servicios construidos en un ambiente real pero a menor escala.
- ✓ Capacidad de verificación: Es necesario contar con algunos componentes que permitan verificar las aplicaciones y contenidos en su desarrollo y ejecución. Estos componentes pueden ser simulados/emulados o reales.
- ✓ Componentes abiertos: Para poder realizar experimentación, los componentes en lo posible deben estar sujetos a modificación o mejora para lograr y crear nuevas funcionalidades.

- ✓ Estandarización: Para lograr la interoperabilidad entre los diferentes actores que participan en la cadena extremo-extremo para TDi y acelerar los tiempos de desarrollo, es necesario seguir un conjunto de estándares.
- ✓ Interactividad: Es necesaria una interacción con los usuarios finales tanto local (aplicaciones en los terminales) como remota (servicios a través de la red de datos).
- ✓ Representación de actores: Deben existir componentes adecuados para la mayoría de actores en la cadena de TDi involucrados en el manejo de contenidos y aplicaciones.

Además existen otro tipo de requisitos no funcionales debido a la infraestructura de soporte del laboratorio, que influyen en su implementación.

- ✓ Economía: Los componentes deben ser los mínimos y su costo debe ser el más bajo posible sin afectar los requisitos funcionales. Se busca el reemplazo de elementos hardware por software libre o gratuito y el reuso de elementos.
- ✓ Facilidad de uso: Los componentes deben ser simples sin opciones complejas pero sin sacrificar la funcionalidad, permitiendo que su aprendizaje y uso sea rápido.
- ✓ Escalabilidad: La infraestructura debe permitir a futuro la evolución, actualización y expansión de funcionalidades.
- ✓ Interoperabilidad: Los componentes deben en lo posible comunicarse sin crear nuevas interfaces o protocolos para ello.

2.3.2 Infraestructura del Laboratorio de EDiTV

Sobre la base de los anteriores requisitos se dotó la infraestructura hardware de la Figura 15 que muestra los componentes mínimos de un laboratorio para el desarrollo y despliegue de servicios interactivos

2.3.2.1 Infraestructura Hardware

Un diagrama de despliegue de la infraestructura hardware del laboratorio de TDi se muestra en la Figura 15, donde además se hace el mapeo de los componentes software descritos en el apartado 2.3 de este documento. A continuación se describe cada uno de los componentes hardware, fundamentales en el laboratorio de EDiTV en el contexto del proyecto EDiTV pero pueden ser extrapolados a otros contextos.

- **Servidor de Contenidos y Aplicaciones.** Este componente se encarga del almacenamiento y adecuación de los contenidos y aplicaciones, para su posterior transporte por el servidor de televisión. Se comunica con el servidor de televisión, con los equipos de producción/developmento y con los equipos terminales a través de una conexión de red Ethernet.
- **Servidor de Televisión:** Este componente se encuentra representado por un computador servidor con características de procesamiento, memoria, interfaz, autonomía y almacenamiento especiales para dar soporte a los servicios de Playout y modulación. Dentro de este servidor se lleva a cabo la generación del flujo de transporte MPEG-2 a través de la multiplexación de datos de diferentes fuentes como son: los flujos de audio/video, la información de programa/servicio y el sistema de archivos del carrusel de objetos, tareas que demandan gran cantidad de procesamiento y un funcionamiento continuo. El servidor puede presentar una o varias interfaces de red para la comunicación con el servidor de contenidos y aplicaciones; así como una interfaz de cable que lleva el flujo de transporte modulado hacia los equipos terminales.
- **Sistema de Codificación y Modulación:** El modulador realiza la adaptación de los flujos de televisión a una señal adecuada para la transmisión bajo el estándar DVB-C. Los Fabricantes ofrecen los equipos de codificación y modulación, integrados o independientes, tanto internos como externos. Para la escogencia del codificador y modulador interno es necesario revisar las características del servidor de Playout, si es capaz de entregar directamente el flujo MPEG-2 al modulador o si entrega el flujo a la fase previa de codificación. En el laboratorio, el servidor de Playout OpenCaster ofrece las dos posibilidades, razón por la cual se escoge un modulador interno (los externos son más costosos) para computador que cumple con la norma DVB-C (ETSI_EN_300_744, 2004-11). De igual forma es recomendable para la elección del modulador tener en cuenta,

tanto el estándar de televisión digital a utilizar como el tipo de plataforma de televisión (Satelital, Terrestre, Móvil o Cable).

- Set Top Box (STB):** Este componente se encarga de la recepción de una señal digital de televisión y de su decodificación para ser presentada en un aparato de televisión (Lopez, Pazos, Blanco, Lopez, & Duque, 2005). El STB esta dotado de un middleware MHP (ETSI_TS_102_812, 2006), que le permite soportar características de interactividad. Algunos STB cuentan con un canal de retorno, lector de tarjetas inteligentes y/o disco duro. Existen además STBs de desarrollo para la prueba directa de aplicaciones.

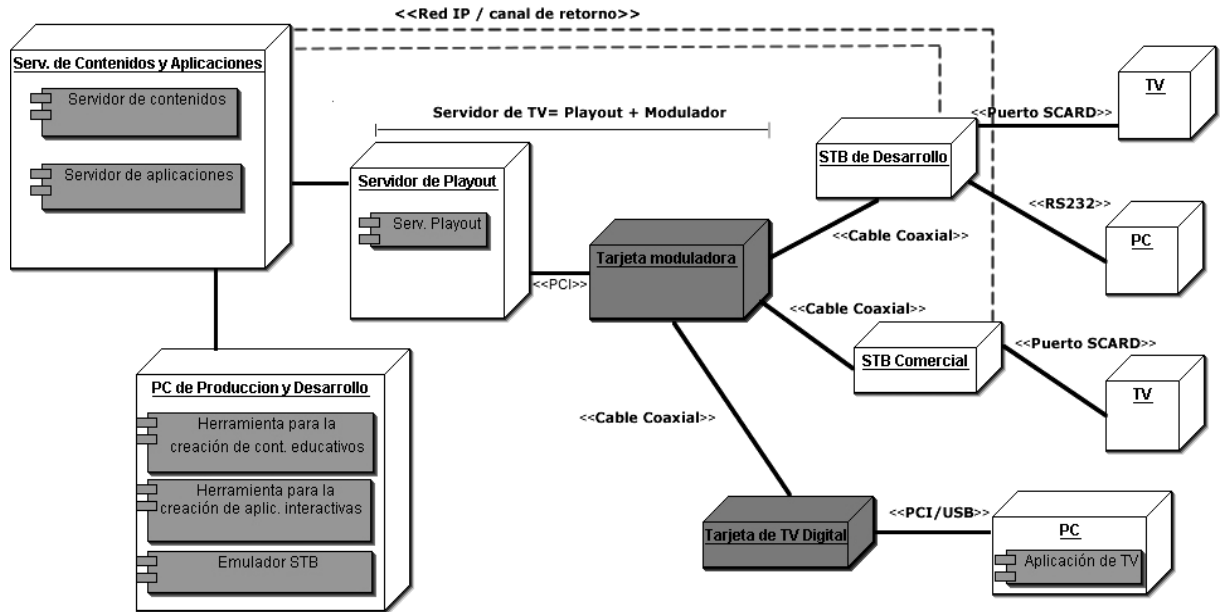


Figura 15. Diagrama de Despliegue – Laboratorio experimental de EDiTV

- Televisor:** Desde el punto de vista de la recepción de la señal, pueden ser analógicos o digitales. Es posible realizar pruebas con cualquiera de los dos, pues a ellos se conecta el STB.
- Tarjeta de Televisión Digital:** Este componente permite sintonizar los canales de televisión digital y así poder visualizarlos en el computador a través de un software cliente que viene con la respectiva tarjeta. Es además útil para captura y prueba del flujo MPEG-2.
- Red de datos:** La infraestructura de comunicación usada por el laboratorio es la de una red IP. En la Figura 14 los módulos que corresponden a Proveedor de contenidos y Broadcaster pueden estar distribuidos sin importar su localización, sin embargo se requeriría una disponibilidad de ancho de banda considerable. En el caso del proyecto EDiTV esta conexión está garantizada a través de la red RENATA; que brinda enlaces de 200 Mbps en Tecnología MPLS (Multiprotocol Label Switching) y enlaces de 22,5 Mbps fuera del país. La red de datos también es usada como canal de retorno en el laboratorio, práctica que es habitual en los sistemas de TDT (Televisión Digital Terrestre) o satelital.

2.3.2.2 Elementos Hardware

De acuerdo con la infraestructura tecnológica definida, se procedió a elegir los elementos que se utilizarían para cada componente implementando así el laboratorio experimental de TDi para la Universidad del Cauca. En la Tabla 4 se presentan los elementos elegidos.

Componente Hardware	Elemento utilizado
Servidor de Contenidos y Aplicaciones Servidor de Televisión	Servidor DELL (PowerEdge 2,2 Ghz, Disco Duro 160GB, RAM 2GB)
Modulador	Tarjeta Moduladora: DekTec Ref. DTA-110T. Soporta DVB-C, DVB-T y DVB-H ADB i-CAN 2000T
STB de Desarrollo	ADB Ref. Q75DEV Soporte a MHP
Televisor	TV Digital LG 32LG30R, 32in, con soporte PAL, NTSC
Tarjeta de TV Digital	Hauppauge WinTV-NOVA-T, para slot PCI, con soporte a DVB-T

Tabla 4. Elementos HW para el laboratorio de TDi

2.3.3 Análisis y Diseño de la Aplicación EDiTV

Se desarrollo una aplicación real que se ejecuta sobre los equipos del laboratorio de EDiTV, a partir de la cual se llevaran a cabo las medidas reales de tráfico generado por una aplicación de esta naturaleza. La revisión del estado del arte muestra que existen muy pocas aplicaciones de este tipo disponibles y la mayoría de las investigaciones en este campo nunca se apoyan en implementaciones reales, recurriendo siempre a simulación y generación de patrones de tráfico simulado

2.3.3.1 Requerimientos

Los requerimientos de la aplicación han sido definidos dentro del proyecto EDiTV mediante la participación de los diferentes grupos, teniendo en cuenta los conceptos pedagógicos, de usabilidad y de ingeniería, los cuales se condensan en los siguientes puntos (EDiTV, 2008).

- ✓ 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.
- ✓ Los videos dentro de cada sección deben presentarse a petición del usuario.
- ✓ Cada sección de video puede presentar una o más aplicaciones interactivas.
- ✓ Las aplicaciones interactivas solo se deben presentar si el usuario así lo desea.

Además existen otro tipo de requisitos funcionales debido a la infraestructura de soporte del laboratorio, que influyen en la implementación de la aplicación. El requisito más destacado es el uso de MHP versión 1.0.2 como middleware que soporta el STB para la ejecución de aplicaciones.

2.3.3.2 Arquitectura Software de la Aplicación

La arquitectura de la aplicación viene dada por los diferentes requerimientos software así como por el hardware en el que se encuentra soportado. De acuerdo a esto se presenta en la Figura 16, la arquitectura que siguen las aplicaciones desarrolladas dentro del proyecto EDiTV (EDiTV, 2008).

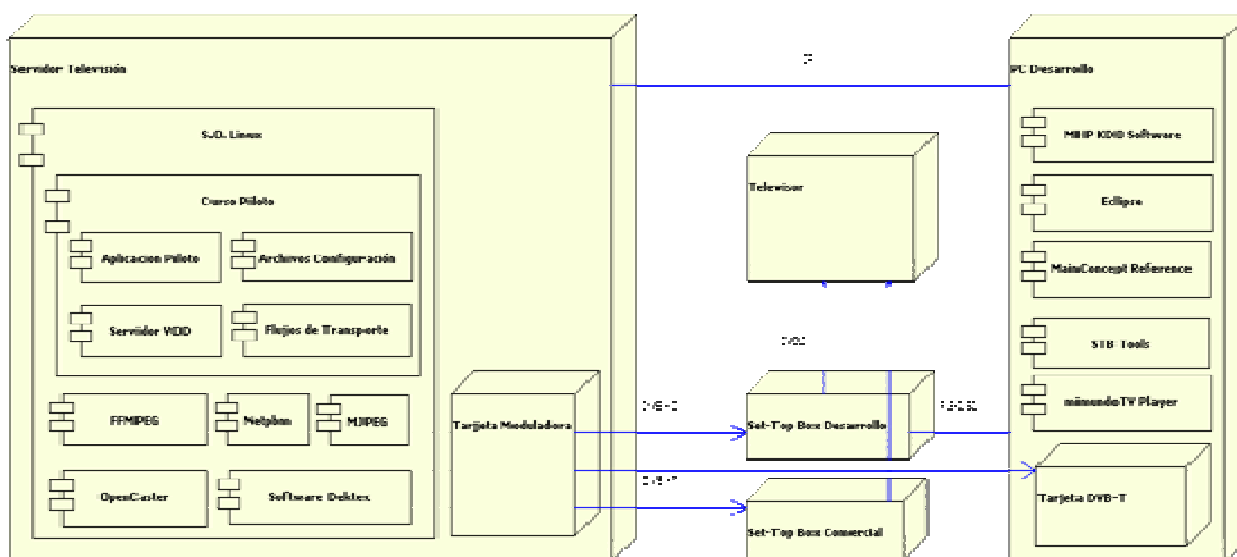


Figura 16. Arquitectura Software de la Aplicación

Dentro de esta arquitectura pueden observarse diferentes componentes que interactúan para proporcionar el servicio requerido. Los elementos desarrollados dentro del proyecto corresponden al componente denominado Curso Piloto mientras que los otros componentes software corresponden a herramientas existente en su mayoría software libre, con la ayuda de algunos programas comerciales los cuales son descritos en el Anexo B

2.3.3.3 Componentes Desarrollados

- **Aplicación Servidor de Video Bajo Demanda**

Debido a las restricciones que impone el Middleware usado por el STB (MHP 1.0.2) la capacidad de realizar video bajo demanda a través de IP no pudo ser implementada, por esta razón se realiza la implementación a través del Broadcast. Para ello se implementó un servidor de peticiones en el lenguaje Python que gestiona los eventos de envío y terminación de los flujos de audio/video a petición del usuario a través del protocolo UDP.

- **Aplicación Curso Piloto DVB-J**

La aplicación Curso Piloto fue desarrollada bajo DVB-J (DVB-Java) en el lenguaje Java siguiendo las restricciones de MHP. Es una aplicación que permite navegar a través de los diferentes contenidos del curso e interactuar en diferentes etapas de este a través del control remoto del usuario y de la conexión IP con el servidor de Video Bajo Demanda. En el siguiente apartado se detalla el funcionamiento de esta aplicación.

- **Archivos de configuración y flujos de transporte**

Aunque no corresponden a componentes software son el insumo principal que necesitan las aplicaciones para formar el Curso Piloto. La descripción de dichas configuraciones se encuentra en el Anexo B.

2.3.4 Curso Piloto

- **Diagrama de despliegue de la aplicación**

El diagrama se muestra en la Figura 17. La aplicación fue desarrollada a través de un único Xlet⁶ llamado Curso que hace las veces de lanzador de Escenas. La escogencia de este método de programación permite optimizar los

⁶ Xlet: Es similar a una Applet. Las Xlets son controladas por un "manejador externo de aplicaciones" que viene incluido en el propio STB, y es precisamente este manejador externo el que puede interactuar con el flujo de vida de la aplicación, permitiendo iniciarla, arrancarla y pararla, pausarlas y resumirlas

tiempos de carga de cada sección o escena dentro de la aplicación, ya que si se tuvieran varios Xlets la carga del ciclo de vida de cada uno tomaría tiempos de espera inadmisibles por el usuario.

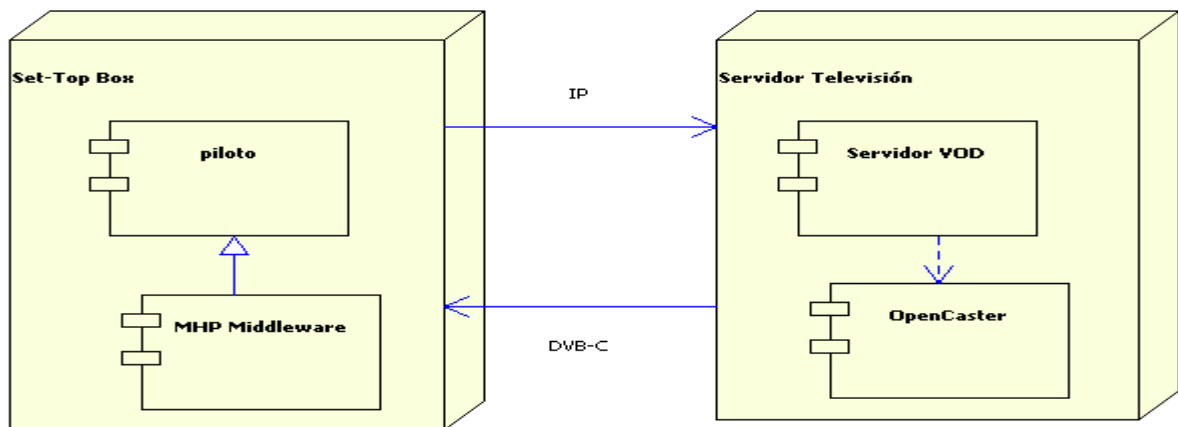


Figura 17. Diagrama de Despliegue aplicación piloto

- Descripción de las clases de la aplicación

En el diagrama de clases se detallan los componentes de la aplicación Curso Piloto ver Figura 18. Cada Escena implementa un contenido del menú del curso o una aplicación independiente señalizada desde alguno de estos. Las escenas heredan de la Clase PlantillaEditv una apariencia común a todas mediante la estandarización de una barra de título, una barra de botones de navegación/información, tipo y tamaño de letra, colores de componentes, entre otros. En cuanto a la navegación cada Escena es independiente una de otra y solo puede realizar transiciones a través de la Clase Curso que es la que gestiona la destrucción de la Escena anterior y la ejecución de la Escena siguiente.

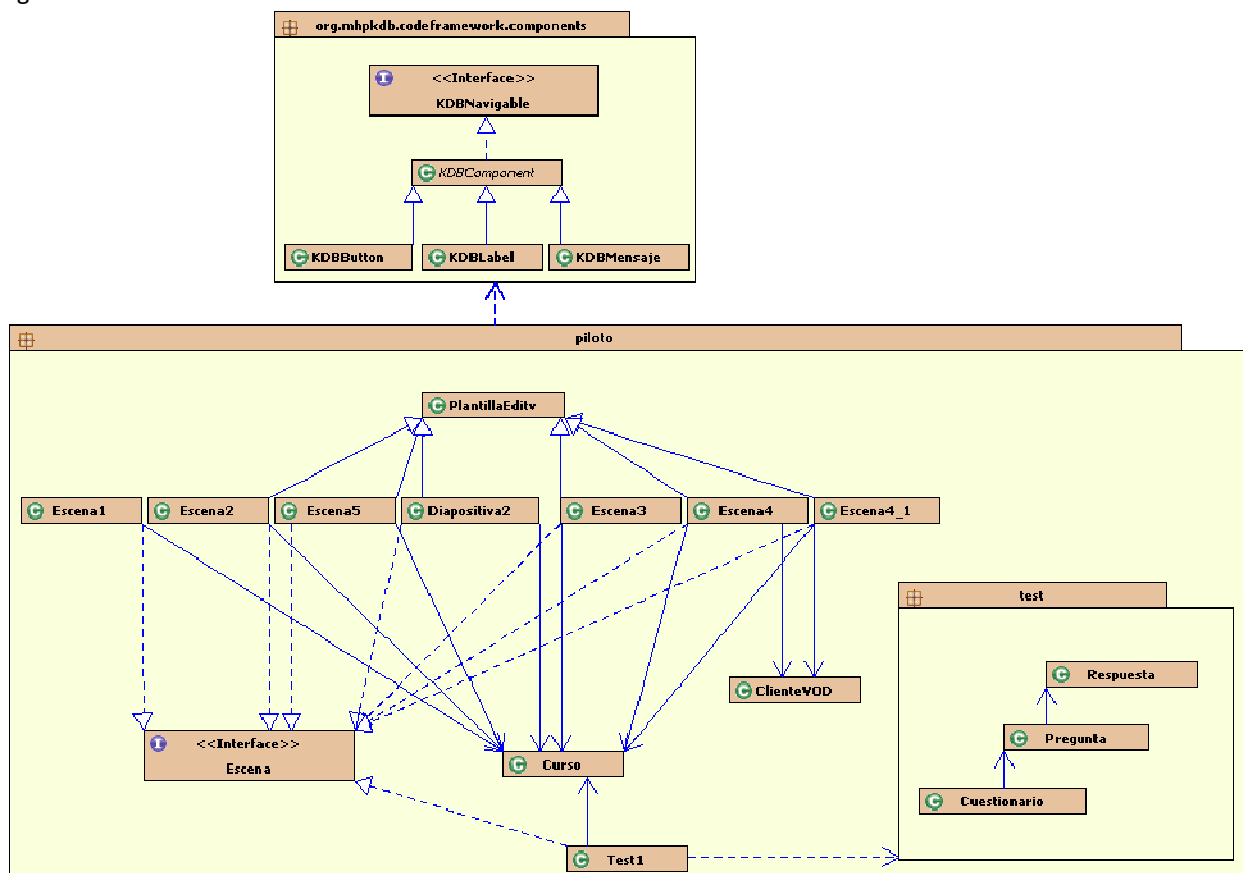


Figura 18. Diagrama de Clases Curso Piloto

Existen otros componentes que usan las escenas para particularizarse como son el ClienteVOD, Clase que maneja la comunicación de paso de mensajes con el servidor de Video Bajo Demanda. El paquete Test, encargado de implementar una aplicación de cuestionarios (Clases Cuestionario, Pregunta, Respuesta). La clase Diapositiva que implementa una aplicación de manejo de diapositivas a través de videodrips de video. Adicionalmente se genero el componente gráfico KDBMensaje con base al paquete Codeframework y que implementa un mensaje de escogencia de SI/NO frecuentemente usado por las escenas.

- **Ejecución de una sección**

El proceso de ejecución de una sección puede verse en la Figura 19. El diagrama de colaboración muestra lo siguiente:

- ✓ El usuario inicia la aplicación Curso a través del control remoto del STB.
- ✓ La aplicación Curso inicia creando la Escena1 correspondiente a la "Pantalla Introdutoria". Posteriormente entra en estado pausado, hasta ser despertada por una Escena.
- ✓ El usuario a través del botón "Entrar" genera una petición de carga de la Escena2.
- ✓ La Escena1 despierta a Curso enviándole la orden de cargar la Escena2. Curso destruye la Escena1, Carga la Escena2 y entra en estado pausado.
- ✓ La Escena2 correspondiente al "Menú de Contenidos", espera la selección del usuario. El usuario hace la selección de ver el contenido correspondiente a la Escena3. Escena2 despierta Curso enviándole el mensaje de cargar la Escena3. Curso destruye la Escena2, carga la Escena3 y queda en estado pausado.
- ✓ La Escena3 correspondiente a la "Introducción" genera la orden de enviar un mensaje por el canal de retorno a la clase ClienteVOD.
- ✓ ClienteVOD realiza la conexión con el programa ServidorVOD a través del canal de retorno y le envía el mensaje de cargar el Video1.
- ✓ ServidorVOD llena el flujo de video alterno con los paquetes del flujo pedido y coloca en espera el evento de información.
- ✓ En el tiempo programado el Broadcast envía el evento de información el cual llega a la Escena3.
- ✓ Escena3 muestra el mensaje de ver información de biografía al usuario. Si este acepta la Escena3 muestra la biografía en pantalla.
- ✓ Cuando el usuario ha terminado de ver el video, puede volver al menú de contenidos (Escena2) o Salir. Si decide Salir, la Escena3 envía a través de la clase ClienteVOD el mensaje de parar el video bajo demanda.
- ✓ Escena3 despierta Curso enviándole el mensaje de Salir.
- ✓ Curso destruye la Escena3. Cambia de nuevo el flujo de audio/video al Broadcast. Cierra la aplicación.

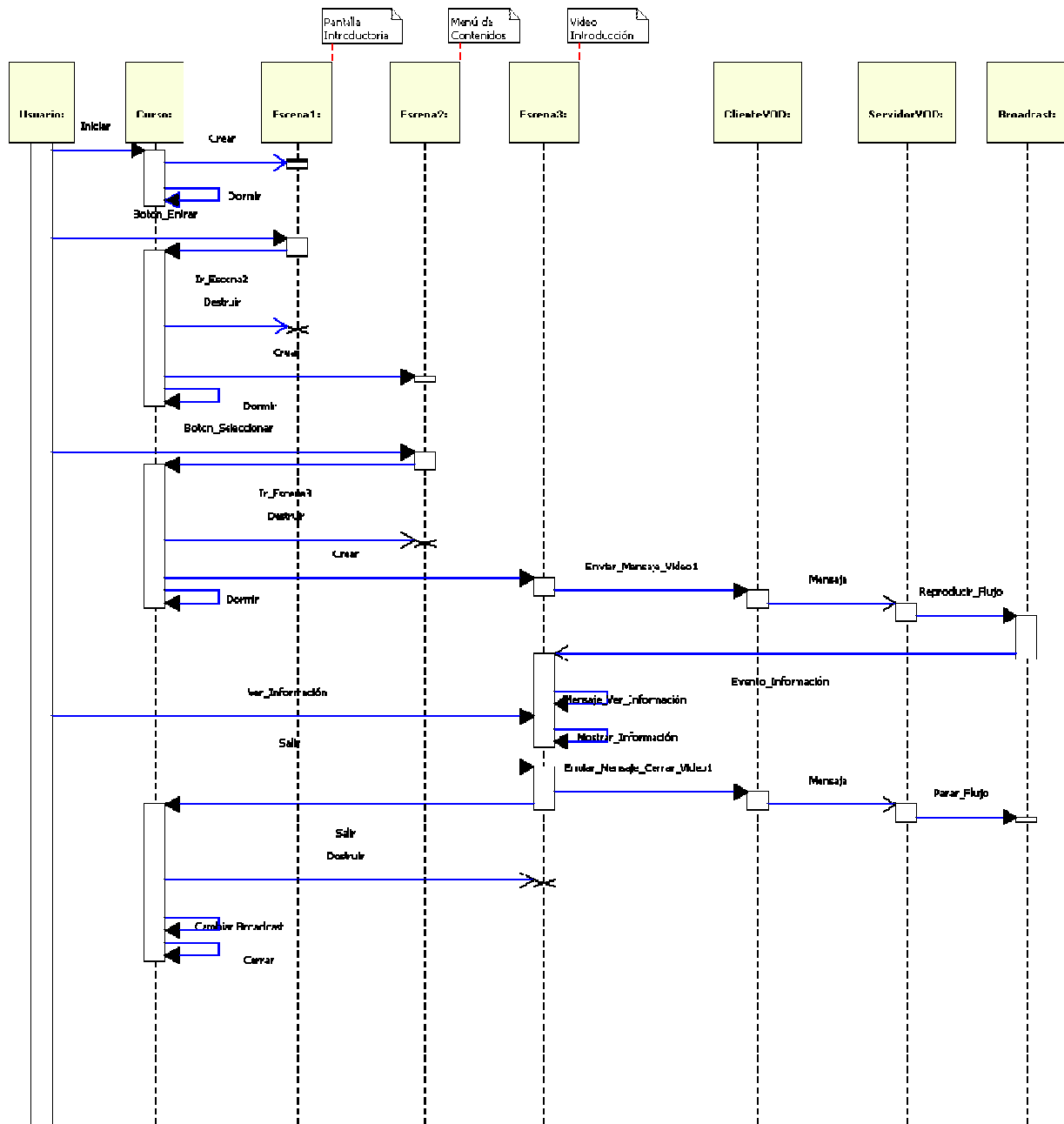


Figura 19. Diagrama de Colaboración Sección Introducción

2.4 Construcción de Contenidos de EDiTV

Este apartado puede ser muy especializado por lo que se presentan mediante el Anexo B.

2.5 Componentes de los Contenidos de EDiTV

En la Figura 20 se observa la arquitectura de la TDi, dicha arquitectura soporta tres tipos de contenidos básicos que deben estar presentes: el audio, el video y los datos. En televisión los contenidos comunes son el audio y el video, pero gracias a la digitalización de los datos y a las capacidades computacionales de los receptores, pueden presentarse muchos tipos de contenidos adicionales en forma de datos.

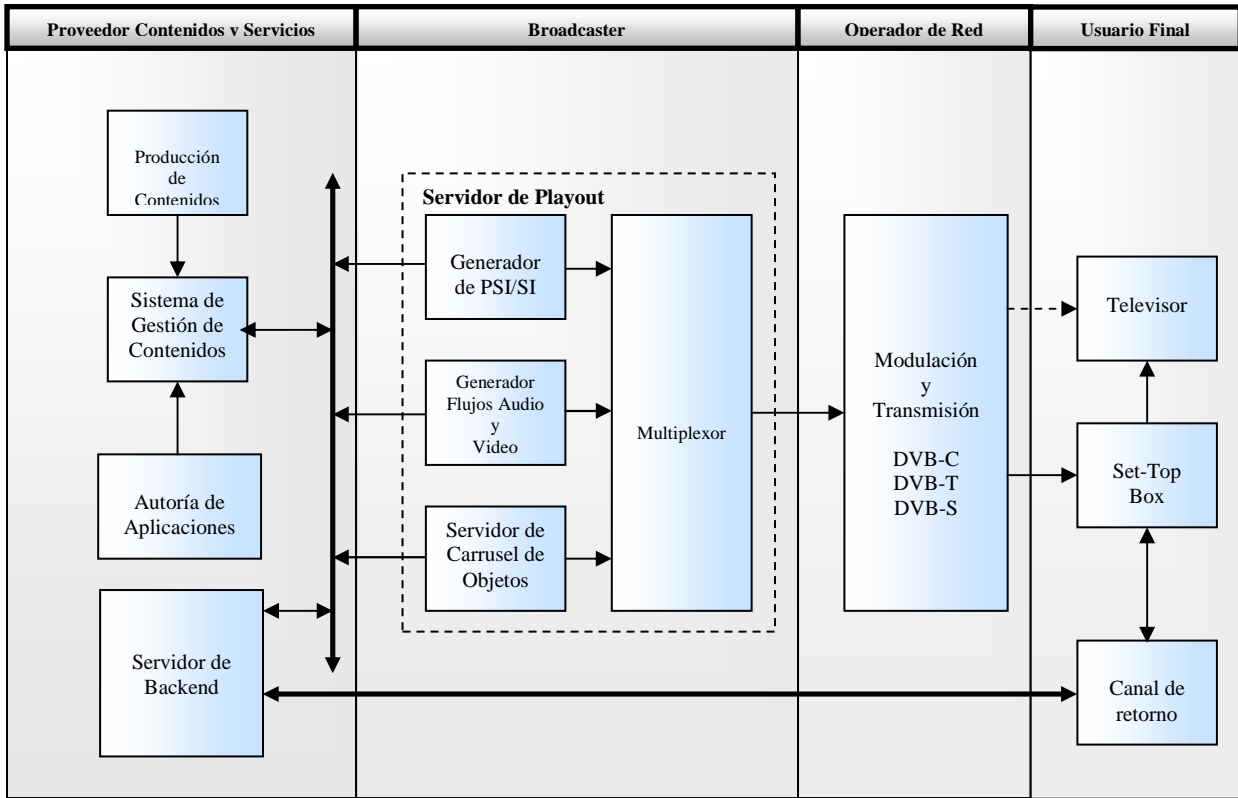


Figura 20. Arquitectura de TDi

En el proyecto EDiTV se trabaja bajo las especificaciones del DVB-C las cuales estandarizan las tecnologías que debe emplear una cadena de TDi. Estas tecnologías se basan en los estándares MPEG-2 para la codificación de audio/video y transporte de contenidos y en el middleware MHP para la generación y presentación de contenidos interactivos. El consorcio DVB usa flujos elementales MPEG-2 que llevan tanto audio como video y datos. Cada flujo elemental puede tener una tasa de bits diferente, aunque generalmente las tasas más altas corresponden a los flujos de video mientras que las más bajas a flujos de audio y datos. En la Figura 21 se muestran las tecnologías utilizadas dentro la TDi

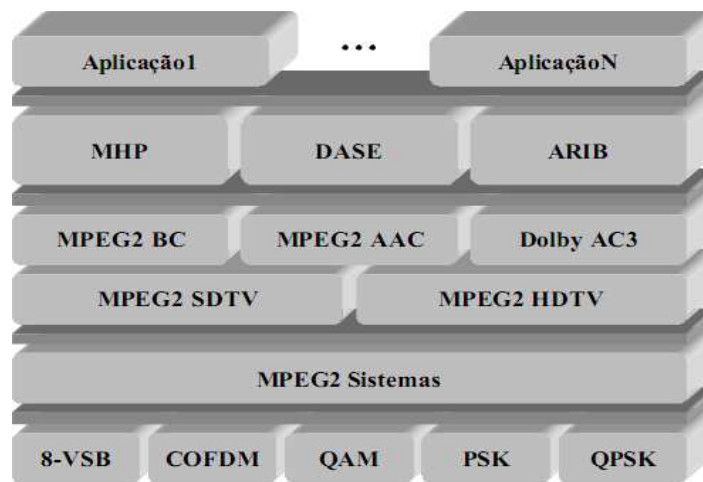


Figura 21. Tecnologías en TDi

2.5.1 Audio y Video

El audio transmitido por broadcast es codificado mediante MPEG-2 a través de un ES (Elementary Stream) flujo elemental. El formato para los clips de audio en MHP es el de un flujo elemental de datos de audio MPEG-1 (capas 1 y 2), como está definido en (ISO/IEC-11172-3, 1996) y en(ETSI_TR_101_154, 2007).

Cada “archivo” de contenido de audio es un fichero de datos binarios que contiene datos de un flujo elemental de audio. Cada “archivo” entrega un número entero de unidades de acceso al audio y el primer byte de cada fichero es el primer byte de una unidad de acceso audio. Por lo demás, los datos de audio de MPEG son conformes a las especificaciones proporcionadas en TR 101 154 (ETSI_TR_101_154, 2007). Las implementaciones que decodifican clips de audio pueden asumir que tienen un número aproximadamente constante de bytes por segundo, pero si no se cumple esta condición, el comportamiento de los decodificadores dependerá de la implementación.

Los receptores MHP deben disponer de la memoria suficiente para poder cargar con éxito un archivo y reproducir de la memoria 5 segundos de audio como se indica en (ETSI_TR_101_154, 2007).

El video transmitido por broadcast es codificado mediante MPEG-2 a través de un flujo elemental. Para la codificación del audio y el video en formato MPEG-2 ES, existen numerosas soluciones comerciales y libres, aunque no todas producen flujos que cumplen con los estándares para trabajar en TD. Entre las herramientas que han probado ser eficientes en este proceso de generación para las aplicaciones de EDiTV están: Adobe Premiere (Adobe, 2008), Mainconcept Reference (Main_Concept, 2009) y TMPGEnc (TMPGEnc, 2008) como soluciones comerciales; y herramientas libres como ffmpeg (FFMPEG, 2007) y mencoder (MPlayer, 2008).

Una ventaja de usar las herramientas libres como ffmpeg y mencoder es el control que se tiene por parte del usuario de la gran cantidad de parámetros y opciones al momento de crear los flujos, ya que las herramientas comerciales generalmente solo permiten la escogencia de ciertas plantillas de generación. Por otra parte una desventaja de las herramientas libres frente a las comerciales es que no logran una gran calidad en la codificación.

- **Codificación de audio y vídeo**

Se hace uso del programa Mainconcept Reference el cual posee un codificador con múltiples perfiles para codificar audio y video en prácticamente cualquier formato. Entre sus perfiles contiene uno específico para generar flujos de transporte DVB MPEG-2 con múltiples parámetros configurables. Aunque los buenos codificadores son costosos, este programa es muy económico y vale la pena tenerlo entre las herramientas para televisión digital. El proceso a seguir mediante el Mainconcept Reference versión 1.1.1 se describe en el anexo B.

2.5.2 Gráficos

En MHP se pueden representar los formatos de imagen JPEG⁷ y PNG⁸. Aunque la mayoría de receptores también soportan el formato GIF. Todas las imágenes tienen como restricción que deben ser codificadas en el espacio de color RGB (*Red, Green, Blue*) para ser representadas correctamente por el decodificador de lo contrario, el decodificador interpretará la paleta de colores de la imagen con un color correspondiente a la paleta RGB. La profundidad de color de los gráficos está reducida a 256 colores o menos. La tabla de colores usada bajo MHP contiene 139 colores opacos, 48 colores con transparencia del 30% y 1 color con transparencia de 0% (MHP T. M., 2006).

La generación y conversión de imágenes para usar en aplicaciones de TDi es muy similar a la que se realiza en un computador convencional. Existen programas como Paint distribuido con los paquetes Microsoft Windows, herramientas como photoshop de uso comercial o programas como GIMP software de edición de imágenes

⁷ JPEG: Joint Photographic Experts Group. es un método comúnmente utilizado para la compresión de imágenes fotográficas. El grado de reducción se puede ajustar, lo que permite seleccionar el compromiso que existe entre el tamaño de almacenamiento y la calidad de la imagen.

⁸ PNG (pronunciado ping) son las siglas de Portable Network Graphics, un formato de compresión de imágenes aprobado por el W3C como sustituto del formato .gif. PNG no está patentado y no necesita licencia para su utilización. El formato .jpg es mejor para fotografía digital mientras que .png es mejor para imágenes gráficas.

multiplataforma y de libre distribución. Todas las imágenes generadas con estos programas deben ser almacenadas en los formatos soportados por el middleware del STB, en el caso de MHP en los formatos JPEG y PNG.

2.5.3 Texto

La especificación MHP define una fuente común para todos los dispositivos. La fuente es llamada Tiresias (Marketing ICT, 2009). Esta específicamente diseñada para el uso en televisión. Por defecto no se soporta ningún otra fuente, pero al decidir el grupo de miembros de MHP usar el formato portable para fuentes, dejan abierta la puerta para que los desarrolladores usen y carguen sus propias fuentes en un dispositivo MHP.

2.5.4 Otros Formatos

- **Videodrips**

Los videodrips son una forma eficiente de representar una imagen usando una secuencia de Frames MPEG (Code4tv, 2009). La norma MHP define un nuevo formato de contenidos exclusivo del mundo de la televisión digital, el videodrip. Consiste en dejar que una aplicación vaya alimentando progresivamente el decodificador de vídeo MPEG-2 con partes de un flujo de vídeo MPEG-2. La principal ventaja de este formato se encuentra a la hora de representar imágenes similares, ya que proporciona una forma más eficiente de hacerlo en cuanto a memoria.

Básicamente, es una parte pequeña de MPEG-2, ya que lo primero que se envía es un cuadro I de MPEG-2 (ver Anexo A) que puede ser decodificado y presentado al usuario. Va seguido por uno o más cuadros P (ver Anexo A), que se decodificarán basándose en el cuadro I precedente, lo que permite al decodificador actualizar la imagen estática de una forma realmente eficiente en memoria.

Pueden ser generados por herramientas comerciales como Mainconcept Reference o por herramientas libres como ffmpeg, imagemagick (ImageMagick, 2008) o mjpeg (MJPEG_tools, 2008); sin embargo en las pruebas realizadas se obtuvieron mejores resultados usando en conjunto varias herramientas de los paquetes imagemagick y mjpeg.

- ✓ **Creación de Videodrips**

La conversión de imágenes en videodrips se puede realizar en Windows o Linux a través de dos paquetes: Netpbm y MJPEG Tools.

Netpbm es un conjunto de utilidades para la manipulación de imágenes, incluye conversión de imágenes entre diferentes formatos. Netpbm usa un formato intermedio para la transformación de imágenes llamado PPM/PNM (portable pixmap/ portable anymap).

MJPEG Tools es un conjunto de herramientas que permiten realizar grabación y reproducción de videos, edición simple y compresión de audio/video en formato MPEG.

Para realizar la transformación de una imagen al formato PPM/PNM se debe primero conocer el formato de la imagen, ya que para cada uno existe una herramienta especial de conversión:

- JPEG (Joint Photographic Experts Group) usa la herramienta jpegtopnm
- TIFF (Tagged Image File Format) usa la herramienta tifftopnm
- BMP (bitmap) usa la herramienta bmptoppm
- PNG (Portable Network Graphics) usa la herramienta pngtopnm
- GIF (Graphics Interchange Format) usa la herramienta giftopnm

Para más detalles sobre las herramientas ver anexo B

- **Aplicaciones MHP**

El desarrollo de aplicaciones DVB-J en MHP puede realizarse mediante herramientas de autoría (La gran mayoría comerciales y de un elevado costo) o directamente en código java mediante cualquier entorno de desarrollo para este lenguaje como netbeans, eclipse, jbuilder, etc. A pesar de que la especificación es abierta no lo es así la implementación de su librería de clases que es diferente en cada vendedor de equipos receptores o de software de desarrollo. Para sobrellevar esta dificultad el proyecto MHP Knowledge Database (MHP T. M., 2006), ha desarrollado unas librerías stub que permiten ser integradas a un entorno de desarrollo Java como librerías de clases para realizar la compilación de las aplicaciones.

Un aspecto a tener en cuenta en el desarrollo de aplicaciones para TDi es el ambiente de ejecución de las mismas. MHP está basado en la especificación Personal Java, la cual es equivalente a las librerías de la versión Java 1.1.8, versión de compilación que debe ser tenido en cuenta al configurar el entorno de desarrollo, para que las aplicaciones puedan ser ejecutadas correctamente en el receptor. MimundoTV Player es un Software que implementa las librerías de MHP para computador y que permite ejecutar aplicaciones de TDi (**Mimundo, 2008**).

Cualquier otro tipo de contenido que quiera ser representado por el receptor debe cumplir dos condiciones: la primera es que debe tener en cuenta las restricciones ya mencionadas para los tipos de contenido básicos, la segunda condición es que debe construirse una aplicación mediante las librerías de MHP que procese y muestre el contenido en forma adecuada.

2.5.5 Transporte de contenidos

Existen básicamente dos formas de transportar los contenidos en una cadena de TDi: El transporte basado en MPEG y el transporte basado en IP. El transporte basado en MPEG es el realizado a través del canal de broadcast, mientras que el transporte basado en IP se realiza a través del canal de retorno, por lo tanto los contenidos a ser transmitidos o recibidos deben ser empaquetados y transportados mediante los procesos propios de las redes de datos.

Este apartado puede ser muy especializado por lo que se presentan mediante el Anexo B. en él se especifica cada una de las etapas que permiten el transporte de contenidos basado en MPEG, los archivos de configuración, comandos, scripts, código, tablas y procesos en general se presentan en detalle en el Anexo B.

2.6 Aportes y conclusiones de este capítulo

Como contribuciones de este capítulo se presenta la infraestructura tecnológica desplegada para un laboratorio experimental de TDi.

- La infraestructura tecnológica para un laboratorio de TDi utiliza componentes Hardware que resultan costosos más aun para Universidades y centros de I+D en países en vía de desarrollo, en esta Tesis se presentan como se pueden trabajar las funcionalidades mínimas y obtener un laboratorio experimental con los componentes necesarios que permitan realizar el despliegue de aplicaciones interactivas. Este aporte se presentó en el COLCOM 2008 (Campo, Amaya, Urbano, & Arciniegas, 2008).
- Al decidir que elemento utilizar para cada componente que hace parte de la infraestructura tecnológica de un laboratorio experimental de Televisión Digital Interactiva se debe haber elegido el estándar de TD a utilizar (DVB, NTSC o ISDB), de esta forma tanto los elementos hardware como software elegidos deben seguir o utilizar formatos acorde con este estándar. Así esta Tesis presenta dichos elementos para el estándar DVB-C, que está en concordancia con el estándar acogido por la CNTV para Colombia.
- La Televisión Digital Interactiva permite el despliegue de nuevos servicios, para ello los centros educativos y/o de investigación interesados deben contar con laboratorios de experimentación que les permita realizar las pruebas requeridas, para tal fin la definición de una infraestructura tecnológica mínima permite viabilizar la implementación de este tipo de laboratorios. Así a través de los laboratorios de TDi las Universidades pueden investigar, desarrollar e innovar, generando conocimiento en esta temática que aun tiene mucho potencial por ser explotado.

- La descripción del protocolo DOCSIS realizada en este capítulo tiene por objetivo resaltar las características más significativas de funcionamiento del acceso al medio en las redes de cable, teniendo en cuenta tanto el canal ascendente como descendente. Por ello, las contribuciones sobre este aspecto se limitan al estudio y análisis del protocolo DOCSIS, resaltando aquellos aspectos de interés necesarios para las simulaciones que se realizarán con el tráfico capturado en la red de cable. Respecto al modelo, se ha utilizado el modelo DOCSIS implementado por OPNET Modeler. En este capítulo se resaltan, de forma esquemática, las características que incorporaran los escenarios de redes de cable que se llevaran a cabo en las simulaciones del capítulo 5. Donde se hace referencia a los parámetros de configuración estudiados.
- Se deduce como trabajo futuro que es de gran importancia definir herramientas metodológicas que guíen desde la concepción hasta el despliegue de aplicaciones interactivas. Existen herramientas para la creación de aplicaciones para TDi ante todo de tipo comercial y de propósito específico, sin embargo en el ámbito educativo las propuestas son escasas. Por tanto desarrollar una herramienta de creación de contenidos para T-learning, que emule el despliegue en TV, que sea open source y pueda ser utilizada por personal no técnico, permitirá ayudar al desarrollo y prueba de contenidos, dotando así un laboratorio experimental de TV Digital Interactiva de herramientas cada vez más completas.

Capítulo 3

Ingeniería de Tráfico

3.1 Ingeniería de Tráfico

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 (Nortel, 2003), 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. Particularmente, para el servicio de TDi se tiene en cuenta el cumplimiento de 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.

Después de diseñar, construir y poner en funcionamiento las aplicaciones de EDiTV, es claro que el tráfico sobre el canal de retorno no incluye aplicaciones tipo video bajo demanda (VoD) ya que no son soportadas por la versión del middleware MHP del STB. Estas aplicaciones de VoD tienen una mayor exigencia en recursos de red, por lo que la captura del tráfico generado por este tipo de aplicaciones se lleva a cabo en el laboratorio de ITV de la Universidad de Oviedo.

3.1.1 Escenario de Pruebas - Laboratorio de ITV en la Universidad de Oviedo.

Este apartado recoge el trabajo desarrollado en La Universidad de Oviedo, en las instalaciones del laboratorio de ITV Escuela de Peritos, Campus de Viesques S/N, Xixón, Asturias (Spain).

El modelo a desarrollar debe responder al funcionamiento del sistema de Televisión Digital Interactiva, cuya implementación se lleva a cabo mediante el simulador OPNET (OPNET Technologies, 2005), lo que permitirá utilizar los dispositivos de red disponibles en las librerías del simulador. El trabajo se desarrolla de manera incremental, el primer paso consiste en la instalación, configuración y puesta a punto de una red de cable, que soportara la Televisión Digital Interactiva, con cada uno de sus elementos como el CMTS (Cable Modem Termination System), el servidor de aplicaciones con sus servicios de DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) y TFTP (Trivial File Transfer Protocol) para el direccionamiento de la red y la transferencia de los parámetros de configuración de los módem de Cable respectivamente (ver Anexo C : montaje del Laboratorio de ITV de la Universidad de Oviedo). El segundo paso consiste en llevar esta red hasta un entorno de simulación en la herramienta OPNET Modeler y mediante un proceso incremental avanzar hacia un refinamiento de de las condiciones de simulación basado en pruebas sobre la red de cable contrastadas con el modelo de red simulado. En la Figura 22 se presenta la infraestructura de red del laboratorio de ITV de la Universidad de Oviedo con su respectivo direccionamiento, en el Anexo C se explica en detalle dicha infraestructura de red con su respectiva configuración.

Como se explica en el trabajo de grado “Análisis y evaluación de una red de acceso HFC para la distribución de contenidos educativos de iTV con QoS” (Taimal & Rueda, 2009) que apoya el desarrollo de este proyecto, la interactividad se da a nivel de las aplicaciones y no a nivel de broadcast.

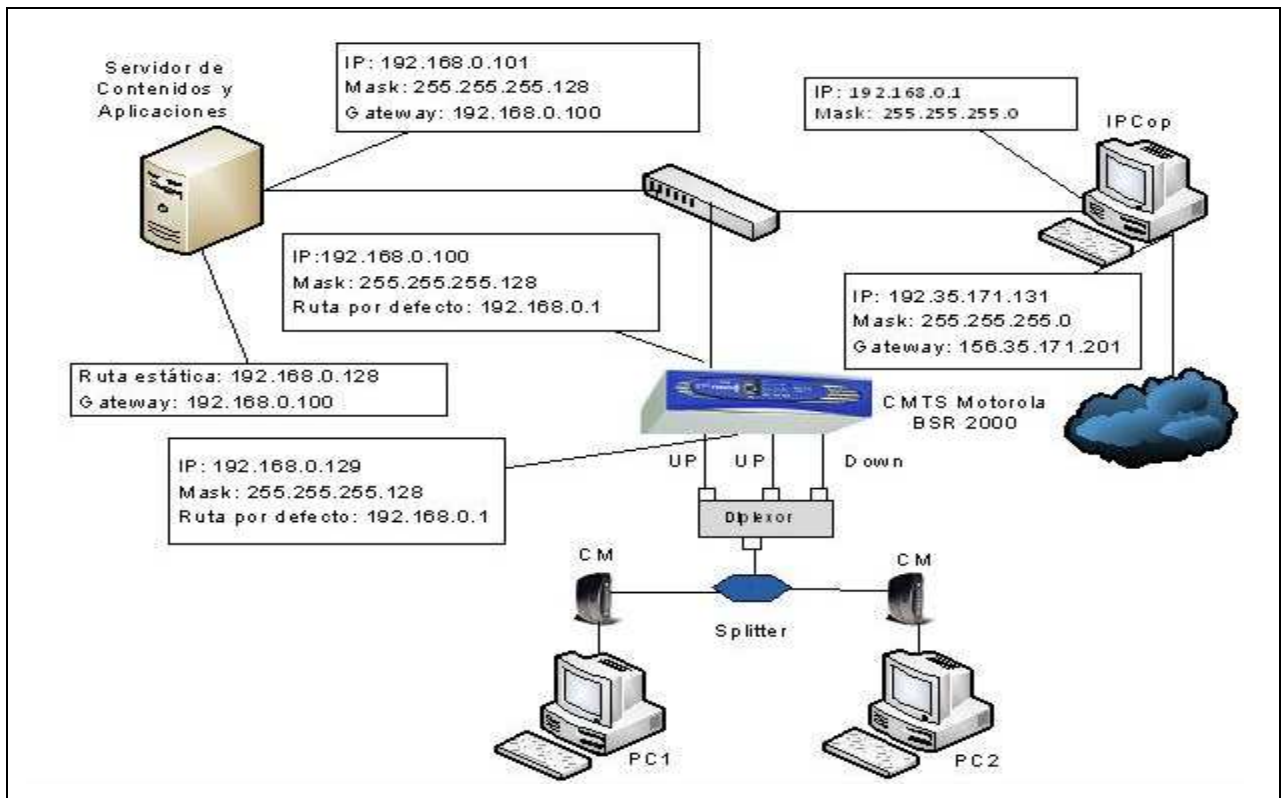


Figura 22. Red del laboratorio de ITV- Universidad de Oviedo

3.1.2 Capturas de Tráfico en el Laboratorio de la Universidad de Oviedo

Para la extracción de los parámetros involucrados en cada fase se hace uso del analizador de protocolos Wireshark (Wireshark, 2008), mediante el cual se llevan a cabo diferentes capturas de tráfico reales originadas en la ejecución de las aplicaciones de VoD instaladas y ejecutadas en la red del laboratorio de ITV. En la Figura 23. Se muestra una captura del tráfico y su correspondiente curva.

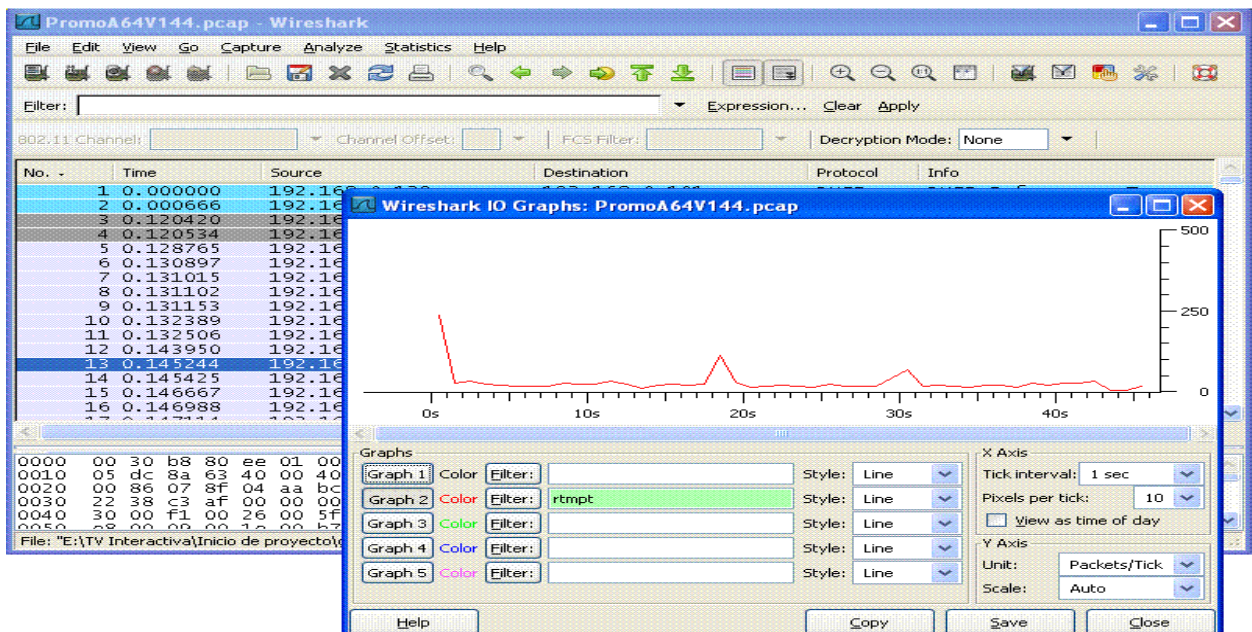


Figura 23. Tráfico de VoD

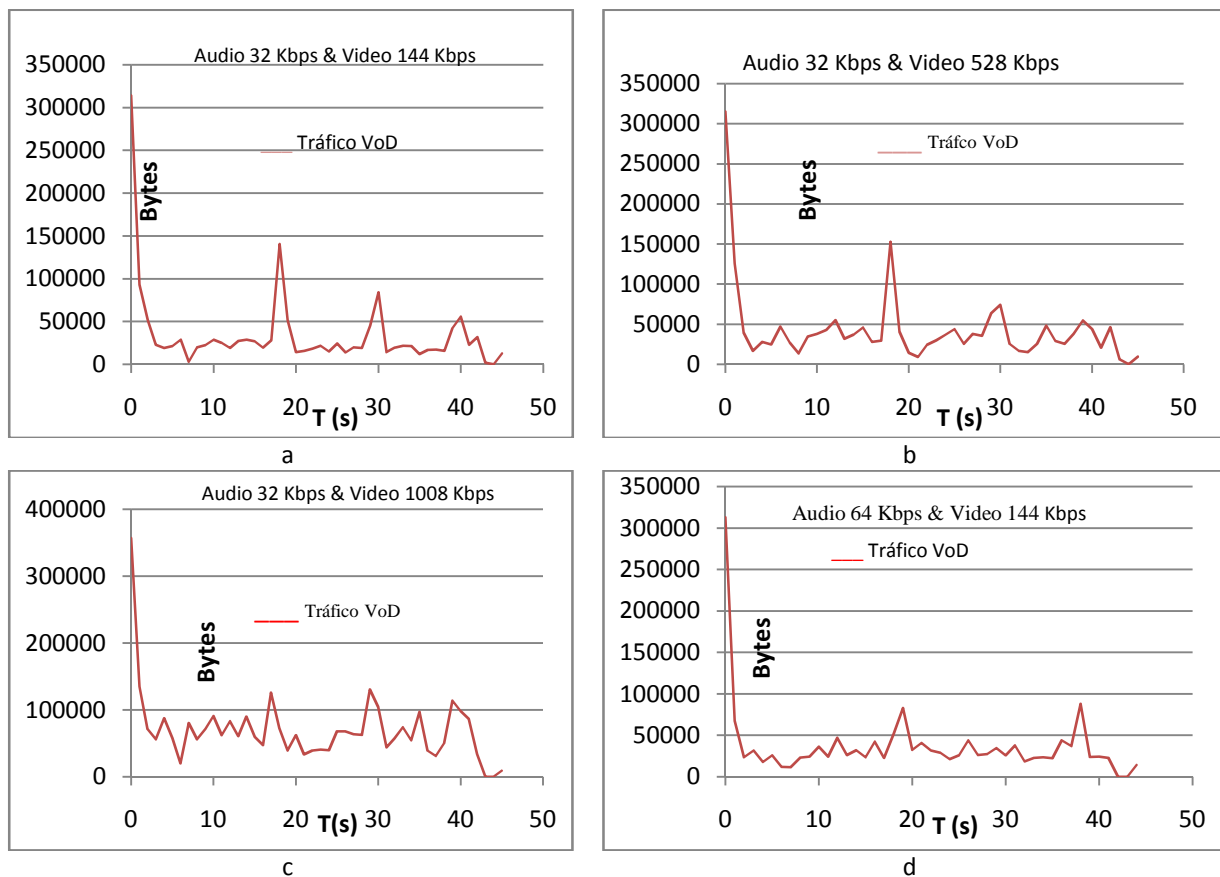
Las fase de conexión corresponde al intercambio de paquetes entre el cliente y el servidor cuyo negociación se limita al intercambio de 4 paquetes, la fase de envío del VoD no tiene asociado un valor en número de paquetes ya que este depende del tamaño, de la duración del video y de sus características de codificación, la fase de desconexión corresponde al intercambio de dos paquetes entre el servidor y el cliente. Así el interés del análisis se concentra en la fase de envío del VoD.

3.1.2.1 Medidas de tráfico

Se tomaron medidas de tráfico con diferentes videos, utilizando como parámetros de codificación (se toman como referencia las calidades de los videos analizados en (García M. , García, García, & Bonis, 2004), (García R. , 2005)) los siguientes: Audio a 32 Kbps y 64 Kbps y Video a 144, 528 y 1008 Kbps. Observando el comportamiento del tráfico, en la Figura 24, se ve una conducta similar para todas las calidades, presentándose ciertas diferencias para las calidades de video de 1008 Kbps. Ver Figura 24.

3.1.3 Análisis de datos de VoD sobre el canal descendente de la red HFC

Las curvas de la Figura 24 representan el tráfico del VoD, para diferentes calidades de streaming, dicha información está representada en forma de series a través del tiempo. Esta información, tabulada en este formato no es de utilidad cuando se trata de obtener una conducta basada en variabilidad con cierto comportamiento probabilístico. Por esta razón para cada una de las gráficas se realiza la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (Astaiza, Bermúdez, & Muñoz, 2007), (Kolmogorov, 1937).



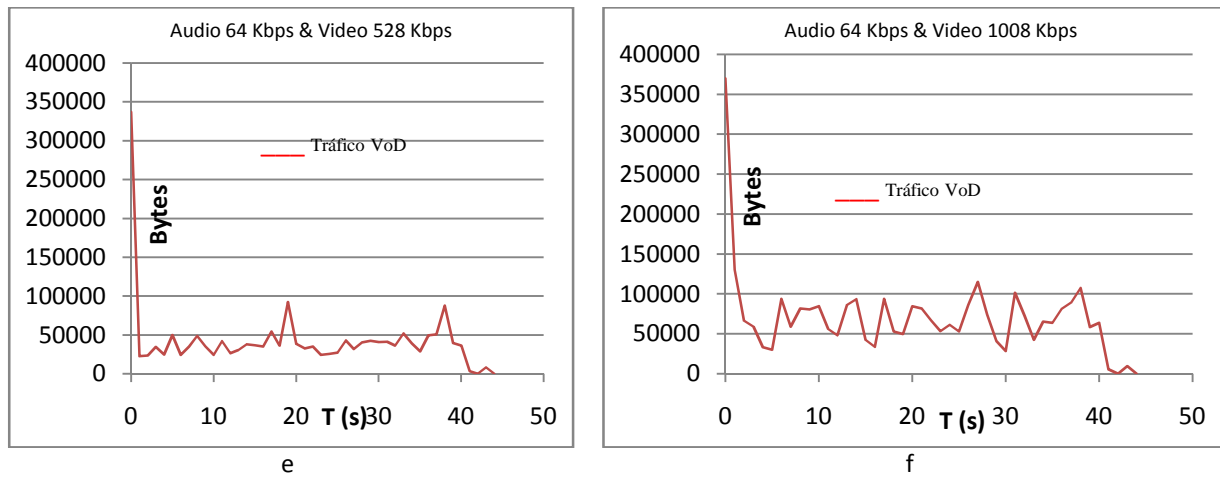


Figura 24. Capturas de tráfico para diferentes calidades de VoD

3.1.3.1 Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov

El objetivo es encontrar el tipo de distribución de probabilidad de una serie de datos, es posible utilizar la prueba de bondad de ajuste de *Kolmogorov-Smirnov*, la cual es eficiente en varios aspectos ya que trabaja con la distribución de probabilidad acumulada (Astaiza, Bermúdez, & Muñoz, 2007). La metodología se describe detalladamente a continuación:

- Calcular las frecuencia observada (FO) con m intervalos, a partir de los n datos, ver ecuación 3. Se obtiene la frecuencia observada (FO) como la cantidad de datos en cada intervalo i .

$$m \approx \sqrt{n} \tag{3}$$

- Se calcula la frecuencia observada acumulada (FOA) para cada intervalo como:

$$FOA_i = \sum_{n=1}^i FO_n \tag{4}$$

- Se obtiene la probabilidad observada acumulada (POA) para cada intervalo como:

$$POA_i = \frac{FOA_i}{n} \tag{5}$$

- Se propone como hipótesis la función de distribución de acuerdo a los histogramas de la FO observados para cada gráfica y se calcula la probabilidad esperada acumulada (PEA) como:

$$PEA_i = \left[F(x) \Big|_0^{LS} \right] \tag{6}$$

Donde

$$F(x) = \int_0^x f(y) dy \tag{7}$$

para distribuciones continuas y:

$$F(x) = \sum_0^x p(y) \tag{8}$$

Para distribuciones discretas

- Se calcula el estimador de máxima diferencia DM utilizando la ecuación 9.

$$DM = Máx |PEAi - POAi| \tag{9}$$

- El estimador DM se compara con el valor límite $D_{n,1-\alpha}^0$ (Astaiza, Bermúdez, & Muñoz, 2007). Si el estimador DM es menor o igual al valor límite, entonces se dice que la hipótesis propuesta se ajusta a la distribución de probabilidad que sigue la información histórica. En caso contrario debe de cambiarse la hipótesis de la función de distribución de probabilidad y repetir el proceso. En el anexo A de (Taimal & Rueda, 2009) se encuentra un ejemplo de el proceso descrito anteriormente.

3.1.4 Modelo Matemático de VoD sobre el canal descendente de la red HFC

El proceso a seguir es el mostrado en la Figura 25, el cual es descrito en cada uno de los subpuntos de este apartado.

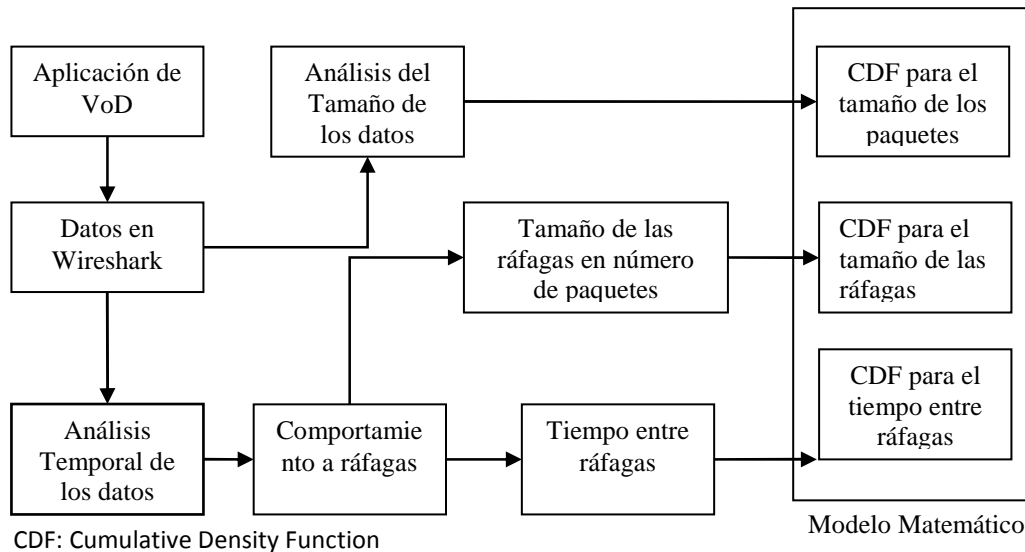


Figura 25. Proceso para la obtención del modelo matemático de VoD

3.1.4.1 Análisis del tamaño de los paquetes

En la Figura 26, se presentan los histogramas para las muestras. Se observa que el tamaño de los paquetes es 1514 Bytes en más del 97% de los casos. Por ello, la mejor distribución estadística para caracterizar el tamaño de estos paquetes es una distribución constante de 1514 bytes. Se debe tener en cuenta que éste es el tamaño de la trama Ethernet, por lo que es necesario restarle los 14 Bytes de la cabeceras Ethernet, 20 Bytes de la cabecera IP, y 20 Bytes de la cabecera TCP (en la configuración del streaming se configuro como protocolo de transporte a TCP) para obtener el tamaño del paquete del VoD.

⁹ $D_{n,1-\alpha}$. Corresponde al valor de la distribución de Kolmogorov-Smirnov (D) para n grados de libertad y a un nivel de confiabilidad de $1 - \alpha$ ($\alpha = 0,1;$ 0.05.; ó 0.001)

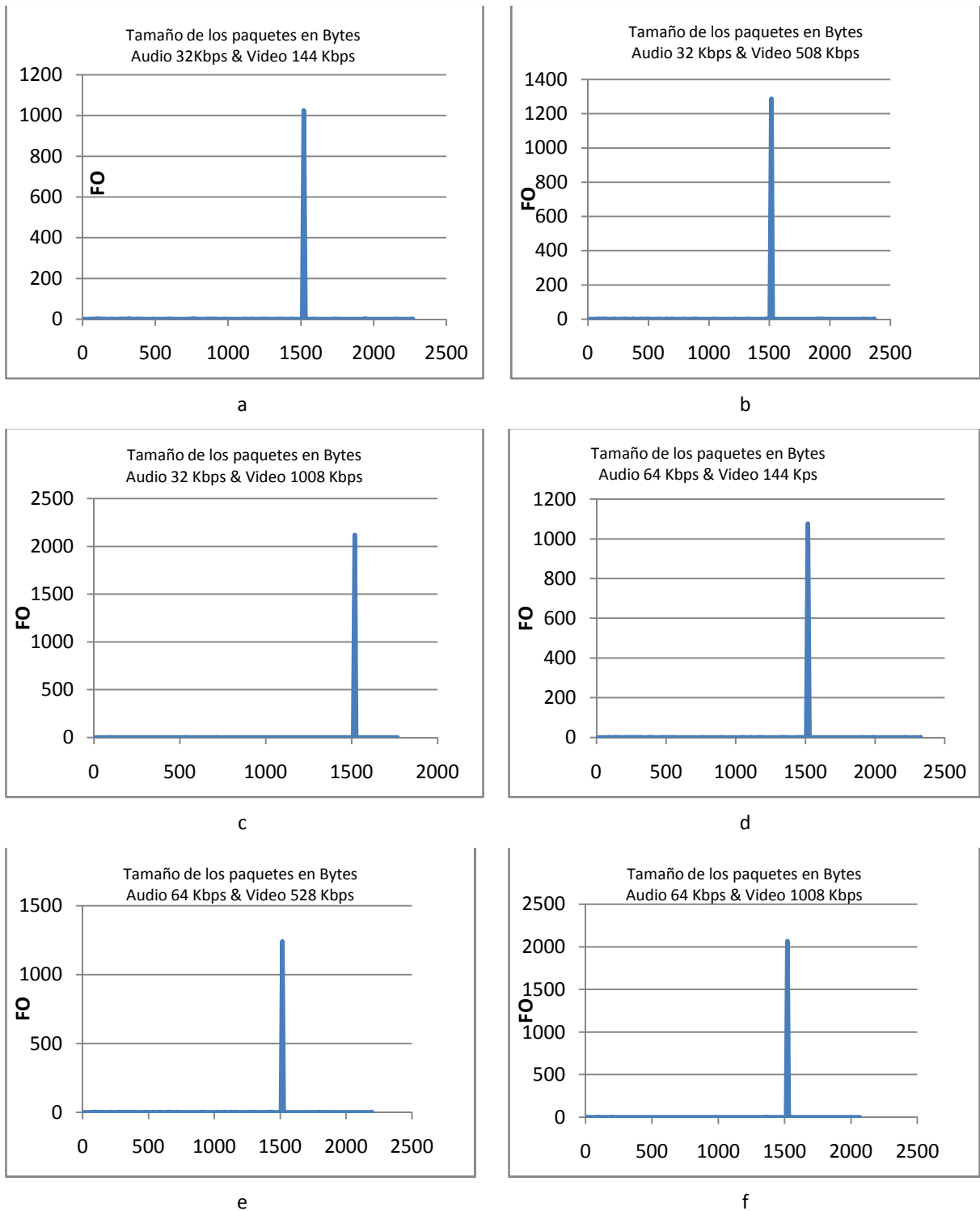
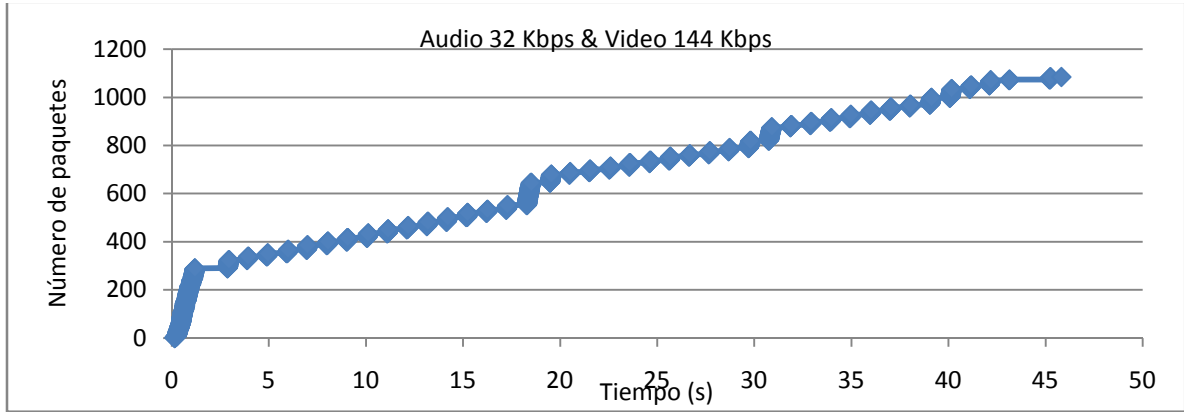


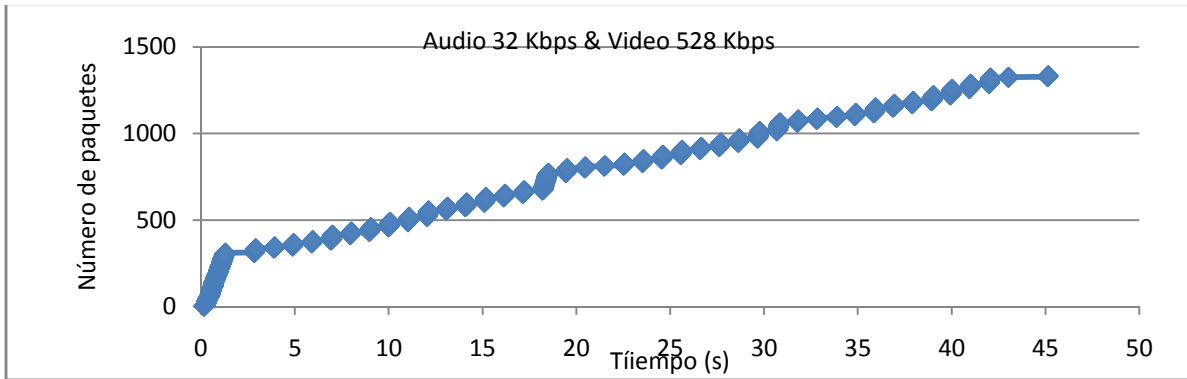
Figura 26. Tamaño de los Paquetes

3.1.4.2 Análisis temporal de los datos

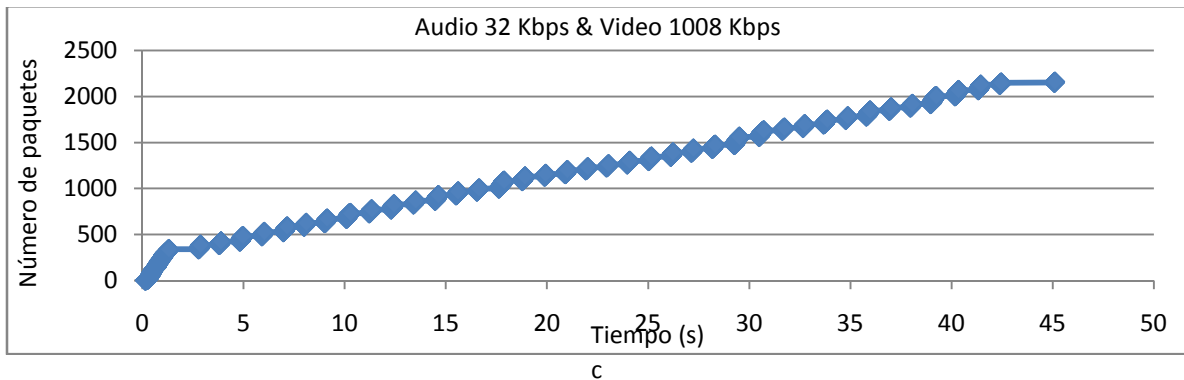
Analizando los datos se observa que existen muchos valores pequeños de tiempos entre paquetes (cada rombo en azul de la Figura 27 corresponde a una ráfaga de paquetes, por lo que el tiempo entre dichos paquetes es demasiado pequeño), de forma casi periódica, esto se debe a que el tráfico tiene un comportamiento a ráfagas. En la Figura 27, se verifica este efecto, donde se muestran las gráficas del número de paquetes en función del tiempo.



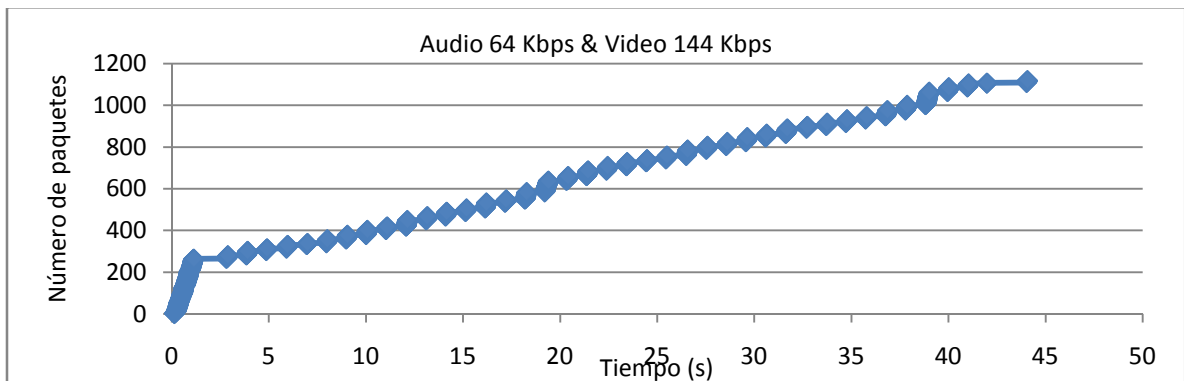
a



b



c



d

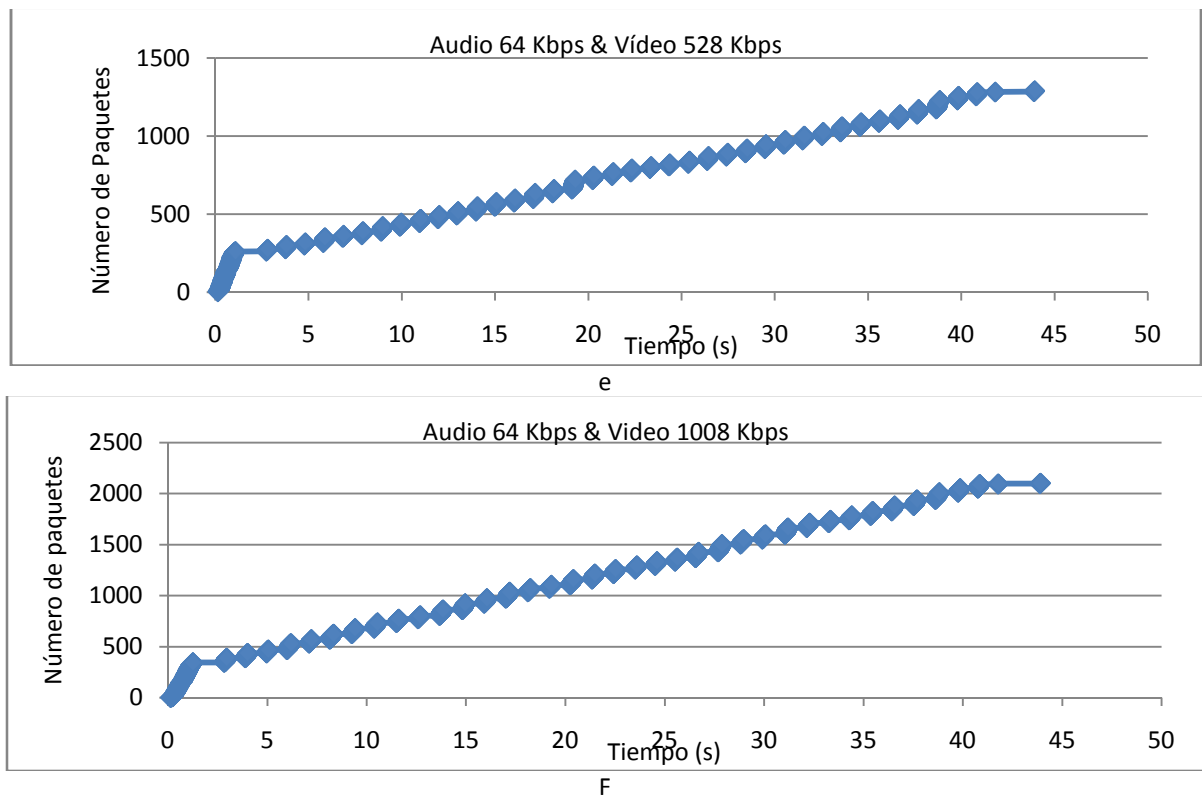


Figura 27. Comportamiento a ráfagas del tráfico

Teniendo en cuenta este comportamiento del tráfico, es necesario para su caracterización en el tiempo obtener las funciones de distribución de probabilidad para: el tamaño de las ráfagas en número de paquetes y el tiempo entre ráfagas.

- **Determinación de los Parámetros de entrada a la simulación para el tamaño de las ráfagas en número de paquetes**

Se obtiene al valor estadístico D_n global de Kolmogorov-Smirnov, el cual calcula la distancia máxima entre la distribución acumulada de la muestra $F_n(x)$ y la función de distribución que se ajusta al comportamiento de la muestra $F(x)$, ver ecuación 10, (Astaiza, Bermúdez, & Muñoz, 2007).

$$D_n = \text{Sup}|F_n(x) - F(x)| \tag{10}$$

Donde $x \in \mathfrak{R}$

El parámetro D_n registrado corresponde al menor valor arrojado por el paquete STATGRAPHICS Plus 5.1 para cada distribución estadística que valida la hipótesis, de que las muestras procedan de sus correspondientes distribuciones con un nivel de confianza de al menos un 90%.

Se validan varias distribuciones estadísticas simples para la caracterización del tamaño de las ráfagas en número de paquetes, asignando aquella que de un menor valor de D_n , la mejor aproximación mediante el proceso descrito en el apartado 3.3.3.1 tiene los siguientes comportamientos de acuerdo a las calidades de codificación:

- ✓ Audio a 32 Kbps, Video a 144 Kbps mediante una distribución de Laplace, cuyos parámetros son: escala 0,172269 y media de 15. El valor estadístico D_n global de Kolmogorov-Smirnov, para validar la aproximación es $D_n = 0,162516$. La función de densidad de probabilidad de esta distribución para estos procesos viene dada por la ecuación 11.

$$f(x) = \frac{\beta}{2} e^{-\beta(|x-L|)} \quad \begin{array}{l} \text{Media} = L \\ \text{Escala} = \beta \end{array} \quad (11)$$

El histograma obtenido para esta muestra y su Función de Densidad Acumulada (CDF: cumulative density function) se presentan en la Figura 28.

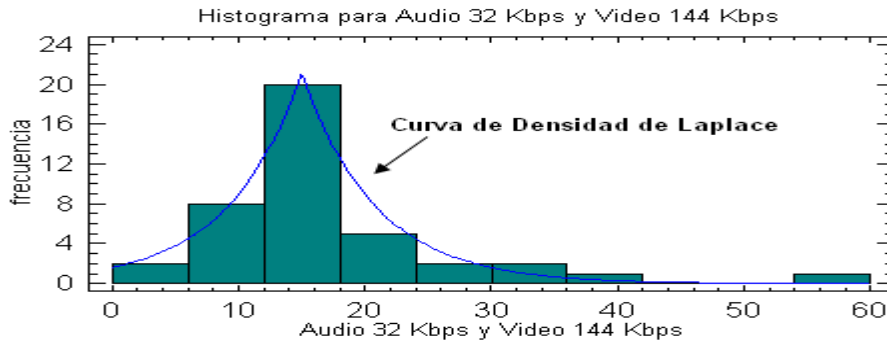


Figura 28. Histograma versus Función de densidad de probabilidad de Laplace

- ✓ Audio a 32 Kbps, Vídeo a 528 Kbps mediante una distribución Lógica, cuyos parámetros son: media 23,44 y la desviación típica de 11,1652. El valor estadístico Dn global de Kolmogorov-Smirnov, para validar la aproximación es Dn = 0,0864307. La función de densidad de probabilidad de esta distribución para estos procesos viene dada por la ecuación 12.

$$f(y) = \frac{e^{-y}}{(1 + e^{-y})^2} \quad \begin{array}{l} \text{Media} = \alpha \\ \text{Desviación típica} = \beta \end{array} \quad (12)$$

Reemplazando:

$$y = (X - \alpha)/\beta$$

El histograma obtenido para esta muestra y su CDF se presentan en la Figura 29.

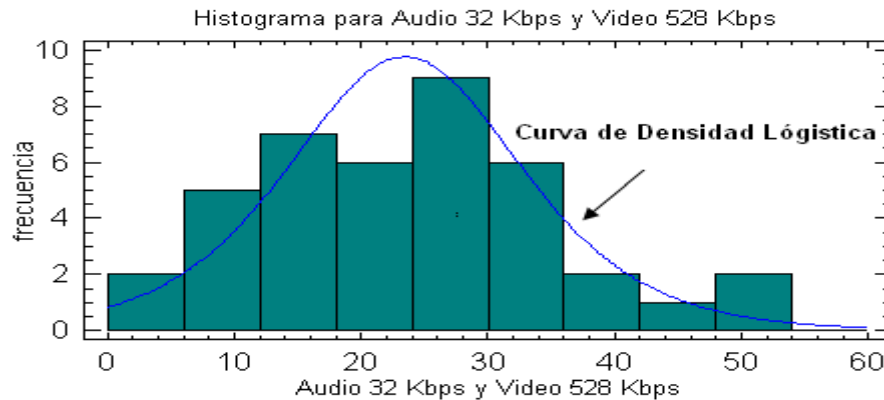


Figura 29. Histograma versus Función de densidad de probabilidad Lógica

- ✓ Audio a 32 Kbps, Vídeo a 1008 Kbps mediante una distribución Gamma, cuyos parámetros son: Forma 7,282427 y escala 0,156225. El valor estadístico Dn global de Kolmogorov-Smirnov, para validar la aproximación es Dn = 0,0900664. La función de densidad de probabilidad de esta distribución para estos procesos viene dada por la ecuación 13.

$$f(x) = \frac{\lambda^k}{\Gamma(k)} x^{k-1} e^{-\lambda x} \quad \begin{array}{l} \text{Forma} = K \\ \text{Escala} = \lambda \end{array} \quad (13)$$

$$0 < x < \infty; \lambda > 0; k > 0$$

El histograma obtenido para esta muestra y su CDF se presentan en la Figura 30.

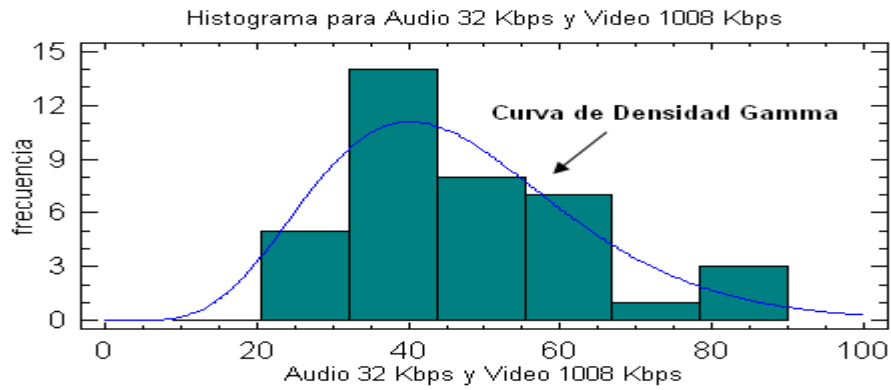


Figura 30. Histograma versus Función de densidad de probabilidad Gamma

- ✓ Audio a 64 Kbps, Vídeo a 144 Kbps mediante una distribución de Laplace, cuyos parámetros son: Media 18 y escala 0,151515. El valor estadístico D_n global de Kolmogorov-Smirnov, para validar la aproximación es $D_n = 0,167368$. La función de densidad de probabilidad de esta distribución para estos procesos viene dada por la ecuación 11.

El histograma obtenido para esta muestra y su CDF se presentan en la Figura 31

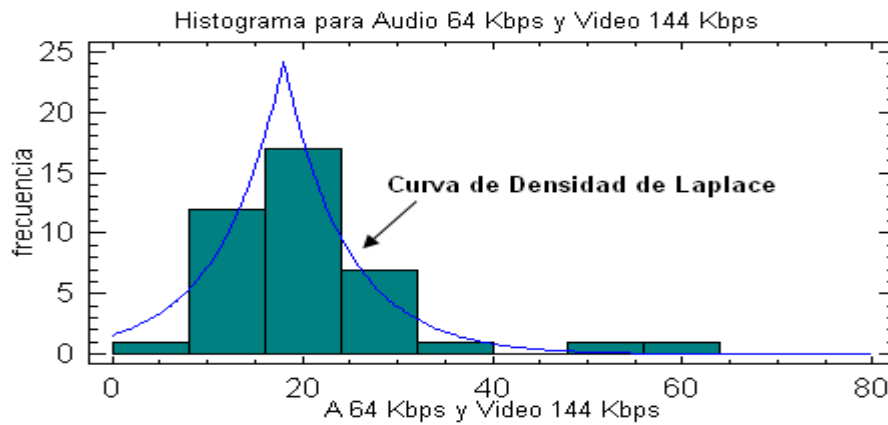


Figura 31. Histograma versus Función de densidad de probabilidad de Laplace

- ✓ Audio a 64 Kbps, Vídeo 528 Kbps mediante una distribución Chi-Cuadrado, con 25,775 grados de libertad. El valor estadístico D_n global de Kolmogorov-Smirnov, para validar la aproximación es $D_n = 0,104255$. La función de densidad de probabilidad de esta distribución para estos procesos viene dada por la ecuación 14.

$$f(x) = \frac{(1/2)^{k/2}}{\Gamma(k/2)} x^{k/2-1} e^{-x/2} \quad \text{Grados de libertad} = k \quad (14)$$

El histograma obtenido para esta muestra y su CDF se presentan en la Figura 32

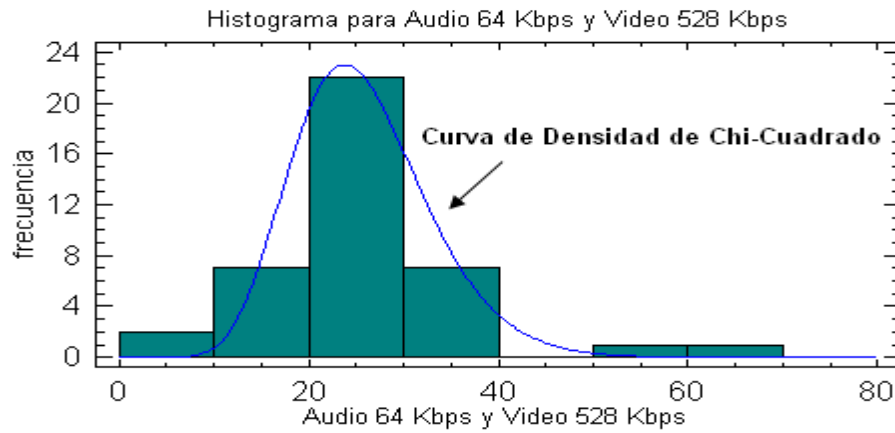


Figura 32. Histograma versus Función de densidad de probabilidad de Chi- Cuadrado

- ✓ Audio a 64 Kbps, Vídeo a 1008 Kbps mediante una distribución Normal, cuyos parámetros son media 46,2895 y la desviación típica 15,0331. El valor estadístico D_n global de Kolmogorov-Smirnov, para validar la aproximación es $D_n = 0,0907285$. La función de densidad de probabilidad de esta distribución para estos procesos viene dada por la ecuación 15.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \begin{array}{l} \text{Media} = \mu \\ \text{Desviación típica} = \sigma \end{array} \quad (15)$$

$$-\infty \leq x \leq \infty$$

El histograma obtenido para esta muestra y su CDF se presentan en la Figura 33.

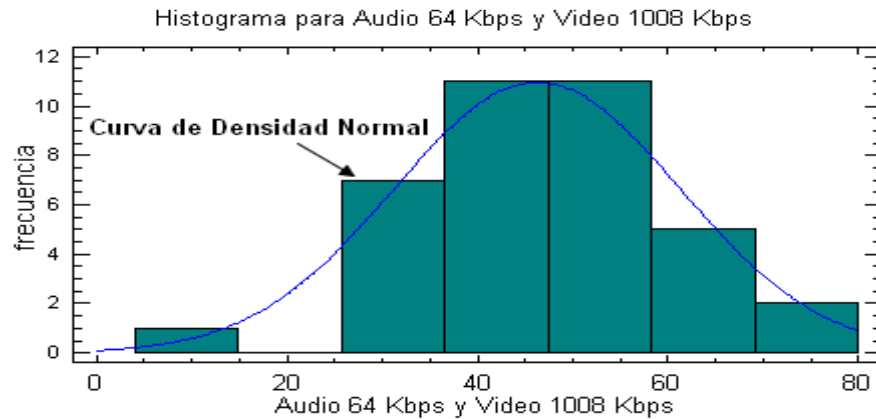


Figura 33. Histograma versus Función de densidad de probabilidad Normal

El análisis muestra diferentes funciones de distribución según las calidades de codificación, lo cual constituye el modelo matemático para el tamaño de las ráfagas medidas en número de paquetes.

En resumen el análisis muestra diferentes funciones de distribución según las calidades de codificación. Sin embargo durante el proceso de las pruebas de bondad de ajuste se observa que todas las muestras pueden ser caracterizadas mediante una distribución de Laplace, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 5.

	Audio 32 & Video 144 (Kbps)	Audio 32 & Video 528 (Kbps)	Audio 32 & Video 1008 (Kbps)	Audio 64 & Video 144 (Kbps)	Audio 64 & Video 528 (Kbps)	Audio 64 & Video 1008 (Kbps)
Media	15	24,5	43,0	18	24,5	46,5
Escala	0,1722	0,115	0,081	0,151	0,152	0,087
Dn	0,1625	0,152	0,133	0,167	0,123	0,135

Tabla 5. Parámetros para la distribución de Laplace

• **Determinación de los parámetros de entrada a la simulación para el tiempo entre ráfagas.**

Se tienen en cuenta los mismos conceptos respecto al parámetro Dn del punto anterior. Comparando varias distribuciones estadísticas simples para la caracterización del tiempo entre ráfagas, la mejor aproximación tiene los siguientes comportamientos de acuerdo a las calidades de codificación:

- ✓ Audio a 32 Kbps, Vídeo a 144 Kbps mediante una distribución de Normal (ver ecuación 15), cuyos parámetros son: Media 0,967021 y desviación típica 0,0184262. El valor estadístico Dn global de Kolmogorov-Smirnov, para validar la aproximación es $D_n = 0,0812196$. El histograma obtenido para esta muestra y su CDF se presentan en la Figura 34.

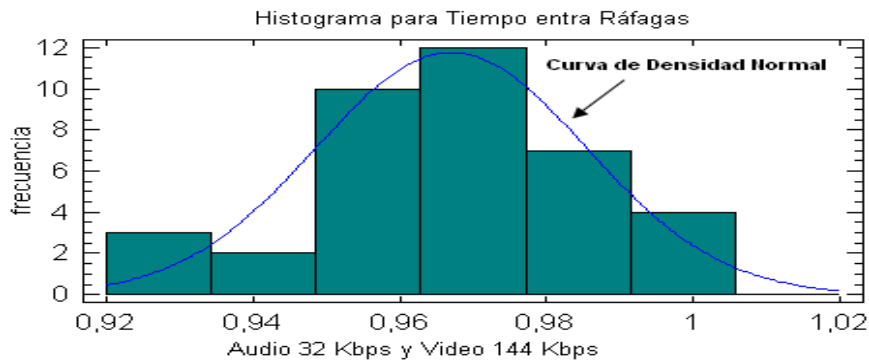


Figura 34. Tiempo entre ráfagas versus Función de densidad de probabilidad Normal

- ✓ Audio a 32 Kbps, Vídeo a 528 Kbps mediante una distribución de Normal cuyos parámetros son: Media 0,948749 y desviación típica 0,023054. El valor estadístico Dn global de Kolmogorov-Smirnov, para validar la aproximación es $D_n = 0,109831$. El histograma obtenido para esta muestra y su CDF se presentan en la Figura 35.

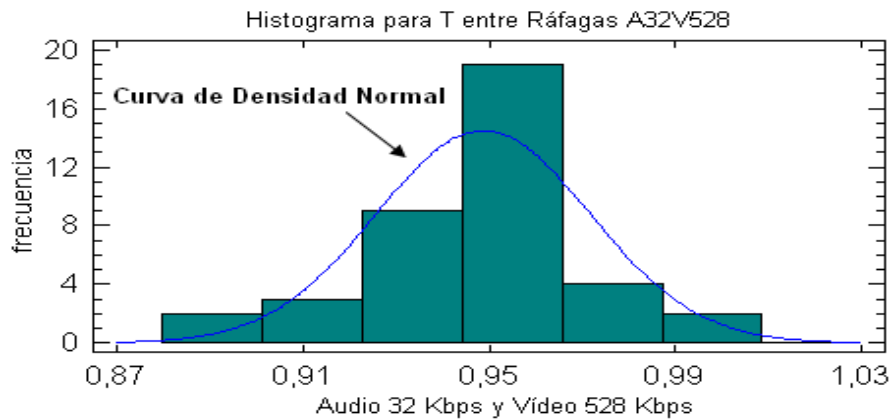


Figura 35. Tiempo entre ráfagas para A32V528 versus Función de densidad de probabilidad Normal

- ✓ Audio a 32 Kbps, Vídeo a 1008 Kbps mediante una distribución Normal, cuyos parámetros son: Media 0,921313 y desviación típica 0,0274772. El valor estadístico Dn global de Kolmogorov-Smirnov, para validar

la aproximación es $D_n = 0,105899$. El histograma obtenido para esta muestra y su CDF se presentan en la Figura 36.

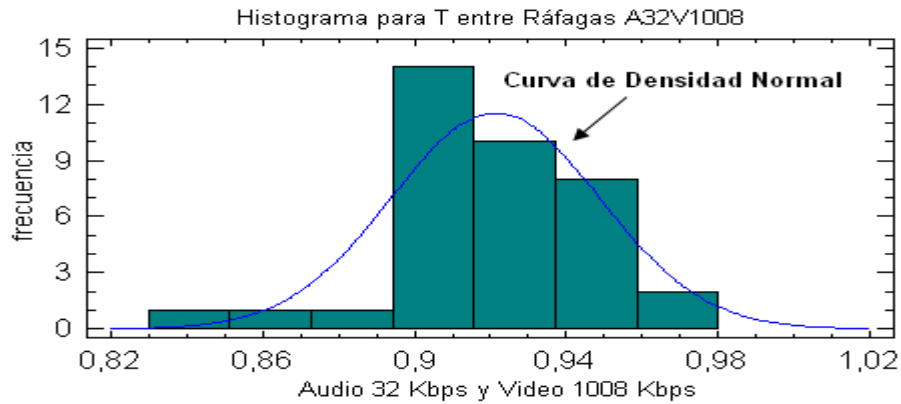


Figura 36. Tiempo entre ráfagas para A32V1008 versus Función de densidad de probabilidad Normal

- ✓ Audio a 64 Kbps, Video a 144 Kbps mediante una distribución de Normal, cuyos parámetros son: media 0,956326 y desviación típica 0,0168749. El valor estadístico D_n global de Kolmogorov-Smirnov, para validar la aproximación es $D_n = 0,0652485$. El histograma obtenido para esta muestra y su CDF se presentan en la Figura 37.

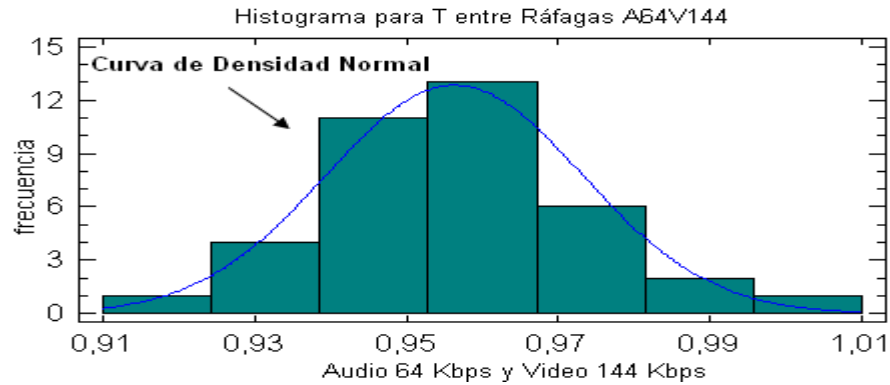


Figura 37. Tiempo entre ráfagas para A64V144 versus Función de densidad de probabilidad Normal

- ✓ Audio a 64 Kbps, Video 528 Kbps mediante una distribución Normal, cuyos parámetros son: Media 0,943724 y desviación típica 0,018591. El valor estadístico D_n global de Kolmogorov-Smirnov, para validar la aproximación es $D_n = 0,0793274$. El histograma obtenido para esta muestra y su CDF se presentan en la Figura 38.

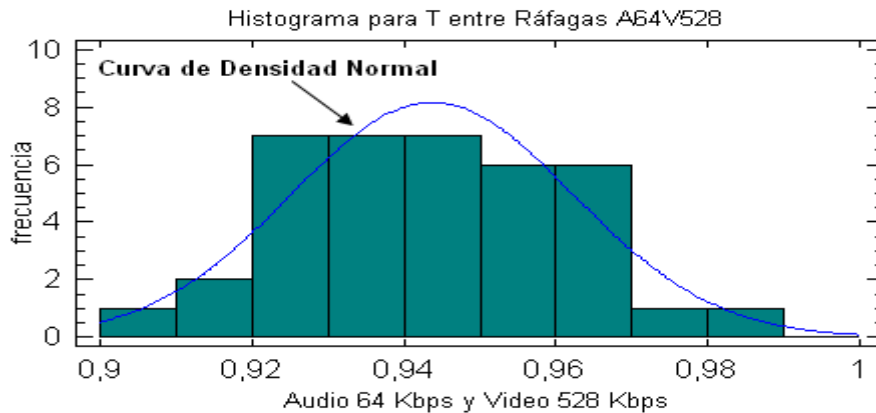


Figura 38. Tiempo entre ráfagas para A64V528 versus Función de densidad de probabilidad Normal

- ✓ Audio a 64 Kbps, Vídeo a 1008 Kbps mediante una distribución Normal, cuyos parámetros son: Media 0,93095 y desviación típica 0,0223895. El valor estadístico Dn global de Kolmogorov-Smirnov, para validar la aproximación es $D_n = 0,0956693$. El histograma obtenido para esta muestra y su CDF se presentan en la Figura 39.

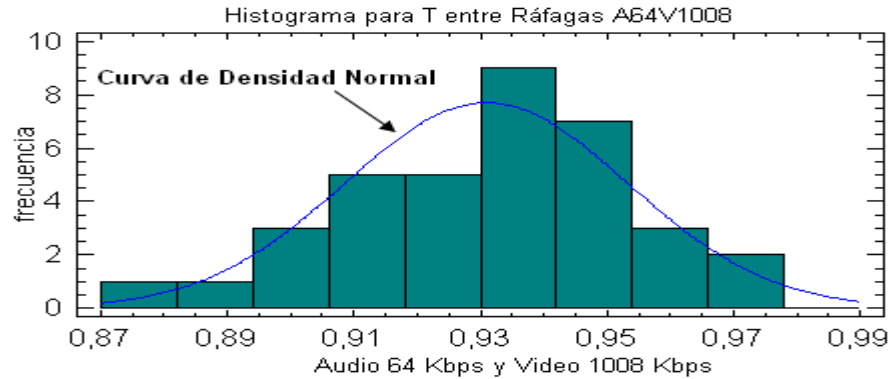


Figura 39. Tiempo entre ráfagas para A64V1008 versus Función de densidad de probabilidad Normal

En resumen el proceso de las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov arroja como resultado que todas las muestras para el tiempo entre ráfagas pueden ser caracterizadas mediante una distribución Normal, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 5.

	Audio 32 & Video 144 (Kbps)	Audio 32 & Video 528 (Kbps)	Audio 32 & Video 1008 (Kbps)	Audio 64 & Video 144 (Kbps)	Audio 64 & Video 528 (Kbps)	Audio 64 & Video 1008 (Kbps)
Media	0,967021	0,948749	0,921313	0,956326	0,943724	0,93095
Desviación Típica	0,0184262	0,023054	0,0274772	0,0168749	0,018591	0,0223895
Dn	0,0812196	0,109831	0,105899	0,0652485	0,0793274	0,0956693

Tabla 6. Parámetros para la distribución Normal

Queda así caracterizado el comportamiento del VoD, mediante la identificación de las funciones de distribución estadística para: el tiempo entre ráfagas mediante la distribución Normal, los tamaños de las mismas medidas en número de paquetes caracterizadas mediante la distribución de Laplace y el tamaño de los paquetes mediante una distribución Constante. Esta caracterización corresponde al modelo matemático que son los parámetros de entrada de tráfico necesarios para llevar a cabo la simulación mediante la herramienta OPNET Modeler presentado en el capítulo 5.

3.1.5 Escenario de Pruebas - Laboratorio de EDiTV en la Universidad del Cauca

Con el objeto de estudiar de manera completa la red HFC es necesario caracterizar el tráfico para el canal ascendente a través de la captura del tráfico de las aplicaciones desarrolladas para el laboratorio de EDiTV, y así llevar el modelo matemático de dichas aplicaciones al entorno de simulación en conjunto con el modelo matemático obtenido para el canal descendente de las aplicaciones de streaming, cuyo tráfico fue capturado en el laboratorio de ITV de la Universidad de Oviedo.

En (Taimal & Rueda, 2009) se caracterizan las aplicaciones de EDiTV las cuales generan tráfico sobre el canal ascendente de la red HFC, dicho trabajo cuenta con la asesoría directa del autor de esta tesis. Se determino que los aspectos a caracterizar son el tamaño de los archivos, el tiempo entre solicitudes y el tiempo de inicio de la respuesta. En este apartado se presentan los resultados obtenidos.

- **Parámetros de entrada para el tiempo entre peticiones de la aplicación de solicitud de información**

El comportamiento del tiempo entre peticiones se caracteriza con la función de distribución de probabilidad exponencial cuyos parámetros son: Media 28,5262 y varianza 25,1136. Y corresponde al tiempo en que el usuario se tarda en solicitar el siguiente contenido con información adicional al programa de TV. La función de densidad de probabilidad de esta distribución para estos procesos viene dada por la ecuación 16.

$$f(x) = \begin{cases} ae^{-ax} & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{Media} = a^{-1} \\ \sigma_x^2 = a^{-2} \end{matrix} \quad (16)$$

- **Parámetros de entrada para el tiempo de inicio de envío de información como respuesta a una pregunta**

Esta aplicación se modela teniendo en cuenta el tiempo desde que se lanza la pregunta hasta que se la contesta y al cual se ha denominado tiempo de inicio de respuesta. Este aspecto se caracteriza con la función de distribución normal. En la ecuación 15 se encuentra definida la función de densidad de probabilidad para esta distribución, y sus parámetros son: Media 38,0102 y desviación estándar 14,1642.

- **Parámetros de entrada para el tamaño de las peticiones**

En caso de las aplicaciones de TDi para el laboratorio de EDiTV analizadas, el tamaño de las solicitudes y envío de información no varía porque se trata de una aplicación que despliega la misma información para todos los usuarios, por lo cual este valor no es aleatorio sino constante.

Los parámetros que se necesitan para llevar a cabo la simulación corresponden al tamaño en bytes de las solicitudes del usuario al servidor y archivos entregados por el servidor para la aplicación de solicitud de información adicional, mientras que para la aplicación “respuestas de selección” múltiple se consideró el tamaño de la respuesta a la pregunta enviada desde el usuario al servidor y la repuesta del servidor indicando su acierto o fallo para las aplicaciones de TDi. Estos valores se tomaron de la información proporcionada por el analizador de protocolos Wireshark y se presentan en la Tabla 7.

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

Tabla 7. Tamaño de las solicitudes, respuestas y archivos (XML e imagen) para las aplicaciones de TDi

Queda así caracterizado el comportamiento de las aplicaciones de los laboratorios de ITV de la Universidad de Oviedo y de las aplicaciones construidas para el laboratorio de EDiTV en la Universidad del Cauca. Esta caracterización corresponde al modelo matemático que brinda los parámetros de entrada necesarios para llevar dichas aplicaciones a la simulación, la cual se desarrollara en el capítulo 4.

3.2 Aportes y conclusiones de este capítulo

- El proceso de análisis y generación del modelo es un proceso incremental, correspondiendo estos datos al primer ciclo que es el de mayor dificultad ya que parte desde la construcción, búsqueda y análisis de la información, hasta llevarlo a funciones matemáticas que describen el comportamiento de las aplicaciones. Este capítulo provee un modelo matemático que describe el comportamiento de un servicio de streaming, sobre una red HFC, el cual presenta como característica un comportamiento a ráfagas.
- Se obtuvo un comportamiento a ráfagas para todas las calidades de codificación de las aplicaciones de VoD, que se ejecutaron sobre la red de cable, como resultado de la caracterización del comportamiento temporal del tráfico. El comportamiento a ráfagas hace más complejo el análisis de tráfico, ya que es necesario encontrar las distribuciones estadísticas tanto para el tamaño de las ráfagas medidas en número de paquetes como para el tiempo entre ellas, desarrollando el proceso matemático para cada una de las aplicaciones de VoD. Para realizar la caracterización del tráfico se obtuvieron las distribuciones estadísticas con los parámetros que mejor se ajustan a los valores reales capturados en la red, siguiendo la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov.

- Se caracterizó el tamaño de los paquetes para todas las calidades de codificación de las aplicaciones de VoD, que se ejecutaron sobre la red de cable, siguiendo el análisis de Kolmogorov-Smirnov, obteniendo como resultado un tamaño constante sobre la red de cable, el cual corresponde al tamaño de la trama Ethernet.
- Con el desarrollo de este capítulo se da cumplimiento al objetivo específico de “Analizar las características del tráfico intercambiado a través de eventos en la red HFC..” puesto que se ha encontrado el comportamiento del tráfico generado por la distribución de contenidos educativos sobre la red HFC, el cual corresponde a un comportamiento en el tiempo a ráfagas cuya caracterización implica el uso de dos funciones de distribución estadística. Una que caracteriza el tiempo entre ráfagas a través de la distribución normal y otra que caracteriza el tamaño de las ráfagas medidas en número de paquetes a través de la distribución de Laplace. Por otra parte el tamaño de los paquetes esta caracterizado por una función constante el cual corresponde al tamaño de la trama Ethernet. Así la definición del modelo matemático de una muestra queda caracterizado a través de tres funciones de distribución estadística las cuales son obtenidas mediante la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov.
- En este capítulo se define el modelo matemático para el tráfico generado por las aplicaciones de TDi enmarcadas dentro del proyecto EDiTV, además lleva dicho modelo a un entorno de simulación donde se programan todos los parámetros entregados por el modelo matemático, tal que permite evaluar el rendimiento de la red ante el aumento de usuarios, variaciones de las configuraciones de los parámetros de la red de cable, ejecución de otras aplicaciones propias de la redes de datos y al aumento de tráfico. Además en este capítulo se da cumplimiento al objetivo específico “ Definir o adaptar un modelo de tráfico que refleje el uso que los abonados del sistema hacen del servicio de TDi”.
- Como trabajos futuros, se debe llevar el modelo matemático a diferentes herramientas de simulación tal que permitan ajustar lo mejor posible las diferentes características del protocolo a las condiciones reales de la red o para diferentes redes.

Capítulo 4

Simulación del Modelo de Tráfico.

4.1 Construcción del modelo de Simulación

Una vez definido un modelo matemático de un sistema, se debe realizar un primer estudio con el objetivo de determinar cómo usar este modelo para dar respuesta a las cuestiones de interés planteadas sobre el sistema que representa. Si el modelo es suficientemente sencillo, será posible obtener una solución analítica que relacione las magnitudes de interés. Si se puede obtener y su costo computacional es asumible se preferirán las soluciones analíticas. Sin embargo, la complejidad de muchos sistemas reales imposibilita la obtención de modelos suficientemente ajustados con soluciones analíticas o, en caso de obtenerlas, la carga computacional que conllevan desaconseja su uso. En este último caso, el modelo debe estudiarse de forma aproximada recurriendo a su simulación. En principio existe, por tanto, dos posibilidades.

- Solución analítica: supone analizar totalmente el modelo del sistema y obtener una solución que valdrá para todo momento y para obtener cualquier parámetro de interés.
- Simulación: se recrea una o varias evoluciones temporales del modelo con el fin de estimar un conjunto de parámetros. Los modelos de simulación son modelos matemáticos que permiten obtener una estimación del comportamiento del sistema para una configuración determinada.

En este capítulo se estudiara el modelo de simulación matemático para las aplicaciones de los laboratorios de EDiTV de la Universidad del Cauca e ITV de la Universidad de Oviedo

4.2 Construcción del modelo de Simulación bajo OPNET Modeler

El modelo que se desarrolla para la aplicación de VoD corresponde con un modelo Personalizado de Aplicaciones (Custom Application) de OPNET Modeler, cuyas etapas se muestran en la Figura 40.

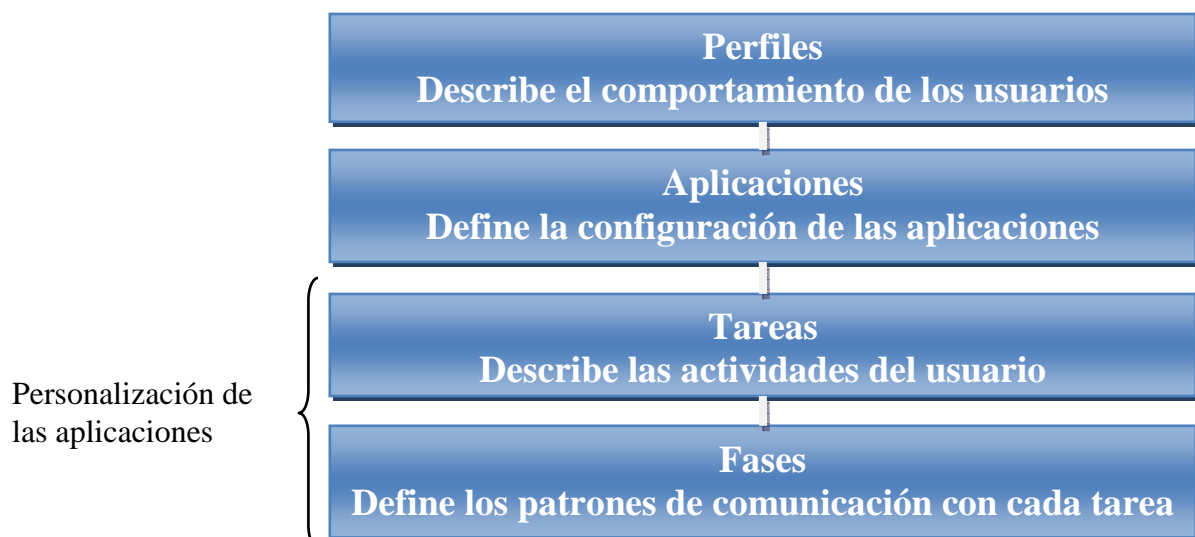


Figura 40. Arquitectura de las aplicaciones en OPNET

- Profiles - Perfiles: son una colección de aplicaciones, describe los patrones de actividad de un usuario individual o de un grupo de usuarios.
- Applications - Aplicaciones: especifica los parámetros de las peticiones y respuestas, corresponden a un grupo de tareas.
- Custom Application – Personalización de aplicaciones: OPNET Modeler permite a través de las Custom Application, realizar modelos de aplicaciones a medida, en las que el patrón de tráfico generado por la aplicación simulada puede ser configurado con atributos específicos tales como tiempo entre peticiones, tamaño de los paquetes en bytes, paquetes por petición, tiempo entre paquetes etc.

Para cada una de las muestras caracterizadas se realiza un modelo de VoD sobre OPNET Modeler para cada una de las muestras caracterizadas, tal que permita observar y analizar el comportamiento de la red de cable cuando transporta el tráfico generado por aplicaciones de VoD. En la Figura 41, se observa la infraestructura de red sobre la que se crean los diferentes escenarios, con sus perfiles, aplicaciones y tareas definidas sobre la misma.

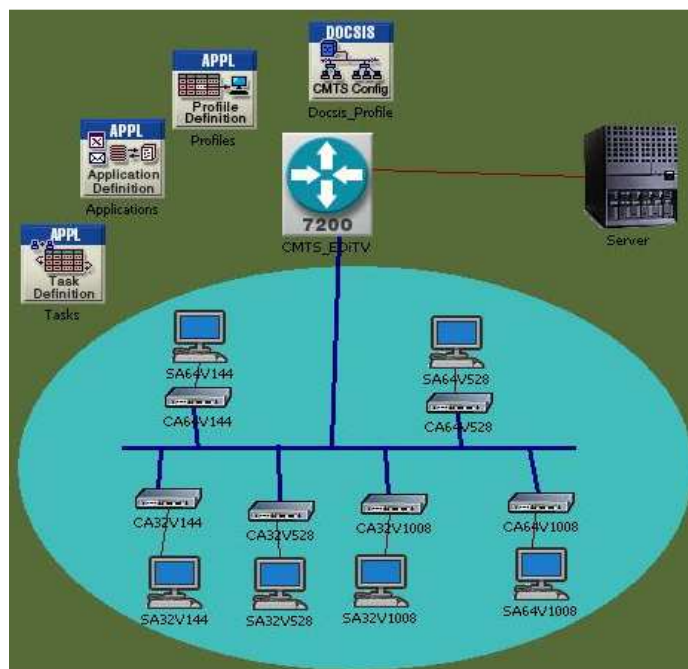


Figura 41. Arquitectura de red básica

4.2.1 Aplicaciones

La definición de aplicaciones se lleva a cabo en el nodo Applications Definition (ver Figura 41). Mediante dicho nodo se accede a la ventana de atributos de las aplicaciones ver Figura 42, en la que se introduce el número de aplicaciones que se desean crear, para este modelo se crearon 6 aplicaciones correspondientes a cada una de las muestras caracterizadas.

4.2.2 Perfiles

La definición de perfiles se lleva a cabo en el nodo Profile Definition (ver Figura 41). Mediante dicho nodo se accede a la ventana de atributos de perfil ver Figura 43, en la que se introduce el número de perfiles que se desean crear, para este modelo se crearon 6 perfiles correspondientes a cada una de las muestras caracterizadas.

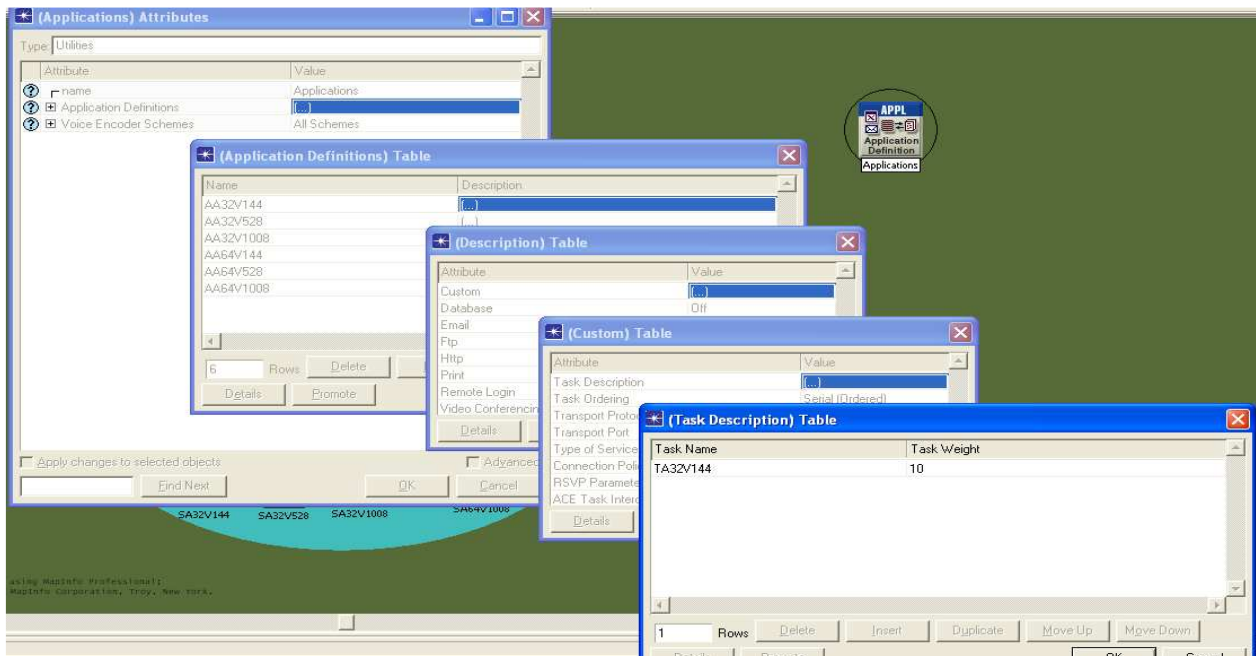


Figura 42. Creación de aplicaciones

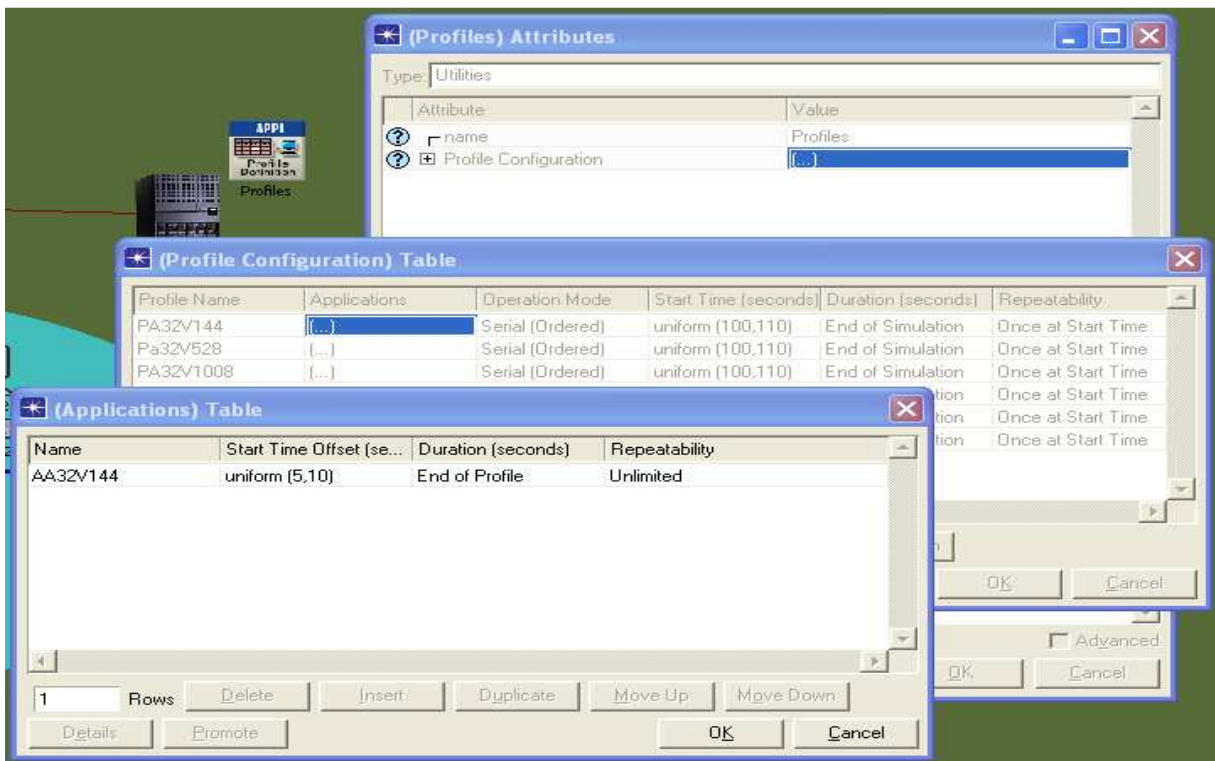


Figura 43. Creación de Perfiles

4.2.3 Tareas

La definición de tareas se lleva a cabo en el nodo Task Definition (ver Figura 41). Mediante dicho nodo se accede a la ventana de atributos de tareas como se muestra en la Figura 44, en la que se introduce el número de tareas que se desean crear, para este modelo se crearon 6 tareas correspondientes a cada una de las muestras caracterizadas.

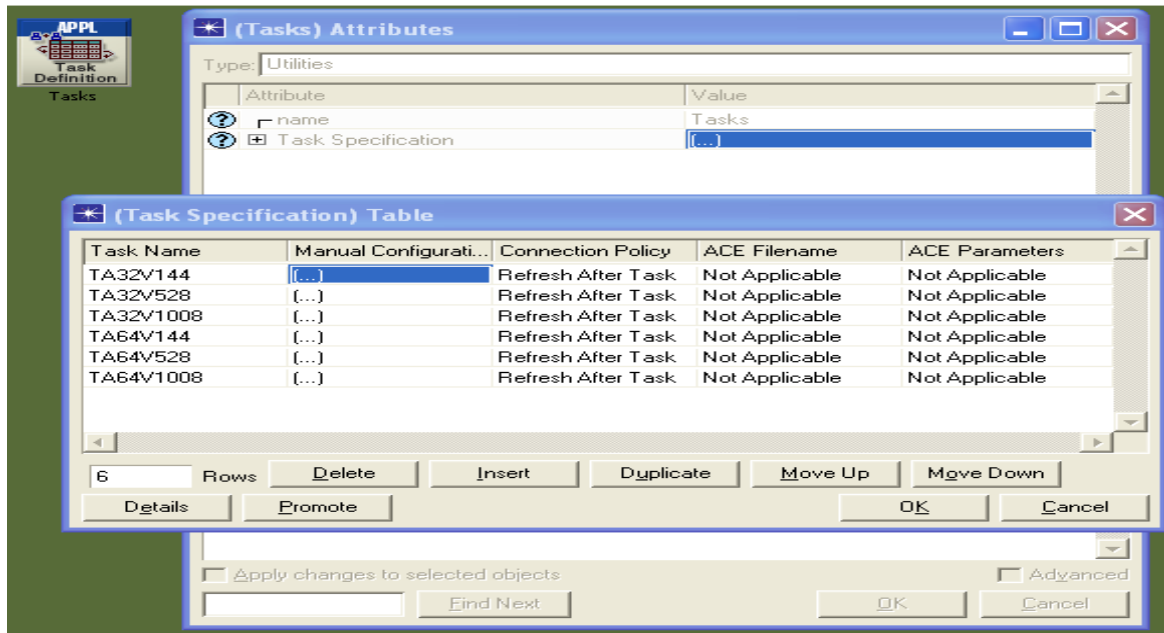


Figura 44. Creación de tareas

4.2.4 Fases

Las fases de cada tarea serán programadas a través del cuadro de diálogo que se obtiene a partir de la definición de cada tarea (columna *Manual Configuration*), ver Figura 45.

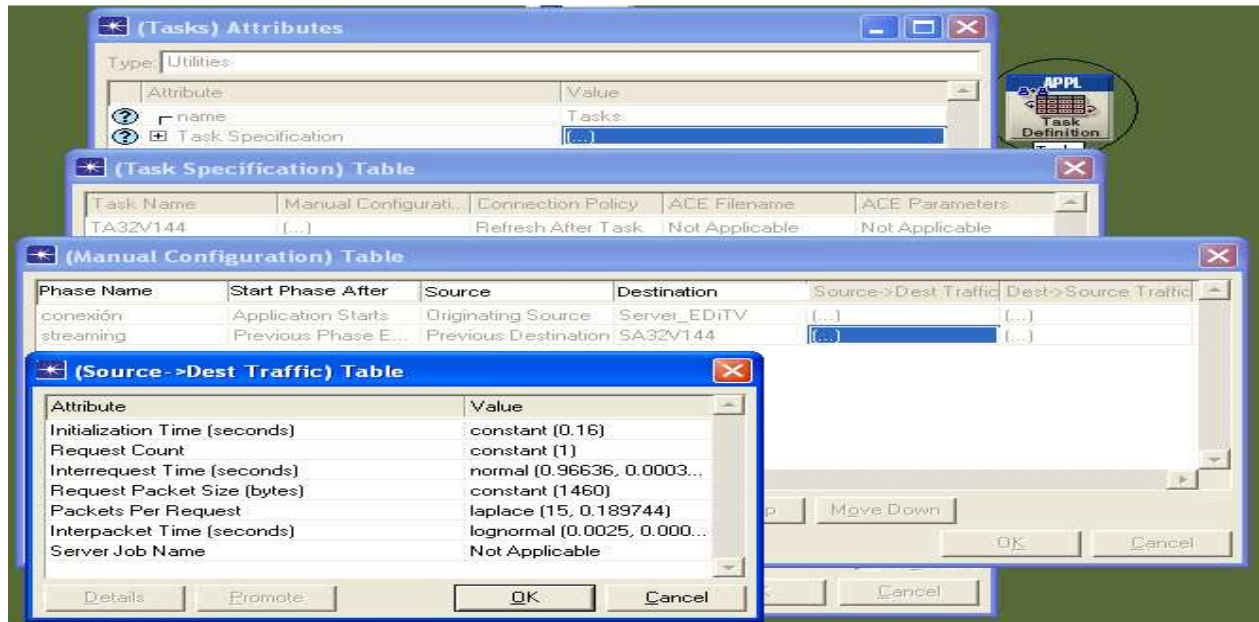


Figura 45. Creación de fases

Las siguientes fases que se describen corresponden a la segunda ventana de la Figura 45 llamada "(manual configuration) Table".

- *Phase name*: Nombre de cada fase
- *Start Phase After*: evento que inicia la fase. Los valores predefinidos serán cuando la aplicación comience, cuando la tarea anterior finalice o cuando la fase anterior finalice.
- *Source*: nombre simbólico del nodo que origina la petición (*request*) de la fase.
- *Destination*: nombre simbólico del nodo que origina la respuesta (*response*) de la fase

Las siguientes fases que se describen corresponden a la primera ventana de la Figura 45 llamada “(source →Dest Traffic) Table”.

- *Source →Dest Traffic*: Donde se modelara el paquete(s) de petición de la fase indicando los siguientes parámetros:
 - ✓ *Initialization Time*: retardo de inicialización introducido por la fase. Simula el *think time* del usuario.
 - ✓ *Request Count*: Número de peticiones realizadas para completar la fase.
 - ✓ *Interrequest Time*: Tiempo entre llegadas de petición.
 - ✓ *Request Packet Size*: Tamaño en bytes de los paquetes de petición.
 - ✓ *Packets Per Request*: Número de paquetes por petición.
 - ✓ *Interpacket Time*: Tiempo entre llegadas de paquetes.

Las siguientes fases que se describen corresponden al nodo llamo “Destination” ver segunda ventana de la Figura 45.

- *Dest → Source Traffic*: Donde se modela los paquetes de respuesta de la fase indicando los mismos parámetros que en el caso de las peticiones.
 - ✓ *Req/Resp Pattern*: Patrón de envío de la dupla petición/respuesta. Este patrón podrá enviarlas en serie o concurrentemente.
 - ✓ *End Phase When* Especifica el evento que desencadena el final de la fase. Generalmente se seleccionará cuando el último paquete de respuesta de la fase alcance al destino.
 - ✓ *Timeout Properties*: Política de inactividad donde se puede especificar los tiempos de descarte de peticiones/repuesta por inactividad del par en la comunicación.
 - ✓ *Transport Connection*: Define el número de conexiones que puede establecer la fase para completar los intercambios de información definidos.

4.3 Extrapolación del modelo Matemático para el desarrollo del modelo de simulación de las aplicaciones de VoD

El modelo que se realizó para las aplicaciones de VoD corresponde con un modelo Custom Application como el que se ha descrito anteriormente. Sus etapas se describen a continuación.

- Los patrones de intercambio de información en una aplicación de VoD son sencillos, es decir, el cliente (estación de trabajo) será quien realice la petición (request) en cada fase mediante dos paquetes (fase de conexión), y el servidor de aplicaciones será quien envíe las respuestas a dichas peticiones (streaming) cuya respuesta constara de múltiples paquetes dependiendo de la longitud del video, calidad, etc.
- Para la extracción de los parámetros involucrados en cada fase se hace uso del analizador de protocolos Wireshark (Wireshark, 2008), mediante el cual se llevan a cabo diferentes capturas de tráfico reales originadas en la ejecución de la aplicaciones de VoD instaladas y ejecutadas en la red del laboratorio de ITV. En la Figura 23, se muestra una captura del tráfico y su correspondiente curva. En la Tabla 8 se muestran los parámetros de cada fase para la aplicación de streaming cuyos parámetros de calidad son: Audio 32 Kbps y Video 144 Kbps. Sobre esta aplicación denominada “streaming uno” se mostrara la construcción y validación del modelo de simulación, siguiéndose un proceso análogo para las otras aplicaciones de streaming.

Fase	Nº paquetes	Tiempo entre paquetes (mseg)	Think Time Cliente(mseg)	Think Time Servidor(mseg)
Conexión	2	N/A	0	100
streaming	3720	2 mseg	55	15
Desconexión	2	N/A	11	13

Tabla 8. Parámetros de cada Fase

4.3.1 Definiendo Tareas

En el nodo de Task Definition del modelo OPNET se definen las tareas tal y como se han identificado en el punto 4.2.3 de los pasos previos. La notación que se usa es la siguiente: TA32V144, corresponde a la tarea para el streaming del VoD con calidad de Audio de 32 Kbps y calidad de Vídeo de 144 Kbps y así sucesivamente con cada uno de los demás videos. Ver Figura 46.

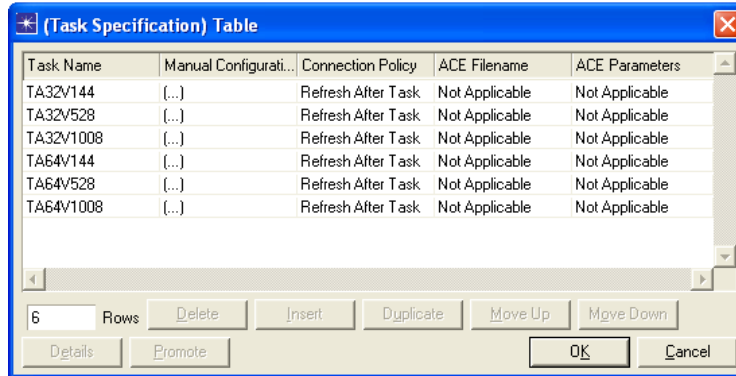


Figura 46. Modelado de las tareas de VoD

4.3.2 Definiendo Fases

En la definición de las fases de cada tarea es donde se deben programar los parámetros de entrada de cada una de las aplicaciones teniendo en cuenta los parámetros que caracterizan cada una de las aplicaciones encontradas en el capítulo 3 correspondientes al modelo matemático y algunos datos adicionales extraídos de las capturas reales del tráfico a través del Wireshark,. A continuación se muestran mediante la Tabla 9, la Tabla 10 y la Tabla 11 el proceso para el streaming uno. El proceso es análogo para las otras aplicaciones.

Fase de Conexión					
Source→Dest Traffic	Initialization Time	0,13 seg	Dest→Source Traffic	Request Processing Time	0,01 seg
	Request Count	1		Response Count	1
	Request Packet Size	60 B		Response Packet Size	1536 B
	Packets Per Request	1		Packets Per Response	1

Tabla 9. Parámetros de Modelado de paquetes en la Fase de conexión

Fase de Streaming					
Source→Dest Traffic	Initialization Time	0,16 seg	Dest→Source Traffic	Request Processing Time	0,0 seg
	Request Count	1		Response Count	1
	Request Packet Size	1460 B		Response Packet Size	60 B
	Packets Per Request	Distribución de Laplace		Packets Per Response	1
	Inter Request Time	Distribución Normal		Inter Reques Time	ACK

Tabla 10. Parámetros de Modelado de paquetes en la Fase de Streaming

Fase de Desconexión					
Source→Dest Traffic	Initialization Time	Fin de la fase previa	Dest→Source Traffic	Request Processing Time	No responde
	Request Count	1		Response Count	N/A
	Request Packet Size	60 B		Response Packet Size	N/A
	Packets Per Request	1		Packets Per Response	N/A

Tabla 11. Parámetros de Modelado de paquetes en la Fase de Desconexión

4.3.3 Programación del Modulo STB sobre OPNET Modeler

Antes de proceder a la validación del modelo se debe configurar las variables TCP que controlan el comportamiento del protocolo en la estación que simulará ser un STB, que ejecuta la parte cliente de las aplicaciones. En la Tabla 12 se muestran los valores de configuración para el equipo disponible en el laboratorio de ITV:

STB			
sunrpc.tcp_slot_table_entries = 16			net.ipv4.tcp_reordering = 3
net.ipv4.tcp_bic_beta = 819			net.ipv4.tcp_fack = 1
net.ipv4.tcp_tso_win_divisor = 8			net.ipv4.tcp_orphan_retries = 0
net.ipv4.tcp_moderate_rcvbuf = 1			net.ipv4.tcp_max_syn_backlog = 128
net.ipv4.tcp_bic_low_window = 14			net.ipv4.tcp_rfc1337 = 0
net.ipv4.tcp_bic_fast_convergence = 1			net.ipv4.tcp_stdurg = 0
net.ipv4.tcp_bic = 1			net.ipv4.tcp_abort_on_overflow = 0
net.ipv4.tcp_vegas_gamma = 2			net.ipv4.tcp_tw_recycle = 0
net.ipv4.tcp_vegas_beta = 6			net.ipv4.tcp_fin_timeout = 60
net.ipv4.tcp_vegas_alpha = 2			net.ipv4.tcp_retries2 = 15
net.ipv4.tcp_vegas_cong_avoid = 0			net.ipv4.tcp_retries1 = 3
net.ipv4.tcp_westwood = 0			net.ipv4.tcp_keepalive_intvl = 75
net.ipv4.tcp_no_metrics_save = 0			net.ipv4.tcp_keepalive_probes = 9
net.ipv4.tcp_low_latency = 0			net.ipv4.tcp_keepalive_time = 7200
net.ipv4.tcp_frto = 0			net.ipv4.tcp_max_tw_buckets = 8192
net.ipv4.tcp_tw_reuse = 0			net.ipv4.tcp_max_orphans = 4096
net.ipv4.tcp_adv_win_scale = 2			net.ipv4.tcp_synack_retries = 5
net.ipv4.tcp_app_win = 31			net.ipv4.tcp_syn_retries = 5
net.ipv4.tcp_rmem = 4096 43689 87378			net.ipv4.tcp_retrans_collapse = 1
net.ipv4.tcp_wmem = 4096 16384 65536			net.ipv4.tcp_sack = 1
net.ipv4.tcp_mem = 3072 4096 6144			net.ipv4.tcp_window_scaling = 1
net.ipv4.tcp_dsack = 1			net.ipv4.tcp_timestamps = 1
net.ipv4.tcp_ecn = 0			fs.nfs.nlm_tcpport = 0

Tabla 12. Parámetros TCP/IP STB

De los valores anteriores resultan útiles para el modelo de estación STB los siguientes parámetros:

- ✓ net.ipv4.tcp_window_scaling : control de escalado en el tamaño de ventana. Con valor 1, indica que está activado.
- ✓ net.ipv4.tcp_sack : control de utilización de Selective ACK. Con valor 1, indica que está activado.
- ✓ net.ipv4.tcp_rmem : tamaños (mínimo defecto máximo) del buffer de recepción TCP, es decir, valores entre los que estará comprendido el tamaño de ventana de recepción que anunciará al servidor.
- ✓ net.ipv4.tcp_adv_win_scale : factor de utilización del buffer de recepción TCP para el buffer de aplicación (el restante será usado para el tamaño de ventana de recepción).
- ✓ net.ipv4.tcp_ecn: control de la notificación explícita de congestión (ECN). Con valor 0 indica que está desactivada

Una vez configurados los parámetros anteriores en la simulación, se procede a validar el modelo.

4.3.4 Validación del Modelo Simulado para el laboratorio de ITV

Para validar el modelo, se comparan las capturas reales del tráfico generado por las aplicaciones de streaming en el laboratorio de ITV, con las que arroja la herramienta de simulación previamente programada mediante los parámetros que arroja el modelo matemático. Teniendo en cuenta que el tráfico generado por las aplicaciones no está representado por una única función de distribución de probabilidad debido a su comportamiento a ráfagas identificado y descrito en el capítulo 3, OPNET Modeler debe generar patrones de tráfico equivalentes a las capturadas por Wireshark.

El procedimiento consistió en montar cada una de las aplicaciones de streaming por separado, correr la aplicación y verificar las estadísticas entregadas correspondientes a:

- La programación de las fases descritas en 4.3.2 y la verificación de la generación del tráfico de cada una de las fases programadas,
- El tamaño de los paquetes,
- El tiempo de ejecución y número de ejecuciones programados para cada uno de los perfiles.

A continuación se muestra el procedimiento para el streaming uno, el procedimiento es análogo para las otras aplicaciones de streaming.

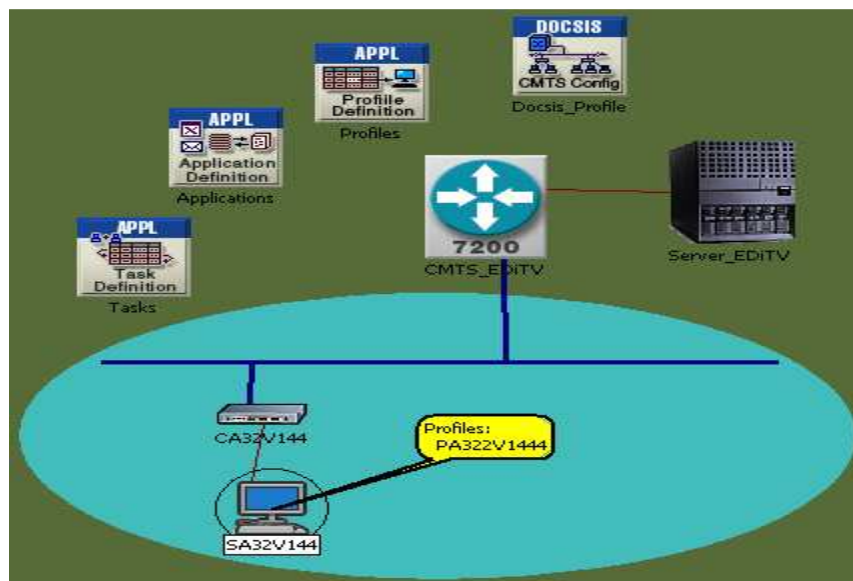


Figura 47. Escenario básico para verificación del modelo simulado

4.3.4.1 Validación de las fases.

En la Figura 48.a se muestra que se han configurado (con los parámetros descritos en las tablas 7, 8 y 9) las tres fases descritas anteriormente, en la Figura 48.b se muestra que dichas fases han sido programadas sobre la Custom Application y una vez ejecutado el proyecto, dichas fases generan tráfico.

4.3.4.2 Validación del tamaño de los paquetes

En la Figura 49.a se muestra capturas de tráfico TCP en Bytes/s y Paquetes/s, sobre la estación SA32V144. En la Figura 49.b se hace zoom sobre una de las ráfagas de tráfico mostrando un pico de 26300 Bytes en un instante dado (a los 7 s aproximadamente) que corresponde a un pico de 18 paquetes en el mismo instante de tiempo. Esto significa que el tamaño de los paquetes corresponde a un valor de 1460 Bytes aproximadamente (26300/18) coincidiendo con el tamaño configurado en la fase de streaming (ver Tabla 10), esto corrobora que el tamaño de

los paquetes sobre el modelo simulado es correcto y coincide con el tamaño de los paquetes capturados del tráfico real mediante Wireshark en el laboratorio de ITV

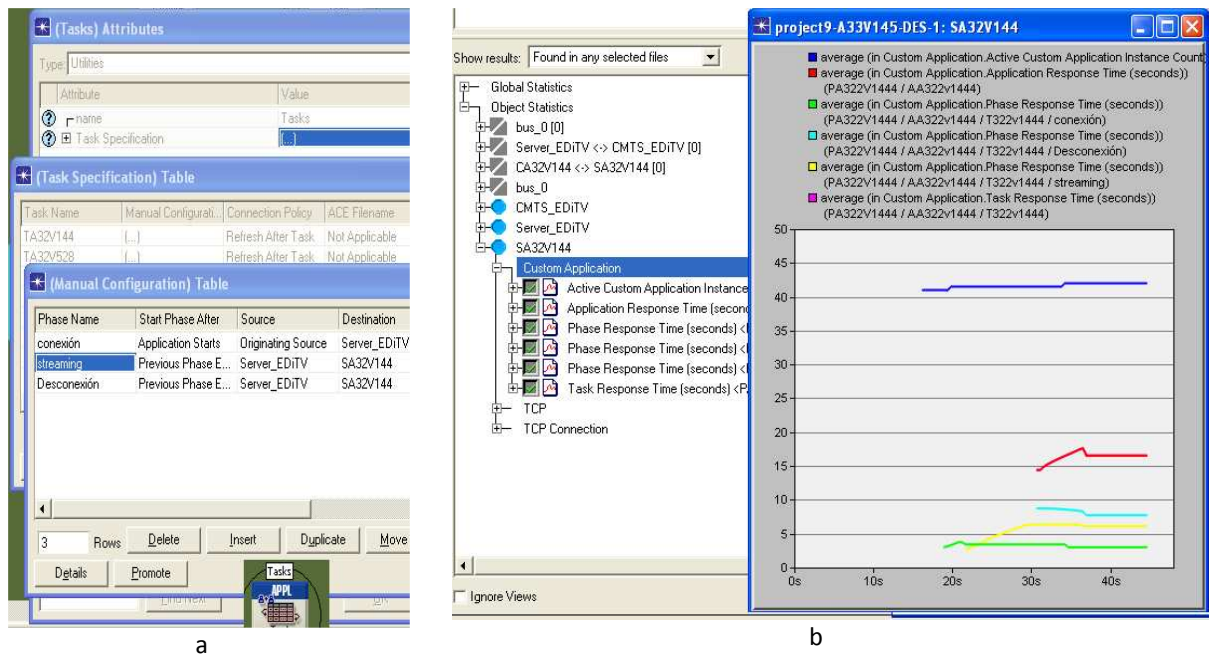


Figura 48. Validación de las fases

Además, el tamaño de la ráfagas mostradas en la Figura 49.a corresponden al tamaño de las ráfagas capturadas mediante Wireshark ver Figura 50. Se debe tener en cuenta que la distancia real entre las ráfagas por razones de capacidad de resolución de la herramienta de simulación no se alcanza a apreciar, por esta razón en el siguiente punto se valida el tiempo de ejecución y el número de ejecuciones.

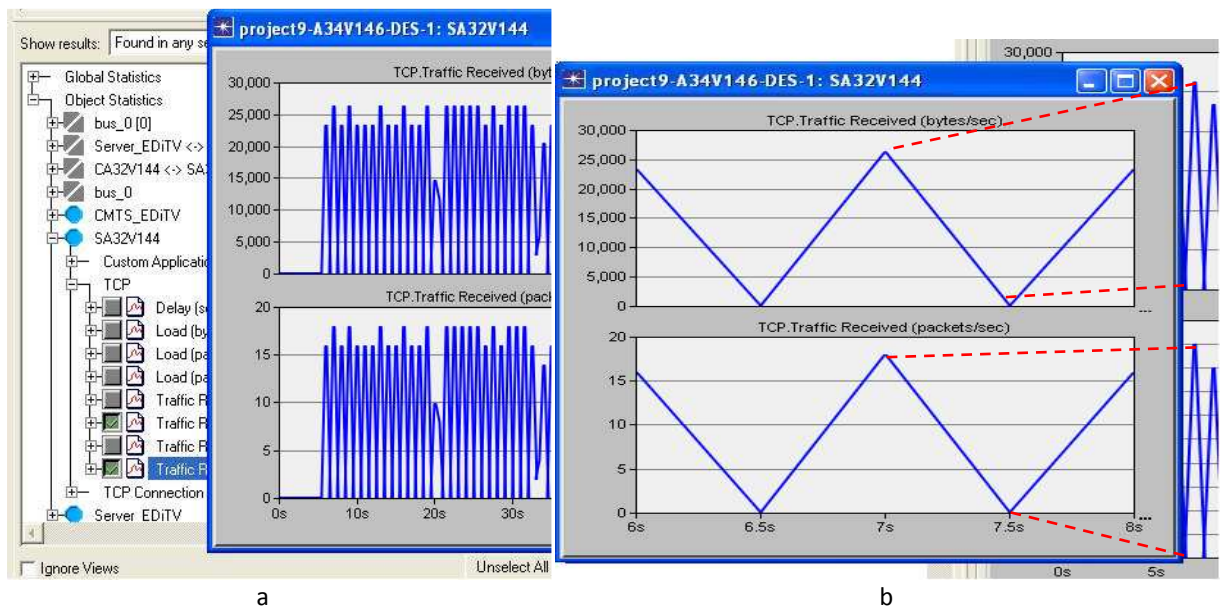


Figura 49. Validación del tamaño de los paquetes

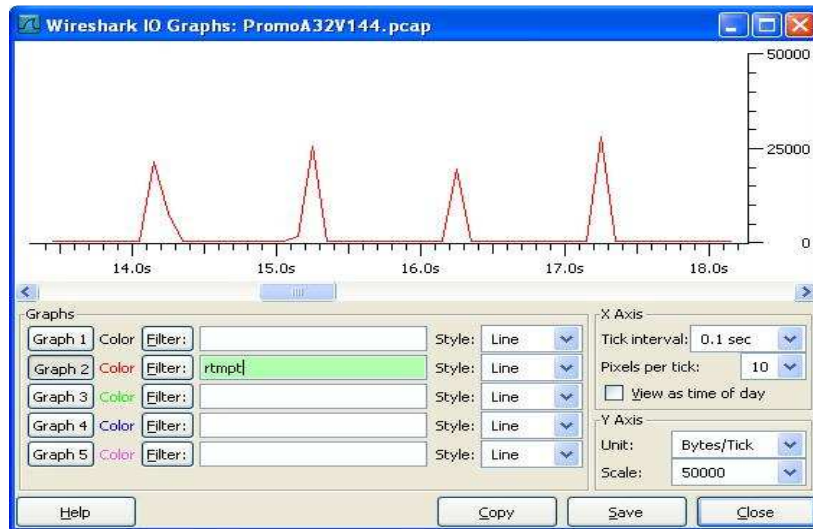


Figura 50. Tamaño de las ráfagas en Wireshark

4.3.4.3 Validación del tiempo de ejecución y número de ejecuciones programados para cada uno de los perfiles.

En la Figura 51.a se muestra que el perfil (profile Definition) PA32V144 se ha configurado para que la aplicación AA32v144 se ejecute 4 veces con tiempos de inicio diferentes (Start Time Offset) y en la Figura 51.b se observa el tráfico recibido sobre la estación SA32V144 observándose 4 ráfagas correspondientes a los tiempos de inicio de ejecución (Start Time Offset) mediante una distribución uniforme (configurable a gusto del administrador del sistema) ver Figura 51.a cuyos tiempos en segundos mínimos y máximos para cada ejecución son (5, 8) (25, 28), (32, 35) y (36, 39). Por supuesto las curvas de tráfico sobre la estación están un poco desfasadas en tiempo debido a los retardos generados por los protocolos y los medios de de trasmisión. Estos conceptos serán abordados con gran detalle en el capítulo 5.

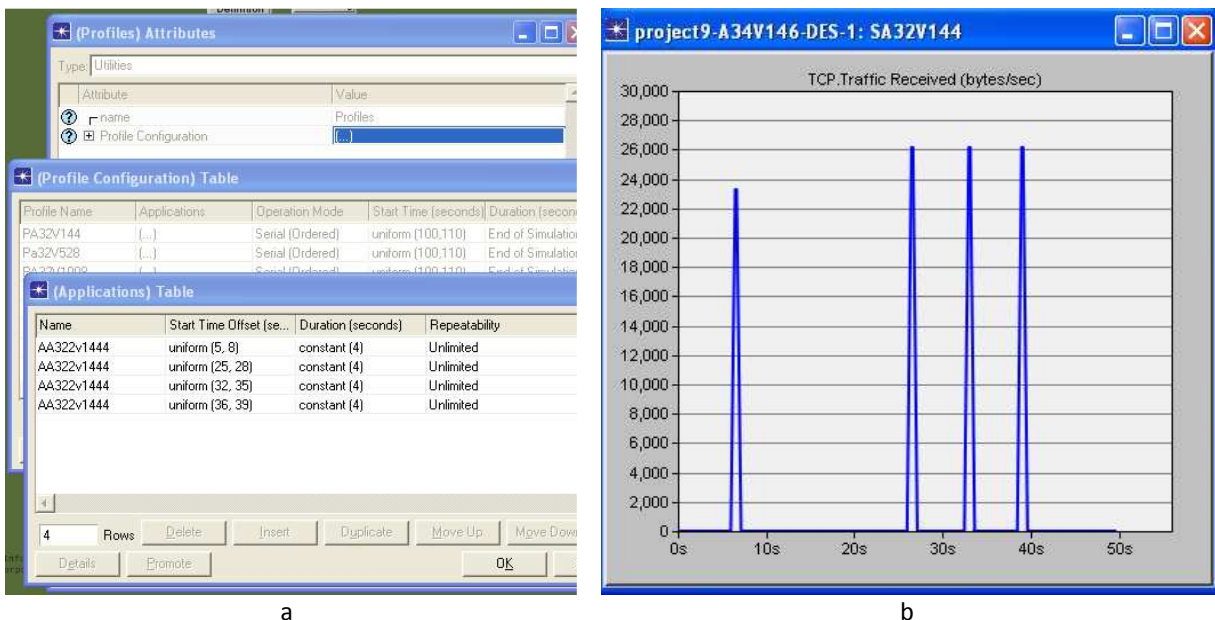


Figura 51. Validación del tiempo y número de de ejecuciones

Estos parámetros configurados sobre OPNET Modeler muestran que son capaces de controlar el tiempo entre ráfagas, se debe tener en cuenta que el valor para la distancia entre las ráfagas para efectos de validación han sido incrementados como se explica en el párrafo anterior y así evidenciar el control sobre dicho parámetro, que de otra manera, por razones de capacidad de resolución de la herramienta de simulación no se alcanzarían a apreciar.

El parámetro número de ejecuciones por su parte se encarga de controlar el tamaño de las ráfagas medidas en número de paquetes ya que el tráfico total generado por una muestra de una aplicación de VoD puede ser alcanzado incrementando el número de veces que se ejecuta la función de distribución estadística que caracteriza el tamaño de las ráfagas. En este apartado se muestra como se tiene el control en la herramienta OPNET Modeler del número de ejecuciones que por razones de resolución de la herramienta ha sido reducido a cuatro ejecuciones para alcanzar a ser observado.

Así, el modelo simulado representa de manera correcta el comportamiento del tráfico generado por las aplicaciones de VoD.

4.4 Validación del Modelo Simulado para las aplicaciones de EDiTV

En (Taimal & Rueda, 2009) se valida el modelo simulado para las aplicaciones de EDiTV, dicho trabajo cuenta con la asesoría directa del autor de este trabajo. En este apartado se presentan los resultados obtenidos.

En la Figura 52 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, llamada EDiTV0. 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 TDi lo que permite validar dicho modelo y por ende puede tomarse como base para hacer estudios pertinentes.

De la misma forma que para la aplicación anterior, en la Figura 53 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 repuesta de la “aplicación preguntas de selección múltiple”, llamada EDiTV1. Nótese que los 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 TDi lo que permite validar dicho modelo y en consecuencia puede tomarse como base para hacer estudios pertinentes.

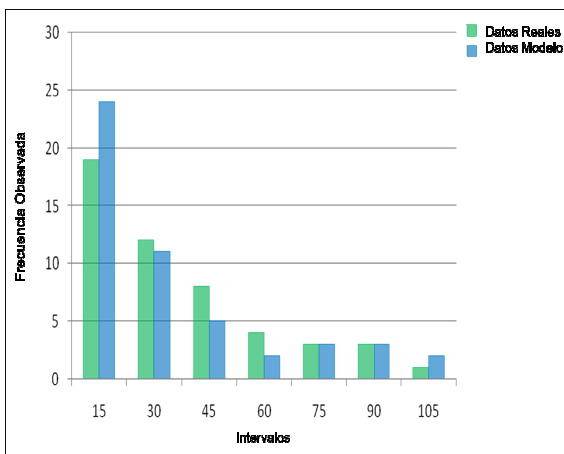


Figura 52. Comparación del tiempo entre peticiones

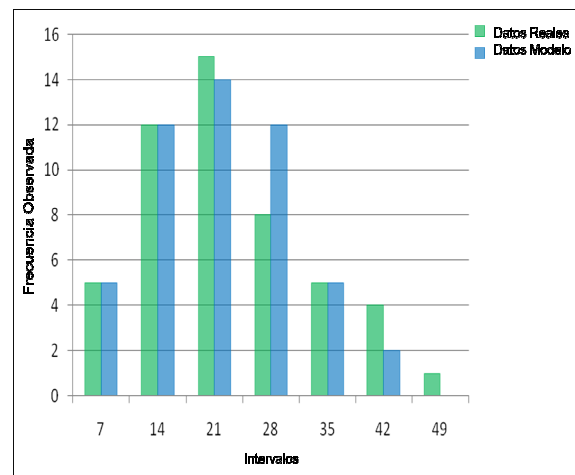


Figura 53. Comparación del tiempo de inicio de respuesta

Por lo tanto, los modelos de tráfico simulados encontrados permiten la definición de diferentes perfiles que determinan el comportamiento de un usuario cuando hacen uso de estas aplicaciones de TDi y que pueden ser simulados en el modelo de red que se plantea en el siguiente capítulo. Esto facilita la evaluación de la incidencia del protocolo DOCSIS sobre este tipo de aplicaciones. Determinando de esta manera las condiciones de la red de acceso HFC para una adecuada prestación del servicio de TDi, que cumpla con los parámetros de desempeño en el canal interactivo de la red.

4.5 Aportes y conclusiones de este capítulo

- La validación de las simulaciones bajo la herramienta OPNET Modeler confirman la validez de los resultados, los cuales corresponden a un trabajo completo ya que en esta tesis se tiene en cuenta un proceso que incluye el montaje de los laboratorios de EDiTV e ITV (ver anexo C), el diseño e implementación de las aplicaciones para TDi, así como su previa evaluación (EDiTV, 2008), la captura de tráfico y un análisis exhaustivo del mismo que conduce a la caracterización estadística de dicho tráfico, extrapolando (apartado 4.3.2 de este documento) dichas características sobre la herramienta de simulación.
- Los resultados obtenidos han sido validados a partir de la información capturada en los laboratorios de EDiTV e ITV. Se ha validado el tamaño de los paquetes, el tiempo de ejecución y número de ejecuciones comparado la evolución temporal del tráfico real con el tráfico simulado. Permitiendo la construcción del modelo sobre un escenario completo sin utilizar los resultados de caracterización de otros autores. Además se presenta la programación del modulo STB sobre OPNET Modeler que permite que las medidas de tráfico sobre el modelo simulado estén en un contexto de TDi. Así queda cumplido el objetivo específico “Validar el modelo de tráfico contrastando los datos obtenidos en la simulación con los datos reales del laboratorio”.
- Teniendo en cuenta el modelo matemático adoptado se ha realizado el mapeo de dicho modelo en la herramienta OPNET modeler. Siendo necesario en la herramienta el manejo de las Custom Applications. A partir de este modelo podemos deducir el comportamiento de la red ante el aumento de usuarios o manejo de diferentes aplicaciones. Como se puede observar los resultados obtenidos hasta el momento dan luces de las condiciones reales de un sistema de VoD, sin embargo en la experimentación se pueden hacer variaciones de los parámetros o condiciones y hacer comparaciones que permitir valorar de mejor manera, rendimiento, y explorar las características de interactividad. El modelo permite que se cree la base del conocimiento para la toma de decisiones sobre el uso de aplicaciones de VoD en la TDi, para los proveedores de contenidos que deseen ampliar su oferta de servicios sobre sus redes.
- Como aporte es necesario resaltar que en este capítulo se presenta el proceso paso a paso para la validación del modelo simulado teniendo en cuenta la validación de las fases, la validación del tamaño de los paquetes y la validación del tiempo de ejecución y número de ejecuciones programados para cada uno de los perfiles, dichos parámetros muestran que son capaces de controlar el tiempo entre ráfagas y el tamaño de las ráfagas medida en número de paquetes.

Capítulo 5

Evaluación de la red HFC

5.1 Análisis de Desempeño de las aplicaciones de TDi en redes DOCSIS

En este apartado se realiza el análisis mediante simulación del comportamiento de una red HFC DOCSIS 1.1 cuando transporta el flujo generado por múltiples televidentes de las aplicaciones de TDi. En el análisis de dicho desempeño se mantendrá especial atención a los aspectos estudiados en el capítulo uno sobre Antecedentes, en el que se han reflejado las líneas de investigación existentes sobre los problemas de transporte de datos de gran capacidad sobre redes DOCSIS, concretamente se estudiara:

- Análisis del impacto en el desempeño con arreglo a los diferentes parámetros de configuración en una red DOCSIS.
- Evaluación mediante modelado del desempeño de una red HFC-DOCSIS que transporta las aplicaciones de VoD caracterizadas en el presente trabajo de investigación bajo los parámetros analizados en los puntos anteriores.
- Parámetros óptimos de configuración de DOCSIS para un transporte eficiente de las aplicaciones de VoD, como conclusión a la evaluación llevada a cabo en el punto anterior.
- Evaluación mediante modelado del desempeño de las aplicaciones de EDiTV y VoD caracterizadas en el presente trabajo.
- Evaluación del comportamiento de la red HFC ante aplicaciones EDiTV, VoD y otras servicios como FTP, VoIP, HTTP.

5.1.1 Configuración Básica de DOCSIS

Todos los escenarios propuestos a continuación contarán de manera fija con los valores de configuración que se muestra en la Tabla 13.

Configuración DOCSIS	Canal Descendente	Canal Ascendente
Modulación	QAM	QPSK
Tasa de datos	256 Mbps	2.56 Mbps
Ancho de banda del canal	8 MHz	800 KHz
Frecuencia central	550 MHz	12 MHz
Versión DOCSIS	1.1	
Opción de Fragmentación	Habilitada	

Tabla 13. Configuración básica de DOCSIS

Se han definido 5 escenarios de pruebas con el objeto de analizar el comportamiento de la red ante el aumento de usuarios y tráfico generado por aplicaciones con diferentes calidades de codificación, así:

- **Escenario Uno**

El objetivo de este escenario es presentar el comportamiento de tres muestras de streaming. Este escenario se configura, utilizando como parámetros de entrada los correspondientes al modelo matemático de los siguientes streaming:

- ✓ Audio 32 Kbps y Video 144 kbps que se llamara streaming uno, configurado sobre el usuario: nodo_0
- ✓ Audio 32 Kbps y Video 528 Kbps que se llamara streamng dos, configurado sobre el usuario: nodo_1
- ✓ Audio 32 Kbps y Video 1008 Kbps que se llamara streaming tres: configurado sobre el usuario: nodo_2

Se configura un televidente por cada uno de los streaming sobre los nodos respectivos, los cuales son solicitados de manera simultánea.

- **Escenario Dos**

El objetivo de este escenario es presentar el comportamiento de tres muestras de streaming cuyas características de codificación son mayores a las del escenario uno. Este escenario se configura, utilizando como parámetros de entrada los correspondientes al modelo matemático de los siguientes streaming:

- ✓ Audio 64 Kbps y Vídeo 144 kbps que se llamara streaming cuatro, configurado sobre el usuario: nodo_0
- ✓ Audio 64 Kbps y Vídeo 528 Kbps que se llamara streamng cinco, configurado sobre el usuario: nodo_1
- ✓ Audio 64 Kbps y Vídeo 1008 Kbps que se llamara streaming seis: configurado sobre el usuario: nodo_2

Se configura un televidente por cada uno de los streaming sobre los nodos respectivos, los cuales son solicitados de manera simultánea. En la Figura 58 se observa el tráfico sobrepuesto de los usuarios.

- **Escenario Tres**

El objetivo de este escenario es presentar el comportamiento de seis muestras de streaming, las cuales involucran el escenario uno y el escenario dos. Este escenario se configura, utilizando como parámetros de entrada los correspondientes al modelo matemático de los siguientes streaming:

- ✓ Audio 32 Kbps y Vídeo 144 kbps que se llamará streaming uno, configurado sobre el usuario: nodo_1
- ✓ Audio 32 Kbps y Video 528 Kbps que se llamará streamng dos, configurado sobre el usuario: nodo_2
- ✓ Audio 32 Kbps y Video 1008 Kbps que se llamará streaming tres, configurado sobre el usuario: nodo_3
- ✓ Audio 64 Kbps y Vídeo 144 kbps que se llamará streaming cuatro, configurado sobre el usuario: nodo_4
- ✓ Audio 64 Kbps y Video 528 Kbps que se llamará streamng cinco, configurado sobre el usuario: nodo_5
- ✓ Audio 64 Kbps y Video 1008 Kbps que se llamará streaming seis: configurado sobre el usuario: nodo_6

Se configura un televidente por cada uno de los streaming sobre los nodos respectivos, los cuales son solicitados de manera simultánea.

- **Escenario Cuatro**

Se configuraron 14 usuarios, tal que haya una mayor exigencia sobre la red del la siguiente forma:

- ✓ Streaming uno, streaming cuatro, streaming cinco y streaming seis: dos usuarios cada uno
- ✓ Streaming dos y streaming tres: Tres usuarios cada uno

- **Escenario Completo**

El escenario esta conformado por los catorce usuarios del escenario cuatro, seis usuarios soportando la aplicación EDiTV0 y seis usuarios soportando la aplicación EDiTV1, todas en conjunto conforman las aplicaciones TDi, además los tiempos de simulación son de 10 minutos. Debido a que la asignación de las direcciones IP se configuro mediante DHCP el proceso de direccionamiento toma cierto tiempo en llevarse a cabo por el número elevado de usuarios, lo que hace necesario asignar a los perfiles tiempos suficientes para la ejecución de las aplicaciones, sus respectivas tareas y fases. Además se realizaron pruebas de los escenarios con tiempos de simulación de un minuto para más de catorce usuarios y la herramienta de simulación arroja errores de direccionamiento que hacen referencia a tiempo insuficiente para la actualización de las tablas de enrutamiento.

5.1.2 Medidas de tráfico para VoD

A continuación se mostrarán medidas de tráfico correspondientes a las aplicaciones de streaming. En la Figura 54 se observa el Retardo DOCSIS para el streaming uno, este parámetro para el protocolo DOCSIS se va incrementando hasta alcanzar un máximo de 8 ms aproximadamente, donde sus variaciones son mínimas, además se observa un

tiempo inicial de aproximadamente 5 segundos durante los cuales no existe ninguna curva para el Retardo, ya que en la configuración del perfil se asignó con un start time offset de 5 s (ver Figura 51). En la Figura 54.b se observa el Retardo para el streaming uno, el cual presenta un pico inicial de 18 ms para luego estabilizarse alrededor de los 16 ms, lo cual cumple con los parámetros establecidos en la Tabla 3.

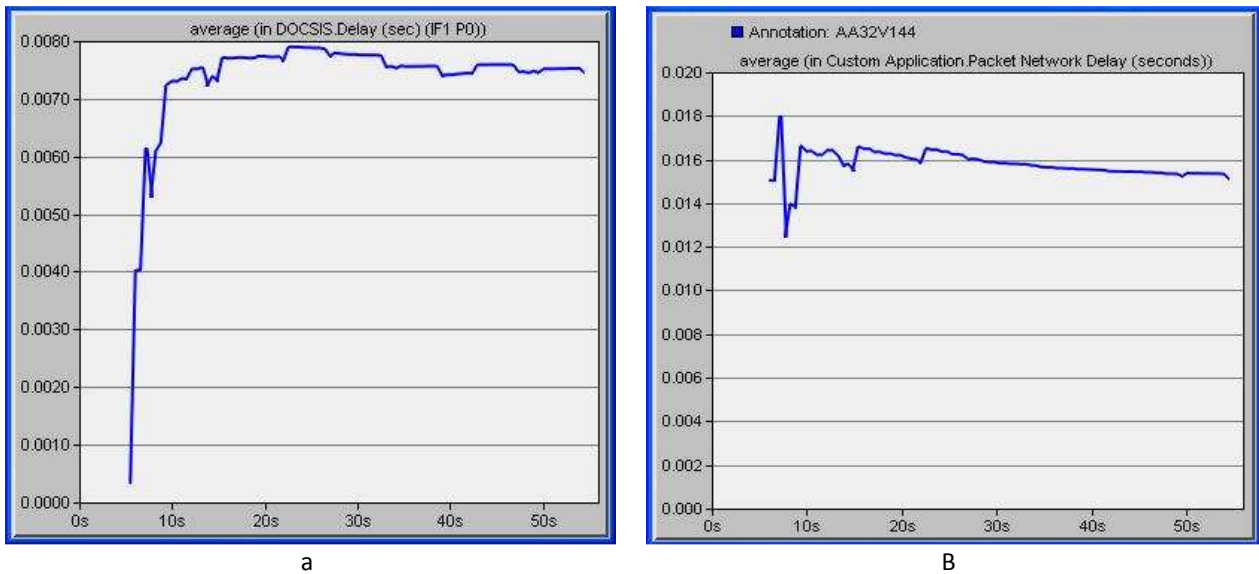


Figura 54. Retardo streaming uno

Por su puesto, una red HFC dedicada solo a soportar una aplicación con las características de codificación del streaming uno, debe comportarse muy bien. Por esta razón a continuación se mostrarán diferentes escenarios que realmente exijan las condiciones de la red.

5.1.2.1 Escenario uno.

Este escenario presenta a través de las Figura 55, Figura 56 y Figura 57 el tráfico, el retardo DOCSIS, el retardo de las aplicaciones de VOD y el throughput de cada uno de los streaming.

En la Figura 55 se muestra el tráfico sobre puesto de los usuarios. Además se observa mediante las curvas, como a mayor calidad de codificación de cada uno de los streaming es mayor el número de bits por segundo en cada una de las ráfagas. Así, la curva superior de color azul corresponde al streaming tres, mientras que la curva inferior de color verde corresponde al streaming uno.

- **Retardo**

El Retardo DOCSIS 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. El Retardo de las aplicaciones representa el tiempo que tardan en llegar a su destino los paquetes de la aplicación de VoD

En la Figura 56.a se observa el Retardo DOCSIS para los streaming uno, dos y tres, que en promedio esta entre 10 y 11 ms. A nivel de la aplicación se tiene el retardo de cada uno de los videos cuyo valor mayor se presenta para el streaming tres, como debería corresponder ya que es el video con mayores valores de codificación, ver Figura 56.b. Se observa que la red es capaz de soportar los streaming uno, dos y tres, dentro del límite de 200ms establecido en (ITU-T_G.1010, 2001).

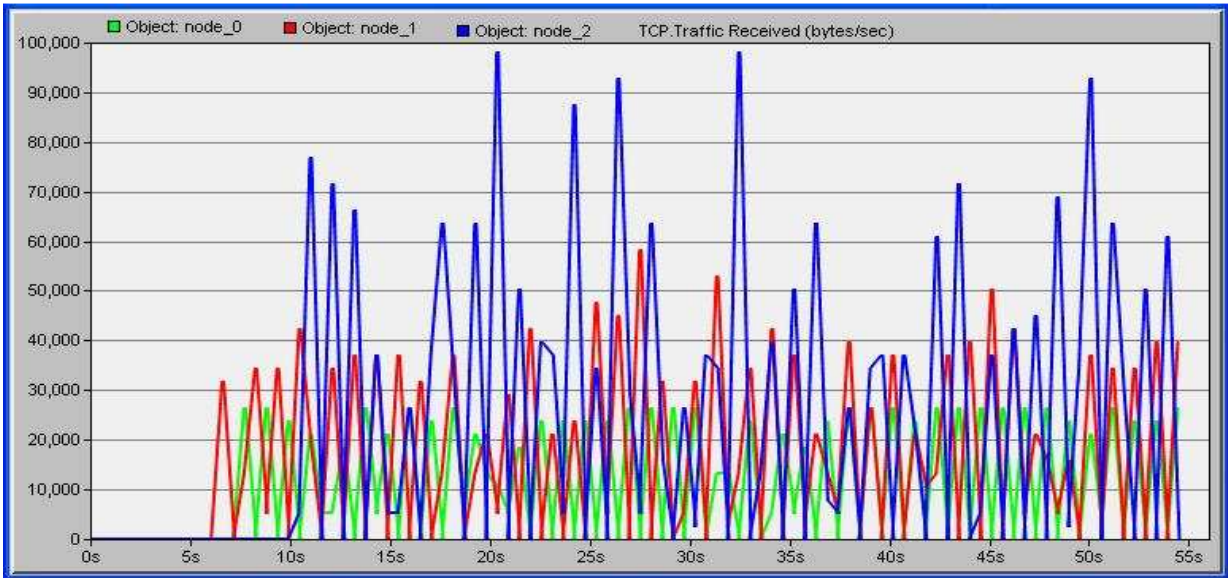
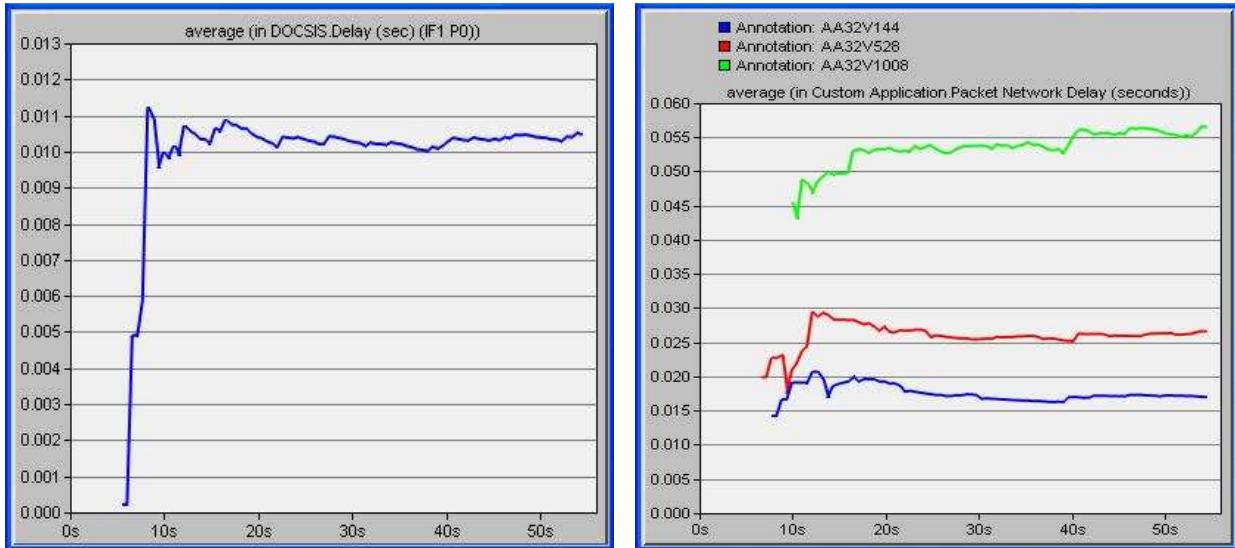


Figura 55. Tráfico sobre los streaming uno, dos y tres



a. DOCSIS

b. Aplicaciones

Figura 56. Retardo sobre los streaming uno, dos y tres

- **Throughput**

En la Figura 57 se observa el throughput para los canales ascendente y descendente, como es de esperarse el throughput del canal descendente es mucho mayor alcanzando un valor máximo de 1100 Kbps, el cual hace referencia a todos los streaming enviados a cada uno de los usuarios. El throughput del canal ascendente alcanza un valor promedio de 40 Kbps el cual corresponde a los mensajes de confirmación o ACK's

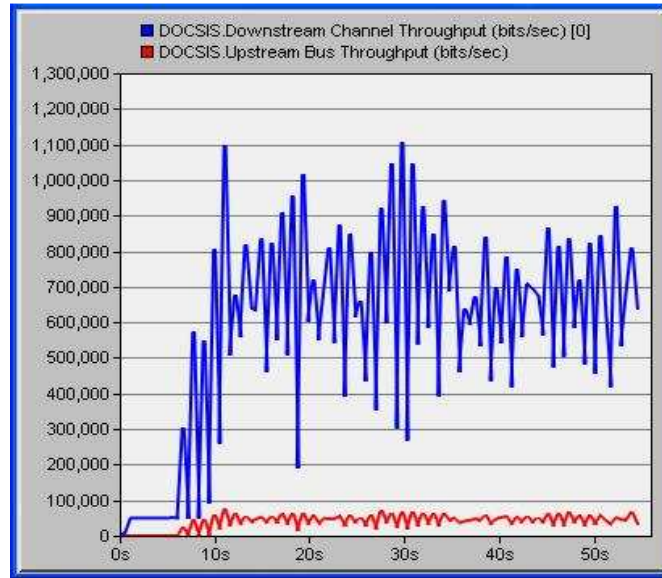


Figura 57. Throughput streaming uno, dos y tres

Como conclusión del análisis de este escenario uno se tiene: el streaming tres el cual presenta las mayores características de codificación (Audio 32 Kbps y Video 1008 Kbps) es el que presenta un mayor throughput y también un mayor retardo, por su parte el streaming uno el cual presenta las menores características de codificación (Audio 32 Kbps y Video 144 Kbps) es el que presenta un menor throughput y también un menor retardo. Lo cual es coherente con un escenario real donde los streaming de mayores calidades de codificación en una misma red, deben generar un mayor throughput y un mayor retardo respecto de un streaming con menores características de codificación.

5.1.2.2 Escenario Dos

Este escenario presenta a través de las Figura 58, Figura 59 y Figura 60 el tráfico, el retardo DOCSIS, el retardo de las aplicaciones de VOD y el throughput de cada uno de los streaming.

En la Figura 58 se observa un comportamiento similar al descrito en el escenario de pruebas uno, donde los streaming de mayor calidad de codificación presentan un mayor número de bits por segundo en cada una de las ráfagas. Así, la curva superior de color azul corresponde al streaming seis, mientras que la curva inferior de color verde corresponde al streaming cuatro.

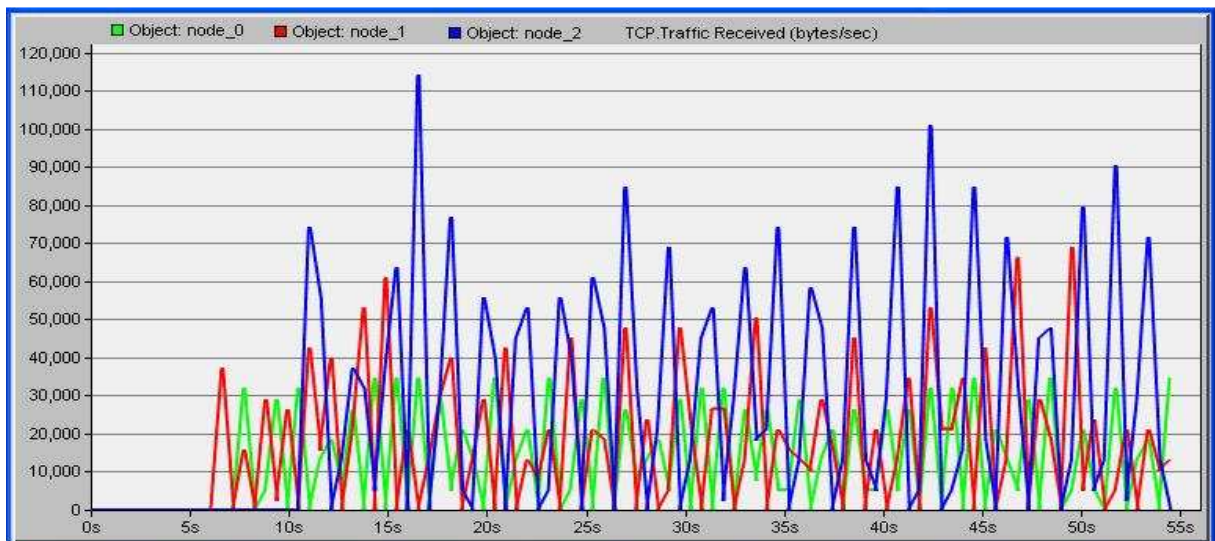


Figura 58. Tráfico de los streaming cuatro, cinco y seis

• Retardo

En la Figura 59.a se observa el Retardo DOCSIS para los streaming cuatro, cinco y seis, que en promedio esta entre 10 y 11 ms. A nivel de la aplicación se tiene el retardo de cada una de los videos cuyo valor mayor se presenta para el streaming seis, como debía corresponder ya que es el video con mayores valores de codificación, ver Figura 59. b. Se observa que la red es capaz de soportar los streaming correspondientes, dentro del límite de 200ms establecido en (ITU-T_G.1010, 2001).

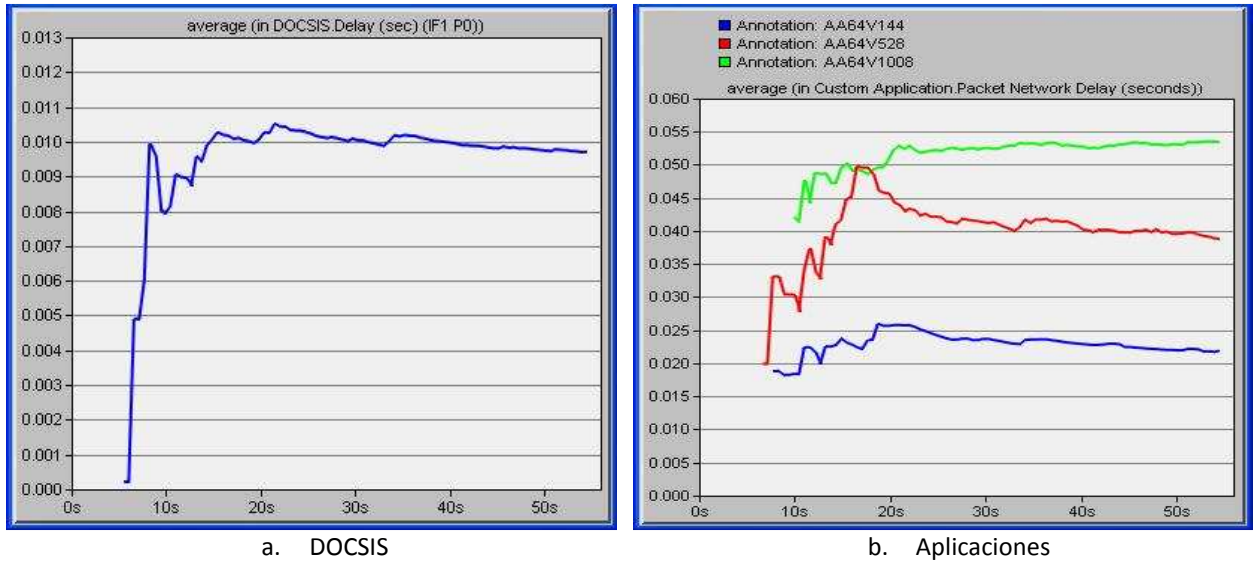


Figura 59. Retardo sobre los streaming cuatro, cinco y seis

• Throughput

En la Figura 60 se observa el throughput para los canales ascendente y descendente, se presenta un comportamiento similar al descrito en el escenario uno, donde la diferencia radica en que los valores alcanzados por el throughput en el canal descendente y ascendente (1365 Kbps y 84 Kbps respectivamente) son mayores respecto al escenario anterior, como debía esperarse, ya que las calidades de codificación de los streaming de este escenario son mayores a las del anterior escenario.

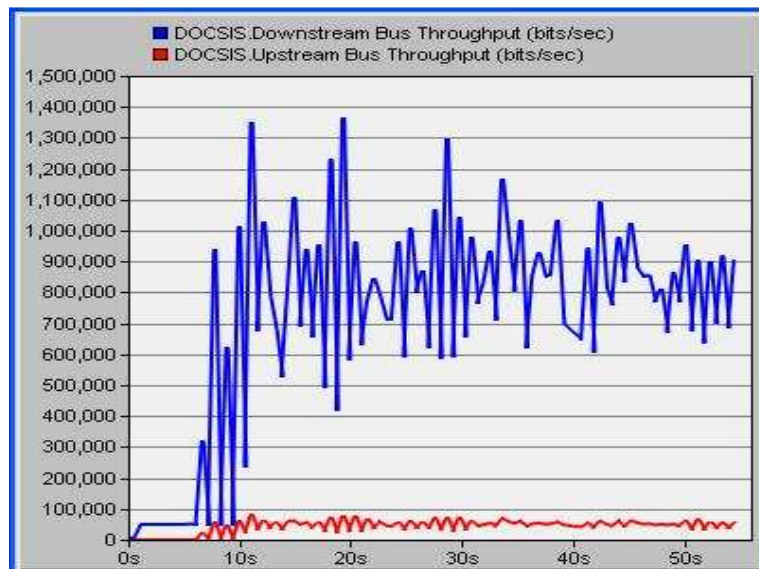


Figura 60. Throughput streaming cuatro, cinco y seis

Como conclusión del análisis de este escenario dos se tiene: el streaming seis el cual presenta las mayores características de codificación (Audio 64 Kbps y Video 1008 Kbps) es el que presenta un mayor throughput y también un mayor retardo, por su parte el streaming uno el cual presenta las menores características de codificación (Audio 64 Kbps y Video 144 Kbps) es el que presenta un menor throughput y también un menor retardo. Lo cual es coherente con un escenario real donde los streaming de mayores calidades de codificación en una misma red, deben generar un mayor throughput y un mayor retardo respecto de un streaming con menores características de codificación.

5.1.2.3 Escenario Tres

Este escenario presenta a través de las Figura 61, Figura 62 y Figura 63 el tráfico, el retardo DOCSIS, el retardo de las aplicaciones de VOD, la razón de pérdidas de paquetes, BER y el throughput de cada uno de los streaming.

- **Retardo**

En la Figura 61.a se observa el Retardo DOCSIS para todos los streaming, se observa que su valor se ha incrementado hasta los 19 ms como consecuencia del mayor número de usuarios respecto a los escenarios uno y dos. A nivel de la aplicación se tiene el retardo de cada una de los videos cuyo mayor valor se presenta para el streaming seis, el cual se ha incrementado en 45 ms respecto al valor presentado en el escenario dos, alcanzando un valor de retardo de 95 ms, ver Figura 61.b. Con estos valores se puede concluir que la red HFC es capaz de soportar los streaming correspondientes, dentro del límite de 200ms establecido en (ITU-T_G.1010, 2001).

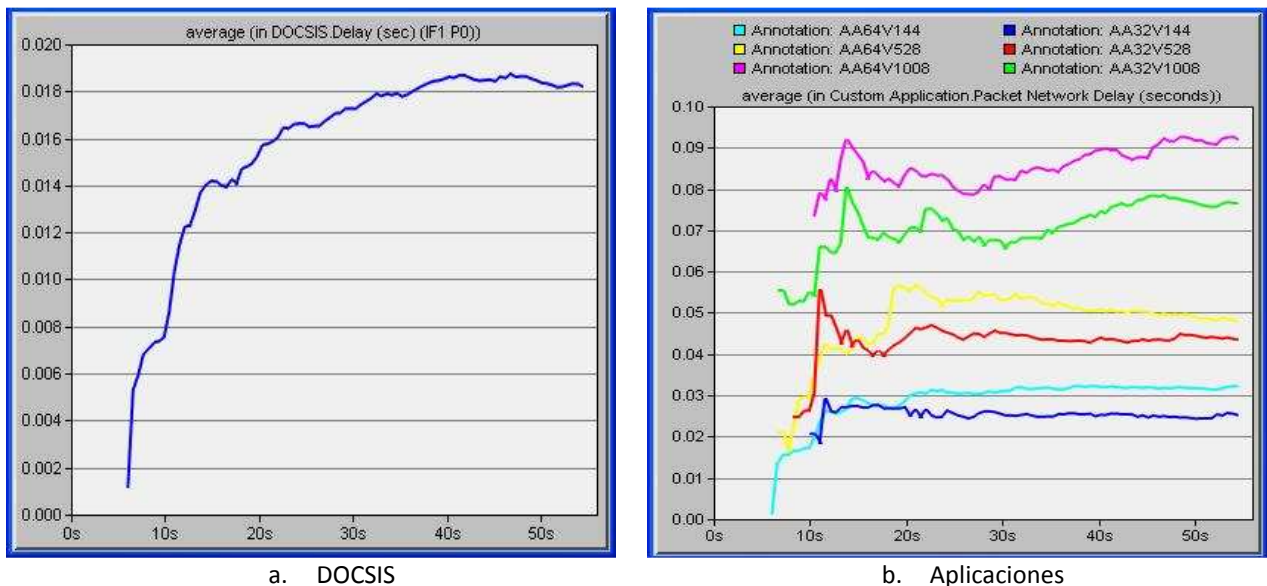
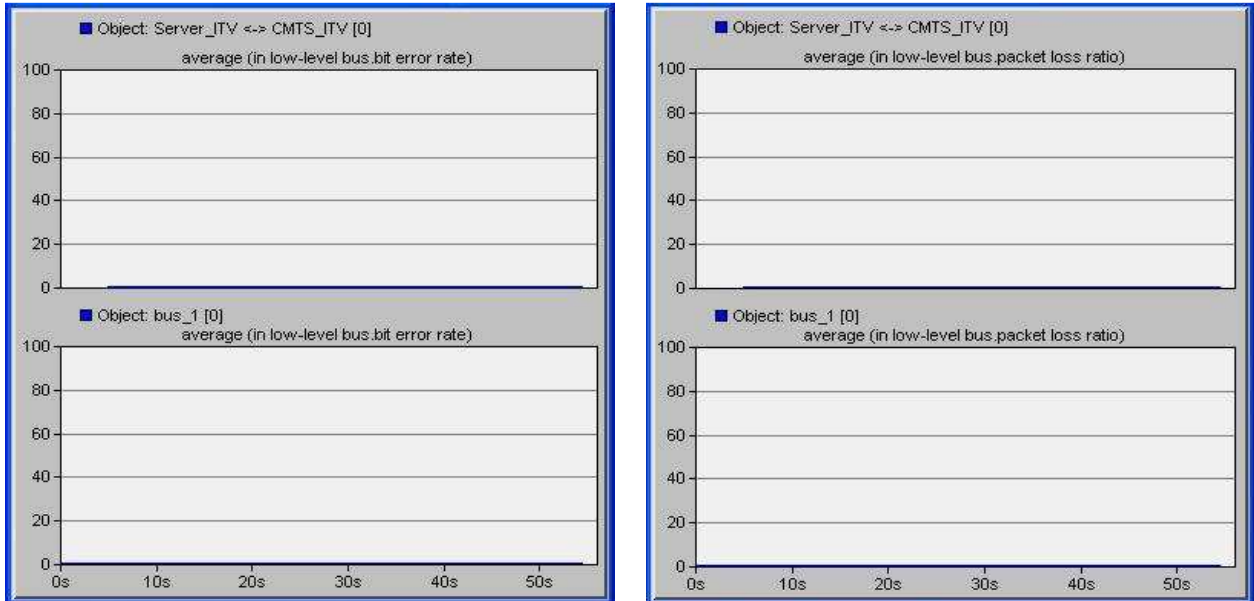


Figura 61. Retardo sobre los streaming uno, dos, tres, cuatro, cinco y seis

- **Razón de pérdidas de paquetes y BER**

Estos parámetros se muestran en este escenario ya que es el de mayor exigencia para la red hasta el momento. En la Figura 62.a y b se observan respectivamente el BER y las razones de pérdidas de paquetes, entre el CMTS_ITV versus el Server_ITV, y sobre el bus_1 el cual corresponde al enlace entre el CMTS_ITV y los CM. La herramienta de simulación reporta valor cero para estos dos parámetros, lo cual corresponde a un comportamiento ideal. Este resultado se obtiene gracias a la configuración de los CM con las características de un STB, a diferencia de los resultados obtenidos en (Taimal & Rueda, 2009) cuyas curvas de BER y razón de pérdidas de paquetes arrojan valores diferentes de cero, ya que los CM no fueron configurados con las características propias de un STB para un sistema de TDi.

Además es necesario resaltar que la herramienta de simulación OPNET Modeler esta efectuando medidas sobre estos parámetros por lo que genera las ventanas mostradas en la Figura 62, si dichos parámetros no fueran medidos por la herramienta esta no generaría ningún reporte.



a. BER b. Razón de pérdida de paquetes

Figura 62. Razón de pérdida de paquetes y BER

- **Throughput**

En la Figura 63 se observa el throughput para los canales ascendente y descendente, se presenta un comportamiento similar al descrito en el escenario uno y dos, donde la diferencia radica en que los valores alcanzados por el throuhgput en el canal descendente y ascendente son mayores respecto de los escenarios anteriores, como debía esperarse, ya que dicho throughput corresponde a seis streaming correspondientes a las aplicaciones de VoD del escenario uno más las del escenario dos. El throughput del canal de bajada alcanza valores máximos de 1700 Kbps, y el throughput del canal de subida alcanza valores máximos de 135 Kbps.

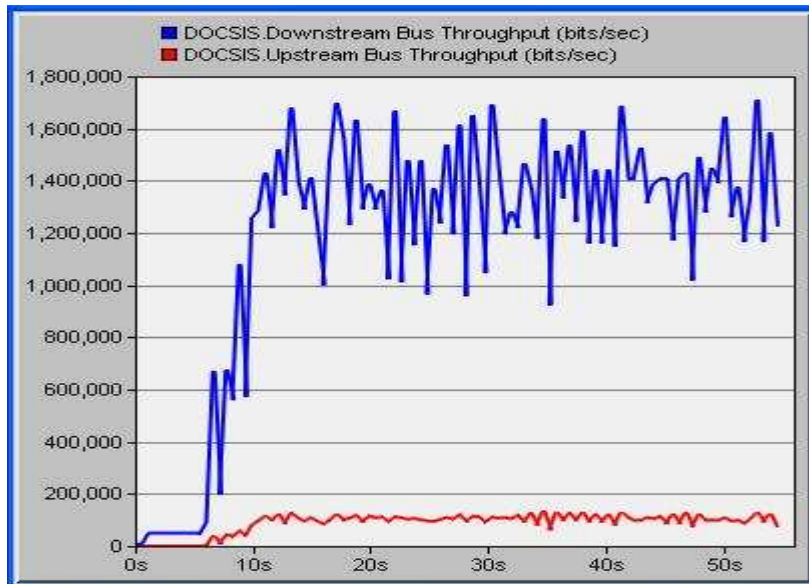


Figura 63. Throughput streaming uno, dos, tres, cuatro, cinco y seis

Como conclusión del análisis de este escenario tres se tiene: el streaming seis el cual presenta las mayores características de codificación (Audio 64 Kbps y Video 1008 Kbps) es el que presenta un mayor throughput y también un mayor retardo, por su parte el streaming uno el cual presenta las menores características de codificación (Audio 32 Kbps y Video 144 Kbps) es el que presenta un menor throughput y también un menor retardo. Lo cual es coherente con un escenario real donde los streaming de mayores calidades de codificación en una misma red, deben generar un mayor throughput y un mayor retardo respecto de un streaming con menores características de codificación. Por su parte la razón de pérdida de paquetes y BER presentan un valor ideal como consecuencia de la configuración de los CMs con las características de un STB.

Los resultados de los escenarios de simulación han presentado un buen comportamiento, se observa como a medida que se aumenta el número de usuario se van incrementando los valores de cada uno de los parámetros como los retardos DOCSIS, el valor del throughput, o el de los streaming correspondiente a las Custom Application.

5.1.2.4 Escenario cuatro

A continuación se presentan diferentes parámetros de tráfico para diferente número de usuarios. En la Figura 64.a y Figura 64.b puede observarse que el tráfico generado por un solo usuario esta alrededor de los 200 Kbps (25000 Bytes/s) en sentido descendente mientras en el sentido ascendente se encuentra alrededor de los 12 Kbps (1500 Bytes/s), estos valores son totalmente coherentes si se comparan con los obtenidos durante la validación del modelo en el capítulo 4 y las capturas de tráfico real mostradas en el capítulo 3.

En tanto que para 14 usuarios se tienen valores pico de 2.5 Mbps en el canal descendente y valores pico alrededor de los 92 Kbps en el canal descendente. Este tráfico se incrementa en la red HFC debido al funcionamiento propio del protocolo DOCSIS, a las técnicas de corrección y detección de errores FEC, el cual sumado al tráfico de los streaming constituyendo el throughput de la red. De esta forma, para 14 usuarios el throughput del canal descendente toma valores un poco mayores respecto del tráfico de los streaming, ver Figura 65.a, mientras que para el canal ascendente las diferencias son más notorias alcanzando valores de 200 Kbps Figura 65.b

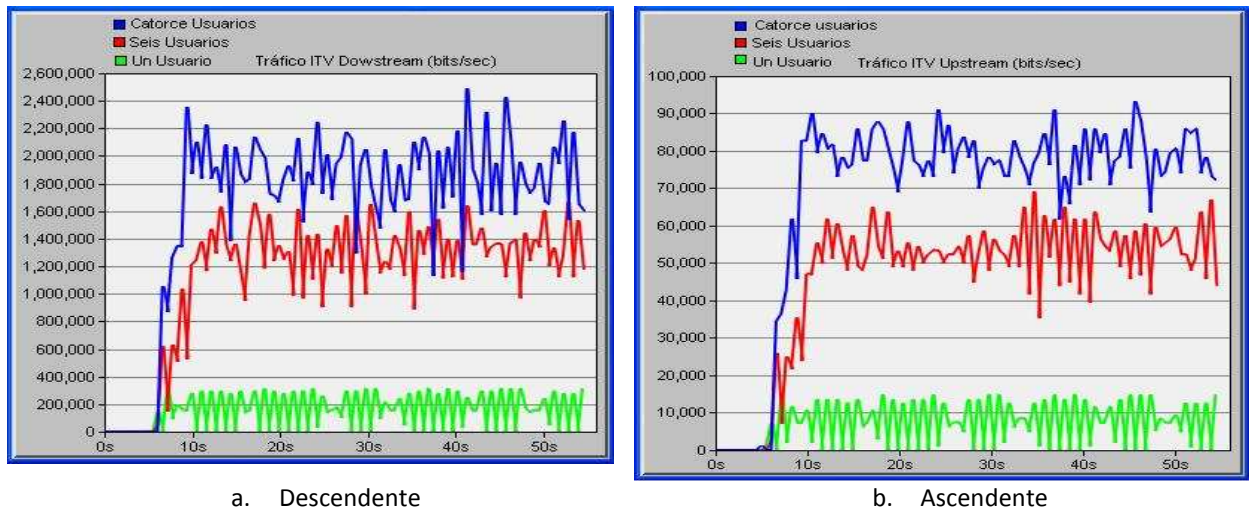


Figura 64. Tráfico Custom Application

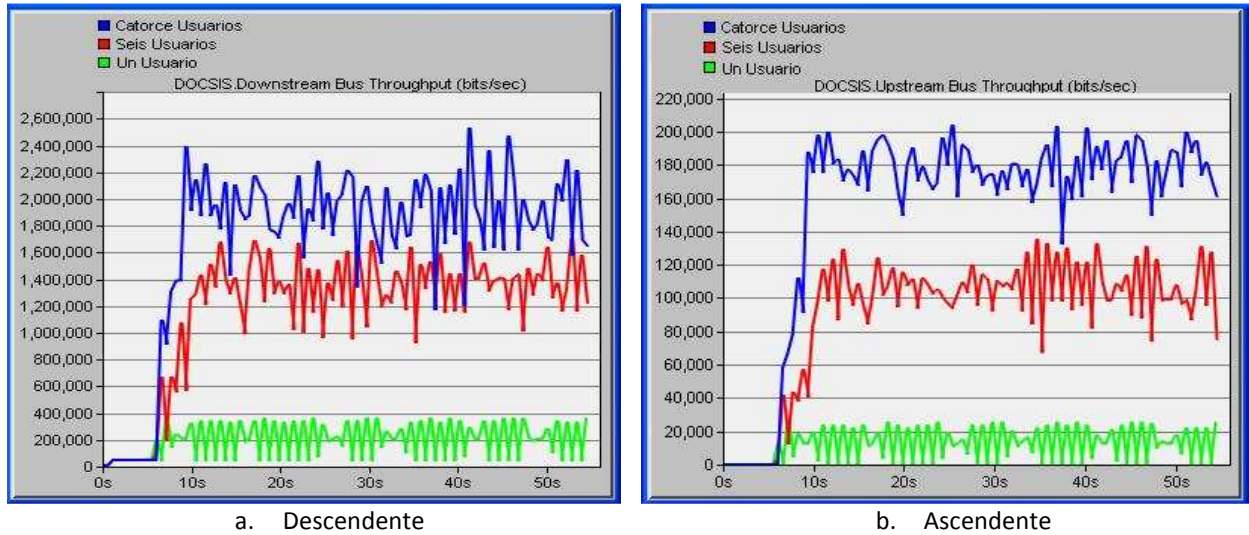


Figura 65. Throughput para catorce usuarios

Los Retardos DOCSIS en promedio no son muy elevados, así, para 14 usuarios se obtuvo el máximo retardo DOCSIS que en promedio fue de 50 ms, ver Figura 66.a. A nivel de los streaming el retardo representa el tiempo que tardan en llegar a su destino los paquetes de las Custom Application de VoD, que como puede observarse en la Figura 66.b en promedio llegó a 180 ms manteniéndose dentro del límite de 200 ms establecido en (ITU-T_G.1010, 2001).

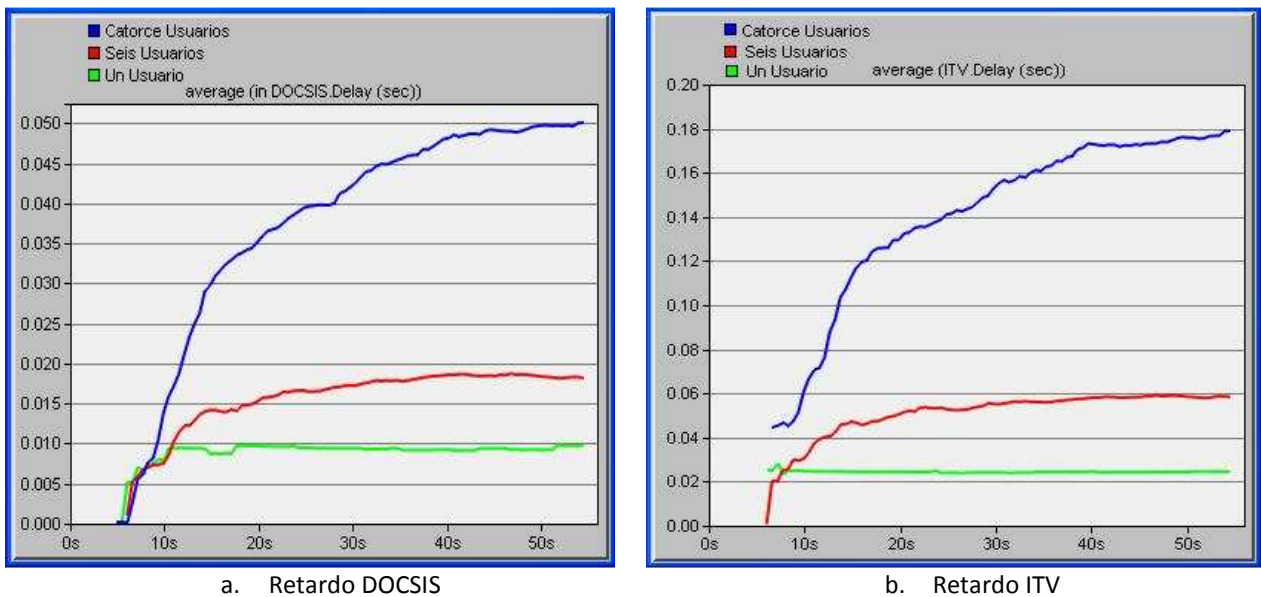


Figura 66. Retardo para catorce usuarios

Con un retardo de 180 ms los escenarios de prueba se están acercando al límite máximo permitido de los 200 ms, por lo que se pueden seguir aumentando el número de usuarios hasta encontrar un número de usuarios que desborden el límite de retardo máximo de 200 ms, sin embargo esto dependerá de las características de codificación de las aplicaciones.

Como conclusión de este apartado se muestra como una red HFC es capaz de soportar de manera simultánea catorce usuarios con diferentes calidades de codificación (correspondientes a los parámetros de tráfico real de los streaming modelados matemáticamente), el proceso se muestra de manera secuencial iniciando con un usuario, tres usuarios, seis usuarios y finalmente catorce usuarios, este proceso permite ver reflejado los incrementos de los parámetros de desempeño de la red como el retardo a nivel DOCSIS y a nivel de la aplicaciones. Con el escenario cuatro se alcanza un tiempo de retardo cercano a los límites permitidos para la TDi.

Así, en el siguiente punto se va a analizar la red HFC teniendo en cuenta las aplicaciones EDiTV y de VoD que permite evaluar las características de la red HFC tanto del canal ascendente como en el canal descendente y como impacta el uno sobre el otro, además se evalúan los efectos que causa la variación de los parámetros DOCSIS sobre el tráfico de la red HFC.

5.2 Medidas de tráfico para las aplicaciones de EDiTV en conjunto con VoD

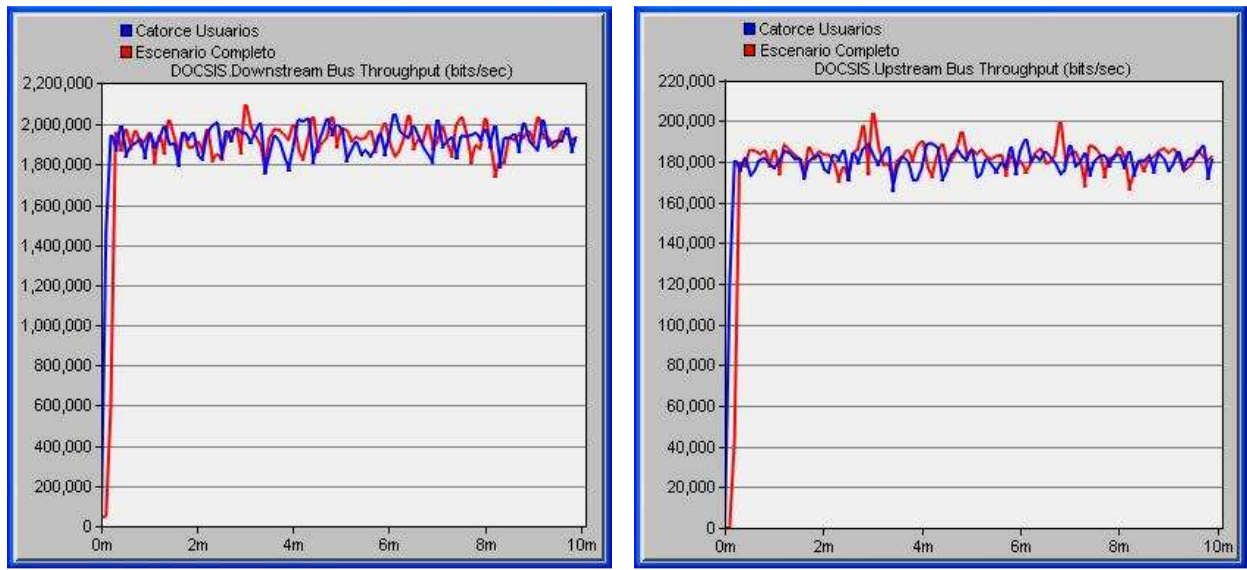
Mediante los siguientes escenarios se mostrara un análisis completo de la red HFC ya que se involucran los dos canales con tráfico de usuarios de manera simultánea. Se genera el modelo de simulación de tráfico de la red tanto para el canal ascendente como descendente a partir de los modelos matemáticos obtenidos previamente en el capítulo 3, como resultado de la caracterización del tráfico real capturado en los laboratorios de EDiTV de la Universidad del Cauca e ITV de la Universidad de Oviedo.

Este análisis brinda un escenario completo de la red HFC sin la necesidad de recurrir a tráfico de background o a la suposición de tráfico para cualquiera de los dos canales de la red HFC, además de que el tráfico real procede de las aplicaciones EDiTV previamente diseñadas y construidas y de las aplicaciones de streaming previamente montadas y ejecutadas sobre los respectivos laboratorios.

5.2.1 Escenario completo

En este apartado también se mostraran algunos resultados arrojados por la herramienta de simulación para el escenario cuatro del apartado anterior, que permita observar las diferencias, entre los escenarios.

Con el objeto de tener medidas de tráfico como punto de referencia ante las los efectos que causa la variación de los parámetros DOCSIS sobre el tráfico de la red HFC, a continuación se presentan las gráficas correspondientes al throughput ver Figura 667 y el retardo ver Figura 68 tanto para el escenario completo como para el escenario cuatro del apartado anterior teniendo como parámetros de configuración los mostrados en la Tabla 13.



a. Descendente
b. Ascendente
Figura 67. Throughput escenario completo

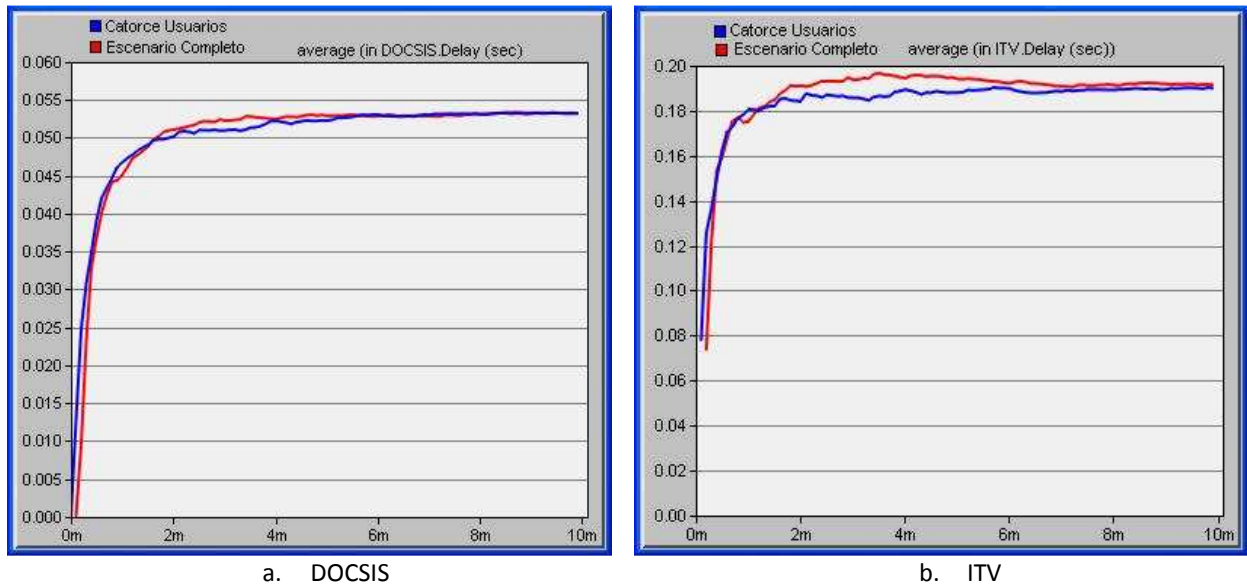


Figura 68. Retardo escenario completo

No se muestran gráficas de razón de pérdida de paquetes ya que la herramienta arroja un valor igual a cero, el mismo que el de la Figura 62.

5.2.2 Efectos de la variación del tiempo entre MAP sobre la transmisión de aplicaciones de TDi

El tiempo entre mensajes MAP tiene mucha relevancia en la configuración del protocolo DOCSIS ya que los mensajes MAP son enviados por el CMTS a 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 (García R. , 2005).

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, 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 (García R. , 2005).

Para determinar los efectos que tiene la variación del tiempo entre MAP sobre las aplicaciones de TDi, se realizaron simulaciones de diferentes escenarios con la configuración del protocolo DOCSIS de la Tabla 13. La comparación se realizó para 5ms, 10ms, 20ms y 50ms de tiempo entre MAP. En las Figuras 73, 74 y 75 el escenario completo ha sido configurado con un tiempo entre MAP de 10 ms.

Para el tiempo entre MAP de 5 ms, la herramienta genera errores y hace que las aplicaciones aborten ver Figura 69, es por esta razón que la curva del throughput en la Figura 70 para este valor de MAP no sigue el mismo comportamiento que para los otros valores de tiempos entre MAP. En la Figura 70 se muestra el efecto de la variación del tiempo entre MAP sobre el throughput de la red. Como se puede observar, a medida que el tiempo entre MAP disminuye el throughput del canal descendente (ver Figura 70.a) 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.

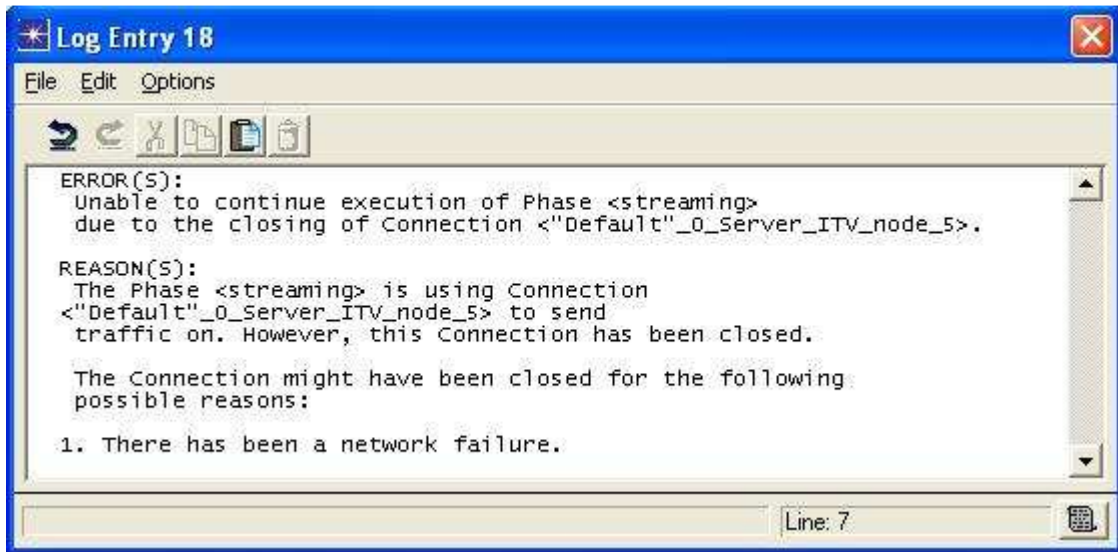


Figura 69. Log para tiempo entre MAP de 5 ms

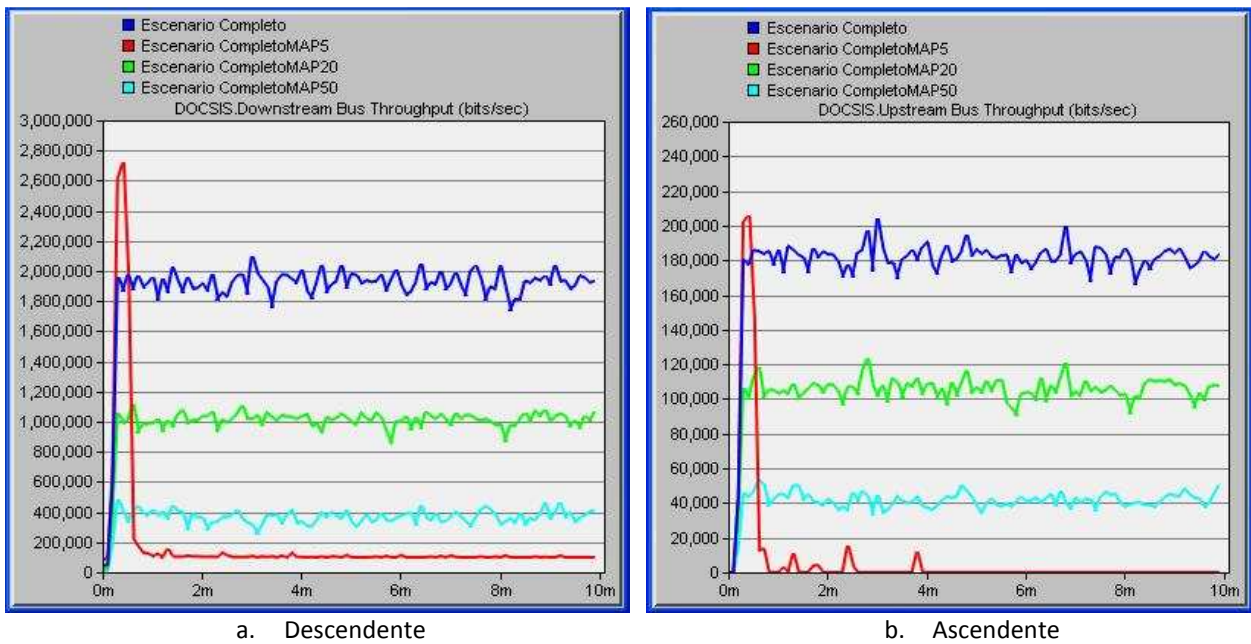


Figura 70. Throughput para diferentes tiempos entre MAP

Por ejemplo, para la configuración de la simulación en la que se establece que un mensaje MAP se envía cada 50 ms, se tendrían 20 MAP/sec. Como el mensaje MAP tiene una longitud de 64 bytes, el ancho de banda consumido por este tipo de mensajes sería de 10,24 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 10.24 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. En la Figura 70.b, puede observarse que a medida que aumenta el tiempo entre MAP el tráfico ascendente es más pequeño, debido a que las estaciones tienen

escasas oportunidades de transmisión. La variación del tiempo entre mensajes MAP sobre el retardo se muestran en la Figura 71.

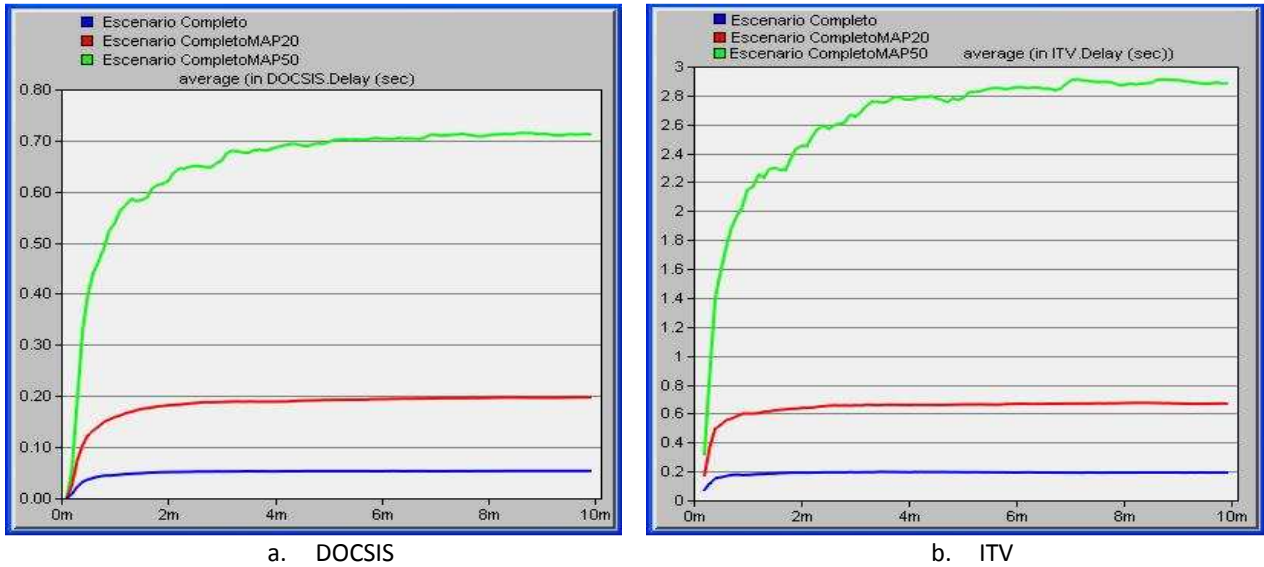


Figura 71. Retardo para diferentes tiempos entre MAP

Nótese como a medida que el tiempo entre MAP aumenta el retardo DOCSIS y de las aplicaciones 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 700 ms como se muestra en la Figura 71.a y el retardo de las aplicaciones TDi en promedio 2,9 ms según la Figura 71.b

Debido a que existe una gran diferencia de escala en los resultados que arroja la herramienta para la configuración de tiempo entre MAP de 5 ms, los resultados para este escenario de pruebas se presentan en la Figura 72. Los valores de los retardos son demasiados elevados como se aprecia en la Figura 72, para ser tenido en cuenta como posible valor de configuración para el parámetro tiempo entre MAP.

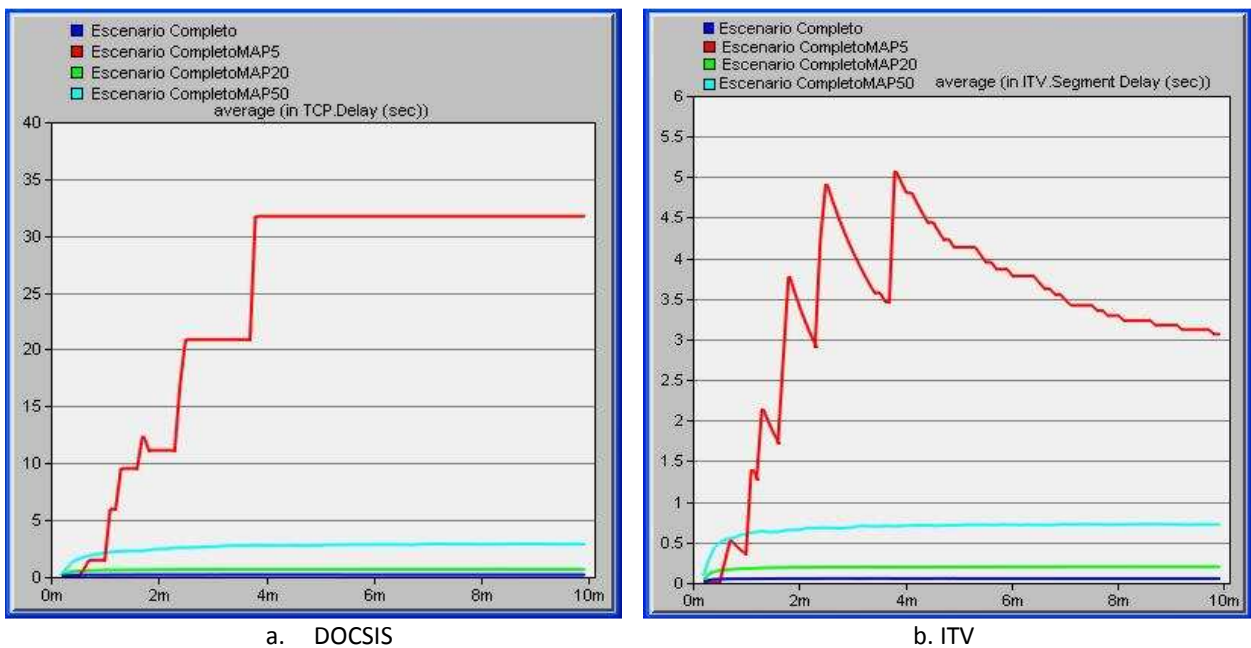


Figura 72. Retardo para tiempos entre MAP de 5 ms

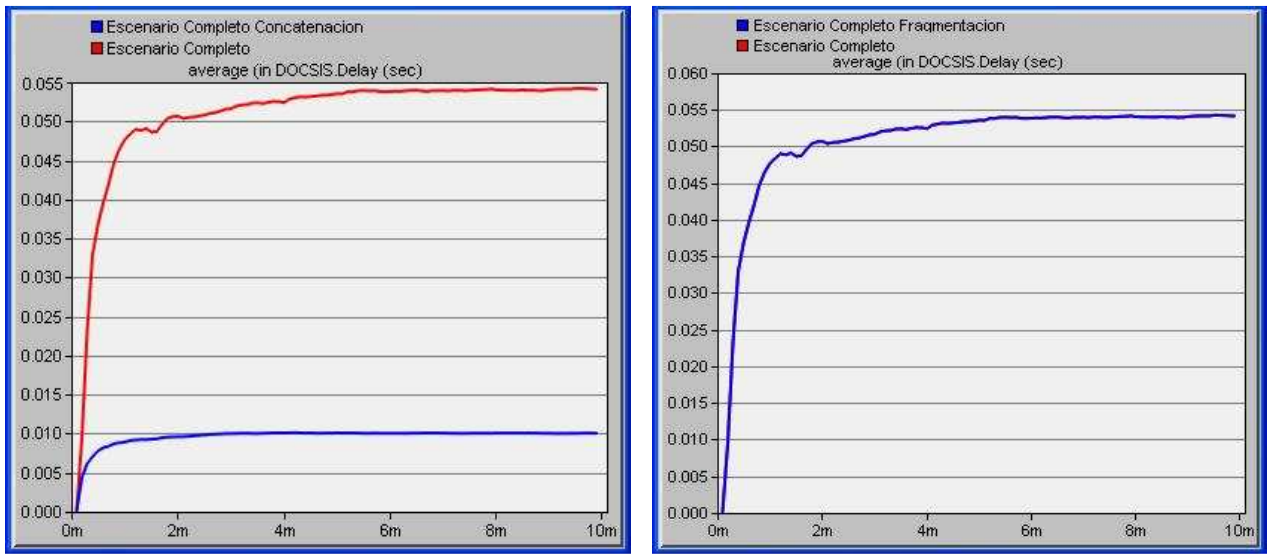
Así, teniendo en cuenta el análisis realizado sobre los resultados arrojados en cuanto al comportamiento del throughput y de los retardos, se observa que el mejor valor de configuración para el parámetro de tiempo entre mensajes MAPs es de 10 ms. Valor con el cual serán configurados los siguientes escenarios de prueba.

5.2.3 Efectos de Concatenación y Fragmentación para el retardo sobre la red HFC

Dentro de las posibilidades de configuración de características de QoS que ofrece DOCSIS 1.1, se encuentran el mecanismo de reserva de ancho de banda (Bandwidth Request) en DOCSIS denominado concatenación, que permite a los CM enviar más de un paquete en cada concesión de ancho de banda obtenido, con lo que todos los ACK concatenados mantendrán un espaciado entre ellos mucho menor. Además, y según (Shah, Kouvatsos, Martin, & Moser, 2005) la cabecera Concatenation MAC Header impide el uso del campo Extended Header y por tanto impide que se realicen peticiones de este tipo cuando el frame actual ha sido concatenado. También se encuentra el mecanismo de fragmentación, el cual en la capa dos previene que paquetes de datos de gran tamaño afecten negativamente el tráfico en tiempo real.

En la Figura 73.a se observa que la concatenación genera mejoras en el retardo DOCSIS, disminuyendo 5 veces su valor pasando de un retardo sin concatenación de 55 ms (correspondiente a la curva escenario completo) a un valor de 10 ms en promedio. En tanto que la fragmentación no genera efectos sobre el retardo DOCSIS, y las curvas con fragmentación habilitada y deshabilitada se traslapan, ver Figura 73.b.

Caso contrario ocurre con el retardo sobre las aplicaciones TDi ver Figura 74.a, donde se observa que la concatenación afecta a las aplicaciones incrementando el retardo de los paquetes. En tanto que la fragmentación no genera efectos sobre el retardo de las aplicaciones, ver Figura 74.b.



a. Con y sin concatenación

b. Con y sin Fragmentación

Figura 73. Retardo DOCSIS con/sin, concatenación y fragmentación

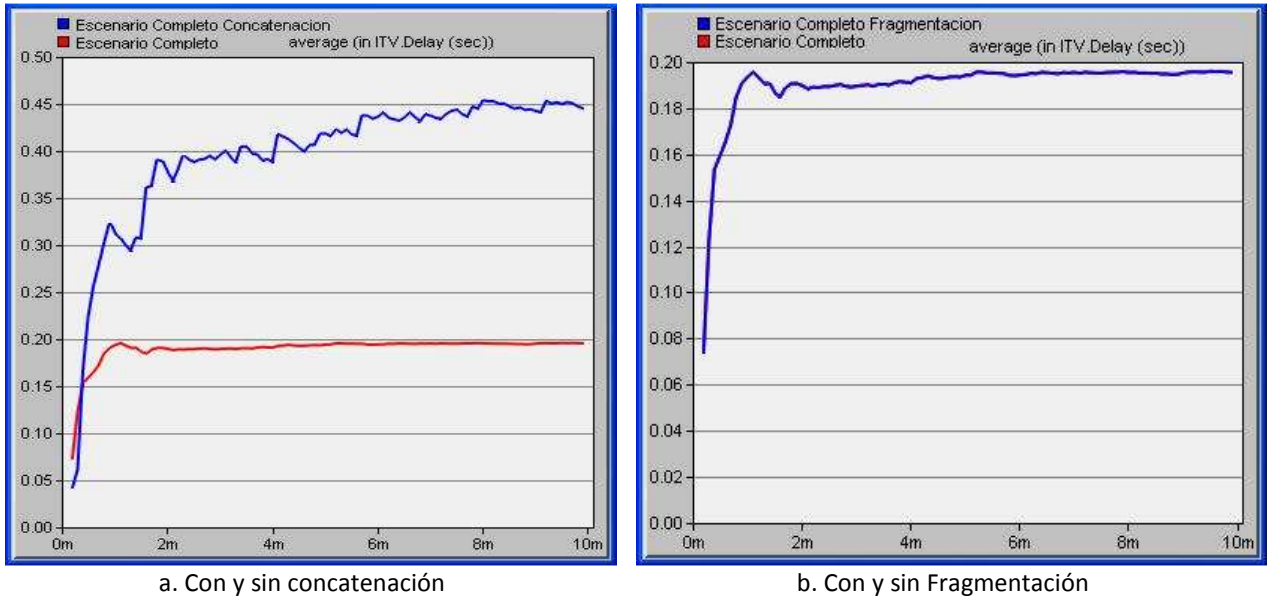


Figura 74. Retardo TDi con/sin concatenación y fragmentación

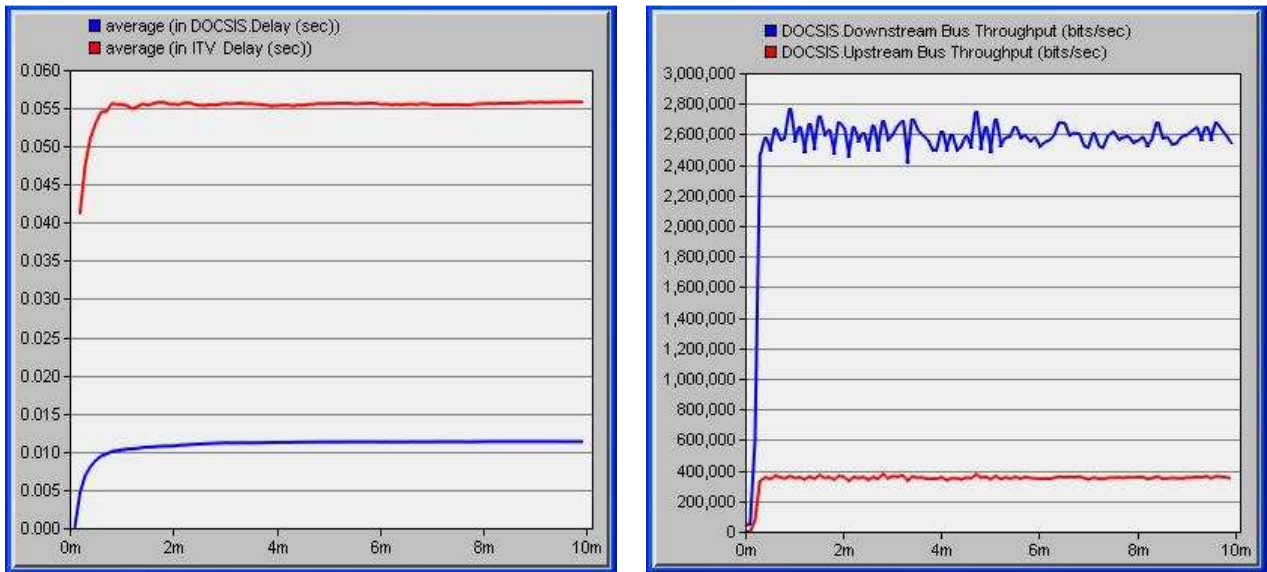
Respecto al throughput se genera una disminución tanto en el canal ascendente como descendente sin embargo estos resultados respecto al throughput no son concluyentes ya que se generan errores de conexión sobre algunos nodos.

Como Corolario se tiene que para los escenarios simulados con diferentes combinaciones entre fragmentación y concatenación, la fragmentación no genera efectos sobre el comportamiento de la red, en tanto que la concatenación genera una disminución en el retardo DOCSIS lo cual es positivo ya que 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 reflejándose en la disminución en el retardo promedio DOCSIS, sin embargo se debe recordar que el Retardo DOCSIS 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. Así esta medida no tiene en cuenta los tiempos de procesamiento necesarios para el proceso de concatenación, solo su efecto. Mientras que el retardo de las aplicaciones si considera todo el proceso que se necesita para ejecutar la concatenación, el cual para los escenarios de prueba a resultado mayor que el retardo sin habilitar dicha parámetro (ver curvas del escenario completo).

5.2.4 Efectos del Piggybacking sobre la red HFC

La Figura 75.a se corroboran los resultados que se muestran en (Chatterjee, 1999), se observa como el parámetro de Piggybacking mejora considerablemente el Retardo DOCSIS pasando de un valor promedio de 55 ms como se aprecia en la Figura 68.a , a un valor de 12 ms como se precia en la Figura 75.a. A nivel de las aplicaciones TDi también existen mejoras considerables pasando de un valor de 190 ms como se aprecia en la Figura 68.b, a un valor de 55 ms como se aprecia en la Figura 75.a.

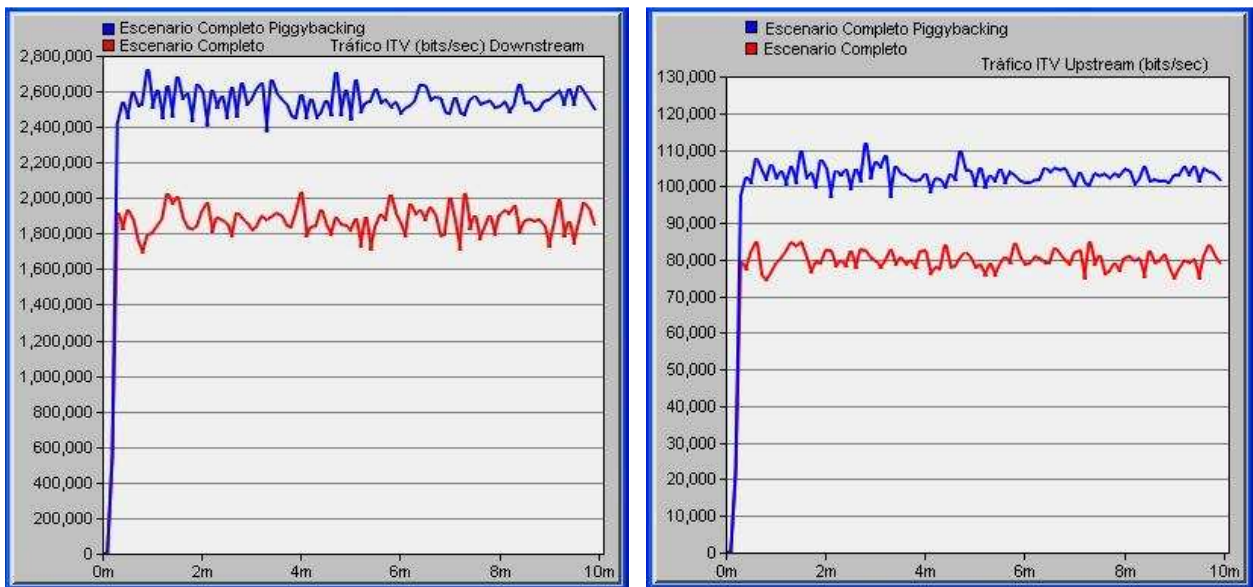
Respecto al throughput el parámetro de QoS también genera variaciones, así para el canal ascendente hay un incremento del throughput de los 190 Kbps como se aprecia en la Figura 67.b a un valor de casi 400Kbps como se puede observar en la Figura 75.b. en el canal descendente el incremento del valor del throughput es de aproximadamente 600 Kbps al incrementarse el valor desde los 2 Mbps como se puede apreciar en la Figura 67.a a un valor de 2,6 Mbps como se puede observar en la Figura 75.b.



a. Retardo DOCSIS e ITV b. Throughput DOCSIS

Figura 75. Efectos del Piggybacking

A diferencia de la concatenación la característica de QoS de piggybacking muestra mejoras en cuanto al throughput, en la Figura 76 se observa el tráfico de las aplicaciones comparando los dos escenarios habilitado y deshabilitando (escenario completo) el parámetro de piggybacking. En el canal descendente hay un incremento de 600 Kbps aproximadamente, ver Figura 76.a. En el canal ascendente hay un incremento de aproximadamente 20 Kbps, ver Figura 76.b.



a. Canal Descendente b. Canal Ascendente

Figura 76. Tráfico ITV con Piggybacking

A continuación se muestran gráficas del comportamiento del escenario completo teniendo en cuenta los parámetros de QoS Piggybacking Versus concatenación

5.2.4.1 Piggybacking versus Concatenación

En la Figura 77.a se observa que la curva del Retardo DOCSIS presenta un mejor comportamiento con la concatenación habilitada respecto al parámetro piggybacking, sin embargo las diferencias son mínimas ya que dicha diferencia corresponden solo a 1 ms. Respecto al Retardo sobre las aplicaciones el comportamiento es

Debido a la naturaleza asimétrica de las aplicaciones de TDi, la asimetría de la red HFC se maximiza haciendo que los mensajes de confirmación se acumulen en la cola de la transmisión del CM y que éste solicite un data grant para varios de estos ACKs al mismo tiempo (concatenación). Ya que será esta la opción que el CM tiende a seleccionar, su posibilidad de cursar solicitudes por medio de piggybacking serán escasas. Estos conceptos se ven reflejados en la Figura 78 y Figura 79 donde se muestra que quien domina el comportamiento de la red es la concatenación. Sin embargo como conclusión se tiene que para las aplicaciones TDi objeto de estudio el mejor comportamiento se ha presentado mediante el parámetro de piggybacking habilitado y concatenación deshabilitada.

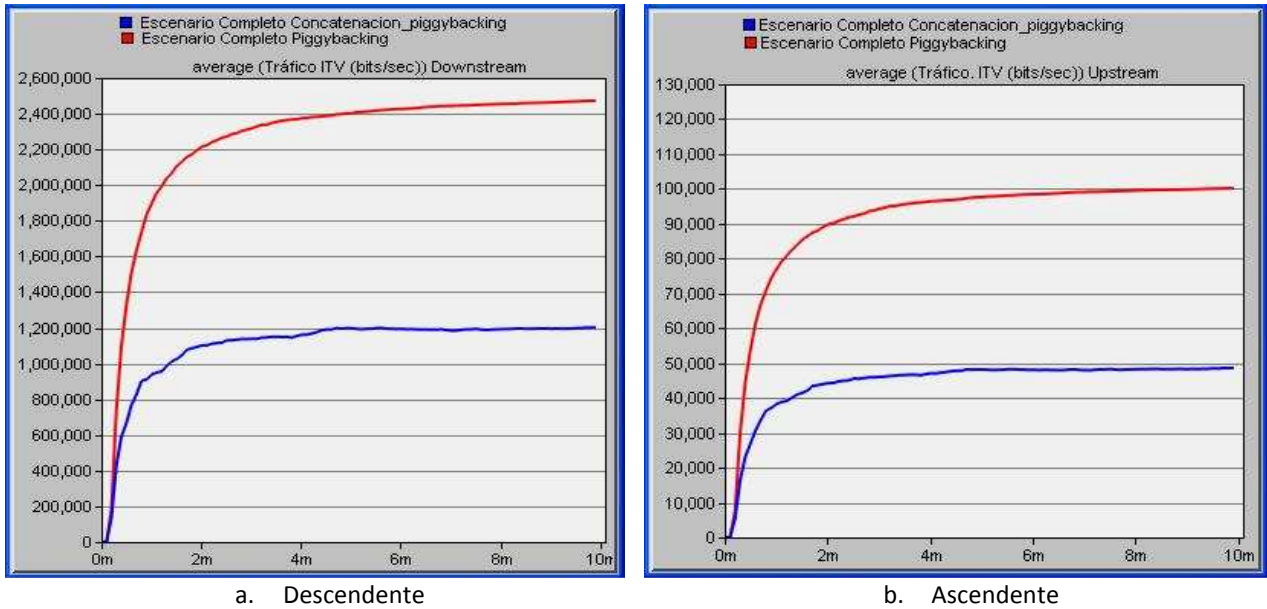


Figura 79. Tráfico TDi con Piggibacking y concatenación habilitados

5.3 Desempeño de la red HFC en presencia de otras aplicaciones

En (Taimal & Rueda, 2009) cuyo trabajo cuenta con la asesoría directa del autor de esta investigación, se presenta el análisis de asignación de flujos de servicio a las aplicaciones de TDi. En este apartado se estudiara los efectos que la asignación de dichos flujos generan sobre el escenario que se ha denominado completo, teniendo en cuenta su mejor comportamiento, esto es habilitando el parámetro de piggybacking, deshabilitando la concatenación, fragmentación habilitada y tiempo entre MAP de 10 ms, 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.

Los perfiles de usuario configurados en la herramienta de simulación para los servicios HTTP, FTP y VoIP se observan en la Tabla 14 (Taimal & Rueda, 2009). El flujo de servicio para los usuarios TDi, HTTP y FTP fue Best Effort (BE) mientras que para los usuarios VoIP el flujo de servicio fue UGS con Grant Size = 256 bytes y Nominal Grant Interval = 10ms. En el apartado 5.1 de (Taimal & Rueda, 2009) se encuentran más detalles respecto a las consideraciones generales para esta configuración.

Servicio	Parámetro	Valor
http	Tiempo entre arribo de páginas	Exponencial (10)
	Tamaño del objeto 1	1000 bytes
	Tamaño del objeto 2	Large Image
	Tipo de servicio (ToS)	Best Effort(0)
FTP	Command Mix (Get/Total)	75%
	Tiempo entre solicitudes	20 s
	Tamaño del archive	50000 bytes

	Tipo de servicio (ToS)	Best Effort(0)
VoIP	Esquema de codificación	G 711 (silence)
	Tipo de servicio (ToS)	Interactive voice (6)

Tabla 14. Perfiles de usuario para los servicios HTTP, FTP y VoIP

El número de usuarios TDi fue 14, 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.

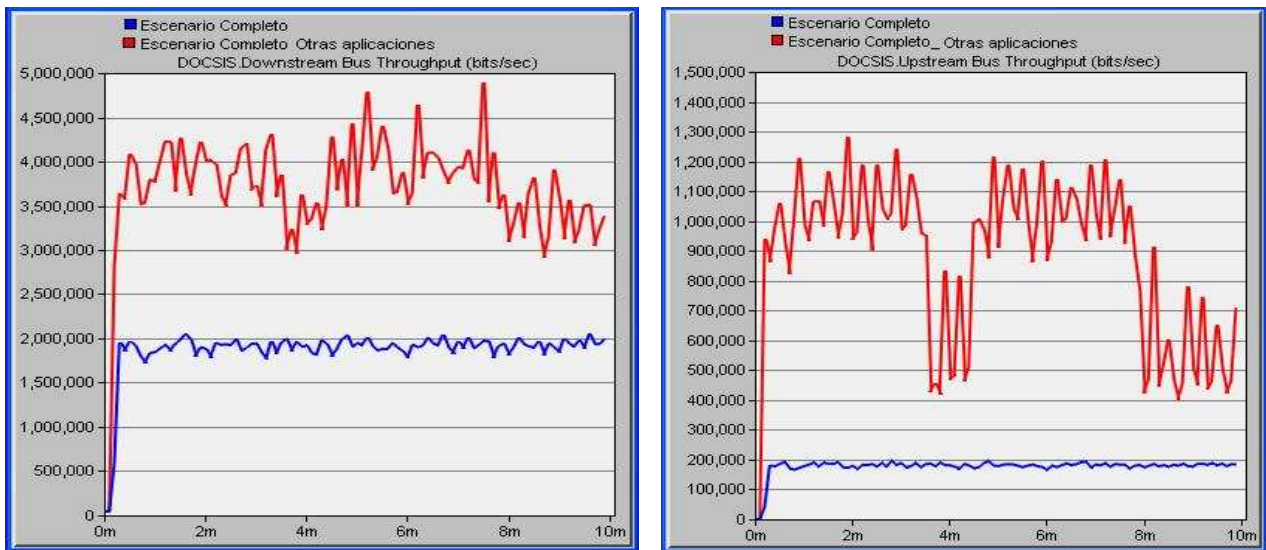
5.3.1 Asignación de otras Aplicaciones al escenario Completo

Inicialmente el escenario denominado completo se configuro con las mejores características encontradas hasta este punto, posteriormente se agregaron otras aplicaciones para evaluar su comportamiento. Los parámetros de configuración para cada servicio se presentan en la Tabla 15

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

Tabla 15. Parámetros DOCSIS para la simulación de tráfico TDi, HTTP, FTP y VoIP

En la Figura 80 se observa el throughput en el canal descendente y ascendente, donde las curvas en color rojo como es lógico corresponden al escenario que incluye las otras aplicaciones. Teniendo en cuenta esta gran cantidad de tráfico, se muestra como influye sobre el retardo de las aplicaciones de TDi en la Figura 81, aumentándose casi en 20 ms (curva verde respecto a la curva azul) .



a. Descendente

b. Ascendente

Figura 80. Throughput con otras aplicaciones agregadas

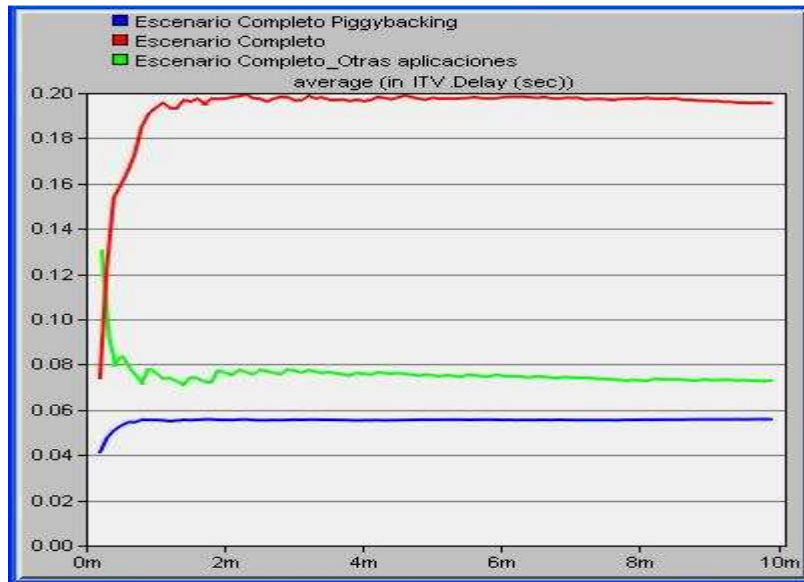


Figura 81. Retardo TDi con otras aplicaciones agregadas

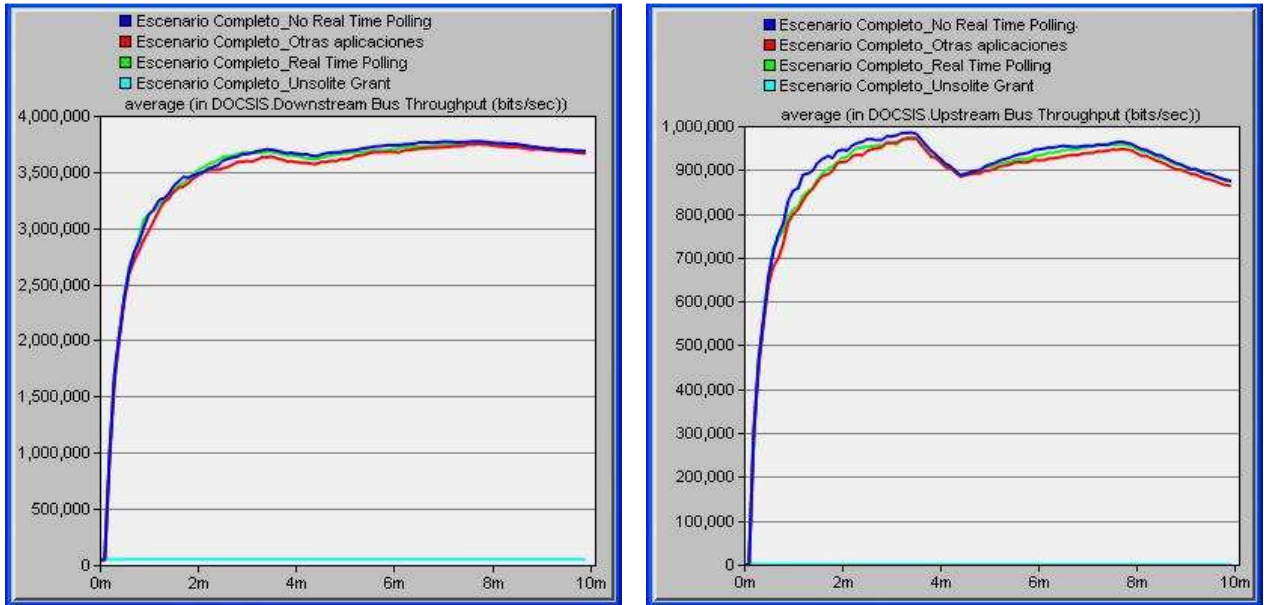
5.3.2 Asignación de flujos de servicio a las Aplicaciones de TDi

En la Figura 82 se muestra los resultados en el retardo TDi cuando se varía la configuración de flujo de servicio en las aplicaciones de EDiTV. La gráfica de la configuración BE 7 corresponde a la configuración del protocolo (escenario completo_otras aplicaciones), en realidad no se muestran diferencias significativas en los resultados arrojados en la simulación, a excepción del escenario configurado bajo UGS, el cual no presenta curva, ya que en ningún momento se estableció la conexión.



Figura 82. Efectos de la variación de los flujos de servicio sobre el retardo TDi

En la Figura 83, se observa que los diferentes flujos de servicio de QoS no impactan de una manera determinante sobre el throughput de la red, a excepción del flujo de servicio UGS cuyo escenario impide se establezca la conexión.



a. Descendente
 b. Ascendente
 Figura 83. Efectos de la variación de los flujos de servicio sobre el throughput

En las gráficas siguientes se muestra las variaciones que se presentan sobre los servicios de FTP y HTTP ante las diferentes configuraciones de los flujos de servicios.

- **Efectos de los flujos de servicio de QoS sobre HTTP**

Los retardos de los servicios BE con HTTP no se ven afectados con la configuración de flujo de servicio rtPS, nrtPS o UGS en las aplicaciones EDiTV, ver Figura 84.a. Gracias a que los CM tienen habilitado el acceso por piggybacking, minimizando el número de peticiones que se realizan por medio del mecanismo de contienda, donde los CM adjuntan una nueva reserva de ancho de banda durante el período de concesión dentro de una región de datos y, dado que esta zona ya ha sido concedida al CM estas peticiones estarán libres de colisiones. Dependiendo de las necesidades de los administradores de red esta característica podría ser aprovechada como una ventaja ante la configuración de accesos de los CM por concatenación.

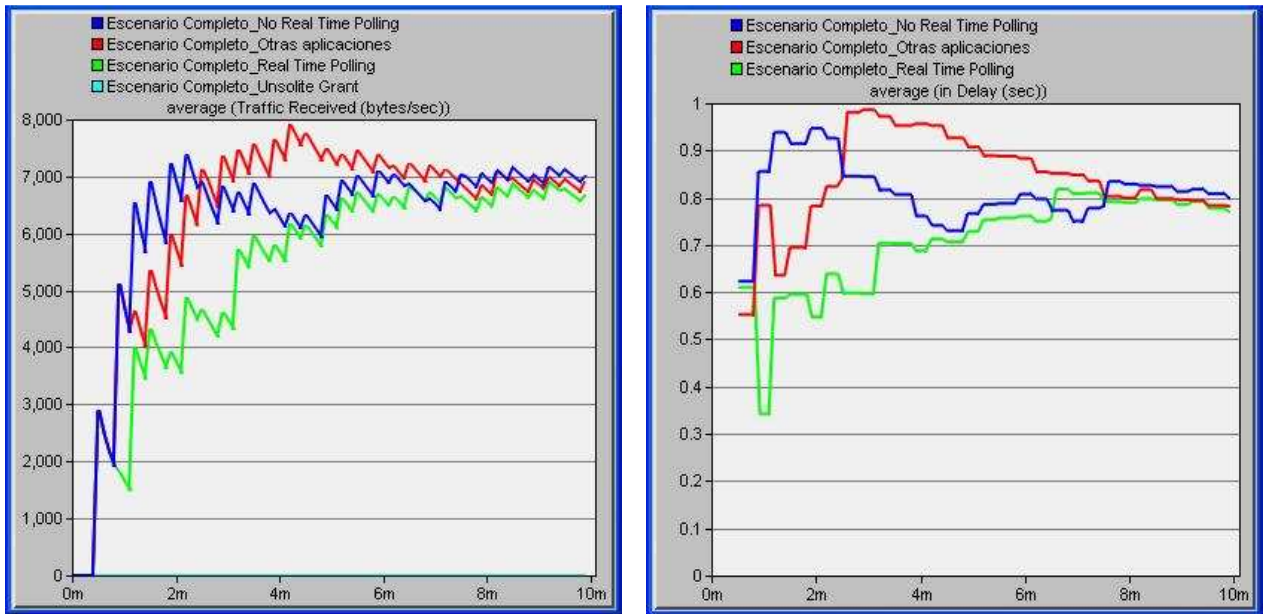


a. Retardo
 b. Tráfico
 Figura 84. Efectos de la variación de los flujos de servicio sobre http

Respecto al tráfico sobre el servidor HTTP existen algunas diferencias entre los diferentes flujos de servicios presentando un mayor valor promedio el tráfico mediante el flujo de servicio nrtPS y el menor valor promedio mediante el flujo de servicio rtPS, ver Figura 84.b, ya que nrtPS esta pensado para tráfico que no es en tiempo real y que requiere concesiones de datos de tamaño variable de forma regular como pueden ser el tráfico generado por HTTP. Mientras que rtPS esta diseñado para proporcionar servicio en tiempo real.

- **Efectos de los flujos de servicio de QoS sobre FTP**

La Figura 85 muestra como se afecta el servicio de FTP ante los diferentes flujos de servicio, donde el menor valor del tráfico promedio sobre el servidor FTP se da para rtPS, ver Figura 85.a, como es de esperarse ya que el objetivo de rtPS no se ajusta a las características de servicio de FTP como se explico anteriormente para HTTP, mientras que el retardo a nivel de aplicación FTP se corresponde de manera directamente proporcional a las características del tráfico FTP, ver La Figura 85.b, esto es, la curva que presenta el menor retardo corresponde al flujo de servicio rtPS puesto que es la de menor tráfico sobre el servidor FTP.

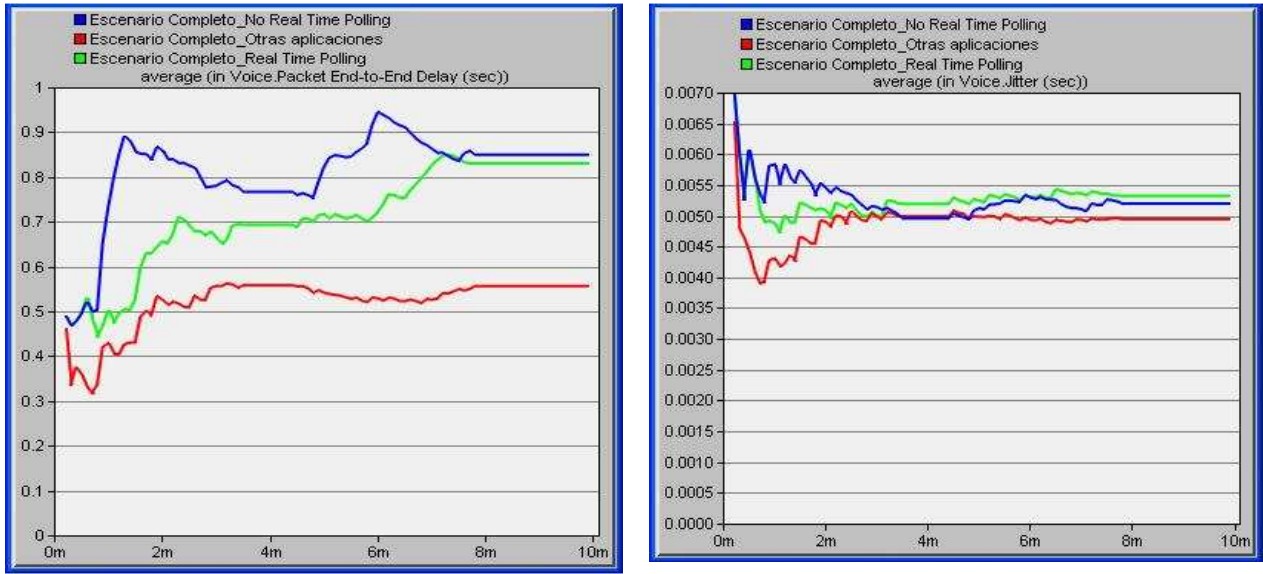


a. Tráfico FTP
 b. Retardo FTP
 Figura 85. Efectos de la variación de los flujos de servicio sobre FTP

- **Efectos de los flujos de servicio de Calidad de Servicio sobre VoIP**

En cuanto a los efectos de la configuración de Best Effort, rtPS y nrtPS en las aplicaciones EDiTV sobre el jitter, se tiene que aunque 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, los retardos son grandes ya que, cuando se configura UGS a las aplicaciones EDiTV no existen conexiones de VoIP debido a que se incrementa el número de concesiones no solicitadas (a las aplicaciones EDiTV) y el sistema no está listo para atender a todos los usuarios de este flujo de servicio. En la Figura 86.a se observan retardos desde los 400 ms hasta los 900 ms, valor que están por debajo del límite para proporcionar QoS para la voz (ITU-T_G.1010, 2001) mientras que en la Figura 86.b el jitter se encuentra al rededor de 5ms, cuyo valor si es adecuado para proporcionar QoS para la voz.

En conclusión es una muy mala decisión configurar las aplicaciones de TDi con UGS si se desea prestar servicios de VoIP sobre la misma red, siendo la mejor opción el flujo de servicio Best Effort, para HTTP y FTP el análisis arroja como buen opción el flujo de servicio Best Effort ya que los retardos para HTTP y FTP son normales y no se ven degradados.



a. Retardo
 b. Jitter
 Figura 86. Efectos de la variación de los flujos de servicio sobre VoIP

Con estos escenarios queda concluido la evaluación de la red HFC DOCSIS 1.1 para aplicaciones de TDi que utilizan tanto el canal ascendente para el transporte de información de usuarios (aplicaciones EDiTV) como el canal descendente (aplicaciones de VoD) de manera simultánea y en presencia de aplicaciones propias de la redes de datos como FTP, HTTP y VoIP.

Como resultado del estudio de los diferentes escenarios, combinaciones y análisis de las curvas arrojadas por la herramienta de simulación, se ha obtenido la mejor configuración de los parámetros DOCSIS y los parámetros para QoS, los cuales se resumen en la Tabla 16, además se analiza como impactan estos parámetros sobre la red HFC.

Configuración DOCSIS	Canal Descendente	Canal Ascendente
Modulación	QAM	QPSK
Tasa de datos	256 Mbps	2.56 Mbps
Ancho de banda del canal	8 MHz	800 KHz
Frecuencia central	550 MHz	12 MHz
Versión DOCSIS	1.1	
QoS DOCSIS	Best-Effort	
Tiempo entre MAP	10 ms	
Contention Slots	32 – DBS:0 DBE:4	
Piggybacking	Habilitado	
Fragmentación	Deshabilitado	
Concatenación	Deshabilitado	

Tabla 16. Parámetros de configuración encontrados para la red HFC, soportando aplicaciones de TDi

5.4 Aportes y conclusiones de este capítulo

- Las aplicaciones de VoD presentan un comportamiento a ráfagas, lo que 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 estas aplicación los parámetros de desempeño establecidos por las recomendaciones, se asegura también un óptimo funcionamiento para otras aplicaciones de TDi menos exigentes.
- El tráfico generado por las aplicaciones de EDiTV0 y EDiTV1 presentan un comportamiento semejante a una navegación Web liviana y un comportamiento a ráfagas respectivamente. De esta manera al garantizar para

EDiTV1 los parámetros de desempeño establecidos por las recomendaciones, se asegura también un óptimo funcionamiento para otras aplicaciones menos exigentes sobre el canal de retorno.

- Se muestra el rendimiento de la red ante el constante aumento de abonados y tráfico, mediante simulaciones que respondan al funcionamiento del sistema real, obteniendo un límite de catorce usuarios generando tráfico de manera simultánea antes de rebasar los límites de los parámetros de retardo permitidos para la TDi. cumpliendo de esta manera con el último objetivo específico propuesto para este proyecto. Así con el cumplimiento de todos los objetivos específicos se llega al cumplimiento del objetivo general propuesto para esta tesis de Maestría.
- El incremento del tiempo entre MAP afecta el *throughput*, el retardo de la red y el retardo de las aplicaciones de TDi, por lo tanto, para las aplicaciones de TDi en las que el tráfico tenga puntos de afluencia debido al comportamiento a ráfagas, se recomienda configurar este parámetro en 10ms para obtener retardos que estén dentro de los límites establecidos por las recomendaciones y un consumo de ancho de banda aceptable.
- El manejo de los parámetros de calidad de servicio como Piggybacking, fragmentación y concatenación demostró que el mejor comportamiento para las aplicaciones de TDi se obtiene mediante el parámetro de piggybacking habilitado, esto debido a las aplicaciones de streaming que generan altos consumos de ancho de banda sobre el canal descendente, brindando frecuentemente la opción de asignación de anchos de banda a cada uno de los CM para transmitir a través del canal ascendente, sin necesidad de recurrir a los procesos de contienda propios de la concatenación.
- Se corroboró el resultado obtenido por otros autores donde la habilitación simultánea de los parámetros de piggybacking y concatenación no genera la suma de los efectos de cada uno de los parámetros, sino que por el contrario es el parámetro de concatenación el que domina el comportamiento de la red deshabilitando los efectos del piggybacking. Además para el tráfico generado por las aplicaciones de TDi se mostro como el parámetro de calidad de servicio de la fragmentación no generó efectos sobre el comportamiento de la red ya que los contenidos que fluyen a través del canal ascendente son pequeños y no superan el tamaño de la trama Ethernet como se muestra en la Tabla 7.
- Los flujos de servicio de QoS como rtPS, nrtPS y UGS aplicados sobre las aplicaciones de EDiTV no afectan la distribución de los contenidos de manera significativa. Por el contrario dichos flujos aplicados sobre las aplicaciones de EDiTV si afectan el comportamiento de las otras aplicaciones por ejemplo aplicaciones de VoIP, encontrando como mejor configuración para los flujos de servicio de QoS el de BE tal que presenta menos efectos sobre las otras aplicaciones.
- Así en resumen como mejor opción de configuración para escenarios que involucren de manera simultánea aplicaciones de VoD y aplicaciones tipo EDiTV (EDiTV0 semejante a una navegación Web liviana, e EDiTV1 con un comportamiento a ráfagas) la mejor opción de configuración encontrada es el flujo de servicio Best Effort, Piggybacking habilitado, concatenación deshabilitada, Tiempo entre MAP de 10 ms, tamaño de minislots de 32 Bytes.

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajos Futuros

6.1 Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones que arroja este trabajo, teniendo en cuenta los objetivos propuestos; además, se plantean trabajos futuros para quienes deseen abordar y continuar con investigaciones en análisis de tráfico sobre redes que soporten televisión digital interactiva.

- La infraestructura tecnológica para un laboratorio de TDi utiliza componentes Hardware que resultan costosos más aun para universidades y centros de I+D en países en vía de desarrollo, en esta Tesis se presentan como se pueden trabajar las funcionalidades mínimas y obtener un laboratorio experimental con los componentes necesarios que permitan realizar el despliegue de aplicaciones interactivas. Este aporte se presentó en el COLCOM 2008 (Campo, Amaya, Urbano, & Arciniegas, 2008).
- Al decidir que elemento utilizar para cada componente que hace parte de la infraestructura tecnológica de un laboratorio experimental de Televisión Digital Interactiva se debe haber elegido el estándar de TD a utilizar (DVB, NTSC o ISDB), de esta forma tanto los elementos hardware como software elegidos deben seguir o utilizar formatos acorde con este estándar. Así esta Tesis presenta dichos elementos para el estándar DVB-C, que está en concordancia con el estándar acogido por la CNTV para Colombia.
- La Televisión Digital Interactiva permite el despliegue de nuevos servicios, para ello los centros educativos y/o de investigación interesados deben contar con laboratorios de experimentación que les permita realizar las pruebas requeridas, para tal fin la definición de una infraestructura tecnológica mínima permite viabilizar la implementación de este tipo de laboratorios. El laboratorio de EDiTV presentado en este trabajo puede entenderse como un laboratorio escalable que permitirá la incorporación de nuevos elementos como por ejemplo un CMTS o elementos propios de un laboratorio de TDT como las antenas y las estaciones base.
- Se obtuvo un comportamiento a ráfagas para todas las calidades de codificación de las aplicaciones de VoD, que se ejecutaron sobre la red de cable, como resultado de la caracterización del comportamiento temporal del tráfico. El comportamiento a ráfagas hace más complejo el análisis de tráfico, ya que es necesario encontrar las distribuciones estadísticas tanto para el tamaño de las ráfagas medidas en número de paquetes como para el tiempo entre ellas, desarrollando el proceso matemático para cada una de las aplicaciones de VoD. Para realizar la caracterización del tráfico se obtuvieron las distribuciones estadísticas con los parámetros que mejor se ajustan a los valores reales capturados en la red, siguiendo la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov. Así una muestra de tráfico de VoD sobre una red HFC queda caracterizada en el tiempo mediante dos CDF correspondientes a la función de Laplace para el tiempo entre ráfagas y la función Normal para el tamaño de las ráfagas, con sus correspondientes parámetros de acuerdo a las calidades de codificación de cada uno de los streaming.
- Se caracterizó el tamaño de los paquetes para todas las calidades de codificación de las aplicaciones de VoD, que se ejecutaron sobre la red de cable, siguiendo el análisis de Kolmogorov-Smirnov, obteniendo como resultado un tamaño constante sobre la red de cable, el cual corresponde al tamaño de la trama Ethernet. Así, el modelo matemático completo para una muestra de tráfico de VoD sobre una red HFC queda definido mediante tres CDF siendo estas: la CDF de Laplace, la CDF Normal y la CDF constante.
- Se ha encontrado el comportamiento del tráfico generado por la distribución de contenidos educativos sobre la red HFC, el cual corresponde a un comportamiento en el tiempo a ráfagas cuya caracterización implica el uso de dos funciones de distribución estadística. Una que caracteriza el tiempo entre ráfagas a través de la

distribución normal y otra que caracteriza el tamaño de las ráfagas medidas en número de paquetes a través de la distribución de Laplace. Por otra parte el tamaño de los paquetes esta caracterizado por una función constante el cual corresponde al tamaño de la trama Ethernet. Así la definición del modelo matemático de una muestra queda caracterizado a través de tres funciones de distribución estadística las cuales son obtenidas mediante la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov.

- Esta tesis define el modelo matemático para el tráfico generado por las aplicaciones de TDi enmarcadas dentro del proyecto EDiTV, además lleva dicho modelo a un entorno de simulación donde se programan todos los parámetros entregados por el modelo matemático, tal que permite evaluar el rendimiento de la red ante el aumento de usuarios, variaciones de las configuraciones de los parámetros de la red de cable, ejecución de otras aplicaciones propias de las redes de datos y al aumento de tráfico.
- La validación de las simulaciones bajo la herramienta OPNET Modeler confirman la validez de los resultados, los cuales corresponden a un trabajo completo ya que en esta tesis se tiene en cuenta un proceso que incluye el montaje de los laboratorios de EDiTV e ITV (ver anexo C), el diseño e implementación de las aplicaciones para TDi, así como su previa evaluación (EDiTV, 2008), la captura de tráfico y un análisis exhaustivo del mismo que conduce a la caracterización estadística de dicho tráfico, extrapolando (apartado 4.3.2 de este documento) dichas características sobre la herramienta de simulación. Además se presenta cómo a través del manejo adecuado de las fases de la herramienta de simulación es posible implementar las tres funciones de distribución estadística que conforman el modelo matemático de cada una de las muestras, donde se presenta como se controla el tiempo entre ráfagas y el tamaño de las ráfagas, a través del manejo adecuado de los tiempos de ejecución y el número de ejecuciones para cada uno de los perfiles.
- Los resultados obtenidos han sido validados a partir de la información capturada en los laboratorios de EDiTV e ITV. Se ha validado el tamaño de los paquetes, el tiempo de ejecución y número de ejecuciones comparado la evolución temporal del tráfico real con el tráfico simulado. Permitiendo la construcción del modelo sobre un escenario completo sin utilizar los resultados de caracterización de otros autores. Además se presenta la programación del módulo STB sobre OPNET Modeler que permite que las medidas de tráfico sobre el modelo simulado estén en un contexto de TDi.
- Teniendo en cuenta el modelo matemático adoptado se ha realizado el mapeo de dicho modelo en la herramienta OPNET modeler. Siendo necesario en la herramienta el manejo de las Custom Applications. A partir de este modelo podemos deducir el comportamiento de la red ante el aumento de usuarios o manejo de diferentes aplicaciones. Como se puede observar los resultados obtenidos hasta el momento dan luces de las condiciones reales de un sistema de VoD, sin embargo en la experimentación se pueden hacer variaciones de los parámetros o condiciones y hacer comparaciones que permitan valorar de mejor manera, rendimiento, y explorar las características de interactividad. El modelo permite que se cree la base del conocimiento para la toma de decisiones sobre el uso de aplicaciones de VoD en la TDi, para los proveedores de contenidos que deseen ampliar su oferta de servicios sobre sus redes.
- El proceso de análisis y generación del modelo es un proceso incremental, ya que parte desde la construcción, búsqueda y análisis de la información, hasta llevarlo a una representación a través de funciones matemáticas que describen el comportamiento de las aplicaciones, donde se inicia con el montaje y configuración de la red de cable para el laboratorio de ITV y EDiTV, toma de muestras y definición del modelo matemático de las mismas, para finalmente llegar hasta la simulación de la red de cable mediante OPNET Modeler.
- Las aplicaciones de VoD presentan un comportamiento a ráfagas, lo que 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 TDi menos exigentes.
- El tráfico generado por las aplicaciones de EDiTV0 y EDiTV1 presentan un comportamiento semejante a una navegación Web liviana y un comportamiento a ráfagas respectivamente. De esta manera al garantizar para

EDiTV1 los parámetros de desempeño establecidos por las recomendaciones, se asegura también un óptimo funcionamiento para otras aplicaciones menos exigentes sobre el canal de retorno.

- Se muestra el rendimiento de la red ante el constante aumento de abonados y tráfico, mediante simulaciones que respondan al funcionamiento del sistema real, obteniendo un límite de catorce usuarios generando tráfico de manera simultánea antes de rebasar los límites de los parámetros de retardo permitidos para la TDi. cumpliendo de esta manera con el último objetivo específico propuesto para este proyecto. Así con el cumplimiento de todos los objetivos específicos se llega al cumplimiento del objetivo general propuesto para esta tesis de Maestría.
- El incremento del tiempo entre MAP afecta el *throughput*, el retardo de la red y el retardo de las aplicaciones de TDi, por lo tanto, para las aplicaciones de TDi en las que el tráfico tenga puntos de afluencia debido al comportamiento a ráfagas, se recomienda configurar este parámetro en 10ms para obtener retardos que estén dentro de los límites establecidos por las recomendaciones y un consumo de ancho de banda aceptable.
- El manejo de los parámetros de calidad de servicio como Piggybacking, fragmentación y concatenación demostró que el mejor comportamiento para las aplicaciones de TDi se obtiene mediante el parámetro de piggybacking habilitado, esto debido a las aplicaciones de streaming que generan altos consumos de ancho de banda sobre el canal descendente, brindando frecuentemente la opción de asignación de anchos de banda a cada uno de los CM para transmitir a través del canal ascendente, sin necesidad de recurrir a los procesos de contienda propios de la concatenación.
- Se corroboro el resultado obtenido por otros autores donde la habilitación simultanea de los parámetros de piggybacking y concatenación no genera la suma de los efectos de cada uno de los parámetros, sino que por el contrario es el parámetro de concatenación el que domina el comportamiento de la red deshabilitando los efectos del piggybacking. Además para el tráfico generado por las aplicaciones de TDi se mostro como el parámetro de calidad de servicio de la fragmentación no genero efectos sobre el comportamiento de la red ya que los contenidos que fluyen a través del canal ascendente son pequeños y no superan el tamaño de la trama Ethernet como se muestra en la Tabla 7.
- Los flujos de servicio de QoS como rTPS, nrtPS y UGS aplicados sobre las aplicaciones de EDiTV no afectan la distribución de los contenidos de manera significativa. Por el contrario dichos flujos aplicados sobre las aplicaciones de EDiTV si afectan el comportamiento de las otras aplicaciones por ejemplo aplicaciones de VoIP, encontrando como mejor configuración para los flujos de servicio de QoS el de BE tal que presenta menos efectos sobre las otras aplicaciones
- Así en resumen como mejor opción de configuración para escenarios que involucren de manera simultánea aplicaciones de VoD y aplicaciones tipo EDiTV (EDiTV0 semejante a una navegación Web liviana, e EDiTV1 con un comportamiento a ráfagas) la mejor opción de configuración encontrada es el flujo de servicio Best Effort, Piggybacking habilitado, concatenación deshabilitada, Tiempo entre MAP de 10 ms, tamaño de minislots de 32 Bytes.

6.2 Aportes

- Los primeros trabajos considerados en el campo del análisis de tráfico en redes de datos estaban centrados en entornos LAN Ethernet, o bien hacían mención a tráfico Web en general. Ninguno de ellos se centra en el entorno específico de las redes de cable para analizar sus propiedades estadísticas. Solamente (García M. , 2002) y (García R. , 2005) analizan el comportamiento estadístico del tráfico en las redes de cable HFC pero sin considerar tráfico especializado para TDi y menos con carácter educativo, a diferencia de este trabajo el cual mediante las capturas de tráfico real en los laboratorios de EDiTV de la Universidad del Cauca e ITV de la universidad de Oviedo puede desarrollar escenarios de pruebas completos, sin necesidad de suponer o tomar modelos de tráfico de otras fuentes.
- Otra de las contribuciones significativas se basa en el análisis del protocolo de acceso en las redes HFC en la Universidad del Cauca. El protocolo MAC teniendo en cuenta tanto el canal ascendente como descendente

prácticamente no ha sido estudiado dentro de la Facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones. Se hace un análisis del protocolo DOCSIS, realizando simulaciones donde puedan apreciarse los efectos de distintas configuraciones de sus parámetros.

- La descripción del protocolo DOCSIS realizada en este capítulo tiene por objetivo resaltar las características más significativas de funcionamiento del acceso al medio en las redes de cable, teniendo en cuenta tanto el canal ascendente como descendente. Por ello, las contribuciones sobre este aspecto se limitan al estudio y análisis del protocolo DOCSIS, resaltando aquellos aspectos de interés necesarios para las simulaciones que se realizarán con el tráfico capturado en la red de cable. Respecto al modelo, se ha utilizado el modelo DOCSIS implementado por OPNET Modeler. En este capítulo se resaltan, de forma esquemática, las características que incorporaran los escenarios de redes de cable que se llevaran a cabo en las simulaciones del capítulo 5. Donde se hace referencia a los parámetros de configuración estudiados.
- Es necesario resaltar que en esta Tesis presenta el proceso paso a paso para la validación del modelo simulado teniendo en cuenta la validación de las fases, la validación del tamaño de los paquetes y la validación del tiempo de ejecución y número de ejecuciones programados para cada uno de los perfiles, dichos parámetros muestran que son capaces de controlar el tiempo entre ráfagas y el tamaño de las ráfagas medida en número de paquetes.
- Este trabajo proporciona un completo análisis del desempeño de la red de acceso para la distribución de contenidos educativos de TDi. Con este trabajo de grado se realizará la simulación del tráfico para TDi sobre la red de acceso HFC, que permitirá 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.
- Se genera un modelo matemático de tráfico que responde lo mejor posible al comportamiento real de los usuarios del servicio (mediante la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-smirnov) y se programa dicho modelo mediante las Custom Application sobre la herramienta de simulación. Así, este modelo de tráfico definido y programado puede servir de base para trabajos futuros como por ejemplo modelos de tráfico para TDi orientada al entretenimiento o al comercio.
- Se incorporó el módulo STB (Set Top Box) para la herramienta Opnet Modeler, necesario para realizar las simulaciones de la TDi, mediante la configuración de parámetros TCP sobre cada uno de los CM. Gracias a este módulo se corrobora mediante las simulaciones la ausencia de pérdida de paquetes y un valor ideal para el BER. Ver Figura 62.
- Los avances y experiencias logrados con el desarrollo del trabajo de grado brindará el conocimiento sobre las propiedades del tráfico generado por la TDi sobre una red HFC, que serán útiles para posteriores proyectos académicos e investigativos que deseen aplicar estas temáticas. Además, permitirá obtener 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 TDi
- La simulación de este tipo de tráfico sobre redes de acceso de cable empleando DOCSIS como protocolo MAC permitió determinar la viabilidad de su implementación en las condiciones de carga reales, relacionando las posibilidades que ofrece DOCSIS con las características del tráfico de contenidos educativos en tiempo real, detectando los puntos de actuación para una mejor configuración del servicio. (tiempo entre MAPs, Flujos de servicio, parámetros de QoS, tamaño de minislot).
- El trabajo de grado permite avanzar en el estudio de los problemas relacionados con los servicios de banda ancha, tales como mecanismos de control de tráfico en redes HFC para soportar el servicio de Televisión Digital 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.

- Se ha construido una base de conocimiento que permite afrontar otros retos como los de la TDT (Televisión Digital Terrestre), mediante un estudio del estado del arte y las tecnologías relacionadas con la TDi, la dotación de un laboratorio experimental y la generación de interés sobre estas temáticas que están en concordancia con los nuevos retos que debe afrontar el país con la inclusión inminente de la TDT en Colombia

6.3 Publicaciones

- Artículo, Full Paper: “Infraestructura Tecnológica para un laboratorio experimental de Televisión Digital Interactiva”. Congreso Colombiano de Comunicaciones IEEE – COLCOM 2008. (actualmente de Evaluación en la REVISTA IEEE AMÉRICA LATINA).(Campo, Amaya, Urbano, & Arciniegas, 2008)
- Artículo, Full Paper: EDiTV: Educación virtual basado en televisión interactiva para soportar programas a distancia. Presentado en Encuentro internacional de e-ciencia y educación apoyadas por redes de tecnología avanzada: Nuevas posibilidades para el desarrollo académico y científico del país 2008 (Campo, y otros, 2008).
- Artículo, Full Paper: “Análisis de vídeo bajo demanda utilizando el protocolo RTMP, sobre una red de cable”. Congreso Iberoamericano de Telemática, 11 y 12 de mayo de 2009 (Campo, Arciniegas, Lara, García, Melendi, & Pañeda, 2009).
- Artículo: “Caracterización de la distribución de contenidos de iTV en el canal interactivo de una red HFC”, Congreso Iberoamericano de Telemática, 11 y 12 de mayo de 2009, (Campo, Rueda, Taimal, & Arciniegas, 2009).
- Artículo, Full Paper: “Analysis of the DOCSIS protocol for distribution of iTV contents in the interactive channel of HFC network (April 2009)”, REVISTA AVANCES EN SISTEMAS E INFORMÁTICA, ISSN 1657-7663, Volumen 6 – NO.1 Junio de 2009, (En evaluación),(Campo, Taimal, Rueda, & Arciniegas, 2009).

6.4 Trabajos futuros

- Estudiar las prestaciones de los dispositivos de la red de cable para lograr un adecuado funcionamiento tanto del para servicio de streaming como del resto de servicios, además de desarrollar estudios en condiciones de congestión de red sobre los problemas que los diferentes protocolos de transporte de streaming puedan presentar debido a su comportamiento a ráfagas.
- Llevar el modelo matemático a diferentes herramientas de simulación tal que permitan ajustar lo mejor posible las diferentes características del protocolo a las condiciones reales de la red o para diferentes redes.
- Investigaciones que involucren el canal de retorno para descargar tráfico de streaming 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.
- Estudiar el algoritmo DOCSIS de manejo de tamaño de la información sobre el canal de retorno. Dicho algoritmo provee mecanismos de acceso por medio del cual se mide el tamaño de la información a enviarse comparándose con un parámetro dado, 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 de gran utilidad estudiar este mecanismo para explotar su utilización en el envío de peticiones e información correspondiente a EDiTV ya que lo que caracteriza a estas aplicaciones es que el tamaño de los paquetes y la información transmitida es pequeña.
- 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 TDi y servicios de voz y datos y así evaluar el consumo de recursos en dicha red.
- El modelo de red diseñado puede completarse añadiendo modelos de nuevos servicios. Con el propósito de abrir una línea para el desarrollo de modelos de los nuevos servicios que irán apareciendo sobre la televisión

Digital, se ha analizado, caracterizado e implementado un modelo para aplicaciones de TDi. Este modelo de servicio se ha integrado en el modelo de red de cable, con el objetivo de estudiar su rendimiento y la repercusión que tiene sobre los servicios ya instalados en la red.

- Realizar la evaluación del modelo de tráfico de TDi 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.
- La televisión digital interactiva proporciona nuevas posibilidades para el desarrollo de aplicaciones interactivas a sus clientes. En este trabajo de grado se abordó el estudio y modelado de aplicaciones de EDiTV 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 TDi
- Una de las promesas de la TDi es la capacidad de proporcionar los servicios de video bajo demanda. Así este trabajo analiza el tráfico de aplicaciones de VoD. Sin embargo, la combinación de video+DOCSIS debe ser observada con detenimiento ya que el alto número de parámetros DOCSIS configurables y su posterior impacto en el rendimiento general de las aplicaciones hacen que este tipo de soluciones deban seguir estudiándose y mejorándose, lo que supone una interesante línea de investigación futura. Así son muchos los posibles escenarios que se podrían analizar. En esta tesis se han mostrado los escenarios más representativos, pudiendo fácilmente ensayar cualquier tipo de situación que se desee analizar.
- Desarrollar estudios en condiciones de congestión de red sobre los problemas que el protocolo RTMP (descrito en el Anexo D) y otros protocolos utilizados para streaming puedan presentar debido a su comportamiento a ráfagas.
- Investigaciones que involucren el canal de retorno de la red HFC, por ejemplo usar el canal de retorno para descargar tráfico de streaming bajo RTMP y bajo otros protocolos utilizados para streaming analizando el que presente mejores prestaciones para la red HFC.
- Existen herramientas para la creación de aplicaciones para TDi ante todo de tipo comercial y de propósito específico, sin embargo en el ámbito educativo las propuestas son escasas; una de ellas SCOCreator (Díaz, Pazos, Fernández, & López, 2007) de la Universidad de Vigo. Por tanto desarrollar una herramienta de creación de contenidos para T-learning, que emule el despliegue en TV, que sea open source y pueda ser utilizada por personal no técnico, permitirá ayudar al desarrollo y prueba de contenidos, dotando así un laboratorio experimental de TDi de herramientas cada vez más completas.
- La TDT debe ser una de las temáticas que debe ser investigada teniendo en cuenta el gran abanico de servicios que puede ofrecer, su alta penetración que se espera en el territorio nacional y sus potencialidades complementarias dentro del as TIC en diferentes áreas como la educación, la salud, el entretenimiento etc, así como sus características en cuanto a arquitecturas de red, protocolos de compresión y manejo de tráfico.
- En resumen las redes HFC se han presentado como candidatas al transporte de datos de alta capacidad, pero su marcado carácter unidireccional heredado de las primeras versiones de esta arquitectura sitúa su cuello de botella en el canal de retorno. Todos los esfuerzos de las revisiones del protocolo DOCSIS como de la comunidad científica van orientados en la mejora del acceso de dicho canal, lo que manifiesta las posibilidades de investigación que todavía están abiertas en este campo.

Referencias

- Aarreniemi, P. (2006). *Modelling and content production of distance learning concept for interactive digital television*. Recuperado el 8 de septiembre de 2008, de portal lib.tkk.fi: <http://lib.tkk.fi/Diss/2006/isbn9512285428/isbn9512285428.pdf>
- Abi-Nassif, F., Lee, W. C., & Stavrakakis, I. (1999). Offered Load Estimation in a Multimedia Cable Network. *IEEE International Conference on Communications, ICC, Vol. 1*, 140-146.
- ADB. (2007). *ADB Ref. Q75DEV Soporte a MHP*. Recuperado el 25 de marzo de 2008, de portal adbglobal.com: <http://www.adbglobal.com/?q=node/193>
- Adobe. (2008). *Adobe Premier*. Recuperado el 12 de diciembre de 2008, de portal adobe.com: <http://www.adobe.com/es/products/premiere/>
- Al-Khatib, W., Rajeswari, A., & Gunavathi, K. (2007). Bandwith Allocation Algorithm for Docsis Based HFC Broadband Networks. *IEEE-ICSCN*, 452-458.
- Alzate, M. (2001). Introducción al Tráfico autosimilar en redes de comunicaciones. *Revista Ingeniería vol 6 No 2, Universidad Distrital; Colombia*, 6 a 17.
- Andueza, A. P. (2004). *Redes de acceso de Banda Ancha en la comunidad Foral de navarra*. Pamplona.
- Astaiza, E., Bermúdez, H. F., & Muñoz, P. A. (2007). *Simulación de sistemas de telecomunicaciones*. Armenia: Arte Imagen.
- Avalpa, E. D. (2008). *OpenCaster*. Recuperado el 5 de marzo de 2008, de portal avalpa.com: <http://www.avalpa.com/the-key-values/15-free-software/33-opencaster>
- Balakrishnan, H., Padmanabhan, V. N., & Katz, R. H. (1999). The effects of asymmetry on TCP performance. *Mobile Networks Applicat., vol. 4*, 219–241.
- Balaluishnan, H., & Padmanabhan, V. N. (2001). How Network Asymmetry Affect TCP. *IEEE Communications Magazine, Vol. 4, 2001, pág. 2*, 2.
- Bansal, D., & Balakrishnan, H. (2001). Binomial Congestion Control Algorithms. *Proceedings INFOCOM*, Alaska.
- Barakat, N., & Darcie, T. E. (2007). Delay characterization of cable access networks. *IEEE Communications Letters, vol. 11, no. 4*, 357 – 359.
- Berrocal, J., Vázquez, E., González, F., Álvares, C., Vinyes, J., Mandinabeitia, G.. (2003). *Redes de Acceso de Banda Ancha: Arquitectura, Prestaciones, Servicios y Evolución*. Madrid, España: Ministerio de Ciencia y Tecnología .
- Brice, R. (2003). *Newnes Guide to Digital TV*. Second edition, Newnes.
- Bushmitch, D., Mukherjee, S., Narayanan, S., Ratty, M., & Shi, Q. (2000). Supporting MPEG Video Transport on DOCSIS-Compliant Cable Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 18, N° 9* .
- CableLabs. (2006). *Radio Frequency Interface Specification DOCSIS 2.0*. CableLabs, Inc.
- CableLabs, C. T. (1996). *Data Over Cable Interface Specification, Cable Modem Termination System - Network Side Interface Specification*. SP-CMTS-NSII01-960702.
- CableLabs, C. T. (2003). *Data Over Cable Service Interface Specifications, Cable Modem to Customer Premise Equipment Interface* . SP-CMCI-109-030730.
- Campo, W., Amaya, J., Urbano, F., & Arciniegas, J. L. (2008). Infraestructura Tecnológica para un laboratorio experimental de Televisión Digital Interactiva”. *Congreso Colombiano de Comunicaciones IEEE – COLCOM 2008. (actualmente en Evaluación en la REVISTA IEEE AMÉRICA LATINA)*.
- Campo, W., Arciniegas, J., Amaya, J., Urbano, F., Euscategui, R., García, X. (2008). *EDiTV: Educación virtual basado en televisión interactiva para soportar programas a distancia*. Recuperado el 20 de Abril de 2008, de Portal: www.renata.edu.co: http://www.renata.edu.co/index.php/descargas/doc_download/48-educacion-virtual-basada-en-television-interactiva-para-apoyar-procesos-educativos-a-distancia.html.

- Campo, W., Arciniegas, J., Lara, A., García, R., Melendi, D., & Pañeda, X. (2009). Análisis de vídeo bajo demanda utilizando el protocolo RTMP, sobre una red de cable. *Congreso Iberoamericano de Telemática*, Oviedo, España.
- Campo, W., Rueda, D., Taimal, I., & Arciniegas, J. L. (2009). Caracterización de la distribución de contenidos de iTV en el canal interactivo de una red HFC. *CITA V Congreso Iberoamericano de Telemática*, Oviedo, España.
- Campo, W., Taimal, I., Rueda, D., & Arciniegas, J. (2009). Analysis of the DOCSIS protocol for distribution of iTV contents in the interactive channel of HFC network (April 2009). *REVISTA AVANCES EN SISTEMAS E INFORMÁTICA*, Oviedo, España.
- Cen, S., & Walpole, J. (1998). Flow and congestion control for internet streaming applications. *Proceedings Multimedia Computing and Networking (MMCN98)*.
- Chandrasekaran, G., Hawa, M., & Petr, D. (2003). Preliminary Performance Evaluation of QoS in DOCSIS 1.1. *Information and Telecommunication Technology Center, University of Kansas, Technical Report 22736-01*.
- Chatterjee, S. (1999). TCP Behavior over HFC Cable Modem Networks. *Computer Communications, Vol. 22, n° 14*, 1321-1332.
- Chu, K. C., Tai, Y. G., Lee, W. T., & Chung, P. C. (2002). A Novel Mechanism for Providing Service Differentiation over CATV Network. *Chu, K. C., Tai, Y. G., Lee, W. T. and Chung, P. C., Computer Communications, Vol. 25*, 1214-1229.
- Chunpeng, X., & Benny, B. (2004). *Measured QoS Performance of the DOCSIS Hybrid-Fiber Coax Cable Network*. Georgia: School of ECE, Georgia Institute of technology.
- CNTV. (02 de diciembre de 2008). *Televisión Digital Terrestre*. Recuperado el 02 de diciembre de 2008, de portal cntv.org.co: http://www.cntv.org.co/cntv_bop/tdt/
- Code4tv. (2009). *Curso Multimedia Home Platform 1.1.2*. Recuperado el 3 de enero de 2009, de portal code4tv.com/: <http://www.code4tv.com/res/mhp112course/16-CODE4TV-MHP-SI-DVB.pdf>
- Cohen, R., & Ramanathan, S. (1998). TCP for high performance in hybrid fiber coaxial broad-band access networks. *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 6, 15-29.
- Cruz, B. C. (2008). *Buenas Prácticas con Xlets*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2008, de Portal <http://www.cesnavarra.net/>: <http://www.cesnavarra.net/cesdigital/Lists/Noticias%20CESDigital/DispFormCES.aspx?List=5ec0dfc7%2D7911%2D470b%2D8b6b%2D71ba72783fdd&ID=63>
- DekTec. (2007). *DVB-T Modulador with UHF Upconverter*.
- Díaz, J., Pazos, J., Fernández, A., & López, M. (2007). Objetos adaptativos de aprendizaje para T-learning. *IEEE Latin America Transactions*, vol. 5, Nro. 6,.
- diSessa, A. (2004). *Changing minds: computer, learning, and literacy*. Massachusetts: The MIT Press.
- Dosi, A. P. (2004). New Frontiers of T-Learning: the Emergence of Interactive Digital Broadcasting Learning Services in Europe. *ED-Media World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia & Telecommunications* (págs. 4831-4836). Lugano, Switzerland: AACE.
- Droubi, M., Idirene, N., & Chen, C. (2000). Dynamic bandwidth allocation for the HFC DOCSIS MAC protocol. *Proc. IEEE IC3N*, .
- EDiTV, P. (2008). *Educación Virtual basada en Televisión Digital Interactiva para apoyar procesos educativos a distancia*. Recuperado el 15 de Octubre de 2008, de Portal: <http://www.unicauca.edu.co/> <http://www.unicauca.edu.co/EDiTV>
- Elloumi, O., Golmie, N., Afifi, H., & Su, D. A. (2000). Simulation-based study of TCP Dynamics over HFC networks. *Computer Networks (21)*, , 307-323.
- España, M. C. (2003). *Servicios Avanzados de Telecomunicación*. España: Ediciones Díaz Santos.
- ETSI_EN_300_429_V1.2.1. (1998). *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for cable systems*.
- ETSI_EN_300_744. (2004-11). *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, EBU-UER. V1.5.1*.

- ETSI_EN_300_744. (2004-11). *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, EBU-UER*. V1.5.1.
- ETSI_TR_101_154. (2007). *Digital Video Broadcasting (DVB) Implementation guidelines for the use of MPEG-2 System, Video and Audio in satellite, cable and terrestrial broadcasting applications*.
- ETSI_TS_101_154. (2007). *Digital Video Broadcasting (DVB); Specification for the use of Video and Audio Coding in Broadcasting Applications based on the MPEG-2 Transport Stream*. V1.8.1.
- ETSI_TS_102_812. (2006). *Digital Video Broadcasting (DVB); Multimedia Home Platform (MHP) Specification 1.1.1*. V1.2.2.
- Feamster, N., Bansal, D., & Balakrishnan, H. (2001). On the Interactions between Layered Quality Adaptation and Congestion Control for Streaming Video. N. Feamster, D. Bansal, and H. Balakrishnan. . In *11th International Packet Video Workshop* , Kyongiu, Korea.
- FFMPEG. (2007). *FFMPEG*. Recuperado el 15 de enero de 2009, de portal ffmpeg.mplayerhq.hu: <http://ffmpeg.mplayerhq.hu/download.html>
- Floyd, S., & Fall, K. (1999). Promoting the use of end-to-end congestion control in the Internet,. *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 7, n°. 4 , 458-472.
- Freshmeat. (2008). *mplex13818*. Recuperado el 223 de Enero de 2009, de Portal freshmeat.net: <http://freshmeat.net/projects/mplex13818/>
- García, M. (2002). "Modelado de prestaciones de Redes de área metropolitana para la transmisión de datos, basadas en tecnología hibridad fibra-coaxial". *Tesis Doctoral, Área de Ingeniería Telemática*. Gijón - España: Universidad de Oviedo.
- García, M., García, D. F., García, V. G., & Bonis, R. (2004). Analysis and Modeling of Traffic on a Hybrid Fiber-Coax Network. *Journal on Select Areas in Communications, Volume 22, Insue 9. IEEE* , 1718 - 1730.
- García, M., García, D. F., García, V. G., García, X. G., & Bonis, R. (2002). Traffic Analysis of Data Transmission on Hybrid Fiber Coax Network. *IASTED International Conference on Communication Systems and Networks*. Málaga - España.
- García, R. (2005). "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*. Gijón - España: Universidad de Oviedo.
- García, R., García, V. G., Pañeda, X. G., Melendi, D., & Neira, A. (2004). Aggregated traffic generation in FTTX networks. *International Conference on Applied Computing*. Lisboa - Portugal.
- García, X. (2004). *Análisis, modelado y configuración de servicios de video bajo demanda sobre redes de cable*, *Tesis Doctoral, Área de Ingeniería Telemática*. Gijón - España: Universidad de Oviedo.
- GNU, L. F. (25 de 12 de 2008). *Televisión Interactiva*. Recuperado el 1 de enero de 2009, de portal es.wikipedia.org: http://es.wikipedia.org/wiki/Televisi%C3%B3n_interactiva#Tipos_de_interacci.C3.B3n
- Golmie, N., Mouveaux, F., & Su, D. A. (1999). A Comparison of MAC Protocols for Hybrid Fiber/Coax Networks: IEEE 802.14 vs. MCNS. *IEEE International Conference on Communications, ICC '99* , 266 - 272.
- Golmie, N., Saintillan, Y., & Su, D. H. (1999). A Review of Contention Resolution Algorithms for IEEE 802.14 Networks. *IEEE Communications Surveys* , 2-12.
- González, A. A. (2008). *La televisión digital interactiva y sus aplicaciones educativas*. Recuperado el 1 de septiembre de 2008, de portal dialnet.unirioja.es: http://dialnet.unirioja.es/servlet/fichero_articulo?codigo=1985787&orden=0
- González, C. (2002). *Sistemas de televisión por cable: una visión integral*. Recuperado el 24 de 12 de 2008, de portal [cinit.org.mx](http://www.cinit.org.mx): <http://www.cinit.org.mx/articulo.php?idArticulo=6>
- GTCF, G. d. (2005). *Docuemnto informativo sobre la TV digital. TELEVISIÓN DIGITAL: ADAPTARSE HOY PARA LA NUEVA TELEVISIÓN*. España: Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicaciones.
- ImageMagick. (2008). *ImageMagick*. Recuperado el 10 de Enero de 2009, de portal [imagemagick.org](http://www.imagemagick.org): <http://www.imagemagick.org/script/download.php>

- ISO/IEC. (2000). *Coding of Audio-Visual Objects, Part-2 Visual, Amendment 4: Streaming Video Profile*. ISO/IEC 14496-2/FPDAM4.
- ISO/IEC_13818-1. (2000). *IS 13818-1, International Standard, Information Technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information – Part 1: Systems*.
- ISO/IEC_2. (1995). *International Standard, Information Technology – Generic Coding of moving pictures and associated audio – Part 2: Video*.
- ISO/IEC-11172-3. (1996). *JTC1/SC29/WG11 MPEG. International Standard IS. Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to 1-5 Mbit/s*.
- ISO/IEC-13818. (1995). *13818, Information Technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information (MPEG-2)*.
- ISO/IEC-13818-3. (1994). *Information Technology – Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information. Part 3: Audio*.
- ISO/IEC-13818-6. (2001). *Extensions for DSM-CC. Digital Storage Media Command and Control*.
- ISO/IEC-14496. (2002). *Information Technology – Coding of audio-visual objects (MPEG-4)*”.
- ISO/IEC-14496-3. (1998). *Information Technology – Very low bitrate audio-visual coding – Part 3: Audio*.
- ITU-T_G.1010. (2001). *Categorías de calidad de servicio para los usuarios de extremo de servicios multimedia*.
- ITU-T_H.262. (1995). *International Standard, Information Technology – Generic Coding of moving pictures and associated audio – Part 2: Video*.
- ITU-T_IPTV. (2007). *FG IPTV-DOC-0199 IPTV vocabulary of terms. Focus Group On IPTV*.
- ITU-T-H.264. (2003). *Recommendation H.264 - ISO/IEC 14496-10, Advanced Video Coding*.
- Jokipelto, P. (2006). *Modelling and Content Production of Distance Learning Concept for Interactive Digital Television*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2008, de portal lib.tkk.fi: <http://lib.tkk.fi/Diss/2006/isbn9512285428/isbn9512285428.pdf>
- Ju, H. J., & Liao, W. (2002). Fast request transmission (FRT) for DOCSIS based CATV networks. *IEEE Int. Conf. Multimedia and Exp (ICME), 2002* , 543-547.
- Kalampoukas, L., Varma, A., & Ramakrishnan, K. K. (1996). Two-way TCP traffic over ATM: Effects and analysis. *IEEE Infocom* .
- Kaza, T. (2001). *Application Performance and System Impact over DOCSIS Networks in a Lossy System*. Kansas City: Master’s thesis, Dept. of Computer Science, University of Missouri Kansas City,.
- Kolmogorov, N. (1937). *La teoría general de la medida y el cálculo de probabilidades*. Moscú: Russian Math.
- Krasic, C., Li, K., & Wapole, J. (2001). The Case for Streaming Multimedia with TCP. *8th International Workshop on Interactive Distributed Multimedia Systems (iDMS)* .
- Lakshman, T. V., Madhow, U., & Suter, B. (1997). Window-based error recovery and flow control with a slow acknowledgment channel: A study of TCP/IP performance. *IEEE INFOCOM '97* , , 38–47.
- Lee, W. T., Chung, K. C., Chu, K. C., & Pan, J. Y. (2006). DOCSIS performance analysis under high traffic conditions in the HFC networks. *IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 52, no. 1* , 21-30.
- Li, J. R., Dwyer, D., & Bharghavan, V. (1999). A transport protocol for heterogeneous packet flows. *IEEE Infocom'99* .
- Liao, W., & Ju, H. J. (2004). Adaptive Slot Allocation in DOCSIS - based CATV Networks. *IEEE Transactions On Multimedia, Vol. 6, N° 3* .
- Lin, Y. D., Huang, C. Y., & Yin, W. M. (1998). Allocation and scheduling algorithm for IEEE 802.14 and MCNS in hybrid fiber coaxial networks. *IEEE Trans. on Broadcasting, vol. 44, n° 4* , 427– 435.
- Lopez, M., Pazos, J., Blanco, Y., Lopez, M., & Duque, J. (2005). Solutions for Personalized T-learning . in *3rd European Conference on Interactive Television, Aalborg, Denmark* , 235-236.

- Lu, D.-J., Wang, Y.-C., Ho, J.-M., Ko, M.-T., & Chen, M.-C. (1997). Experience in designing a TCP/IP based VOD system over a dedicated network. *IEEE International Symposium on Consumer Electronics* .
- Main_Concept. (2009). *MainConcept Reference*. Recuperado el 2 de febrero de 2009, de portal mainconcept.com: <http://www.mainconcept.com/site/prosumer-products-4.html>
- Marianov, V., Oberli, C., & Rios, M. (2006). *Análisis de los Estándares de Transmisión de Televisión Digital Terrestre y su Aplicabilidad al Medio Nacional*. Recuperado el 12 de 11 de 2008, de portal subtel.cl (DICTUC, Pontificia Universidad Católica de Chile): http://www.subtel.cl/prontus_tvd/site/artic/20070315/asocfile/20070315173311/estudio_uc.pdf
- Marketing ICT, a. (2009). *Terisias*. Recuperado el 28 de Enero de 2009, de portal tiresias.org: <http://www.tiresias.org/about/index.htm>
- Martin, J. (2004). The Interaction Between the DOCISS 1.1/2.0 MAC Protocol and TCP Application Performance. *Proceedings of the International Working Conference on Performance Modeling and Evaluation of Heterogeneous Networks*, (págs. P57/1-10). Ikley, UK.
- Martin, J., & Shrivastav, N. (2003). Modeling the DOCSIS 1.1/2.0 MAC Protocol. *Proceedings International Conference on Computer Communications and Networks*. Dallas.
- Martínez, S. (2005). *Transmisión de voz sobre IP en redes de cable*". Tesis de Maestría. , Área de Ingeniería Telemática. Gijón - España: Universidad de Oviedo.
- Meritxell, E. (2002). *Interactividad e interacción*, Departamento de Pedagogía, Universidad de Girona. España. Documento PDF disponible en: Recuperado el 30 de noviembre de 2008, de portal dialnet.unirioja.es: http://dialnet.unirioja.es/servlet/fichero_articulo?codigo=1252603&orden=89124
- MHP. (2005). *KnowledgeDatabase*. Recuperado el 15 de octubre de 2008, de portal mhp-knowledgebase.org: http://www.mhp-knowledgebase.org/publ/mhp-kdb_d12.pdf
- MHP, T. M. (2006). *The MHP-Guide*. KnowledgeDatabase.
- Mimundo. (2008). *MimundoTV Player*. Recuperado el 10 de enero de 2009, de portal mimundotv.de: <http://www.mimundotv.de/parking.php?ses>
- Ming, I. T. (1999,). Performance evaluation of web browsing over hybrid fiber coaxial broad-/band networks. *Proc. ICON* , 372–382.
- MITC. (2008). *Televisión Digital por Cable (MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO)*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2008, de portal televisiondigital.es: <http://www.televisiondigital.es/Cable/>
- MJPEG_tools. (2008). *mjpeg*. Recuperado el 15 de Enero de 2009, de portal mjpeg.sourceforge.net: <http://mjpeg.sourceforge.net/>
- MPlayer. (2008). *MEncoder*. Recuperado el 28 de diciembre de 2008, de portal mplayerhq.hu: <http://www.mplayerhq.hu/design7/news-es.html>
- Nortel. (2003). *Introduction to Quality of Service (QoS)*. EE.UU: Nortel Networks.
- OPNET Technologies, I. (2005). *General Tutorials*. USA: Bethesda MD 20814-7904.
- Perales, B., Benoit, H., & Días, F. (2004). *Televisión Digital*. Thomson Paraninfo.
- Pérez, E. (2009). *01 INTRO2 TRANSMISION - Introducción a la TV Digital II La Transmisión*. Recuperado el 1 de enero de 2009, de code4tv.com: <http://www.code4tv.com/res/mhp112course/01-CODE4TV-MHP-INTRO2-TRANSMISION.pdf>
- Puche, W. S., Amaya, F., & Cárdenas, A. M. (2008). Simulación de la subcapa PMD en sentido de retorno según la especificación DOCSIS 3.0 para redes HFC. *Congreso Colombiano de Comunicaciones – Colcom, Popayán* .
- Pulkkinen, J. (2006). *The paradigms of E-Education, An analysis of the communication structures in the research on information and communication technology integration in education in the years 2000-2001*. Oulu: Oulun yliopisto.
- Rabbat, R., & Siu, K. (1999). QoS Support for Integrated Services over CATV. *IEEE Communications Magazine* , 64-68.
- Rege, K., & Sun, D. (Noviembre de 2005). A simple analytical model to estimate VoIP signaling delays in an HFC access network. *GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference* , 1344 – 1348.

- Rejaie, R., Handley, M., & Estrin, D. (1999). An end-to-end rate-based congestion control mechanism for realtime streams in the internet. *Proceedings of IEEE Infocomm* .
- Reyes, M. (2001). *Estudio de Transmisión Digital en el Retorno para la aplicación de Redes HFC del Sistema de Televisión por Cable de TELEDINAMICA S. A.* Universidad Industrial de Santander.
- Reyes, M. (2002). *Estudio y Diseño del Procesamiento Digital de Señales para sus uso en Aplicaciones del forward del sistema de Televisión por Cable de TELEDINAMICA S. A* . Universidad Industrial de Santander.
- Sala, D., & Limb, J. (1998). Comparison of Contention Resolution Algorithms for a Cable Modem MAC Protocol. *Seminar on Broadband Communications*, (págs. 83-90). Zurich.
- Sala, D., Limb, J. O., & Khaunte, S. U. (1997). Adaptive MAC protocol for a Cable Modem. *Georgia Tech Technical Report GIT-CC-97/14* .
- Sdralia, C., Smythe, P., Tzerefos, & Cvetkovic, S. (1999). Performance characterization of the MCNS docsis 1.0CATV protocol with prioritised first come first served scheduling. *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 45, , 161–205.
- Sdralia, V., Tzerefos, P., & Smythe, C. (2000). Recovery Analysis of the DOCSIS protocol after service disruption. *submitted to IEEE Transactions on Broadcasting*, .
- Sdralia, V., Tzerefos, p., Cvetkovic, S., & Smythe, C. (2000 a). Fault Recovery of the DOCSIS protocol. *Contribution to IEEE 802.16 WG, IEEE 802.16.lmc-00/1 I*, .
- Seung-Eun, H., & Oh-Hyeong, K. (2006). Performance Analysis of Single- and Multi-Channel Contention Resolution Algorithm for the DOCSIS MAC Protocol. *IEEE ICC Proceedings* , 1083-1088.
- Shah, N., Kouvatso, D., Martin, J., & Moser, S. (2005). A tutorial on DOCSIS: protocol and performance models. *Proceedings of the international working conference on performance modeling and evaluation of heterogeneous networks*.
- Shimonishi, H., Hama, T., & Murase, T. (2007). TCP congestion control enhancements for streaming media. *in Proceedings of IEEE Consumer Communications and Networking Conference* .
- Siahaan, M., & Hamdani, A. (2002). Determination Consideration for DOCSIS Implementation. *IEEE* , 431- 434.
- Sienra, L. G. (Noviembre de 2001). *DOCSIS. El Conjunto de Estándares Cable Módem de CableLabs*. Recuperado el 2 de septiembre de 2008, de Portal Cinit.org.mx: <http://www.cinit.org.mx/articulo.php?idArticulo=4>
- Sienra, L. G. (1 de Febrero de 2003). *Midiendo la calidad de señales digitales: Una orientación práctica*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2008, de portal: [www.cinit.org.mx: http://www.cinit.org.mx/articulo.php?idArticulo=16](http://www.cinit.org.mx/articulo.php?idArticulo=16)
- Simoneta, J. (2002). *Televisión Digital Avanzada*. Buenos Aires: 1 edición, Intertel.
- Taimal, I. R., & Rueda, D. F. (2009). *Análisis y evaluación de una red de acceso HFC para la distribución de contenidos educativos de iTV con QoS*. Popayán: Universidad del Cauca.
- Tan, D., & Zakhor, A. (1999). Real-time internet video using error resilient scalable compression and TCP-friendly transport protocol. *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 1, n°. 2 , 172-186.
- Tan, W., & Zakhor, A. (1998). Internet video using error resilient scalable compression and cooperative transport protocol. *Proc. ICIP, volumen 1* , 17-20.
- Televés. (2006). *Televisión y Radio, analógica y digital*. Santiago de Compostela-La Coruña: Telvés.
- TMPGEnc. (2008). *TMPGEnc Xpress*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2008, de portal [tmpgenc.net](http://www.tmpgenc.net): <http://www.tmpgenc.net/es/index.html>
- Trigal, O. A. (2007). *Televisión Digital en Argentina*. Buenos Aires: Instituto Tecnológico de Buenos Aires.
- Tzerefos, P., Sdralia, V., Smythe, C., & Cvetkovic, S. (1999). P. Tzerefos, V. Delivery of Low Bit Rate Isochronous Streams of the DOCSIS 1 .0 Cable Television Protocol. *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 45, N°. 2 , 206-214.
- UIT-H.262. (2007). *SISTEMAS DE AUDIOVISUALES Y MULTIMEDIA: infraestructura de los servicios audiovisuales - Codificación de imágenes vídeo en movimiento*.

- Vera, D. P. (2002). *Análisis y Diseño de una Red HFC para la ciudad de Popayán. Tesis de pregrado* . Popayán: Universidad del Cauca.
- Wanjiun, L. (2006). The behavior of TCP over DOCSIS-based CATV networks. *IEEE Transactions on Communications*, vol. 54, no. 9 , 1633 – 1642.
- Wen, K. K., Sunil, K., & Jay, K. C. (2002). Dynamic Collision Resolution and Traffic Scheduling for DOCSIS Systems with QoS Support. *IEEE GLOBECOM'02, Vol.2* .
- Wen, K. K., Sunil, K., & Jay, K. C. (2003). Improved Priority Access, Bandwidth Allocation and Traffic Scheduling for DOCSIS Cable Networks. *IEEE Transactions On Broadcasting, Vol. 49, n° 4* .
- Widmer, J., Denda, R., & Mauve, M. (2001). A survey on TCP-friendly congestion control. *IEEE Network*, vol. 15 , 28-37.
- Wireshark. (2008). *wireshark*. Recuperado el 15 de marzo de 2008, de portal wireshark.org: <http://www.wireshark.org>
- Wolff, P. A. (2008). *Diseño e Implementación de un curso de Servicios sobre Redes HFC de Nueva Generación*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Yan, J., Katrinis, K., May, M., & Plattner, B. (2006). Media- and tcp-friendly congestion control for scalable video streams. *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 8, n°. 2 , 196-206.
- Yin, W., & Lin, Y. (2000). Statistically Optimised Minislot Allocation for Initial and Collision Resolution in Hybrid Fiber Coaxial Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 18, n°. 9, .
- Zhang, L., Shenker, S., & Clark, D. D. (1991). Observations on the dynamics of a congestion control algorithm: the effects of two-way traffic. *ACM Computer Communication Review* .