

Análisis del protocolo DOCSIS para la distribución de aplicaciones y contenidos de TDi en una HFC

Analysis of the DOCSIS protocol for distribution of TDi applications and contents in a HFC network

Wilmar Y. Campo M., MSc., Diego Rueda P., Ing., Iván Taimal N., Ing., Jose Arciniegas H., PhD.

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Departamento de Telemática,

Universidad del Cauca, Colombia

{wilicampo, dfrueda, itaimal, jlarc} @unicauca.edu.co

Recibido para revisión 15 de Abril de 2009, aceptado 23 de Octubre de 2009, versión final 03 de Diciembre de 2009

Resumen—Este artículo presenta el análisis del protocolo de acceso DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification) en el canal de retorno de la red Hibrida Fibra Coaxial (HFC, Hybrid Fiber Coaxial) para la distribución de aplicaciones y contenidos educativos en el contexto de la televisión digital interactiva (TDi).

En este análisis, se tuvo en cuenta varios escenarios de prueba que permitieron evaluar los parámetros de configuración del protocolo DOCSIS bajo diferentes condiciones. Para ello, fue necesario capturar y caracterizar el tráfico real generado por las aplicaciones interactivas para luego construir los modelos de simulación que las representan. Como resultado de las simulaciones se pudo determinar los parámetros más adecuados para soportar aplicaciones con la calidad de servicio requerida en el contexto del T-learning y el mejor aprovechamiento de los recursos. Siendo estos la contribución más relevante de este artículo.

Palabras Clave—Protocolo DOCSIS, red HFC, Televisión Digital interactiva (TDi), Canal de retorno.

Abstract—This article presents the analysis of the Data Over Cable Service Interface Specification (DOCSIS) access protocol in the return channel of the Hybrid Fiber Coaxial (HFC) network for distribution of educational applications and contents in the context of interactive Digital Television (iTV).

In this paper, several test scenarios was taken into account allowing to evaluate configuration parameter from DOCSIS protocol on different conditions. For this, the real generated traffic by interactive applications were caught and characterized, after that, some simulation models were developed. As result of the simulations, the most adequate parameters were determinate in order to support application with required quality of service in the T-learning context and the best resource use. Being them, the most relevant contribution of this paper.

Keywords—DOCSIS Protocol, HFC network, interactive Digital Television (iTV), return channel.

I. INTRODUCCIÓN

La Universidad del Cauca (Popayán-Colombia) en asociación con la Universidad Autónoma de Occidente (Cali-Colombia) y la Universidad de Oviedo (Gijón-España) han definido un escenario propicio para la construcción de contenidos para la TDi. Con este propósito se realizó el proyecto de investigación EDiTV - Educación virtual basado en televisión interactiva para apoyar procesos educativos a distancia [23], el cual permitió la implantación del laboratorio de EDiTV en la Universidad del Cauca [1] para propósitos educativos, es decir en el campo de T-learning (aprendizaje a través de la televisión), que permite el aprovechamiento de la interactividad que brinda la televisión digital.

Como caso de estudio se desarrollaron aplicaciones para T-Learning, donde el contenido educativo y el proceso de aprendizaje han sido desarrollados especialmente para un ambiente interactivo basado en los estándares DVB-MHP (Digital Video Broadcasting - Multimedia Home Platform) [8] para una red de televisión por cable HFC. Un curso para T-learning es una combinación de diferentes tipos de materiales de aprendizaje tales como videos, animaciones y páginas DVB-HTML que corresponden a aplicaciones que se basan en el uso de XML (Extensible Markup Language), HTML (HyperText Markup Language) y JavaScript combinando texto e imágenes; los cuales son presentados en la pantalla de televisor mediante un navegador que se ejecuta en el STB [15].

La interactividad de los sistemas de televisión digital está estandarizada por diferentes organismos de regulación de telecomunicaciones tanto para la difusión de televisión digital como para el sistema mediador de los decodificadores (Set Top Box- STB). Para esta investigación se toma como referencia la especificación DVB-MHP. La interactividad en los sistemas de

TDi requieren dos canales de comunicación, uno de broadcast o de difusión y otro interactivo o de retorno [20][7].

La red de acceso HFC [6] como una evolución de las redes de cable tradicionales, se convierte en una alternativa atractiva para la TDi, dado que reserva una porción del espectro de frecuencia proporcionado por el cable coaxial para cada uno de los canales. Para enviar datos o solicitar información a través del canal de retorno en la redes HFC, se usa a nivel de capa de acceso al medio el protocolo DOCSIS para la transmisión de datos de alta velocidad [16].

El tráfico agregado por los contenidos de T-learning, genera un consumo considerable de recursos razón por la cual es necesaria una adecuada configuración del protocolo a nivel de capa de Control de Acceso al Medio (MAC, Media Access Control). Esta configuración, debe asegurar que el funcionamiento de las aplicaciones de la TDi sea el adecuado, cuando estas entren a competir por los recursos con otros servicios que son accedidos por el mismo canal, como por ejemplo voz sobre IP (VoIP), FTP o HTTP.

Así, está investigación se concentra en el estudio del protocolo DOCSIS para la transmisión del tráfico, generado sobre el canal de retorno, por los contenidos de T-learning desarrollados en el proyecto EDiTV; tal que permitan conocer las mejores opciones de configuración, para la distribución de este tipo de contenidos con calidad de servicio. Se evalúan los parámetros de desempeño como la utilización de los enlaces (throughput), el retardo y pérdida de paquetes en la red HFC en diferentes condiciones de escenarios donde se varía el número de usuarios que acceden a la red y los parámetros de configuración del protocolo.

Para el análisis del protocolo DOCSIS se siguió el siguiente proceso: Inicialmente se caracterizó el tráfico de las aplicaciones de T-learning desarrolladas en el laboratorio de pruebas de la Universidad del Cauca. Posteriormente, se construyó un modelo matemático que lo describe. Tanto el estudio de caracterización como el modelo matemático son ampliamente detallados en [22]. Para el análisis y la evaluación del protocolo fue necesario hacer simulaciones con diferentes condiciones; en primer lugar se construyó el modelo de simulación de la red del laboratorio con los servicios montados, tal que se pueda hacer las variaciones del caso. Para el soporte del modelo matemático del tráfico y el de simulación se utilizó la herramienta OPNET modeler [17], la cual es capaz de soportar funciones estadísticas, los elementos, y protocolos que permiten una representación de la funcionalidad de la red de laboratorio. Finalmente se realizaron varias simulaciones considerando diferentes configuraciones y condiciones tal que nos permitió deducir cuales son los parámetros recomendados para el protocolo DOCSIS de una manera eficiente sobre una red HFC.

El proceso y los resultados obtenidos son descritos en este artículo el cual está organizado en 7 secciones así: sección 2, se muestran los trabajos relacionados con la investigación; sección

3 marco teórico, brinda los conceptos necesarios sobre DOCSIS; sección 4 caso de estudio, describe los escenarios objeto de la investigación; sección 5 modelos de simulación, donde se resumen los modelos elaborados para este trabajo, sección 6 análisis de resultados, muestra para cada uno de los escenarios los resultados obtenidos con su respectivo análisis y finalmente la sección 7 presenta las conclusiones más relevantes del trabajo.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Como antecedentes a est trabajo se mencionan brevemente los desarrollados por el grupo de investigación GIT [24] de la Universidad del Cauca, los cuales son parte de los resultados obtenidos dentro del proyecto EDiTV [23] y son la base para esta investigación.

En [22] se presenta un modelo de tráfico que caracteriza dos aplicaciones de televisión interactiva de soporte para T-learning. Este modelo se determinó a partir de un estudio estadístico de las capturas de tráfico generado por las aplicaciones en el canal de retorno de un sistema de televisión interactiva, cuyos resultados permiten desarrollar un modelo de simulación.

En [4] se ha realizado un análisis de un servicio de streaming, se describe el escenario de pruebas real en el cual se realizan las medidas de tráfico y se caracteriza estadísticamente el tráfico generado para construir un modelo de simulación.

Existen además, varios estudios relacionados sobre las redes HFC o el protocolo DOCSIS. A continuación se presentan los trabajos más cercanos con respecto al análisis de redes HFC con aplicaciones típicas como video bajo demanda, HTTP, FTP, entre otras.

En [12] se realiza un modelo de un servicio de video bajo demanda sobre redes de cable para la transmisión de voz y datos, realizando además un exhaustivo análisis del protocolo DOCSIS. El autor presenta un artículo titulado Aggregated traffic generation in FTTX networks [13], donde se muestra la realización del modelo, bajo 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.

En [9] se 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 [11] y Analysis and Modeling of Traffic on a Hybrid Fiber-Coax Network [10]. 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 y ascendente. 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.

En [2] se 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. 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.

En [14] se muestra el análisis de prestaciones y calidad de servicio permitiendo a los operadores de redes de cable predecir el impacto de estos novedosos servicios en sus redes y configurarlos de forma efectiva. En [21] se analiza como el retardo de contención experimentado por las solicitudes asociadas a los paquetes de señalización; en los servicios de VoIP sobre redes con acceso HFC; a menudo dominan todo el retardo de señalización global. Se presenta además el 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 compara con los resultados de una simulación.

En la exploración de trabajos relacionados no se encontró publicaciones que aborden el estudio de la evaluación de condiciones de tráfico para la transmisión de contenidos educativos sobre un sistema de televisión digital con capacidades de interactividad.

III. MARCO TEÓRICO

El protocolo DOCSIS es el resultado del interés de los operadores de cable en desarrollar sistemas de comunicaciones de alta velocidad por paquetes, capaces de soportar una gran variedad de servicios. Éstos incluyen servicios de telefonía por paquetes y servicios de video-conferencia, descarga de

archivos, además de muchos otros [18]. Para lograrlo, las compañías de cable asociadas en CableLabs decidieron proponer una serie de especificaciones de interfaz que permitan la definición, diseño, desarrollo y despliegue de sistemas de datos sobre cable [18]. Por medio de la especificación DOCSIS es posible la transferencia bidireccional de tráfico IP entre la cabecera (headend) del sistema de cable y los usuarios, sobre una red mixta de fibra y cable coaxial [5]. En la figura 1 [5] se ilustra esta situación.

A. Generalidades del protocolo DOCSIS 1.1

El protocolo DOCSIS define las operaciones de las capas de nivel físico y MAC de Control de Acceso al Medio (MAC, Media Access Control) de la red HFC. Para la transmisión tanto en sentido ascendente como en sentido descendente se utiliza Acceso Múltiple por División en Frecuencia (FDMA) en la subcapa Dependiente del Medio Físico (PMD, Physical Media Dependent) de DOCSIS. El canal ascendente es un medio compartido, mientras que el descendente es un enlace dedicado de difusión desde el sistema de transmisión de módems de cable (CMTS, Cable Modem Termination System) al módem de cable (CM, Cable Modem) [5].

En sentido descendente, la banda de radiofrecuencia (RF) descendente (88 MHz a 860MHz en EE.UU. y 108 MHz a 860 MHz en Europa) está dividida en canales de 6 MHz en el sistema NTSC (National Television Systems Committee) estadounidense o de 8MHz en el sistema PAL (Phase Alternate Line) europeo. Cada uno de estos canales se utiliza para la difusión de televisión analógica y digital y para la transmisión de telefonía o servicios de datos. Los esquemas de modulación adoptados en los canales descendentes son 64 QAM y 256 QAM con lo cual se pueden obtener tasas de transmisión entre 30 y 57 Mbps [5].

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

La subcapa de convergencia de la transmisión (TC, Transmision Convergence) proporciona una interfaz a la subcapa dependiente del medio físico para la capa de MAC [12]. Para mejorar la robustez en la demodulación y facilitar

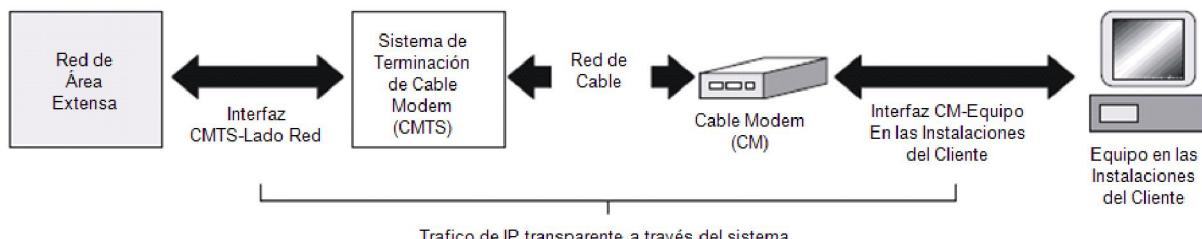


Figura 1. Tráfico IP a través del sistema de datos sobre cable

la multiplexación de video y datos, DOCSIS emplea MPEG-2 en la subcapa TC . El flujo de bits en sentido descendente se define como una serie continua de paquetes MPEG de 188 bytes [12].

B. Inicialización

Para iniciar la conexión, una estación debe adquirir un canal descendente (downstream) escaneando la banda de frecuencias hasta que su receptor identifica una señal de bajada válida. Después de obtener la sincronización a nivel físico, la estación puede adquirir las características del canal ascendente (upstream) a partir de los mensajes de gestión difundidos por la cabecera [5].

Luego la estación obtiene sus parámetros operacionales de la cabecera, entre los que se incluyen dirección IP, información de seguridad, configuración del canal, configuración de clase de servicio, etc., gracias a los servicios del Protocolo de Configuración Dinámica de Anfitrión (DHCP, Dynamic Host Configuration Protocol) y del Protocolo de Transferencia de Archivos Trivial (TFTP, Trivial File Transport Protocol) respectivamente [5].

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

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

C. Asignación del ancho de banda del canal ascendente y métodos de acceso

El canal ascendente está dividido en intervalos de tiempo debido al mecanismo de asignación de ancho de banda que implementa el protocolo. Cada intervalo es un número entero de minislots, siendo éstos la unidad de granularidad para las oportunidades de transmisión en sentido ascendente. El CMTS transmite por el canal descendente, además del tráfico de usuarios, información sobre el uso que los CM pueden hacer del canal ascendente, logrando así la gestión del ancho de banda mediante el envío (broadcasting, multicasting o unicasting) de mensajes de asignación de ancho de banda MAP (Media Access Protocol) [12].

Como resultado de la reserva de ancho de banda, los CM tienen garantizado una transmisión libre de colisiones. Sin embargo, las solicitudes de asignación de ancho de banda realizadas durante los intervalos de contienda están sujetas a colisiones, las cuales se resuelven por medio de un Algoritmo de Resolución de Contienda (CRA, Contention Resolution Algorithm). DOCSIS adopta el CRA conocido como Disminución Exponencial Binaria (Binary Exponential Backoff) [12].

Adicionalmente, se tiene el mecanismo de piggybacking por medio del cual una estación solicita ancho de banda adicional en la transmisión de datos. Con esto se obvia la contención, dado que las solicitudes se transmiten con los paquetes de datos logrando una reducción en los retardos de acceso. En DOCSIS 1.1, además de los modos de reserva de tiempo de transmisión como son el modo normal de reserva y piggybacking, se incluyen el acceso isócrono, el sondeo periódico de solicitud y el modo de acceso inmediato [5].

El acceso isócrono se utiliza para oportunidades de transmisión de datos asignadas periódicamente, mientras los sondeos periódicos se realizan cuando se tienen oportunidades de transmisión periódicas asignadas por solicitud. Estos modos de acceso están diseñados para flujos con calidad de servicio (QoS, Quality of Service). Finalmente, el acceso inmediato se concede cuando existe ancho de banda disponible después de satisfacer todos los requerimientos de ancho de banda. Este modo de acceso está abierto tanto para datos como para solicitudes. Si la carga es ligera, este modo de acceso puede emplearse para reducir retardos en los accesos a solicitudes y transmisión de datos [5].

D. Calidad de servicio en DOCSIS 1.1

La especificación DOCSIS 1.1 incluye nuevos conceptos relacionados con calidad de servicio que no están incluidos en la versión anterior como la clasificación de paquetes e identificación de flujo, la planificación de la QoS de flujo de servicio y los mecanismos de fragmentación y concatenación [5].

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

- Una función de configuración y registro para la configuración previa de flujos de servicio de QoS basados en CM y parámetros de tráfico.
- Una función de señalización para establecer dinámicamente flujos de servicio habilitados para QoS y parámetros de tráfico.
- Utilización de parámetros de tráfico y de planificación de MAC para flujos de servicio ascendentes.
- Utilización de parámetros de tráfico QoS para flujos de servicio descendentes
- Clasificación de los paquetes que llegan de la interfaz de servicio de la capa superior para un determinado flujo de servicio activo.

2) Flujos de Servicio: La manera de proporcionar una QoS consiste en clasificar los paquetes que atraviesan la interfaz MAC de RF en un flujo de servicio el cual es un flujo unidireccional de paquetes que proporcionan una determinada calidad de servicio. El CM y el CMTS proporcionan esta QoS conformando, controlando y priorizando el tráfico de acuerdo al conjunto de parámetros de QoS definido para el flujo de servicio [5].

Los flujos de servicio existen tanto en el sentido ascendente como en el descendente, y sin de hecho ser activados. Los flujos de servicio tienen un identificador de flujo de servicio (SFID) de 32 bits asignado por el CMTS. Todos los flujos de servicio tienen un SFID; los flujos de servicio activo y admitido también tienen un identificador de servicio (SID) de 14 bits [5].

Para manejar los servicios disponibles, se ha habilitado un mecanismo de clasificación de paquetes basándose en ciertos campos de las cabeceras de las capas 2, 3 y 4 y una asignación de ancho de banda mediante mensajes MAP de forma que la diferenciación de servicios pueda implementarse en redes con DOCSIS 1.1.

3) Flujos de Servicio de QoS en DOCSIS 1.1: Los servicios de planificación están concebidos para mejorar la eficiencia del proceso de petición/concesión. Especificando un servicio de planificación y sus parámetros de QoS asociados, el CMTS puede prever las necesidades de throughput y retardo del tráfico en sentido ascendente, y proporcionar peticiones y/o concesiones en los momentos oportunos. Cada servicio se adapta expresamente a un tipo específico de flujo de datos. Los servicios básicos comprenden: servicio de concesión no solicitada (UGS, Unsolicited Grant Service), servicio de interrogación secuencial en tiempo real (rtPS, real-time Polling Service), servicio de concesión no solicitada con detección de actividad (UGS-AD, Unsolicited Grant Service with Activity Detection), servicio de interrogación secuencial no en tiempo real, (nrtPS, non-real-time Polling Service), y servicio de máximo esfuerzo (BE, Best Effort) [12].

4) Concatenación y Fragmentación: Con estos dos mecanismos, los minislots concedidos serán utilizados completamente para transportar paquetes segmentados o concatenados. De esta forma, el throughput del canal ascendente se incrementa [12].

Por un lado, la concatenación es un medio del que dispone el CM para permitir que múltiples paquetes pequeños sean combinados y enviados en una misma trama MAC, aprovechando una sola oportunidad de transmisión. La concatenación reduce la ocurrencia de colisiones reduciendo el número de oportunidades de transmisión individuales necesarias. Por otro lado, la fragmentación consiste esencialmente en la división de grandes paquetes en varios paquetes más pequeños, los cuales se encapsulan en una trama MAC junto con un encabezado de fragmentación de tamaño fijo y un código de redundancia cíclica (CRC) del fragmento. Al habilitar este mecanismo para un flujo de servicio, el CMTS inicia la fragmentación cuando concede a un determinado CM un ancho de banda con un tamaño de concesión menor al de la petición de ancho de banda realizada por el CM. Esto se conoce como concesión parcial. La fragmentación se aplica de la misma forma tanto a las tramas concatenadas como a las simples y se encapsulan de la misma forma [12].

El CMTS puede utilizar dos modos para efectuar la

fragmentación. El primero es el modo concesión múltiple, el cual presume que el CMTS retiene el estado de la fragmentación. Este modo permite al CMTS tener múltiples concesiones parciales pendientes para cualquier SID dado. El segundo es el modo remolque que supone el CMTS no retiene ningún estado de la fragmentación. Sólo una concesión parcial está pendiente, por lo que el CM inserta la cantidad restante en el campo remolque del encabezado de fragmento. El CMTS determina el modo que habrá de utilizarse [5].

IV. CASO DE ESTUDIO

Las aplicaciones para ambientes educativos que se tuvieron en cuenta como caso de estudio son aquellas que facilitan la entrega de contenidos de T-learning y cuyos requerimientos han sido definidos dentro del proyecto EDiTV mediante la participación multidisciplinar de los diferentes grupos involucrados, teniendo en cuenta los conceptos pedagógicos, de usabilidad y de ingeniería, los cuales se condensan en los siguientes puntos [3].

- 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.
- A continuación se hace una breve descripción de las aplicaciones que fueron objeto de simulación bajo la herramienta OPNET Modeler:
- Programa educativo con información adicional: En esta aplicación se habilitan contenidos adicionales a lo largo de la transmisión del programa, los cuales están compuestos de texto e imágenes que se descargan a través del canal de retorno. Para acceder a dichos contenidos la aplicación incluye opciones que el estudiante puede seleccionar iniciando su descarga desde el servidor de aplicaciones del sistema de aprendizaje [15]. La pantalla del televisor se divide en dos espacios, en uno de los cuales el video continúa ejecutándose y en el otro se presenta la información solicitada por el televíidente. Esta aplicación se la ha denominado EDiTV0.
- Programa educativo con preguntas de selección múltiple: En esta aplicación, un estudiante recibe un programa de televisión por el canal de difusión durante el cual se realizan

diversas preguntas de selección múltiple. Cada pregunta tienen una vigencia en un de tiempo determinado, por lo cual el programa se divide en segmentos, cada uno de los cuales tendrá asociada una pregunta que el estudiante responderá de acuerdo a lo que está observando. Las respuestas seleccionadas desde el control remoto se transmiten desde el STB al servidor de aplicaciones por el canal de retorno. Esta aplicación se la ha llamado EDiTV1.

V. MODELOS DE SIMULACIÓN

Para poder realizar la simulación de manera confiable fue necesario modelar la red HFC en el cual se desplegarían las aplicaciones de TDi [22], para ello, se utilizaron los modelos de dispositivos proporcionados por la herramienta de simulación OPNET Modeler como CMTS, CM y estaciones de trabajo, al igual que el modelo del protocolo DOCSIS el cual es soportado en el CMTS, y se construyeron los modelos de simulación para el tráfico de las aplicaciones de TDi, el cliente STB y el servidor de aplicaciones interactivas, los cuales se describen a continuación:

A. Modelo de tráfico

Para generar el modelo de tráfico de las aplicaciones de TDi tomadas como caso de estudio, se realizaron capturas en el laboratorio de EDiTV, y de esta forma se determinaron los parámetros de las funciones de probabilidad que mejor describen el comportamiento de los usuarios cuando realiza una solicitud o envío de información al servidor de aplicaciones tal y como se muestra en la tabla 1. El proceso seguido para encontrar el modelo de estas aplicaciones de TDi se encuentra en [22].

Tabla I. Caracterización del tráfico de las aplicaciones EDiTV

Aplicación de TDi	Aspecto del tráfico caracterizado	Funciónde probabilidad	Parámetros de entra a la herramienta de simulación
Aplicación de solicitud de información adicional	Tiempo entre peticiones	Exponencial	Media (μ_x) = 28.5262 seg Desviación estándar (σ_x) = 25.1136 seg
	Tamaño de la Solicitud de información	Constante	Valor constante = 256 bytes
	Tamaño del Archivo XML1	Constante	Valor constante = 1084 bytes
	Tamaño del Archivo XML2	Constante	Valor constante = 8443 bytes
	Tamaño de la Imagen	Constante	Valor constante = 10053 bytes
Aplicación de respuestas de selección múltiple	Tiempo entre respuestas	Normal	Media (μ_x) = 38.0102 seg Desviación estándar (σ_x) = 14.1642 seg
	Tamaño del Envío de Información	Constante	Valor constante = 400 bytes
	Tamaño de la Respuesta del Servidor	Constante	Valor constante = 200 bytes

La aplicación EDiTV0 desarrollada en laboratorio permite la solicitud de un contenido con información de tipo texto (archivo XML1), y luego de un tiempo (tiempo entre peticiones) la solicitud de un contenido conformado por texto (archivo XML2) y por una imagen. Entre tanto, la aplicación EDiTV0 solamente facilita el envío de las respuestas de los usuarios al servidor de aplicaciones y la réplica del servidor a estos.

Este modelo de tráfico permitió la realización de diferentes simulaciones con varios usuarios y diferentes perfiles de

configuración del protocolo DOCSIS, para determinar los alcances de la red de acceso HFC para proporcionar los recursos de red necesarios para una adecuada prestación de un servicio de TDi, donde el retardo no debe ser mayor que 200 mseg y la pérdida de paquetes tiene que ser nula [19]

B. Modelo del Cliente STB

En la simulación de las aplicaciones de TDi, los clientes que simulan al STB corresponden a estaciones de trabajo que se conecta por medio de una interfaz Ethernet al módem de cable. En estas estaciones se configuraron los perfiles que representan el comportamiento de un usuario durante un lapso de tiempo en el que interactúa con las aplicaciones de TDi tanto de solicitud de información adicional como de preguntas de selección múltiple. Los perfiles se configuraron teniendo en cuenta que el productor del programa de televisión educativo es quien define o habilita cuando se puede solicitar información adicional al programa de televisión o responder a una pregunta. Para todos los usuario de las aplicaciones de TDi, cada 2 minutos se permite la utilización de estas con lo cual el modelo de tráfico de las aplicaciones entra en funcionamiento basado en el comportamiento estadístico de cada una de ellas.

C. Modelo del servidor de aplicaciones interactivas

Dentro del proceso de simulación, se utilizó un servidor genérico de la herramienta OPNET Modeler el cual fue configurado de tal forma que pueda responder a la solicitud de archivos y peticiones realizadas por los diferentes usuarios de las aplicaciones de televisión interactiva. Este servidor se conecta al CMTS por medio de una interfaz Ethernet para establecer una transmisión de datos transparente por la red HFC, este servidor hace parte de lo que en una red de TDi se conoce como la cabecera de red.

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta el análisis de los resultados de la simulación de los diferentes escenarios.

A. Efectos del incremento del número de usuarios sobre la transmisión de aplicaciones de TDi

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

Con la configuración típica del protocolo DOCSIS de la tabla 2, con tipo de servicio Best Effort, un sólo canal ascendente, fragmentación, concatenación y piggybacking deshabilitados, se mide inicialmente el efecto del aumento de usuarios tanto para la aplicación EDiTV0 como para la aplicación EDiTV1 para

1, 40, 80, 125 y 250 usuarios.

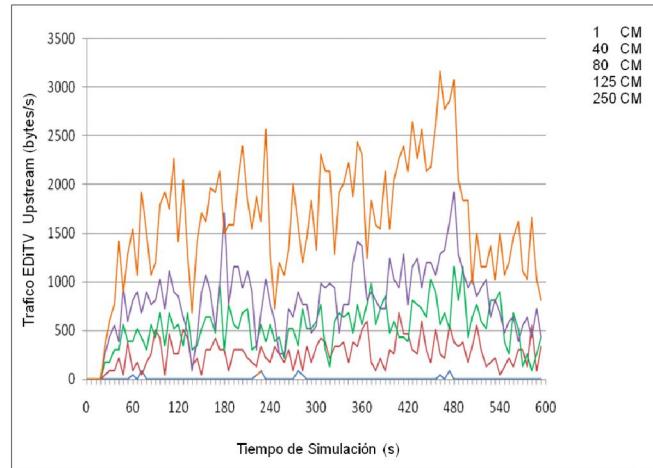
Las Fig. 2a y Fig. 2b corresponden a tráfico recibido y enviado por el servidor de aplicaciones mientras que las Fig. 2c y Fig. 2d corresponden al throughput en la red HFC. El tráfico agregado es el resultado de la transferencia de información iniciada por los diferentes usuarios en los instantes de tiempo donde el productor de televisión habilita la aplicación para extraer la información adicional al programa de televisión. En dichas gráficas puede notarse como a medida que se aumenta el número de usuarios el tráfico de la red aumenta y se presenta disperso

en todo el intervalo de tiempo de simulación sin verse aglomeraciones de ráfagas. Por su parte, la aplicación EDiTVO en cuanto a la forma del tráfico generado presenta similitudes con las aplicaciones HTTP a pesar de que los paquetes que maneja son más pequeños.

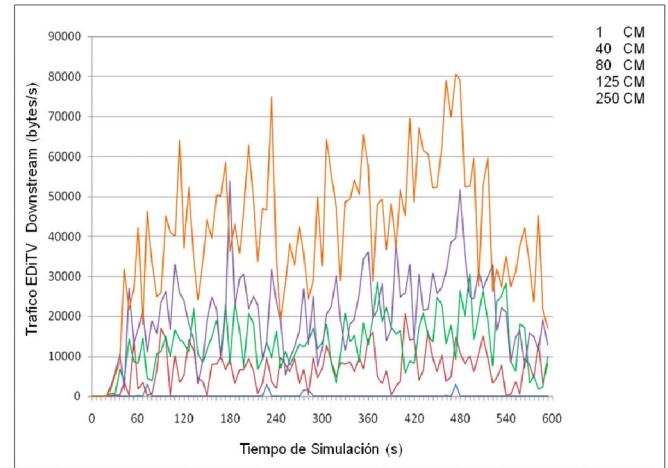
En las Fig. 2a y Fig. 2b puede observarse que el tráfico generado por un solo usuario no supera los 80 bytes/s tanto en sentido descendente como en el sentido ascendente, mientras que con 250 usuarios se tienen valores pico de 3000 bytes/s en el canal ascendente y 80000 bytes/s en el canal descendente. Este tráfico se incrementa en la red HFC debido al funcionamiento propio del protocolo DOCSIS, al mecanismo de transporte MPEG y a las técnicas de corrección y detección de errores FEC llegando hasta 140 Kbps (figura 4-5c) en el canal ascendente y 700 Kbps (figura 4-5d) en el canal descendente.

TABLA II. PARÁMETROS DOCSIS PARA EL TRÁFICO DE TDI

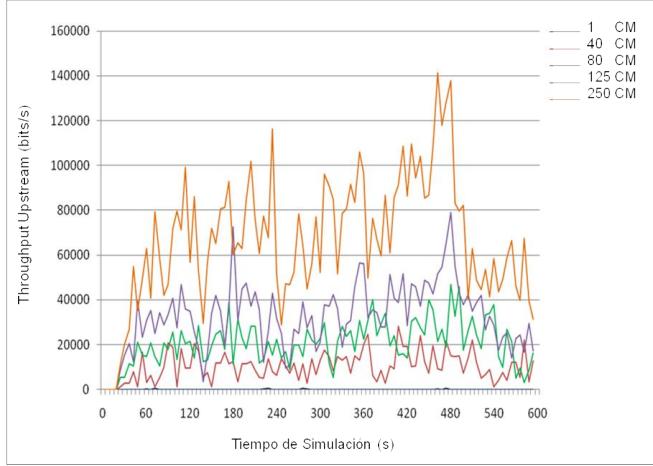
Parámetros	Valor
Tasa de datos de <i>Upstream</i>	2.56Mbps / QPSK
Tasa de datos de <i>Downstream</i>	55 Mbps / 256QAM
Tiempo entre MAP	10 ms
Tamaño <i>minislot</i>	16 bytes
<i>Minislot</i> por MAP	200
<i>Slots</i> de contención por MAP	32



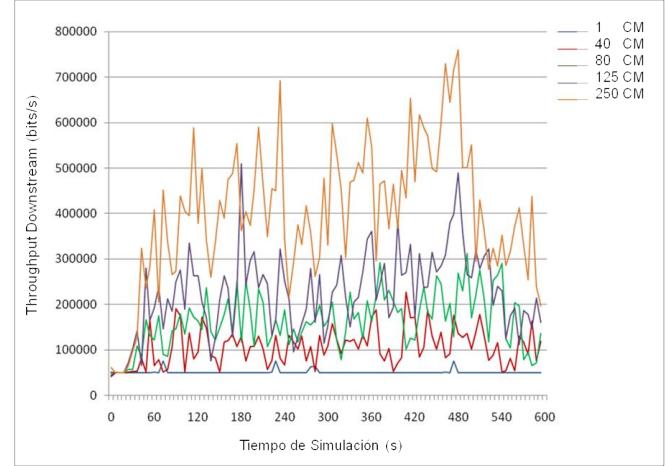
a)



b)



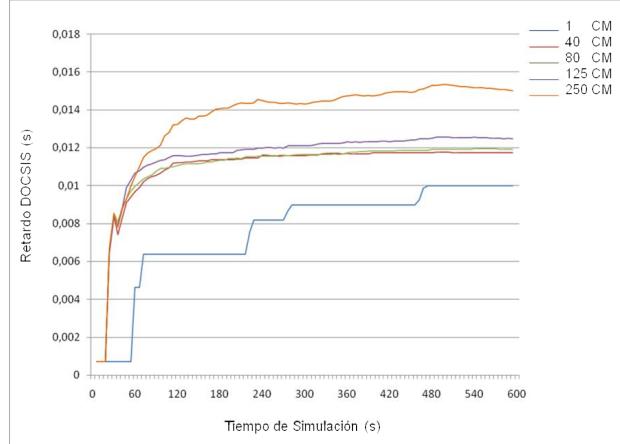
c)



d)

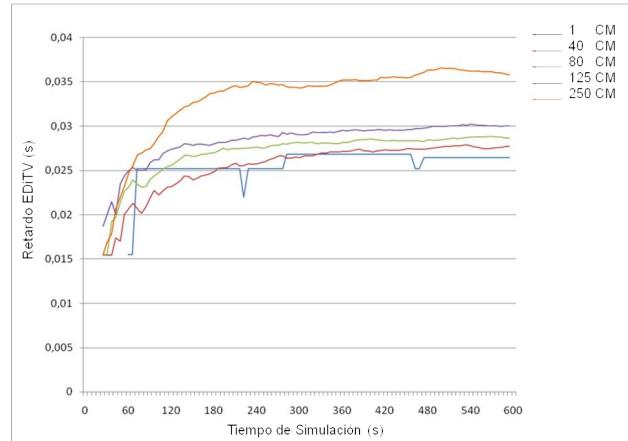
Figura 2. Tráfico agregado generado por diferente número de usuarios de la aplicación de solicitud de información adicional en los canales ascendente y descendente.

Debido al bajo consumo de ancho de banda, los retardos generados no son muy elevados, así, para 250 usuarios se obtuvo el máximo retardo DOCSIS que en promedio fue de 14.8 ms y a nivel de la aplicación (retardo EDiTV) el retardo en



a)

promedio llegó a 35 ms manteniéndose dentro del límite de 200 ms con lo cual la aplicación no tendrá problemas de funcionamiento. Esto se puede ver en la Fig. 3.



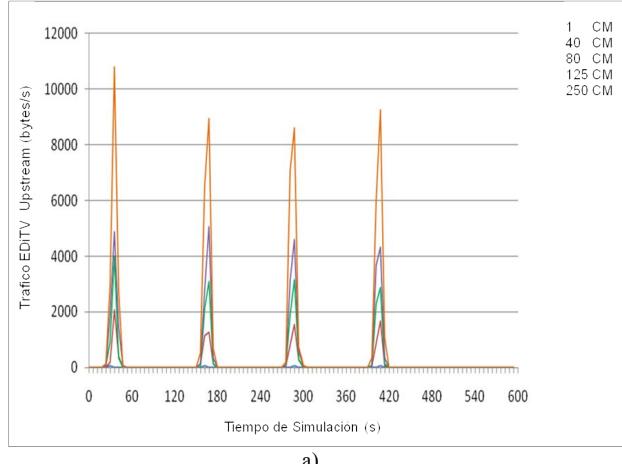
b)

Figura 3. Retardo DOCSIS y retardo EDiTV para diferente número de usuarios de la aplicación de solicitud de información adicional.

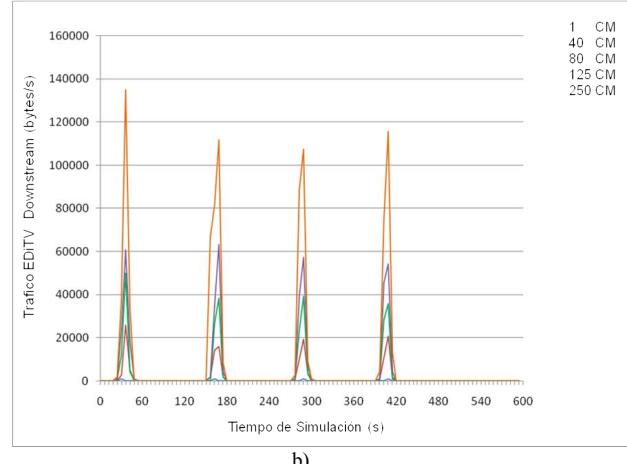
La aplicación EDiTV1 a diferencia de la anterior requiere la sincronización con el contenido del programa que el usuario recibe por el canal de difusión, por lo que las respuestas y el intercambio de información a través del canal interactivo están ligados a los eventos que sucedan en el programa ocasionando que el tráfico agregado tenga determinados puntos de afluencia y por ende se presente en ráfagas. Como ejemplo, cuando se realiza una pregunta comienza a correr un tiempo que delimita la vigencia de la pregunta, por lo cual todos los usuarios deberán hacer efectiva su respuesta dentro de ese intervalo y todo el tráfico se concentrará en el lapso, siguiendo la distribución normal según el modelo de tráfico arrojado por el estudio de las capturas de tráfico real [22]. Esta aglomeración del tráfico afecta

en mayor medida el rendimiento de la red debido a la cantidad de usuarios que tratan de acceder simultáneamente aunque los paquetes no tengan un tamaño considerable.

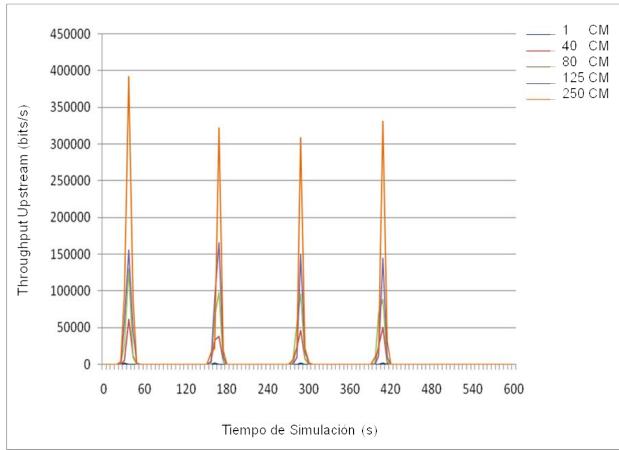
En la Fig. 4 puede notarse que en los puntos de afluencia el tráfico generado por 250 usuarios que responden a una pregunta de selección múltiple (Fig. 4a) llega a 120 Kbytes/s mientras que el tráfico del servidor en contestación a los 250 usuarios (Fig. 4b) es más pronunciado llegando a 1080 Kbytes/s.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



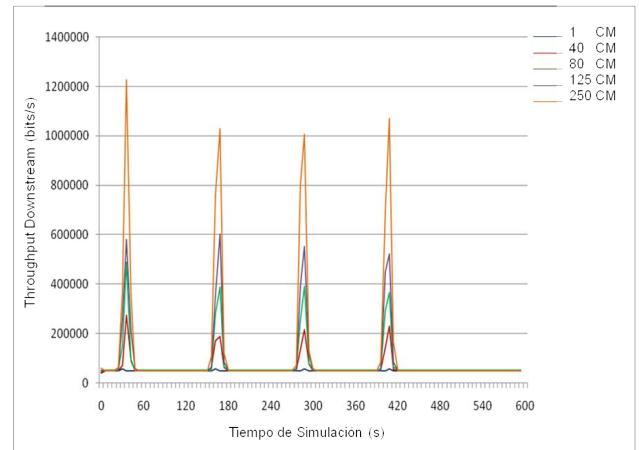
a)



b)



c)

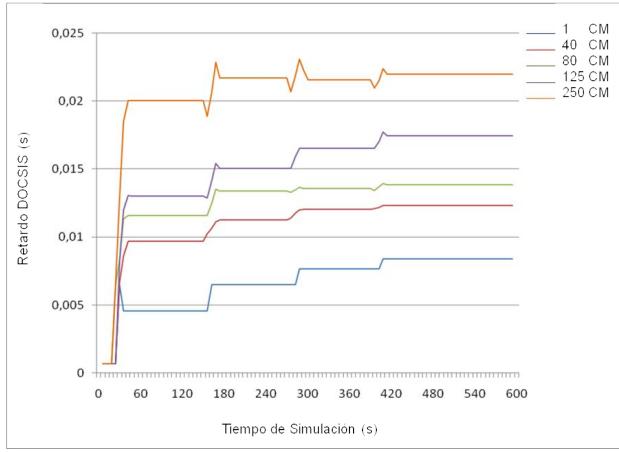


d)

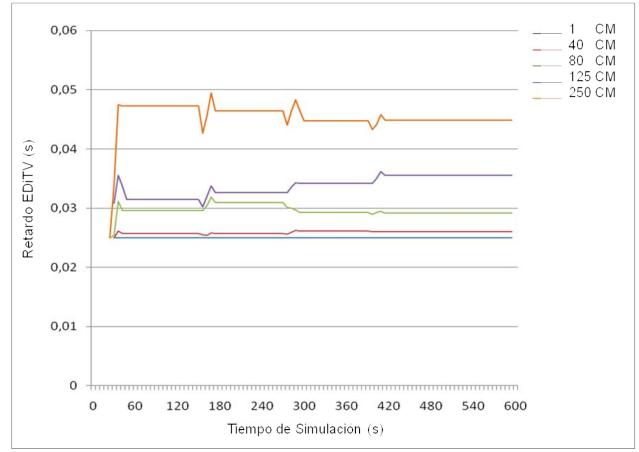
Figura 4. Tráfico agregado generado por diferente número de usuarios de la aplicación de preguntas de selección múltiple en los canales ascendente y descendente.

Para este escenario se tiene que el retardo DOCSIS y TCP están dentro de los rangos normales, y por ende la aplicación no tendrá problemas de funcionamiento. En la Fig. 5 se muestra

el promedio del retardo DOCSIS y del retardo EDiTV variando el número de usuarios, donde el máximo retardo se obtuvo para 250 usuarios llegando a 22ms y 4.8 ms respectivamente.



a)



b)

Figura 5. Retardo DOCSIS y retardo EDiTV para diferente número de usuarios de la aplicación de preguntas de selección múltiple.

B. 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.

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 muchos

oportunidades de reserva mientras se encuentra en espera de la transmisión, en cambio un tiempo excesivamente grande entre mensajes MAP reduce las oportunidades de trasmisión.

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 2. La comparación se hizo para 5ms, 10ms, 20ms, 50ms de tiempo entre MAP.

En este sentido, en la Fig. 5 se muestra el efecto de la variación del tiempo entre MAP sobre el throughput de la red cuando se tienen 125 usuarios de la aplicación EDiTV0. Como se puede observar, a medida que el tiempo entre MAP disminuye el throughput del canal descendente (Fig. 6a) aumenta debido a que el CMTS envía con mayor frecuencia este tipo de mensajes por el canal descendente reduciendo la tasa de bits efectiva

para la transmisión de información.

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

Estas consideraciones indican que la transmisión de mensajes

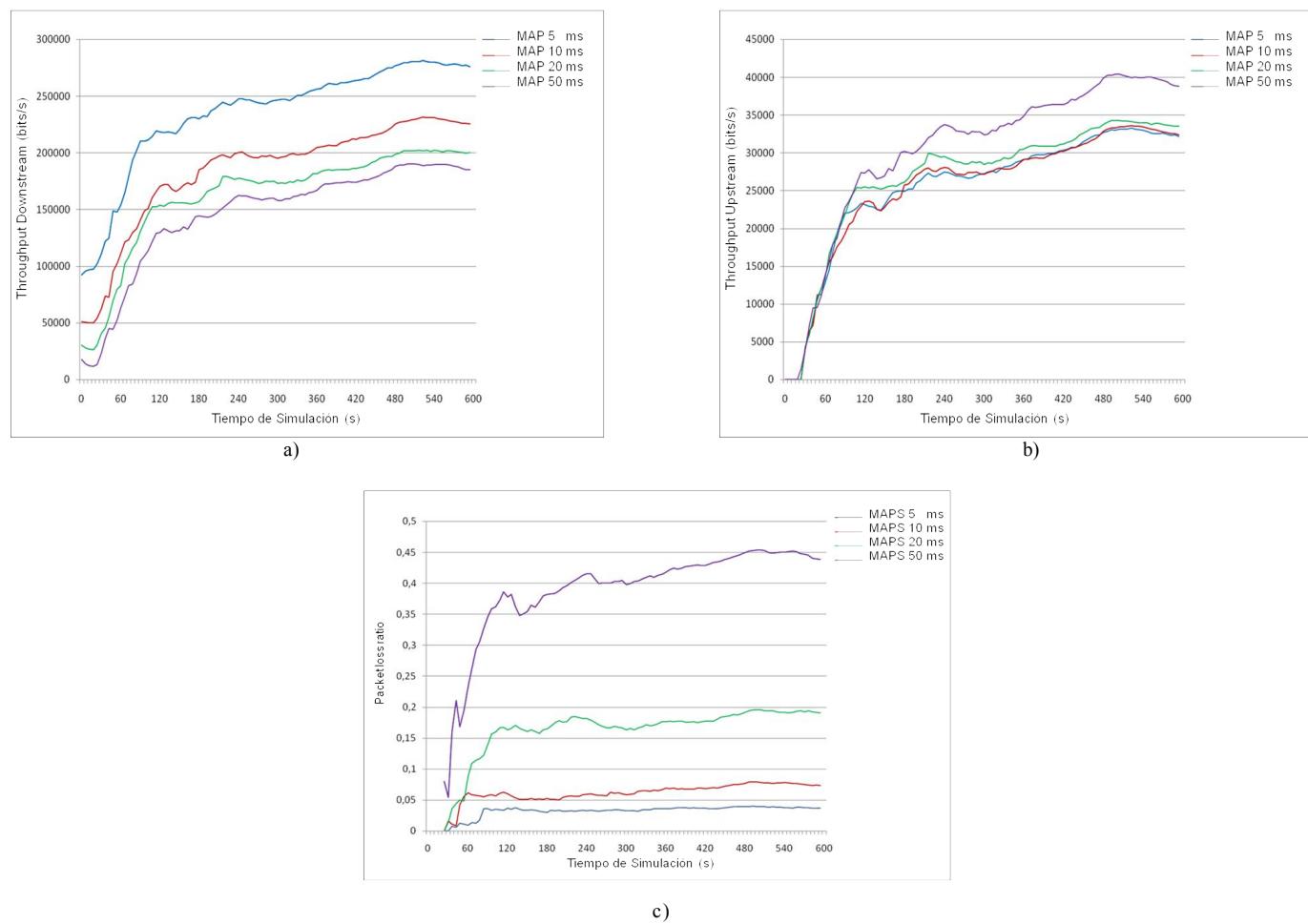
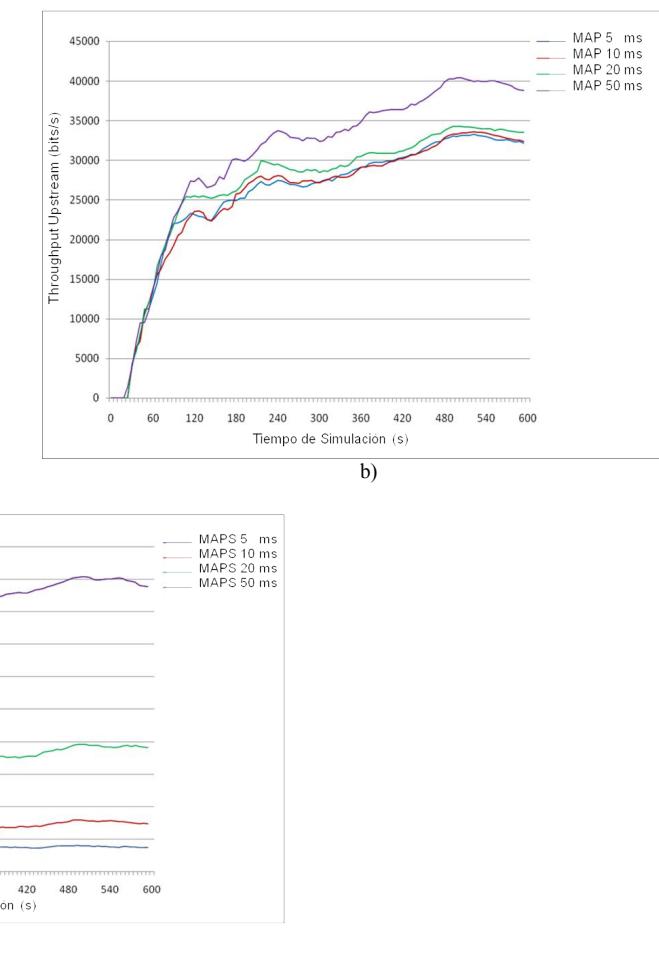


Figura 6. Throughput de los canales ascendente y descendente, y razón de pérdida de paquetes para diferente tiempo entre mensajes MAP para la aplicación de solicitud de información adicional.

Por su parte, el efecto de la variación del tiempo entre MAP sobre el retardo se muestran en las graficas de la Fig. 7. Nótese como a medida que el tiempo entre MAP aumenta el retardo DOCSIS y EDiTV se incrementan desde valores aceptables hasta

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

Para el canal ascendente la situación es diferente, en la Fig. 6b, puede observarse que para un tiempo entre MAP de 50 ms el tráfico ascendente es más grande, debido a que las estaciones tienen escasas oportunidades de transmisión, por lo cual los time-out de la aplicación se vencen y se produce perdida de paquetes, así se hace necesaria la retransmisión y precisamente lo que adiciona tráfico en la red. Esto se puede corroborar con la Fig. 6c donde la razón de paquetes perdidos es de 45 % si la red se configura con un tiempo entre MAP de 50 ms.



valores que perjudican el desempeño de las aplicaciones por cuanto superan el límite permitido de 200ms. El caso más crítico se obtuvo para un tiempo entre MAP de 50ms donde el retardo DOCSIS alcanzó 140ms y el retardo EDiTV 300 ms.

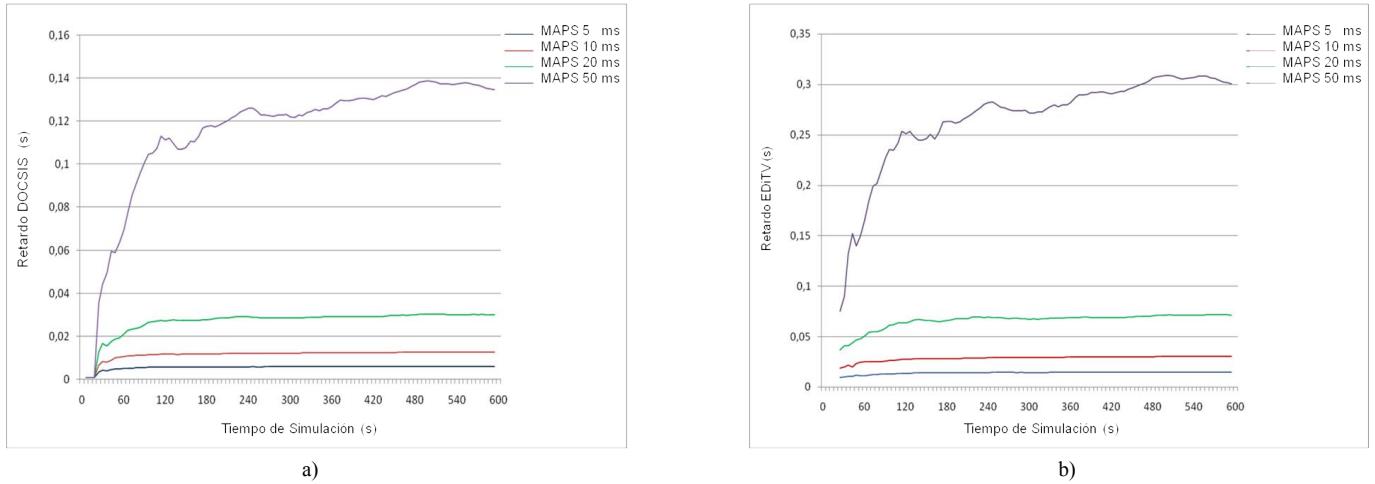


Figura 7. Retardo DOCSIS y retardo EDiTV para diferente tiempo entre mensajes MAP para la aplicación de solicitud de información adicional.

Para la aplicación EDiTV1 los efectos del tiempo entre MAP son similares a los de la aplicación EDiTV0, por lo tanto si el tiempo entre mensajes MAP es reducido, el tráfico en el canal descendente se incrementa debido al aumento en la frecuencia de transmisión de mensajes MAP, en cuanto al canal ascendente se ve un incremento

en el tráfico al disminuir la cantidad de mensajes MAP y se debe al tráfico de las retransmisiones. Como caso particular, en la Fig. 8a, con un tiempo entre MAP de 5 ms, la aplicación tiene problemas de funcionamiento por que excede el número de retransmisiones posibles, y por ende no se genera tráfico.

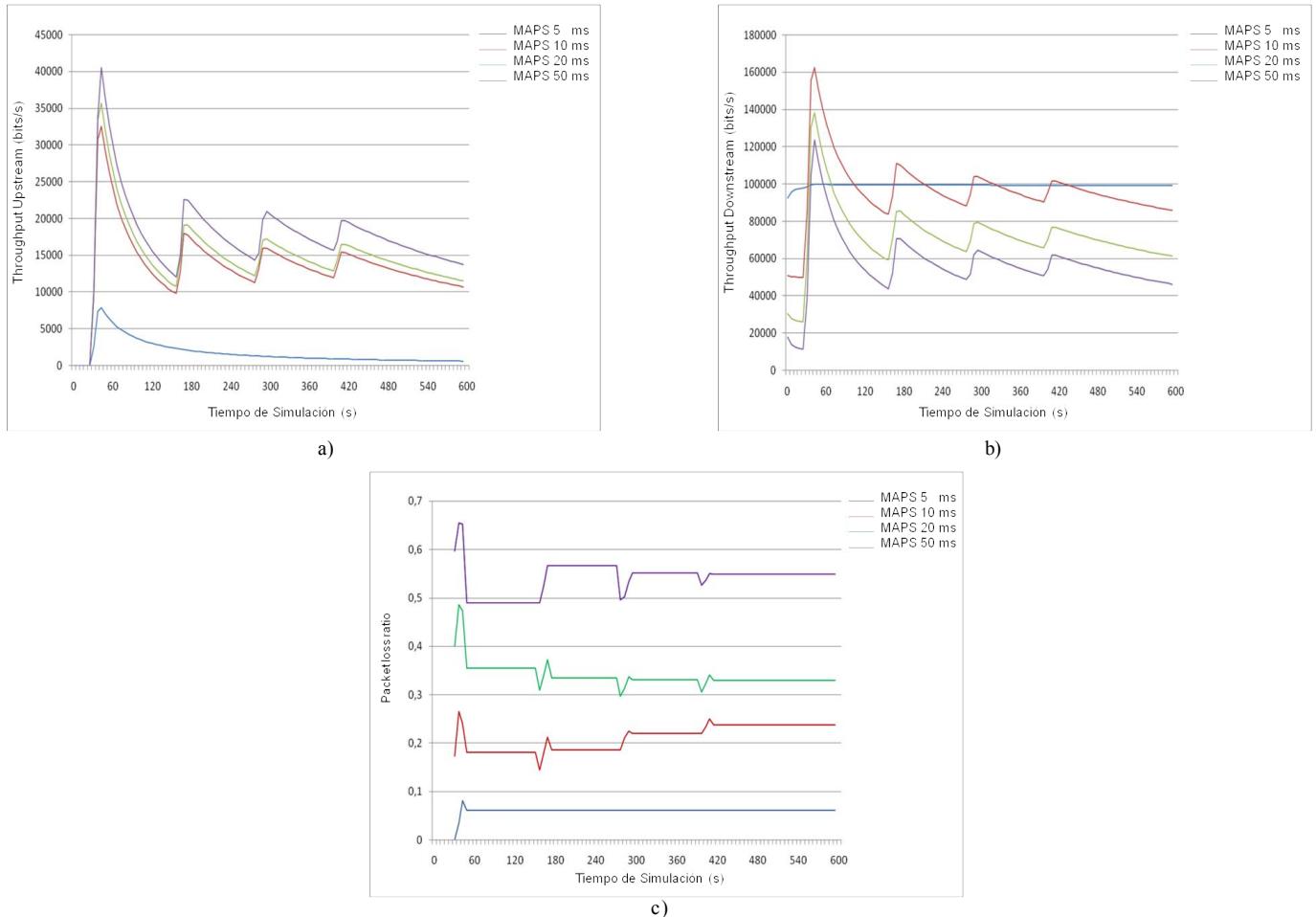
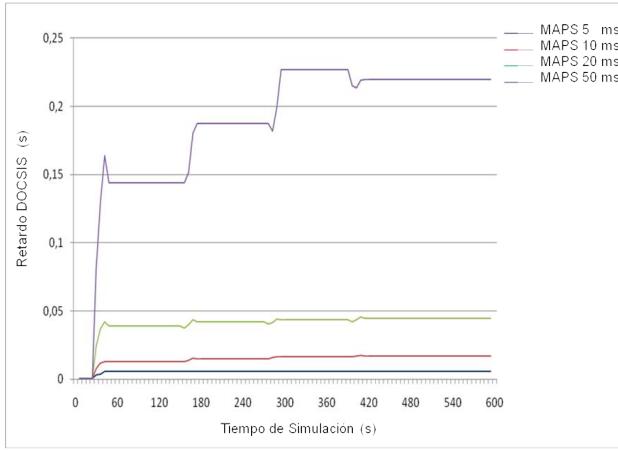


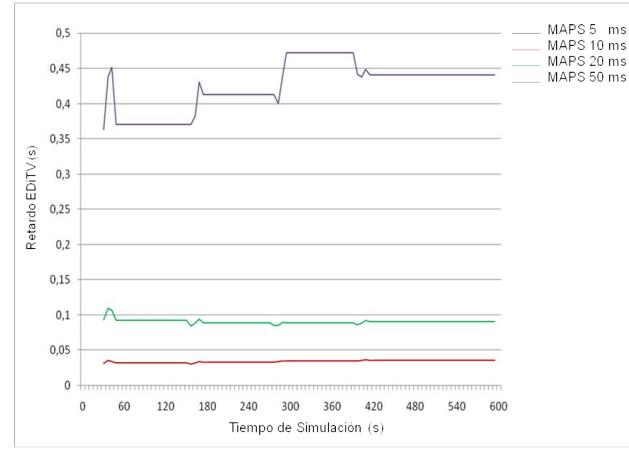
Figura 8. Throughput de los canales ascendente y descendente, y razón de pérdida de paquetes para diferente tiempo entre mensajes MAP para la aplicación de preguntas de selección múltiple.

En cuanto a los retardos, puede observarse en la Fig. 9 que al aumentar el tiempo entre MAP el retardo se incrementa llegando hasta 220 ms en el retardo DOCSIS y 450 ms en el retardo EDiTV



a)

cuando se configura un tiempo entre MAP de 50 ms, lo cual afecta considerablemente el rendimiento de la aplicación.



b)

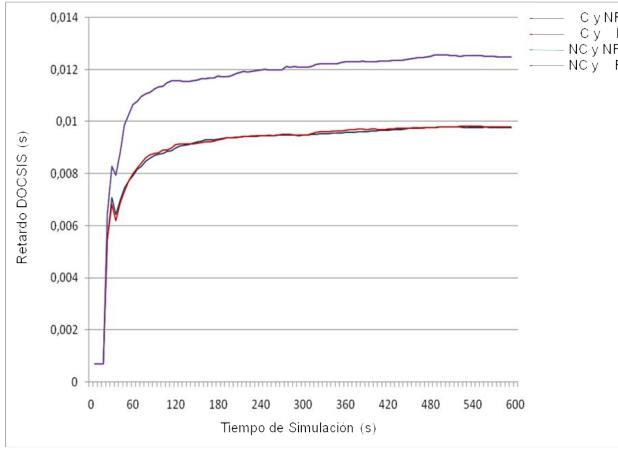
Figura 9. Retardo DOCSIS y retardo EDiTV para diferente tiempo entre mensajes MAP de la aplicación de preguntas de selección múltiple.

C. Efectos de la variación de los parámetros de calidad de servicio del protocolo DOCSIS sobre la transmisión de aplicaciones de TDi

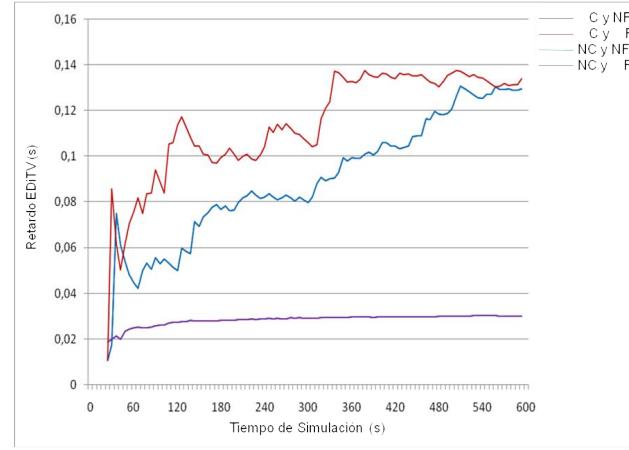
La fragmentación y la concatenación están pensadas para mejorar el rendimiento del canal ascendente y hacer un mejor uso de este recurso tan limitado en las redes HFC [5]. De esta manera, y para analizar los efectos que estos métodos pueden tener sobre la transmisión de información de las aplicaciones de TDi objeto de estudio, se realizaron la simulación de diferentes escenarios habilitando y deshabilitando estos dos mecanismos con la configuración del protocolo DOCSIS de la tabla 2 para 125 usuarios. En las gráficas que se presentan a continuación se tienen las siguientes convenciones: C: Concatenación Habilitada, NC: Concatenación Deshabilitada,

F: Fragmentación Habilitada y NF: Fragmentación Deshabilitada.

Para la aplicación EDiTV0, la Fig. 10a muestra que con el mecanismo de concatenación habilitado se disminuye el retardo DOCSIS, en tanto que la fragmentación casi no tiene efectos sobre el tráfico generado por las aplicaciones de TDi. En los escenarios que tienen deshabilitada la concatenación el retardo DOCSIS se incrementa hasta 12.5 ms, y como se puede ver las gráficas resultantes están traslapadas. Caso contrario ocurre con el retardo EDiTV (Fig. 10b), donde los peores casos están cuando se habilita la concatenación con lo cual se alcanza el límite del retardo permitido para proporcionar calidad de servicio; por su parte la fragmentación no tiene efectos y mantiene el retardo EDiTV con valores aceptables alrededor de 30 ms.



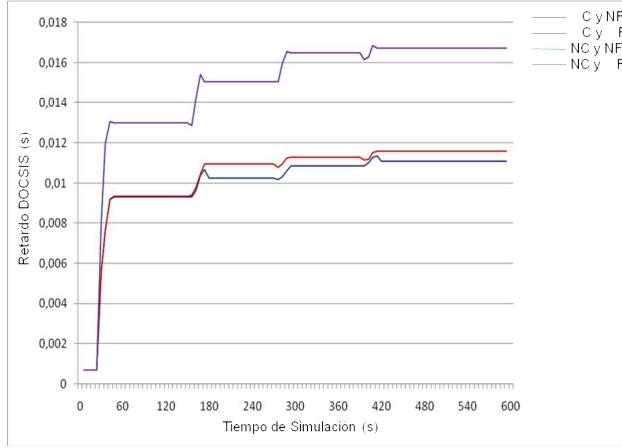
a)



b)

Figura 10. Retardo DOCSIS y retardo EDiTV para diferentes combinaciones de concatenación y fragmentación para la aplicación de solicitud de información adicional.

Ahora con la aplicación EDiTV1, en la Fig. 11 se muestra que con el mecanismo de concatenación habilitado el retardo DOCSIS disminuye, mientras que para las dos combinaciones restantes este se incrementa hasta 16.5 ms. Por su parte, se obtienen los



a)

Figura 11. Retardo DOCSIS y retardo EDiTV para diferentes combinaciones de concatenación y fragmentación para la aplicación de preguntas de selección múltiple.

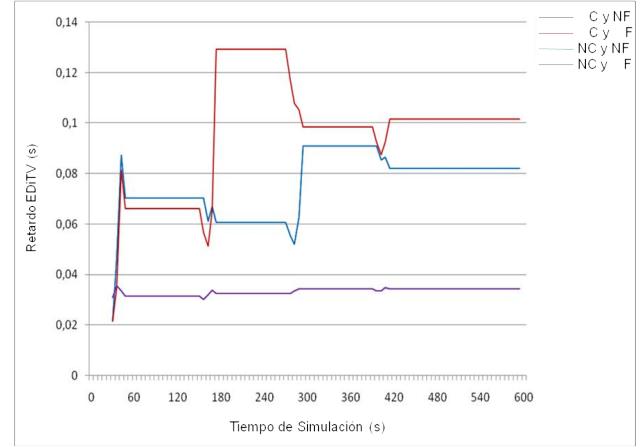
VII. CONCLUSIONES

La aplicación TDi, de preguntas con respuesta de selección múltiple (EDiTV1) tiene un comportamiento a ráfagas, que si bien genera paquetes pequeños exige un adecuado manejo de la red debido a las múltiples trasmisiones que el CMTS debe atender en instantes de tiempo determinados. De esta manera si se asegura que para esta aplicación los retardos están dentro de los límites establecidos por las recomendaciones, se asegura también un óptimo funcionamiento para otras aplicaciones de TDi menos exigentes. Por otra parte, la aplicación EDiTV0 que está enfocada a la petición de información adicional cuando los contenidos están disponibles, maneja solicitudes de imágenes y texto asemejándose a la navegación Web liviana dado que para la transferencia de información usa el protocolo HTTP.

El tráfico agregado generado por las aplicaciones de TDi supone un consumo considerable de recursos que deben ser proporcionados por la red para que el funcionamiento de las aplicaciones este dentro de los límites de retardo y pérdida de paquetes, razón por la cual es necesaria una adecuada configuración del protocolo MAC cuando las aplicaciones entren a competir por los recursos con otras aplicaciones como Voz sobre IP (VoIP), FTP o HTTP.

El incremento del tiempo entre MAP afecta el throughput y el retardo de la red y de las aplicaciones, por lo tanto, para las aplicaciones de TDi en las que el tráfico tenga puntos de afluencia, como resultado de que el tiempo entre respuestas esté descrito por una distribución normal, y para aplicaciones típicas de solicitud de información adicional, donde las peticiones se distribuyen de manera exponencial, se recomienda

peores resultados del retardo EDiTV (Fig. 11b) cuando se habilita la concatenación alcanzándose valores cercanos a los 100 ms; entre tanto la fragmentación no tiene efectos y mantiene el retardo EDiTV con valores aceptables alrededor de 35 ms.



b)

configurar este parámetro entre 10ms y 20ms con lo cual es obtienen retardos y consumo de ancho de banda aceptables.

Los mecanismos de fragmentación y concatenación reducen el retardo DOCSIS de la red, la fragmentación por su parte, no tiene efectos muy apreciables sobre las aplicaciones EDiTV ya que los paquetes intercambiados entre el servidor de EDiTV y los clientes son muy pequeños, de tal manera que en ningún momento se presenta una concesión parcial. Por su parte, la concatenación si se aplica para los paquetes de EDiTV, pero aunque disminuye el retardo a nivel MAC introduce retardo las aplicaciones EDiTV (retardo EDiTV) siendo así perjudicial para el funcionamiento de estas aplicaciones.

Como trabajos futuros, se deben realizar estudios sobre aplicaciones tipo vídeo que se descarguen a través del canal de retorno. Evaluando el rendimiento ante diferentes configuraciones del servicio en conjunto con otras aplicaciones, para determinar las capacidades de la red de acceso HFC y su protocolo DOCSIS.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo formó parte del proyecto EDiTV [23], el cual fue apoyado por el Ministerio de Educación Nacional de Colombia y COLCIENCIAS (Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología, Francisco José de Caldas) a través del proyecto 110339320026.

A Roberto García Fernández, profesor titular del Departamento de Informática de la Universidad de Oviedo (España), por su apoyo y soporte en el uso de la herramienta de simulación OPNET Modeler para llevar a cabo este trabajo.

REFERENCIAS

- [1]Amaya J.P., Urbano F.A., Campo W. Y., Arciniegas J. L., 2008. Infraestructura Tecnológica para un laboratorio experimental de Televisión Digital interactiva. Congreso colombiano de comunicaciones - Colcom, Popayán, Colombia.
- [2]Barakat N.y Darcie T. E., 2007. Delay characterization of cable access networks. En: IEEE Communications Letters, vol. 11, no. 4, pp 357 - 359.
- [3]Campo W. Y., 2009. Análisis de Tráfico para una Red HFC Generado por la Distribución de Contenidos Educativos para la Televisión Digital Interactiva. Tesis de Maestría en Ingeniería Telemática. En: Universidad del Cauca, Popayán - Colombia
- [4]Campo W. Y.; Lara A.; Arciniegas J. L.; García R.; Melendi D. y Pañeda X. G., 2009. Análisis de video bajo demanda utilizando el protocolo RTMP, sobre una red de cable. En: V Congreso Iberoamericano de Telemática - CITA 2009. Universidad de Oviedo, Gijón, España.
- [5]Cable Television Laboratories, Inc., 2007. Data-Over-Cable Service Interface Specification, DOCSIS 1.1, Radio Frequency Interface Specification.
- [6]ETSI EN 300 429 V1.2.1. 1998. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for cable systems.
- [7]ETSI ES 200 800 V1.3.1. 2001. Digital Video Broadcasting (DVB); DVB interaction channel for Cable TV distribution systems (CATV).
- [8]ETSI TS 102 812 V1.2.2. 2006. Digital Video Broadcasting (DVB); Multimedia Home Platform (MHP) Specification 1.1.1.
- [9]García M., 2002. Modelado de prestaciones de Redes de área metropolitana para la transmisión de datos, basadas en tecnología hibrida fibra-coaxial. Tesis Doctoral, Área de Ingeniería Telemática. En: Universidad de Oviedo, Gijón - España.
- [10]García M.; García D. F.; García V. G. y Bonis R., 2004. Analysis and Modeling of Traffic on a Hybrid Fiber-Coax Network. En: Journal on Select Areas in Communications, Volume 22, Issue 9. IEEE, pp. 1718 - 1730.
- [11]García M.; García D. F.; García V. G.; García X. G. y Bonis R., 2002. Traffic Analysis of Data Transmission on Hybrid Fiber Coax Network. En: IASTED International Conference on Communication Systems and Networks. Málaga - España.
- [12]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. En: Universidad de Oviedo, Gijón - España.
- [13]García R.; García V. G.; Pañeda X. G.; Melendi D. y Neira A., 2004. Aggregated traffic generation in FTTX networks. International Conference on Applied Computing. Lisboa - Portugal.
- [14]García X., 2004. Análisis, modelado y configuración de servicios de video bajo demanda sobre redes de cable, Tesis Doctoral, Área de Ingeniería Telemática. En: Universidad de Oviedo, Gijón - España.
- [15]Jokipelto P., 2006. Modelling and content production of distance learning concept for interactive digital television. Tesis Doctoral. Universidad de Tecnología de Helsinki, Finlandia. Documento PDF disponible en: <http://lib.tkk.fi/Diss/2006/isbn9512285428/>
- [16]Meritxell E., Interactividad e interacción, Departamento de Pedagogía, Universidad de Girona. España. En: http://diainet.unirioja.es/servlet/fichero_articulo?codigo=1252603&orden=89124
- [17]Modeler Documentation Set. Version: 12.0. 2006. OPNET Technologies.
- [18]Muñiz I., 2006. La Evolución de la Especificación DOCSIS (Parte 1)". CINIT, México. En: <http://www.cinit.org.mx/articulo.php?idArticulo=35>
- [19]Recomendación ITU-T G.1010., 2001. Categorías de calidad de servicio para los usuarios de extremo de servicios multimedia.
- [20]Recomendación ITU-T J.112., 1998. Sistemas de transmisión para

servicios interactivos de televisión por cable.

- [21]Rege K. y Sun D., 2005. A simple analytical model to estimate VoIP signaling delays in an HFC access network. En: GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference, pp. 1344 - 1348.

- [22]Rueda D.F., Taimal I. R., Campo W. Y. y Arciniegas J. L., 2009. Caracterización de la distribución de contenidos de iTV en el canal interactivo de la red HFC. En: V Congreso Iberoamericano de Telemática - CITA 2009. Universidad de Oviedo, Gijón, España.

- [23]Sitio Web del Proyecto Educación Virtual basada en Televisión Digital Interactiva para apoyar procesos educativos a distancia - EDiTV. En: <http://www.unicauca.edu.co/EDiTV>

- [24]Sitio web del Grupo de Ingeniería Telemática GIT de la Universidad del Cauca. En: <http://git.unicauca.edu.co/>

Wilmar Yesid Campo Muñoz. Ha recibido los títulos de Magíster en Ingeniería, Área Telemática; Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca y actualmente es candidato a Doctor en Ingeniería Telemática de la misma Universidad. Ha ejercido profesionalmente como Investigador en diferentes proyectos en el ITEC Telecom y en la Universidad del Cauca. Entre sus campos de interés están la Gestión de redes, la Televisión Digital Interactiva y el Teletráfico. El Ingeniero Campo forma parte del Grupo GIT de la Universidad del Cauca donde ha propuesto, elaborado y participado en la ejecución de varios proyectos de Televisión Digital interactiva como; EDiTV, MT2TDi, ST-CAV



Diego Fernando Rueda Pepinosa. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones graduado en la Universidad del Cauca, Colombia. Actualmente se desempeña como Profesional de Proyectos en el Centro de Investigación de las Telecomunicaciones (CINTEL) y es miembro de la Asociación Colombiana de Ingenieros – ACIEM. Entre sus áreas de interés se destacan las Redes y Servicios de Nueva Generación, la Televisión Digital Interactiva, el Análisis de Tráfico y el Desarrollo de Aplicaciones Web. Participó en la ejecución del proyecto de investigación sobre Televisión Digital interactiva EDiTV desarrollado en la Universidad del Cauca.



Iván Ricardo Taimal Narváez. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones graduado de la Universidad del Cauca, Colombia. Actualmente está vinculado a la División de Sistemas de la Universidad del Cauca. Su interés está centrado en las Redes de Nueva Generación, la Seguridad en Redes, el Análisis de Tráfico y el Desarrollo de Aplicaciones Móviles.



José Luis Arciniegas Herrera. Ha recibido los títulos de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones y Especialista en Redes y Servicios Telemáticos de la Universidad del Cauca; y Doctor en Ingeniería de Sistemas Telemáticos de la Universidad Politécnica de Madrid. Se desempeña como docente adscrito al Departamento de Telemática de la Universidad del Cauca. Entre sus campos de interés están el Desarrollo del Software Evolutivo, Arquitectura del Software, Sistemas de Tiempo Real y la Televisión Digital Interactiva .El Ingeniero Arciniegas forma parte del Grupo GIT de la Universidad del Cauca donde ha liderado varios proyectos de televisión Digital interactiva, EDiTV, MT2TDi y ST_CAV.