

**XXVII CONVOCATORIA DE PREMIOS
“Ingenieros de Telecomunicación” 2006
Colegio Oficial Ingenieros de Telecomunicación**

TESIS DOCTORAL

**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**

ÁREA DE INGENIERÍA TELEMÁTICA

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Roberto García Fernández

ÍNDICE DE CONTENIDOS

LISTA DE FIGURAS	2
LISTA DE TABLAS	2
1 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO	3
1.1 ORIGEN	4
1.2 OBJETIVOS Y DESARROLLO DE LA TESIS DOCTORAL	6
1.3 CONCLUSIONES	7
2 ORIGINALIDAD	9
3 RESULTADOS.....	12
3.1 INGENIERÍA DE TRÁFICO EN REDES DE CABLE.....	12
3.2 METODOLOGÍA DE MODELADO.....	12
3.3 ANÁLISIS DE TRÁFICO EN LA RED DE CABLE	12
3.4 MODELO DE GENERACIÓN DE TRÁFICO.....	13
3.5 MODELO DE LA RED DE CABLE	13
3.6 CARACTERIZACIÓN DEL SERVICIO DE VÍDEO BAJO DEMANDA	14
3.7 MODELO DE VIDEO BAJO DEMANDA SOBRE REDES DE CABLE	14
4 APLICABILIDAD.....	15
ANEXO I: FINANCIACIÓN POR PARTE DE INSTITUCIONES O EMPRESAS PÚBLICAS Y PRIVADAS	17
ANEXO II: PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS DOCTORAL	19
ANEXO III: REFERENCIAS AL TRABAJO POR PARTE DE OTROS INVESTIGADORES	21

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de los servicios instalados por el operador Telecable Asturias S.A.U.	6
Figura 2. Servicios portadores, servicios básicos y servicios de valor añadido	15
Figura 3. Fases del proceso de modelado de un sistema	15

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Abonados a los servicios de banda ancha en 2004 según datos de OECD	5
--	---

1 Descripción del trabajo

El gran crecimiento experimentado en los últimos años por las tecnologías de la información, debido principalmente a la expansión de Internet, ha supuesto un considerable incremento tanto en el número de usuarios y volumen de tráfico generado en las redes de telecomunicaciones como en los servicios y aplicaciones que se ejecutan en estas redes. Asimismo, las actuales redes de telecomunicaciones deben ser capaces de proporcionar la integración de servicios de televisión, voz y datos.

En estas condiciones, la aparición de nuevos servicios ha llevado aparejado un incremento considerable en el consumo de recursos en las redes, así como en los dispositivos que hacen uso de ellas, provocando situaciones en las que se produce una degradación inesperada en el rendimiento de sistemas que estaban trabajando de forma eficiente. Estas circunstancias han motivado el estudio de las propiedades estadísticas del tráfico que se genera en una red, determinado por el comportamiento de los usuarios y por las acciones de los protocolos implicados en las comunicaciones entre los diferentes elementos de la red.

La realización de análisis previos ayudará a determinar el impacto que tendrán los nuevos servicios en el futuro, además de tomar las precauciones necesarias para evitar los posibles problemas que puedan aparecer, lo que provocaría el consecuente descontento de los usuarios y la mala imagen que se proyecta del servicio. Estos análisis previos, si están hechos con el rigor y la precisión necesaria, permitirían prever el comportamiento del sistema sin la necesidad de desplegar grandes infraestructuras, evitando, con ello, los elevados costes de desarrollo que conlleva.

El trabajo presentado en esta Tesis Doctoral se enmarca dentro del campo de la evaluación de prestaciones de los sistemas de telecomunicación, mediante la propuesta de un modelo de red de acceso de fibra óptica para la transmisión de voz y datos. Para ello, se han tenido en cuenta tres factores fundamentales para la implementación del modelo: número de usuarios en el sistema, comportamiento de los usuarios y protocolo de acceso al medio utilizado.

Por otra parte, debido a que las redes de cable se empleaban tradicionalmente para la transmisión de señales de televisión, son pocos los estudios existentes sobre este tipo de redes encaminados a la transmisión de voz y datos. Las contribuciones de esta Tesis han sido, por un lado, la realización de análisis estadísticos de tráfico a partir de datos reales sobre el comportamiento de una red de telecomunicaciones con más de 49000 abonados. Estos análisis han permitido la caracterización del comportamiento de los usuarios en base a las aplicaciones que utilizan, así como la determinación del número de usuarios conectados al sistema. Posteriormente, se ha realizado un modelo de red cuyos resultados han sido convenientemente validados a partir de las medidas reales de tráfico en la red.

Puesto que el protocolo de acceso al medio más extendido en este tipo de redes es el protocolo DOCSIS, se ha realizado un exhaustivo análisis del protocolo a partir de sus estándares. El estudio ha permitido la realización de una ingeniería de tráfico para las redes de cable teniendo en cuenta las particularidades del protocolo, así como las necesidades de carga que debe soportar. 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.

Una vez caracterizada estadísticamente la carga del tráfico de datos, analizado el consumo de recursos del tráfico de voz y considerando el comportamiento del protocolo de acceso al medio, se ha realizado un modelo completo del sistema que permita

analizar el rendimiento de la red ante la transmisión de tráfico de voz y datos. Se han medido las cargas de tráfico inducidas por cada una de las aplicaciones, la carga de tráfico de voz, además del tráfico agregado en todos los nodos y enlaces en la red. Los resultados del modelo han sido validados estadísticamente a partir de la información capturada en la red utilizada como caso de estudio, lo que avala la utilidad del modelo desarrollado.

El modelo de red que se ha implementado permite la realización de estimaciones acerca del comportamiento de la red ante situaciones distintas a las habituales. Así, se pueden realizar previsiones ante el aumento de usuarios en el sistema, ante la necesidad de añadir nuevas ramas a la red existente, el aumento de tráfico debido a la implantación de nuevos servicios, las prestaciones de la red ante la introducción o modificación de dispositivos de tratamiento de la señal de voz, fallos en algún nodo o enlace de la red, o cualquier otra circunstancia que pudiera producirse.

Finalmente, se ha realizado un modelo de un servicio de video bajo demanda sobre redes de cable. Para ello, basándose en la monitorización, a lo largo de 4 años de implantación, de un servicio real, se ha caracterizado estadísticamente su comportamiento y se ha diseñado un modelo del servicio. La simulación del modelo del servicio sobre el modelo de red permitirá la evaluación de las prestaciones de ambos, además de prever su comportamiento y rendimiento ante situaciones diversas, distintas del funcionamiento habitual.

1.1 Origen

Al proporcionar un medio de acceso a Internet, las redes de acceso de banda ancha están creciendo considerablemente tanto en tamaño y capacidades, como en influencia en la población. A pesar de que los abonados de estas redes tienen que pagar una cantidad de dinero cada mes por contar con el privilegio de una conexión de banda ancha, el número de personas que deciden hacer esta inversión está creciendo espectacularmente en los últimos años. Un grupo de investigación, In-Sat/MDR, indicaba que el número de suscriptores de banda ancha residencial alcanzaba los 46 millones a finales de 2002. Estos números son bastante significativos de la expansión que ha sufrido el sector, considerando que la banda ancha solamente se encontraba disponible comercialmente a gran escala en el año 1999. En el año 2001, los suscriptores de banda ancha en los países desarrollados alcanzaban los 31 millones, de acuerdo con el informe emitido por la Organización para la cooperación y desarrollo económico (OECD). A finales de 2002, esta organización hacía otra estimación de los abonados a la banda ancha en todo el mundo, cifrada en más de 40 millones de usuarios. Teniendo en cuenta que este crecimiento no ha dado todavía síntomas de debilidad, In-Sat/MDR, pronosticaba más de 60 millones de abonados para finales de 2003, aumentado hasta 130 millones para el año 2006. Solamente en Estados Unidos, más de 50.000 hogares se conectan a la banda ancha cada semana, según datos de 2004.

La forma en que este creciente número de usuarios recibe los servicios de banda ancha es un incentivo para la mejora de las redes de comunicaciones. De los más de 118 millones de clientes de la banda ancha residencial en diciembre de 2004 (10.3% del total de habitantes de los países OCDE), la mayoría (61 %), recibe los servicios a través de DSL (*Digital Subscriber Line*), mientras que el 33 % son atendidos mediante redes de cable. Los restantes (6 %), acceden a los servicios de banda ancha con wireless u otras redes de distribución. En la Tabla 1 se indican los datos del número de abonados a la banda ancha por países, según información publicada por la OECD en julio de 2005. Se muestran, por simplicidad, solamente los resultados en algunos de los países más significativos.

País	DSL (%)	Cable (%)	Otros (%)	Total (%)	Rank	Total Abonados
Korea	14.1	8.5	2.2	24.9	1	11 921 439
Netherlands	11.6	7.4	0	19.0	2	3 084 561
Canada	8.6	9.1	0.1	17.8	5	5 631 714
Switzerland	10.8	6.5	0	17.3	6	1 282 000
Belgium	9.6	6.0	0	15.6	7	1 618 944
Japan	10.4	2.3	2.3	15.0	8	19 097 172
United States	4.7	7.4	0.9	13.0	12	37 900 000
France	9.9	0.7	0	10.6	13	6 529 997
United Kingdom	7.1	3.4	0	10.5	14	6 256 300
Spain	6.4	2.0	0	8.4	17	3 441 630
Portugal	4.0	4.2	0	8.2	19	858 418
Total	6.2	3.4	0.7	10.3		118 599 112

Tabla 1. Abonados a los servicios de banda ancha en 2004 según datos de OECD

Puede observarse la gran influencia que las redes de cable tienen en el acceso a los servicios de banda ancha. A nivel global, más del 33% de los abonados se conectan mediante esta tecnología, siendo en países como EEUU, Holanda, Canadá o Portugal donde esta contribución de las redes de cable es más significativa. En España, más de 800.000 abonados utilizan esta tecnología de acceso, creciendo considerablemente en número de suscriptores en los últimos años.

Particularizando todavía más, en Asturias, el operador de cable Telecable Asturias, SAU, tomado como caso de estudio para validar los resultados del modelo realizado, sirve a más del 50% de los abonados a la banda ancha del Principado. Distintos estudios han subrayado que el del área central de Asturias, donde coexisten la red de Telefónica y la de fibra óptica del operador asturiano, es uno de los pocos ejemplos españoles de competencia real en telecomunicaciones. En la Figura 1 puede observarse la evolución de los servicios instalados en la red del operador de cable. Puede apreciarse cómo, a finales de 2003, el número de conexiones a Internet por banda ancha alcanzó las 37709, incrementándose hasta 49794 a finales de 2004, según Telecable.

Indicadores como los resaltados en la Tabla 1 y la Figura 1 han motivado el trabajo realizado en esta Tesis Doctoral acerca de las redes de cable. El constante aumento en el número de abonados a las redes de cable y la creciente demanda de banda ancha para el acceso a los servicios que proporcionan las tecnologías de la información hacen necesarios estudios acerca de las prestaciones de estas redes de telecomunicaciones. Un análisis detallado de su estructura, los protocolos empleados en las comunicaciones de datos y los volúmenes de tráfico que se manejan, repercutirá en la mejora de los servicios proporcionados a sus abonados. Los modelos de redes que se construyan deben ser precisos y reflejar lo más fielmente el comportamiento de la red y de sus usuarios. De esta forma, las previsiones acerca del consumo de recursos en la red y de sus prestaciones supondrán un ahorro considerable de tiempo y de costes de implantación.

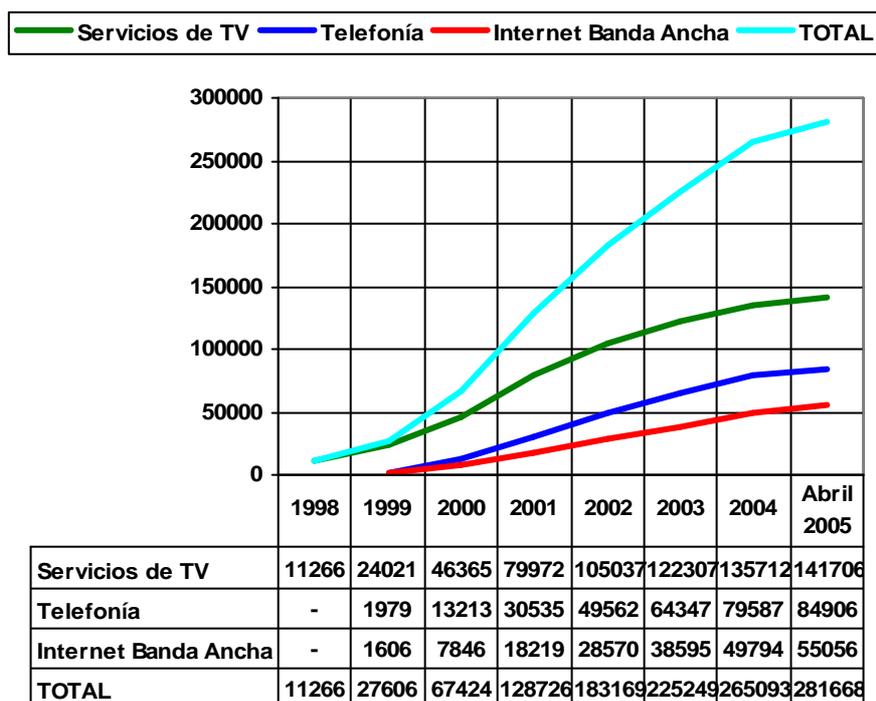


Figura 1. Evolución de los servicios instalados por el operador Telecable Asturias S.A.U.

1.2 Objetivos y desarrollo de la Tesis Doctoral

En esta Tesis se plantea el objetivo de desarrollar un modelo de una red de acceso de fibra para la transmisión de voz y datos, teniendo en cuenta aspectos relacionados con la implementación de diferentes calidades de servicio y la posterior verificación y validación de los resultados obtenidos.

Los resultados del modelo serán validados a partir de la información capturada durante el funcionamiento de una red de acceso de fibra óptica ya implantada que reúne las siguientes condiciones:

- La red cuenta con más de 49000 abonados
- Los abonados acceden libremente a cualquier tipo de servicio
- Las características de los usuarios del servicio no se limitan a entornos específicos
- No hay restricciones acerca del comienzo y la duración de las conexiones
- La topología de la red permite llegar con fibra óptica hasta el área de servicio (FTSA)
- La red de cable utiliza DOCSIS como protocolo de acceso
- El operador proporciona servicios de voz y datos

En este entorno tan heterogéneo se tratará de caracterizar todos los elementos que intervienen en la comunicación.

Para alcanzar este objetivo general se han establecido los objetivos parciales que se enumeran a continuación:

- Análisis de una red de cable real. Se pretende realizar un análisis del tráfico en una red de cable que incorpore los nuevos elementos que continuamente aparecen en un entorno cambiante como son las telecomunicaciones.

- Modelado del tráfico de red. Con la información de la etapa de análisis se realizará un modelo de carga de tráfico que refleje el uso que los abonados al sistema hacen de las diferentes aplicaciones.
- Estudio y modelado del protocolo acceso. Se estudiará en detalle el comportamiento del protocolo de acceso DOCSIS, utilizado en la red objeto de modelado. Una vez determinado el funcionamiento del protocolo y analizadas sus posibilidades de transferencia de información mediante ingeniería de tráfico de datos y voz se realizarán simulaciones que verifiquen los cálculos realizados.
- Análisis del comportamiento con diferentes QoS. Otro aspecto significativo del protocolo utilizado es la posibilidad de ofrecer varias calidades de servicio. Por ello, se analizará el comportamiento del protocolo en esas circunstancias, teniendo en cuenta la naturaleza de la información a enviar así como la política de acceso al canal.
- Simulación de la transmisión de VoIP. Una vez caracterizada la carga de tráfico en la red y analizado el protocolo de acceso, se evaluará el rendimiento de la red de fibra mediante la transmisión telefónica sobre IP en presencia de tráfico de datos. La simulación será realizada utilizando DOCSIS como protocolo de acceso.
- Validación estadística del modelo. Se contrastarán los datos obtenidos por el modelo con datos reales proporcionados por la compañía Telecable de Asturias S.A.U.
- Realización de simulaciones. Con ánimo de evaluar las prestaciones de la red y hacer predicciones sobre comportamientos en condiciones diferentes a las habituales, se realizarán simulaciones que permitan analizar diferentes parámetros como el consumo de recursos, la escalabilidad, la calidad de servicio y la respuesta de la red ante el constante aumento tanto de abonados como de tráfico generado.
- Modelado de un servicio de video bajo demanda. Para evaluar el comportamiento de un servicio real sobre la red de cable analizada, se ha diseñado un modelo de video bajo demanda basándose en la monitorización de un servicio real. Se realizarán simulaciones de este servicio sobre la red de cable, de forma que permitan validar el modelo diseñado, además de evaluar el rendimiento del servicio en la red ante diferentes situaciones que puedan presentarse.
- Obtención de conclusiones. Con los resultados de las simulaciones se tratará de obtener conclusiones sobre el comportamiento de la red de cable, así como de las posibilidades de implementar nuevos servicios sobre este tipo de redes.

El modelo final desarrollado deberá reflejar lo más fielmente posible el comportamiento de los diferentes elementos que componen la red. También deberá ser escalable, de forma que se puedan ir añadiendo más elementos y usuarios a la red, además de permitir la modificación y sustitución de aquellos dispositivos que se considere necesarios. Finalmente, a medida que se van desarrollando nuevos servicios, éstos podrán ser incorporados al modelo de red para evaluar su incidencia en el conjunto y analizar el efecto sobre el rendimiento del resto de aplicaciones ya implantadas.

1.3 Conclusiones

En esta Tesis se ha propuesto un modelo de red que simula el comportamiento de los abonados al operador de cable. Se ha analizado el tráfico en la red y desarrollado un modelo de carga que permite estudiar su comportamiento en condiciones similares al funcionamiento real del sistema. Como complemento al análisis de tráfico en la red de

cable se ha desarrollado un modelo de un servicio de vídeo bajo demanda y se ha estudiado su comportamiento ante distintas configuraciones de la red.

Como paso previo al desarrollo del modelo, se ha analizado el protocolo de acceso (DOCSIS), de forma que se han realizado una serie estimaciones para determinar la capacidad de transferencia de información del sistema. Asimismo, se han simulado varios escenarios con el objetivo de encontrar los parámetros de configuración más adecuados para un correcto funcionamiento de las aplicaciones que se ejecutan en la red. Se han tenido en cuenta aspectos tales como las opciones de QoS, los diferentes tipos de servicio, así como configuraciones fundamentales en el rendimiento del protocolo. La inclusión de servicios de voz en las redes de cable conlleva la necesidad de una adecuada configuración de QoS. Mediante la opción UGS se hace posible la inclusión de este servicio.

Para permitir la simulación de redes de cable de grandes dimensiones se ha establecido una metodología de modelado. De esta forma, se evalúan en detalle aquellos aspectos de interés en la red, sin pérdida de precisión en los resultados y con unos tiempos de ejecución relativamente cortos.

La información proporcionada por el operador de cable ha sido analizada en detalle. Se ha caracterizado el tráfico en los controladores de la red, tanto en sentido descendente como en retorno. La evolución en la asignación de direcciones en el servidor DHCP ha permitido conocer el número de abonados conectados al sistema en cada instante, además de aportar una justificación a los valores mínimos y máximos de intensidad de tráfico en los controladores. También se ha monitorizado el tráfico en los routers de salida hacia Internet, lo que ha posibilitado caracterizar de forma individualizada el tráfico por aplicaciones. Se ha demostrado que el tráfico *peer-to-peer* es mayoritario en la red de cable, contribuyendo con porcentajes del orden del 90% al tráfico total.

Con la información de tráfico caracterizada se ha diseñado un modelo de generación de tráfico en el que se ha tenido en cuenta la evolución de los usuarios conectados a cada uno de los controladores y el grado de utilización en los accesos. Los resultados del modelo han sido validados estadísticamente, mostrando, además, que el tráfico en la red de cable y el modelo presenta la propiedad de autosimilitud. Se ha simulado el comportamiento de la red, analizando el tráfico en los puntos de interés, demostrándose que, con el número de abonados actual, la infraestructura de red es capaz de soportar con holgura los volúmenes de tráfico que se generan en todas las subredes.

Para evaluar el rendimiento de nuevos servicios sobre la red de cable se ha analizado el comportamiento de un servicio de vídeo bajo demanda, basado en la monitorización del servicio real LNE TV. El modelo construido ha sido validado y se ha simulado en distintos escenarios de red, trabajando en condiciones similares a la carga real de la red. Las diversas configuraciones disponibles en el modelo del servicio permiten evaluar su rendimiento en la red de cable, de forma que puede hacerse un análisis de previsiones acerca de futuras situaciones que pudieran plantearse.

2 Originalidad

Resumiendo las aportaciones de esta Tesis Doctoral, se pueden sintetizar en:

- Se ha definido una metodología de modelado para las redes de cable. Los procesos de modelado de sistemas se han particularizado para una red de cable, teniendo en cuenta las peculiaridades de este tipo de redes. Las contribuciones, en este aspecto, han sido, la definición de una metodología para la simulación de las características de la red teniendo en cuenta la configuración de Calidades de Servicio. La metodología propuesta contempla la posibilidad de incluir los modelos de tráfico realizados como carga del modelo de red para la evaluación de prestaciones de la red de cable. El protocolo de acceso al medio en este tipo de redes juega un papel importante en el establecimiento de la metodología, siendo el causante de las topologías de red seleccionadas y de las configuraciones QoS en las ramas de acceso.
- Se han analizado los datos de tráfico proporcionados por el operador Telecable. Se ha estudiado la utilización de los distintos controladores en las ramas de acceso, la evolución del número de direcciones asignadas y la diferenciación del tráfico por aplicaciones, protocolos y redes. Para ello, se han desarrollado herramientas específicas para el análisis estadístico de los datos disponibles.
- El modelo de generación de tráfico tiene en cuenta las aplicaciones más significativas. No son muchos los trabajos sobre este tipo de redes, la mayoría de ellos centrados en el análisis de los protocolos de acceso. La generación de tráfico separado por aplicaciones y su agregación para obtener el volumen de tráfico total supone una aportación importante. La comparación de los resultados con el tráfico real avala la precisión del modelo desarrollado.
- Se ha comprobado que el tráfico en la red de cable es autosimilar. El tráfico que genera el modelo de carga también cumple la propiedad estadística de autosimilitud, validando esta propiedad mediante la comparación del coeficiente Hurst.
- El desarrollo de un modelo de red es un factor esencial a la hora de evaluar las prestaciones de la red de cable. No se trata únicamente de conocer el volumen de tráfico en los puntos y segmentos de interés en la red, sino que además ha de considerarse cómo las diferentes condiciones afectan a la calidad que los usuarios están percibiendo de los diferentes servicios. Otro aspecto crucial en la simulación de este tipo de redes, con una gran infraestructura de red y un elevado número de abonados, es el tiempo de ejecución de las simulaciones de los modelos planteados. Por ello, se han utilizado diferentes topologías. Cada una de las topologías empleadas tiene como objetivo estudiar aspectos de interés en la red de cable, procurando que las simulaciones se ejecuten en tiempos razonables. La combinación de simulaciones por eventos discretos y modelos analíticos proporciona unos resultados precisos con tiempos de ejecución no demasiado elevados.
- Aunque inicialmente se desarrollaron modelos para los dispositivos de red necesarios, finalmente se optó por utilizar los proporcionados por OPNET

Modeler, utilizando el tráfico generado como carga del sistema. La utilización de modelos específicos de proveedores, que se ajustan a las características reales de sus dispositivos, permite implementar cualquier topología, además de un diseño modular de las redes. La facilidad de uso permite que el modelo de red sea escalable, pudiendo adaptarse a la evolución de la red.

- La posibilidad de realizar pruebas con diferentes opciones de QoS en condiciones de carga de tráfico real es otro de los aspectos importantes que incorpora el modelo diseñado. El comportamiento de un determinado servicio puede analizarse en detalle, compitiendo el tráfico con el generado por las aplicaciones reales del sistema. Pueden probarse fácilmente distintas arquitecturas de red, combinando aspectos como ubicación de servidores, inclusión de proxies, nuevos dispositivos de red, para evaluar su incidencia en el rendimiento del servicio considerado.
- Los resultados de salida del modelo permiten obtener información acerca de los aspectos más destacables en la red. Así, además del tráfico en cada uno de los enlaces, utilización de los enlaces, paquetes transmitidos, estadísticas de los protocolos involucrados en la comunicación, el modelo permite la diferenciación del tráfico por aplicaciones y representa su evolución temporal. Estos resultados son directamente comparables con la información monitorizada en la red real. Se puede analizar el tráfico en puntos críticos de la red, predecir el comportamiento ante cambios en algunos de sus componentes, así como dimensionar la red adecuadamente ante un aumento en el número de abonados.
- El desarrollo de un modelo de servicio de audio/vídeo para evaluar su comportamiento en una red de cable, necesita la especificación de un método para la realización de experimentos con estos servicios. Como contribución de la Tesis Doctoral en este apartado, se indica, en primer lugar, la especificación de un método para la realización de experimentos de audio/vídeo en Internet [Pañeda et al, 2005].
- Por otra parte, se ha realizado un importante análisis sobre el comportamiento de los usuarios de un servicio de vídeo bajo demanda [Vilas et al, 2005] [Melendi et al, 2005]. Los datos reales de la implantación del servicio LNE TV, de La Nueva España Digital, han permitido realizar análisis para caracterizar aspectos como la cantidad de información de audio/vídeo transmitida, el número y duración de las pausas, la popularidad de los vídeos, así como otros aspectos representativos del funcionamiento del servicio. Comparado con otros trabajos previos, este estudio presenta varias ventajas, como son la gran variedad de contenido temático ofrecido a los usuarios, la interactividad del servicio, las diferentes duraciones de los vídeos, la implantación del servicio durante más de cuatro años, además de la variedad de accesos por parte de los usuarios, no estando restringido el acceso a un determinado grupo. Asimismo, se ha monitorizado, analizado y caracterizado estadísticamente el tráfico en el servidor de *streaming* [García et al, 2005c].
- El modelo de vídeo bajo demanda que se ha diseñado representa un avance significativo en el análisis de predicciones de este tipo de servicios. No se han encontrado trabajos anteriores de modelos para estos servicios, donde se tenga en cuenta el comportamiento de los clientes, el tipo de tráfico que se transmite y la dinámica de funcionamiento de los protocolos implicados en la comunicación.

- Además de abrir una nueva línea de trabajo en el modelado de estos servicios, se ha evaluado el rendimiento sobre las redes de cable. Todo esto permite la integración de nuevos modelos de servicios con el tráfico real, o estadísticamente semejante, existente en la red de cable.

3 Resultados

Se indican los resultados y contribuciones que se han obtenido en cada uno de los aspectos analizados en esta Tesis Doctoral. Así, se resaltan, de forma resumida los resultados obtenidos y las contribuciones en los temas de ingeniería de tráfico en redes de cable, metodología de modelado, análisis de tráfico en la red de cable, modelo de generación de tráfico, modelo de red de cable, caracterización del servicio de video bajo demanda, modelado del servicio video bajo demanda y análisis de comportamiento sobre las redes de cable.

3.1 Ingeniería de tráfico en redes de cable

En este apartado se han realizado una serie de estimaciones numéricas y simulaciones para determinar las posibilidades de transferencia de información de los sistemas basados en el protocolo DOCSIS. Se han tenido en cuenta, además de las especificaciones del protocolo, las particularidades de la red de cable para realizar un dimensionado de la red y estimar el ancho de banda necesario para dar servicio a un determinado número de abonados.

Finalmente, como última fase del análisis del comportamiento del protocolo se han realizado una serie de simulaciones encaminadas a determinar la configuración más adecuada de los diferentes parámetros. Se han tenido en cuenta los efectos de las configuraciones de diferentes tipos de servicio, posibilidades QoS y factores clave en el rendimiento del protocolo, como los tiempos entre llegadas de mensajes MAP. Los resultados muestran claramente la necesidad de realizar una adecuada configuración, aprovechando las posibilidades de QoS que ofrece la versión DOCSIS 1.1, más aún cuando se quiere ofrecer el servicio de telefonía sobre IP. La opción UGS permite la inclusión de este servicio, consiguiendo unos retardos en el tráfico de voz que cumplen holgadamente las especificaciones ITU-T.

3.2 Metodología de modelado

Debido a la magnitud de la red a simular, se hace necesario el establecimiento de una metodología de modelado para hacer frente a los elevados tiempos de ejecución que conllevaría una simulación completa de la red, contemplando todos los aspectos relevantes de su funcionamiento.

3.3 Análisis de tráfico en la red de cable

En este apartado se ha realizado un análisis de los datos de tráfico sumisitrados por el operador Telecable. En primer lugar, se ha analizado la evolución temporal del tráfico en la red, teniendo en cuenta el tráfico en los dos sentidos de transmisión *upstream* y *downstream*. A continuación, se han agrupado algunas características básicas de los perfiles de tráfico con el objetivo de encontrar relaciones entre ellas que sean aplicables en la realización del modelo de tráfico. Así, se han encontrado dependencias lineales, modeladas mediante rectas de regresión, entre algunas de las estadísticas analizadas.

Otro aspecto destacable en el análisis es la caracterización del número de abonados conectados al sistema. La evolución de la asignación de direcciones en el servidor DHCP se ha modelado mediante la transformada discreta del coseno, obteniendo unos resultados precisos a partir de un reducido número de coeficientes.

Por otra parte, el análisis realizado en el router de salida a Internet ha permitido diferenciar el tráfico por aplicaciones, protocolos, redes y operadores. Con el objetivo de realizar un modelo de tráfico diferenciado por aplicaciones se ha hecho más énfasis

en el análisis de este tipo de tráfico. Se ha comprobado que la mayor parte del tráfico en la red de cable corresponde a tráfico de aplicaciones *peer-to-peer*, corroborando con ello la tendencia creciente de este tipo de tráfico en los últimos años.

Otra contribución importante de la Tesis Doctoral que se presenta es que el modelo permite diferenciar el tráfico por servicios, de manera que el tráfico total en los controladores de la red está formado por la agregación del tráfico de estas aplicaciones. Utilizando estimadores de máxima similitud se han obtenido las distribuciones estadísticas con los parámetros que mejor se ajustan a los valores reales capturados en la red. La presencia de distribuciones de colas pesadas en la red de cable, como Weibull y Pareto, confirma los resultados obtenidos del análisis de tráfico realizado en otros tipos de redes. Este tipo de distribuciones son las causantes de la aparición de la autosimilitud del tráfico en las actuales redes de datos.

3.4 Modelo de generación de tráfico

En este apartado se ha realizado un modelo que permite la generación de tráfico en los controladores de la red de cable. Se han utilizado modelos ON/OFF para la caracterización de los volúmenes de tráfico. Además, se ha tenido en cuenta el uso que los abonados hacen del sistema, diferenciando entre intervalos de tiempo activos e intervalos de tiempo inactivos, donde el abonado no está haciendo uso de los servicios de comunicaciones.

Los resultados obtenidos han sido validados a partir de la información capturada en la red del operador de cable. Se ha comparado la evolución temporal del tráfico agregado, en los dos sentidos de transmisión. Para cuantificar la aproximación entre el modelo y el tráfico en la red se han calculado los intervalos de confianza con una certidumbre del 95%, observándose que, en la mayoría de los casos, el error obtenido se encuentra dentro del margen $\pm 3\%$. También se ha comparado la autocorrelación del tráfico, mostrando en todos los casos valores próximos a la unidad, tanto en el modelo como en el tráfico en la red. El cálculo del coeficiente de Hurst en los perfiles de tráfico ha permitido demostrar que el tráfico en la red de cable es autosimilar. El valor de este coeficiente se ha obtenido mediante los métodos de la varianza agregada y la estadística R/S. En todos los casos, el coeficiente de Hurst está por encima de 0.85, demostrando la autosimilitud del tráfico en la red de cable analizada y en el modelo diseñado.

Se ha validado la evolución temporal del tráfico por aplicación, la contribución de cada aplicación al tráfico total en la red, así como las distribuciones y parámetros empleados para la generación de tráfico. Cabe resaltar la presencia de distribuciones de colas pesadas, como Weibull o Pareto, para caracterizar el tamaño de los paquetes. Como se ha indicado en apartados anteriores, esta circunstancia es la causante de la autosimilitud del tráfico.

3.5 Modelo de la red de cable

Basándose en los análisis de tráfico y el modelo de carga realizados en apartados anteriores, se han realizado simulaciones del comportamiento de la red en las condiciones similares a las reales. Así, se ha estudiado el tráfico que se genera en cada una de las subredes de acceso, la utilización del *backbone*, el tráfico intercambiado por el operador de red con los proveedores de servicio de Internet y se han realizado una serie de simulaciones encaminadas a determinar el tráfico y el rendimiento de las aplicaciones en un controlador de la red.

Las conclusiones que se obtienen de los análisis realizados en este apartado indican que, en la red analizada, el sobredimensionamiento de la red de transporte le permite asumir

el tráfico generado en las subredes de acceso, trasladando a éstas los problemas derivados del crecimiento en número de abonados y el mayor uso que éstos hagan de los servicios de red. Mediante la incorporación de nuevos controladores al sistema, la red puede soportar los problemas de crecimiento comentados. La simulación de los escenarios que se presentan en las nuevas condiciones posibilita realizar estimaciones sobre los volúmenes de tráfico en los puntos críticos de la red, así como observar la incidencia que estas nuevas situaciones tienen sobre los servicios ofrecidos.

Finalmente, los escenarios que se presentan en este apartado reflejan el comportamiento real de la red del operador de cable, por lo que el rendimiento que puedan tener nuevos servicios en la red podría evaluarse sobre estos escenarios. Por consiguiente, con el objetivo de establecer una línea de trabajo encaminada a modelar el comportamiento de nuevos servicios y analizar su rendimiento sobre las redes de cable, el apartado siguiente está dedicado a la elaboración de un modelo de un servicio real de video bajo demanda. Siguiendo esta línea se podrían ir añadiendo nuevos modelos de servicios, como servicios de video en directo, radio en Internet, *peer-to-peer*, etc, y evaluar las incidencias que su implantación tiene sobre las redes de cable.

3.6 Caracterización del servicio de vídeo bajo demanda

Se ha especificado un método para la realización de experimentos de audio/vídeo en Internet [Pañeda et al, 2005]. Se ha realizado un análisis sobre el comportamiento de los usuarios de un servicio real de vídeo bajo demanda, cuyos resultados se presentan en [Vilas et al, 2005] [Melendi et al, 2005]. Asimismo, se ha monitorizado el tráfico en el servidor de *streaming* [García et al, 2005c]. Los resultados de este análisis indican que el tráfico UDP del servidor es el causante de la mayor carga de tráfico en el sistema, por lo que se ha caracterizado en detalle. Todas las trazas analizadas han demostrado que los vídeos codificados con CBR no presentan un comportamiento autosimilar. Los resultados han sido esenciales en la definición de un modelo del usuario que será integrado en el modelo del servicio completo.

3.7 Modelo de video bajo demanda sobre redes de cable

El modelo que se ha diseñado permite evaluar las prestaciones y el rendimiento de un servicio de audio/vídeo bajo demanda. Se ha implementado el modelo de forma que responda lo más ajustadamente posible al comportamiento real de los dispositivos implicados en el servicio. Las características del servicio LNE TV, con más de cuatro años de funcionamiento, 160000 reproducciones y más de 900 vídeos almacenados, proporcionan una base muestral suficiente para la validación del modelo.

Por otra parte, se ha integrado el modelo del servicio de audio/vídeo en el modelo de red FTSA construido en apartados anteriores. De esta forma, es posible evaluar su rendimiento en condiciones de carga reales, compitiendo por los recursos de la red con el resto de aplicaciones en el sistema. Además de analizar cómo se comporta el servicio en la red en situaciones diversas, es posible estudiar su incidencia sobre el resto de aplicaciones ya implantadas. Asimismo, la configuración de los parámetros del controlador puede afectar al comportamiento del servicio, por lo que el modelo posibilita este tipo de estudios. La utilización de las posibilidades de QoS puede ayudar a la mejora de las prestaciones de este tipo de servicios. No obstante, los resultados demuestran que con el tipo de servicio *best effort* los retardos de paquetes de audio/vídeo son prácticamente despreciables en todos los escenarios analizados. Téngase en cuenta que el tráfico mayoritario, de servidor a cliente, se transmite en sentido *downstream*, con lo que los retardos no son significativos.

4 Aplicabilidad

El marco de aplicación de la Tesis Doctoral es la evaluación de prestaciones de los servicios de telecomunicación, orientada principalmente al estudio de las redes de acceso por cable basadas en tecnologías HFC y FTTX.

La creciente utilización de nuevos servicios por parte de los usuarios, hace necesario un estudio de las posibilidades de las redes que determine su capacidad para atender la demanda. En la Figura 2 se puede observar que el trabajo realizado en esta Tesis Doctoral se encuentra enmarcado dentro de la evaluación de prestaciones de los servicios portadores, particularizando el estudio para las redes de cable. Además, con el objetivo de establecer una vía para la evaluación de servicios básicos sobre este tipo de redes, se ha realizado un modelo de un servicio de video bajo demanda y se han realizado las simulaciones necesarias para validar el modelo de servicio diseñado sobre el modelo de la red de cable.

SLA _{SVA}	e-commerce	e-admin	e-games	...	Servicios de Valor Añadido	PSSI	
SLA _{SB}	DNS	Correo	Navegación	P2P	...	Servicios Básicos	ISP/ASP
SLA _{SP}	Dial-up	ADSL	Cablemodem	GPRS	...	Servicios Portadores	Operador red

Figura 2. Servicios portadores, servicios básicos y servicios de valor añadido

Por otra parte, a pesar de no existir una metodología definida para llevar a cabo un estudio de prestaciones, son abundantes los autores que definen diversas estrategias de modelado. Estos trabajos establecen las técnicas estadísticas y los procesos empleados para el desarrollo de modelos y presentación de resultados. En esta Tesis Doctoral se propone una metodología específica para el estudio de prestaciones en redes de cable [García et al, 2004d].

Básicamente, en la Figura 3 se resumen los diferentes aspectos a tener en cuenta a la hora de modelar el comportamiento y prestaciones de un sistema.

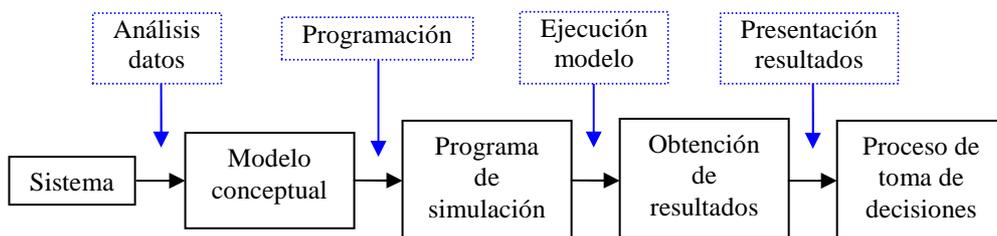


Figura 3. Fases del proceso de modelado de un sistema

A partir de la descripción del sistema físico que se pretende estudiar, la red de fibra óptica y el servicio de video bajo demanda en este caso, se realiza un análisis de los datos capturados para reflejar su funcionalidad. El análisis de la información disponible va a permitir la obtención de relaciones matemáticas que definen el comportamiento del sistema. De esta forma se obtiene el modelo conceptual. La programación y ejecución del modelo conceptual mediante la herramienta de simulación adecuada permiten

obtener una serie de resultados acerca del comportamiento del sistema real ante situaciones en las que se quiere evaluar su rendimiento. Mediante un apropiado proceso de toma de decisiones, a partir del análisis de los resultados obtenidos, se puede prever el comportamiento del sistema ante situaciones distintas a las habituales, evitando los costes asociados al despliegue de grandes infraestructuras de red.

ANEXO I: Financiación por parte de instituciones o empresas públicas y privadas

La Tesis Doctoral que se presenta ha recibido financiación por parte del Ministerio de Educación y Ciencia, del Principado de Asturias y de las empresas Telecable Asturias SAU y La Nueva España, a través de los proyectos de investigación que se indican.

Título del proyecto: “PLANIFICACIÓN, DISEÑO E INTEGRACIÓN DE SERVICIOS MULTIMEDIA Y DE TV INTERACTIVA ADAPTADOS A PERSONAS CON DISCAPACIDADES SOBRE REDES FTTX (REF: TSI2004-00979)”

- **Entidad financiadora:** MEC - Plan Nacional de I+D+I 2004-2007
- **Entidades participantes:** Universidad de Oviedo, Telecable de Asturias SAU, La Nueva España, Corvera TV, Asturias.com, COCENFE-Asturias
- **Duración, desde:** 1-01-2004 **hasta:** 1-01- 2007
- **Investigador principal:** Dr. D. Victor G. García García
- **Número de investigadores participantes:** 8
- **IMPORTE TOTAL DEL PROYECTO:** 110.000 €

Título del proyecto: Ampliación al proyecto “PLANIFICACIÓN, DISEÑO E INTEGRACIÓN DE SERVICIOS MULTIMEDIA Y DE TV INTERACTIVA ADAPTADOS A PERSONAS CON DISCAPACIDADES SOBRE REDES FTTX (REF: TSI2004-00979)”

- **Entidad financiadora:** FICYT - Principado de Asturias
- **Entidades participantes:** Universidad de Oviedo
- **Duración, desde:** 1-01-2004 **hasta:** 1-01- 2007
- **Investigador principal:** Dr. D. Victor G. García García
- **Número de investigadores participantes:** 8
- **IMPORTE TOTAL DEL PROYECTO:** 31.552,50 €

Título del proyecto: “IMPLANTACIÓN DE SERVICIOS DE AUDIO Y VIDEO BAJO DEMANDA (MEDIA XXI-I)”

- **Tipo de contrato:** Proyecto de investigación con la U. De Oviedo
- **Empresa/Administración financiadora:** Telecable Asturias SAU, Prensa Asturiana Media
- **Entidades participantes:** Universidad de Oviedo, Telecable Asturias SAU, La Nueva España
- **Duración, desde:** 01-10-03 **hasta:** 30-09-04
- **Investigador responsable:** Victor G. García García
- **Número de investigadores participantes:** 6
- **IMPORTE TOTAL DEL PROYECTO:** 32.200 €

Título del proyecto: “IMPLANTACIÓN DE SERVICIOS DE AUDIO Y VIDEO BAJO DEMANDA (MEDIA XXI-II)”

- **Tipo de contrato:** Proyecto de investigación con la U. De Oviedo
- **Empresa/Administración financiadora:** Telecable Asturias SAU, Prensa Asturiana Media
- **Entidades participantes:** Universidad de Oviedo, Telecable Asturias SAU, La Nueva España
- **Duración, desde:** 01-10-04 **hasta:** 30-09-05
- **Investigador responsable:** Victor G. García García
- **Número de investigadores participantes:** 6
- **IMPORTE TOTAL DEL PROYECTO:** 32.200 €

Título del proyecto: “IMPLANTACIÓN DE SERVICIOS DE AUDIO Y VIDEO BAJO DEMANDA (MEDIA XXI-III)”

- **Tipo de contrato:** Proyecto de investigación con la U. De Oviedo
- **Empresa:** Telecable S. A. y La Nueva España (Prensa Asturiana Media)
- **Entidades participantes:** U. De Oviedo
- **Duración, desde:** 01-10-05 **hasta:** 30-09-06
- **Investigador principal:** Victor Guillermo García García
- **Número de investigadores participantes:** 4
- **IMPORTE TOTAL DEL PROYECTO:** 32.200 euros

ANEXO II: Publicaciones derivadas de la Tesis Doctoral

El trabajo desarrollado en esta Tesis se ha reflejado en las siguientes publicaciones:

- Pañeda, X.G., Melendi, D., García, V.G., García, R., Neira, A., Riesgo, E. Análisis de un Servicio de Vídeo Bajo Demanda Basado en Tecnología de Streaming. *IV Jornadas Españolas de Ingeniería Telemática (JITEL)*. Las Palmas de Gran Canaria, España. Septiembre, 2003
- García, R., García, V.G, Pañeda, X.G., Melendi, D. and Neira, A. Aggregated traffic generation in FTTX networks. *International Conference on Applied Computing*. Lisboa, Portugal. Marzo, 2004
- García, R., García, V.G, Pañeda, X.G., Melendi, D. and Pérez, J. Modelling Procedure to Increase the Efficiency in Fiber Broadband Access Networks. *International Conference on E-Business and Telecommunications Networks (ICETE)*. Setubal, Portugal. Agosto, 2004
- García, R., García, V.G, Pañeda, X.G., Melendi, D. and Bonis, R. Caracterización de Tráfico y Servicios en Redes de Cable: Modelado de Comportamiento y Validación de Resultados. *XIV Jornadas TELECOM I+D*. Madrid, España. Noviembre, 2004
- García, R., García, V.G, Pañeda, X.G., Melendi, D. and Pérez, J. Fiber Broadband Access Networks: Workload Characterization, Modelling and Validation. *Internet and Multimedia Systems and Applications (EuroIMSA)*. Grindelwald, Switzerland. February, 2005
- García, R., Rodríguez, I., García, V.G, Pañeda, X.G., Melendi, D. Traffic Engineering from a Fiber To Service Area Access Network *31st EUROMICRO CONFERENCE on Software Engineering and Advanced Applications*. Porto, Portugal. IEEE Computer Society pp. 346-353, August-September, 2005
- Vilas, M., Pañeda, X.G., García, R., Melendi, D. and García, V. User Behaviour Analysis of a Video-On-demand Service with a Wide Variety of Subjects and Lengths. *31st EUROMICRO CONFERENCE on Software Engineering and Advanced Applications*. Porto, Portugal. IEEE Computer Society pp.330-337, August-September, 2005
- Melendi, D., García, V.G., Vilas, M., García, R., Pañeda, X.G. and Rodríguez, I. Caracterización estadística de un servicio real de vídeo bajo demanda. *V Jornadas de Ingeniería Telemática (JITEL)*. Vigo, España. Septiembre, 2005
- Pañeda, X. G., García, R., Melendi, D., Vilas, M. and García, V. Method for Audio/Video Streaming Testbed and Model Development. *2nd International Conference on E-Business and Telecommunication Networks (ICETE)*. Reading, UK. October, 2005
- García, R., Pañeda, X.G., García, V. G., Melendi, D. and Vilas, M. Workload Analysis of CBR-coded RealMedia Streaming Traffic. In *Proceedings of the 5th IEEE International Workshop on IP Operations & Management (IPOM 2005)*. Barcelona, Spain. October 2005

- García, R., García, V.G., Pañeda, X.G., Melendi, D. and Pérez, J. Analysis and modelling of a broadband fiber access network with high peer-to-peer traffic load. *Simulation Modelling Practice and Theory, Elsevier Science*, Volume 14, Issue 5 , July 2006, pp. 506-526 (Available online 24 October 2005)
- Pañeda, X. G., García, R., Melendi, D., Vilas, M., García, V.G. Popularity analysis of a video-on-demand service with a great variety of content types. Influence of the subject and video characteristics. IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). Vienna, Austria. IEEE Computer Society pp.29-34. April, 2006

ANEXO III: Referencias al trabajo por parte de otros investigadores

El trabajo y las publicaciones derivadas de la Tesis Doctoral han sido referenciados en los artículos que se citan a continuación.

Zeljko Vrba, Thomas Plagemann, Vera Goebel, Xabiel G. Paneda, "Study of Server Workload in Large Online Newspaper," *icdcs*, p. 52, 26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW'06), 2006

Zeljko Vrba, University of Oslo

Thomas Plagemann, University of Oslo

Vera Goebel, University of Oslo

Xabiel G. Paneda, University of Oviedo

P. Koutsakis, "A Unified Mechanism for Multimedia Downlink Scheduling and Call Admission Control for Future Error-Prone Wireless Networks", *Wireless Personal Communications Journal*, Springer Publ., Vol. 34, No. 4, pp. 395-409, 2005

P. Koutsakis, McMaster University, Canada

H. Papadakis, P. Koutsakis and M. Vafiadis, "On the Performance Evaluation of a Dynamic Bandwidth Reservation Mechanism for Integrated H.263 Video, IP and MP3 Traffic over Wireless Networks", in *Proc. of the 7th IEEE International Symposium on Multimedia (ISM 2005)*, December 2005, Irvine, California, USA

H. Papadakis, Technological Educational Institution of Crete, Greece

P. Koutsakis, McMaster University, Canada

M. Vafiadis, Technological Educational Institution of Crete, Greece