

XXV CONVOCATORIA DE PREMIOS “Ingenieros de telecomunicación” ‘04



Colegio Oficial
Asociación Española
Ingenieros de Telecomunicación

Premio tesis doctoral

Resumen de la tesis:

CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LA QOS PARA SERVICIOS
MULTIMEDIA EN TIEMPO REAL SOBRE REDES IP. PROPUESTA
PARA LA ADAPTACIÓN DE LOS SATÉLITES
GEOESTACIONARIOS PARA PROVEER ESTOS SERVICIOS

Antonio J. Sánchez Esguevillas

Índice

Título de la tesis doctoral	3
Datos generales: Autor, director, lugar y fecha, calificación.....	3
Resumen de la tesis doctoral	3
Las tecnologías IP multimedia y la importancia de la QoS	4
Mejoras específicas de QoS para satélites geoestacionarios.....	6
Arquitectura de los servicios de multiconferencia.....	8
Validación del tráfico IP multimedia en tiempo real sobre satélite	10
Resultados: Contribuciones del trabajo de investigación	13
Líneas futuras de investigación	13
Publicaciones.....	13
Revistas	14
Congresos (incluyendo libros con actas de congresos)	15
Varios	18

Título de la tesis doctoral

REAL TIME MULTIMEDIA SERVICES OVER IP NETWORKS. PROPOSAL FOR THE ADAPTATION OF GEOSTATIONARY SATELLITES TO PROVIDE THESE SERVICES. (CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LA QOS PARA SERVICIOS MULTIMEDIA EN TIEMPO REAL SOBRE REDES IP. PROPUESTA PARA LA ADAPTACIÓN DE LOS SATÉLITES GEOESTACIONARIOS PARA PROVEER ESTOS SERVICIOS)

Datos generales: Autor, director, lugar y fecha, calificación

- *AUTOR*: Antonio Javier Sánchez Esguevillas.
 - *DIRECTOR*: Belén Carro Martínez
 - Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática. Universidad de Valladolid
 - *Fecha de lectura*: 6 de febrero de 2004
 - *Calificación*: **Sobresaliente cum laude por unanimidad del Tribunal**
- La tesis ha sido escrita y defendida en inglés y tanto la evaluación externa como el tribunal contó con investigadores internacionales.

La tesis se ha encuadrado dentro de dos proyectos internacionales de I+D cofinanciados por la Comisión Europea, siendo el autor **coordinador global** del principal proyecto:

- VIP-TEN (Validation of IP-Telephony Over EuroSkyWay Network). Programa Ten-Telecom de la CE. Duración: Febrero 2000 a enero de 2001. Presupuesto: 1 millón €. El autor participó como investigador principal de Telefónica I+D. Socios: Alenia Spazio (coordinador, Italia), Telefónica I+D, Universidad de Surrey (Reino Unido), KPN-Qwest (Italia), SIRE.
- ICEBERGS (IP Conferencing with Broadband multimedia over Geostationary Satellites). 5º Programa Marco en la prioridad Information Society Technologies de la CE (CE 5PM-IST). Presupuesto: 3 millones de €. Duración Noviembre de 2001 a Abril 2003. El autor participó como coordinador global de todo el proyecto. Socios: Telefónica I+D (coordinador), Alenia Spazio (Italia), Universidad de Surrey (Reino Unido), SIRE, Universidad de Valladolid (http://dbs.cordis.lu/fep-cgi/srchidadb?ACTION=D&SESSION=171692005-2-17&DOC=1&TBL=EN_PROJ&RCN=EP_RPG:IST-2000-31110&CALLER=PROJ_IST)

Resumen de la tesis doctoral

En primer lugar veamos la estructura y objetivos de este trabajo de investigación:

- Introducción a las tecnologías multimedia en tiempo real. Estudio exhaustivo de las características del tráfico, parámetros QoS y técnicas de medida requeridos por los flujos multimedia en tiempo real
- Partiendo de este estudio, se proponen las **siguientes contribuciones originales**. En esta etapa, se procede al diseño y validación teóricos de las contribuciones:
 - Técnicas para la mejora de la calidad
 - Realización de un modelo detallado de retardo para servicios multimedia sobre satélites geoestacionarios
 - Adaptaciones y técnicas para optimizar el transporte de flujos multimedia IP en tiempo real sobre satélites geoestacionarios
 - Modelos de conferencia que evitan el doble salto de satélite
- Finalmente, se presenta la validación de las nuevas técnicas propuestas:
 - Ejecución de simulaciones
 - Ejecución de una campaña de medidas en entorno real
 - Análisis de los resultados obtenidos y validación final de las contribuciones propuestas

Las tecnologías IP multimedia y la importancia de la QoS

Las tecnologías de voz y vídeo sobre IP son relativamente jóvenes. Se puede decir que sus orígenes se remontan a mediados de la década de los 90 (Vocaltec dice ser el primer fabricante comercial), con un primer despegue importante en 1998, cuando varios pilotos tienen lugar en el ámbito mundial y varios suministradores aparecen en escena. Desde entonces la tecnología ha evolucionado más lentamente, siendo afectada también para la crisis económica y la burbuja de Internet. Ahora de nuevo, parece que 2003 es el año de la recuperación de la tecnología (por ejemplo, las conferencias de Pulver, y específicamente la última de VON Fall 2003, ha sido el evento mundial de VoIP que mayor número de asistentes ha tenido), tanto en términos de venta de equipamiento como de tráfico de llamadas. Al contrario que la tecnología de la RTC, VoIP ofrece un muy alto grado de apertura para la innovación, convirtiéndose por tanto en un campo muy importante de investigación y desarrollo. En este trabajo de investigación, se ha cubierto una de las principales líneas de investigación de la tecnología de VoIP (probablemente la principal), que es la QoS. Las contribuciones originales presentadas en este trabajo, permiten ofrecer servicios de voz y vídeo sobre redes IP con una calidad de servicio controlada y optimizada, igual o incluso mejor que la que ofrece la RTC. En los siguientes párrafos de esta sección, repasaremos todas las contribuciones originales presentes en este trabajo de investigación, en lo relativo a la QoS de VoIP, incluyendo todos los elementos que deben ser considerados debido a su impacto en la QoS.

En lo que respecta a los modelos de tráfico, permiten caracterizar el ancho de banda consumido lo que a su vez depende del codec utilizado y de la sobrecarga (por cabeceras) del protocolo. Comenzamos con el tráfico de voz que tiene una tasa de bit constante (CBR). Los resultados muestran que para unas pocas conversaciones, los recursos se deben dimensionar de tal manera que provean ancho de banda suficiente como si todas las conversaciones estuviesen activas de forma simultánea. A medida que el número de conversaciones aumenta, el ancho de banda requerido se aproxima a la tasa de bit media de todas las conversaciones simultáneas. Como ejemplo, usando el codec G.723.1 en modo de 6,4 kbps, con una tasa de actividad (voz vs. silencio) de 0,5, para 30 conversaciones solo se requiere un ancho de banda adicional del 5%, a costa de una probabilidad de pérdidas del 1%. Una expresión más general se puede derivar, teniendo en cuenta el uso de diferentes codecs, con el objetivo de relacionar la pérdida de paquetes con el ancho de banda requerido. Por otro lado, el tráfico de vídeo (tasa de bit variable, VBR), es bastante más difícil de caracterizar. Existen ciertos parámetros externos que tienen influencia en la tasa binaria, como la luminancia de la imagen (tanto de objetos como del fondo), movimiento de objetos,... y otros que pueden ser controlados por el usuario como el número de imágenes por segundo (movimiento de la imagen) y la resolución de la imagen. Todos estos parámetros, hacen que el modelo de tráfico sea más complejo. Por ese motivo, en el trabajo se presentan estadísticas obtenidas relativas al tamaño de los paquetes de vídeo (lo que tiene un efecto directo en la sobrecarga del protocolo) y tasa de envío de paquetes de vídeo (o espaciado temporal entre cada paquete enviado). Asimismo se analizan trazas de tráfico real utilizadas para simulaciones. Todos estos resultados permiten una mejor dimensionado y planificación de una red IP con el objetivo de soportar llamadas de voz y vídeo, evitando las típicas soluciones basadas en el sobredimensionamiento de la red que suponen un malgasto de recursos de red. Esto es especialmente crítico para aquellas redes basadas en la asignación dinámica de recursos, como veremos más adelante y para las que se proponen optimizaciones basadas en estos estudios de tráfico.

En cuanto a los parámetros de calidad de red, se describen los dos principales: pérdidas de paquetes y retardo, con un tercero –el jitter– que afecta a los dos anteriores. Las colas de los elementos de red afectadas por congestión en la ruta del tráfico IP multimedia tienen consecuencia directa sobre estos parámetros de calidad: los routers descartan paquetes y también introducen un retardo de paquete variable. En el trabajo, se proporcionan los valores límites estándar para estos dos parámetros principales. Para el retardo, los valores oscilan entre los 100 y 400 ms. Para la pérdida de paquetes, se consideran valores en torno al 1-5%, con valores distintos para audio y vídeo, y estrictamente dependientes del codec empleado. Los errores de tipo ráfaga tienen un mayor impacto. Un parámetro de calidad colateral es el tiempo de establecimiento de llamada, más sencillo de controlar y cuyos valores límite son relativamente elevados, especialmente para llamadas nacionales e internacionales.

La medida más importante para la calidad de una llamada multimedia es la percepción del usuario final que accede al servicio. El valor que muestra esta percepción es el llamado *Mean Opinion Score* (MOS: Valor de opinión medio) y refleja la percepción media proporcionada por un gran grupo de usuarios. Puesto que esta forma de medir no es práctica, se describen dos alternativas relevantes (sólo para voz) para obtener este valor. El primero es el Modelo E, que emplea fórmulas que combinan los efectos de los diferentes factores de perturbación (principalmente calidad de codec, pérdida de paquetes y retardo). Se proporcionan cifras que muestran el efecto de estos parámetros de calidad variables. Otros métodos alternativos son los perceptuales, de los cuales PESQ es el estándar actual.

Una vez revisados en detalle todos los aspectos relacionados con la calidad del tráfico multimedia IP, se presenta un estudio de las herramientas disponibles para medir la calidad (un total de nueve herramientas han sido analizadas). Para llevar a cabo esta comparación, se han ejecutado pruebas de laboratorio, así como demostraciones in situ por parte de los fabricantes. A partir de este estudio detallado se indican conclusiones de las mejores herramientas para mediciones de campo sobre redes IP existentes. Esta comparativa ha sido muy útil para la campaña de validación. Las soluciones hardware ofrecen mejores prestaciones y mayor precisión, a costa de un precio elevado. Las soluciones software son adecuadas para análisis de red, pero no cubren todos los aspectos necesarios para la calidad de servicio multimedia. Además no tienen la capacidad suficiente de procesamiento para el manejo de tráfico muy elevado y altas cantidades de datos, como los que se dan en redes reales. Por último, todas las herramientas tienen aún ciertas limitaciones como la de QoS de vídeo que aún no está implementada (y ni siquiera estandarizada), aunque los planes de evolución de los productos las están empezando a considerar. En la campaña de validación utilizaremos todos estos parámetros (y valores límite), metodologías y herramientas, para el análisis detallado del rendimiento de las redes planteadas.

Habiendo realizado este estudio con profundidad sobre las tecnologías IP multimedia y sus estrictos requerimientos de calidad de servicio, estamos en disposición de proporcionar técnicas para la mejora de la calidad. Las conclusiones sobre las técnicas propuestas se obtendrán a partir de las pruebas en laboratorio. No obstante, de forma preliminar ciertas conclusiones teóricas se exponen en las siguientes líneas.

En primer lugar, se proponen técnicas adaptativas (autoadaptabilidad a las condiciones de red). El empleo de técnicas de adaptación en la capa de aplicación es una solución que permite a las aplicaciones multimedia minimizar el impacto de una degradación abrupta de su comportamiento, de forma que la QoS que percibe el usuario se mantiene a un nivel aceptable.

El primer grupo de técnicas está relacionado con la calidad que percibe el usuario en un momento dado, y adapta los parámetros de transmisión de forma acorde. Estas técnicas se implementan por tanto en el lado del usuario. Los parámetros de transmisión se pueden cambiar manualmente para distintas condiciones de red, con objeto de estimar qué solución se adapta mejor a los cambios de la red. Sin embargo, se prefiere un control automático de autoadaptabilidad de forma que pueda realizarse en tiempo real. Estas técnicas están relacionadas con las características del codec (codec empleado y parámetros) y se aplican de forma dinámica: codificación, tasa de muestreo de audio (sólo para audio, que suele ser un parámetro fijo para un codec dado), tamaño de vídeo dinámico (sólo para vídeo) y número de tramas por segundo dinámico (sólo para vídeo). La mayoría de estos parámetros influyen en el ancho de banda transmitido, que se ajusta a las condiciones de red en un momento dado, y por tanto las pérdidas de paquetes debidas a congestión disminuyen y aumenta la garantía de enviar paquetes que puedan ser transmitidos por la red. De forma análoga, en entornos con escasez de ancho de banda el usuario preferirá ver vídeos de menor tamaño que vídeos con menor calidad en los que la mayoría de las tramas se pierden.

El buffer de jitter adaptativo es una técnica emergente que provee calidad mejorada gracias a la disminución del parámetro de retardo, con el objetivo de minimizarlo al valor actual de jitter presente en la red, evitando tener un tamaño de buffer sobredimensionado o establecido de forma manual.

La priorización del audio frente al vídeo es también otra importante técnica para mejorar la calidad percibida por el usuario, dado que el impacto sobre la calidad global es mayor por parte del audio que del vídeo. Si queremos que los usuarios perciban un nivel aceptable de calidad en la conversación, se necesita priorizar las comunicaciones de audio frente a las de vídeo. Esto a su vez implica que el ancho de banda requerido por el codec de audio debe ser garantizado, dejando el restante para el vídeo. El vídeo requiere un ancho de banda mayor pero no es estrictamente necesario tener una calidad constante de cara a obtener una buena comunicación. A tal efecto, se ha contribuido con una técnica relacionada con el ajuste dinámico de acuerdo al ancho de banda disponible. Esta técnica, que ha sido incorporada a OpenH.323, está basada en la introducción de un retardo entre los paquetes, cuando se intenta transmitir a una tasa mayor que la deseada. Dado que la calidad de la imagen está fijada a un valor dado, el efecto percibido por el usuario es que la sensación de movimiento se reduce cuando la tasa binaria es menor.

El segundo grupo de técnicas son las relativas a la red, es decir, que se implementan en la propia red. La más importante es la de enrutado de QoS de aplicación, implementado mediante proxies RTP distribuidos a lo largo de la red. La base de esta técnica es la misma que las anteriores en el sentido de que precisa la monitorización de la calidad IP multimedia. La diferencia es que se mide la calidad de flujos multimedia que pasan entre dos puntos de red dados. De este modo, se puede seleccionar el camino más apropiado en un instante dado, con lo que la calidad está garantizada. Con esta técnica hay una selección dinámica de los caminos que atraviesa el flujo multimedia a través de una ruta extremo a extremo. Tiene la ventaja de su independencia de la red IP que está por debajo. Asume una red heterogénea que sería muy compleja y costosa de actualizar para proporcionar QoS IP de forma genérica. Por otro lado, existen otras técnicas de

red alternativas como el enrutado QoS. La idea es proporcionar algoritmos de enrutado que tienen en cuenta la QoS, en nuestro caso específica para flujos multimedia. No obstante, estas técnicas adolecen de importantes problemas de escalado y estabilidad. Además requerirían una actualización masiva de los routers.

Mejoras específicas de QoS para satélites geoestacionarios

Los servicios ofrecidos a través de satélites geoestacionarios se encuentran en una posición competitiva muy fuerte para ciertos nichos de mercado gracias a su cobertura global, y por tanto, pese a su relativamente baja penetración de mercado en términos absolutos, constituyen una importante área de investigación. De esta manera, debido al elevado retardo de propagación, los satélites geoestacionarios constituyen la tecnología de transmisión más exigente para servicios multimedia en tiempo real desde un punto de vista de QoS.

El primer paso para el estudio de mejoras de QoS específicas para satélites geoestacionarios es poseer una visión global de estos sistemas, centrándonos en los satélites de próxima generación con carga útil regenerativa, objeto de una intensa labor de investigación en el momento presente. A tal efecto, a modo de introducción, se ha realizado un resumen de los sistemas de satélite en general: órbitas, evolución de sistemas transparentes a sistemas con procesamiento a bordo, comunicación entre satélites, métodos de acceso múltiple para canales ascendentes, bandas de frecuencia, modulaciones, interconexión con sistemas terrestres,... Asimismo, se ha particularizado para los satélites geoestacionarios (cobertura, estándares para el canal descendente (DVB-S) y ascendente (DVB-RCS), principales sistemas comerciales,...) y especialmente aquellos con procesamiento a bordo. Es en este tipo de satélites donde se implementarían mejor estas propuestas de incremento de calidad. Si bien la tecnología actual de satélites transparentes puede soportar servicios multimedia no lo hace de una manera muy eficiente. Un aspecto importante que demuestra esta afirmación, es la falta de conectividad total (malla) entre todos los terminales de satélite para evitar el doble salto satelital a través de un *Hub*. Aparte de esta consideración, para una eficiente provisión de estos servicios multimedia en tiempo real, el satélite debe soportar las siguientes características: 1) ancho de banda suficiente para soportar conferencias multimedia a gran escala, empleando por ejemplo la banda de frecuencias Ka. 2) Capacidad multicast del satélite con múltiples haces (*spot beams*). 3) Provisión de QoS para tráfico en tiempo real junto con un uso eficiente de los recursos del satélite.

El estudio detallado de un sistema de satélite de próxima generación nos permite identificar mejor las adaptaciones necesarias para mejorar la QoS multimedia. En concreto, resulta interesante la descripción de los servicios portadores, cubriendo capacidades de gestión de la conexión donde se presta especial atención a la QoS (retardo de transferencia máximo, variación de retardo pico a pico, tasa de pérdida) y a definiciones de parámetros de tráfico (tasa de transferencia pico, tasa de transferencia media, factor de utilización o ráfagas), junto con las clases de servicio (similar a ATM). Partiendo de los valores objetivo para los parámetros de QoS (que se mapean a los parámetros de calidad de red ya presentados: retardo, jitter y pérdida de paquetes), se realizan recomendaciones para nuevos valores límites, como se verá más tarde en estas conclusiones, de acuerdo a los requisitos específicos para flujos multimedia IP.

La primera parte de las adaptaciones propuestas están enfocadas al principal problema anteriormente mencionado, que es el retardo (y por tanto el jitter que tiene un impacto directo sobre él). Se estudian las contribuciones al retardo extremo a extremo y aquellas variables son objeto de una atención especial, debido a su impacto tanto en el retardo como el jitter. Con el objetivo de reducir este retardo extremo a extremo, **se proponen técnicas para reducir estas contribuciones variables de retardo**. En primer lugar se tratan aquellas técnicas relacionadas con el terminal con el objetivo de reducir al máximo sus contribuciones al retardo, a costa a veces de tener un mayor consumo de ancho de banda. En esta línea tenemos la selección del code, el número de tramas por paquete IP y retardo asociado de paquetización (por ejemplo, con G.711 o G.726 se puede conseguir un retardo de paquetización mínimo de 20 ms., sin retardo de espera a la siguiente trama); la aplicación de usuario (por ejemplo Microsoft Netmeeting introduce un retardo adicional del mismo orden que el retardo de propagación de satélite); y el buffer de jitter adaptativo anteriormente mencionado y particularizado en este caso para el entorno de satélite, que al representar una red única extremo a extremo, presenta unos perfiles de jitter mucho más controlables.

A nivel de satélite existen unas técnicas que pueden aplicarse a las capas inferiores (física y de enlace). La primera es la supresión de ARQ extremo a extremo para tráfico IP multimedia (ARQ introduce un retardo adicional y los paquetes que llegan con retraso se descartarán en recepción) junto con mejoras opcionales de FEC para este tráfico (o técnicas de ocultación de pérdidas de paquetes a nivel de codec). Las pruebas muestran que la tasa de pérdidas de tramas de voz para una BER de 10^{-7} con errores aleatorios ronda el 0.1% (dependiendo del codec), y más si hay errores de ráfaga (caracterizados a partir de entornos de satélite reales). Para valores de BER mayores estos porcentajes son aún más significativos. La segunda técnica consiste en la asignación eficiente de slots (esquema TDMA) en la capa MAC para la transmisión

ascendente, con objeto de optimizar la programación de las colas del terminal de satélite y minimizar así el retardo y el jitter.

En capas más altas (enlace/red y aplicación) se pueden proporcionar otros medios para la priorización del tráfico multimedia en la red de satélite. Así, se proponen adaptaciones adicionales del servicio multimedia en el entorno de satélite para optimizar la calidad global, basadas en adaptaciones de las pilas de protocolos del satélite. Esto implica la especificación de una **capa de adaptación entre las capas IP y de enlace de satélite**, en las cuales se implementan varias técnicas que mejoran la calidad del tráfico IP multimedia. El módulo de programación y distribución de prioridades permite la priorización de los paquetes multimedia IP sobre otros tipos de tráfico, disminuyendo su tiempo de cola y teniendo en consecuencia un impacto positivo directo sobre el retardo. La segmentación /fragmentación de paquetes (técnica habitual aplicada al nivel de router para tráfico IP) contribuye a la reducción del retardo, gracias al entrelazado de paquetes. En este sentido, si el tráfico de paquetes sin QoS (*best effort*) consta de paquetes de gran longitud, y llega un paquete IP multimedia, no tiene que esperar hasta que todo el paquete no-QoS se haya transmitido, reduciendo el retardo. Además, el manejo de la fragmentación a esta capa permite el uso de algoritmos de programación que proporcionan mejores valores de jitter. Para validar este procedimiento se realiza una simulación que confirma la hipótesis. Finalmente, la técnica de compresión de cabeceras CRTP permite por un lado la reducción significativa de la sobrecarga del protocolo (de 40 a 2 ó 4 bytes), y por otro la inclusión de la carga útil del codec junto con el overhead en una única celda de satélite, disminuyendo también la sobrecarga de capa de enlace, con lo que el consumo de ancho de banda se ve ampliamente reducido.

En la capa de adaptación, el controlador de tráfico de satélite es el responsable de la gestión de los recursos y conexiones de la red de satélite, de modo que se cumplan los requisitos de QoS del tráfico entrante. Para estudiar esto se proporciona el entorno básico de interoperabilidad entre satélites de próxima generación orientados a conexión y la capa IP (en los planos de control y usuario). Se analizan los datagramas IP para extraer la información para los procedimientos de señalización del satélite para el establecimiento y finalización de la conexión, que sirve de base para las mejoras de calidad. Un aspecto importante de esta interoperabilidad es los parámetros de conexión de los canales del satélite, y entre ellos el ancho de banda asignado y la QoS. Se precisa de un mapeo entre los requisitos de calidad del tráfico IP multimedia y los canales de la red satelital que necesitan asignarse para cursar este tráfico. Para tratar esto se examinan varias soluciones al problema de transportar tráfico IP con requisitos de QoS sobre la red de satélite. De todas las soluciones propuestas las dos mejores candidatas son la integración con RSVP o integración específica con tráfico IP multimedia. Esta última puede realizarse bien implementando una integración con protocolos de señalización IP multimedia o bien directamente con RTP. Como se ha mencionado ambas soluciones requieren un mapeo entre el perfil del tráfico multimedia y la QoS que se necesita. En el caso de RSVP, el mapeo lo realiza una aplicación de usuario. En el segundo caso, el mapeo lo realiza el terminal de satélite. En ambos casos, el algoritmo de mapeo a aplicar puede ser el mismo.

A partir de aquí, se estudian métodos de **integración específicos para protocolos de señalización IP multimedia**. Esta integración de capa de aplicación nos permite controlar con mayor precisión en la red de satélite el comienzo y fin de las llamadas multimedia, y por consiguiente los momentos en que los canales del satélite deben ser activados y desactivados. Además, y lo que es más importante desde una perspectiva de QoS, permite la inspección de los parámetros de calidad negociados al principio de la conversación, concretamente los codecs empleados. Esta información permite el mapeo a los parámetros de tráfico de conexión del satélite (tasas de datos media y de pico y patrón de ráfagas) comentadas anteriormente. Por otro lado, los parámetros de QoS indicados en el establecimiento de la conexión (retardo, jitter y pérdida de paquetes) y las categorías de servicio asociadas pueden establecerse de forma más general según los valores límite estandarizados, y teniendo en cuenta las consideraciones particulares de un escenario de satélite. En este sentido, el modelo de retardo derivado anteriormente proporciona un punto de partida importante para estos valores.

La segunda alternativa es la proporcionada por la integración con RSVP, también estudiada en detalle. Presenta la ventaja de proporcionar una integración genérica para QoS IP, y por tanto para servicios genéricos. Sin embargo, esta generalidad no permite gran precisión con los parámetros. Es más, la falta de escalabilidad de RSVP puede ser una traba importante. A este respecto, es de resaltar que RSVP puede proporcionarse sólo dentro del dominio de satélite, sin imponer el requisito de proporcionar RSVP en la red terrestre (RSVP se transporta de forma transparente por routers o nubes no RSVP). El mapeo de parámetros es externo al dominio del satélite, lo que impone requisitos adicionales y limita la transparencia al usuario. Adicionalmente, a día de hoy la extensión del uso de clientes RSVP en aplicaciones IP multimedia no es muy significativa.

Para ambas soluciones es importante resaltar que los valores de ancho de banda del canal no deben establecerse en el ámbito de una única llamada, sino que podrían agregarse todas las llamadas que comparten el mismo origen y destino, permitiendo un segundo nivel (además del multiplexado de canal virtual proporcionado por la red de satélite) de multiplexado estadístico de todas las conversaciones, a expensas de una leve degradación de la QoS. Para proporcionar estos valores precisos, comenzamos con los modelos de tráfico presentados anteriormente, y ejecutamos simulaciones adaptadas al entorno de satélite junto con análisis teóricos. En cuanto al ancho de banda, para una tasa de 1% de pérdida de paquetes los resultados muestran que para pocas conversaciones los recursos deben ser dimensionados para proporcionar suficiente ancho de banda como si todas las conversaciones estuvieran activas simultáneamente. A medida que crece el número de conversaciones, el ancho de banda necesario se aproxima a la tasa binaria media de todas las conversaciones simultáneas. En cuanto al retardo de transmisión del satélite, está limitado entre un retardo mínimo que corresponde al caso en que una única conversación está en el periodo activo, y un retardo máximo correspondiente al peor caso del máximo número de conversaciones activas multiplexadas en el ancho de banda asignado. Los resultados de simulación muestran una media igual a la mitad del retardo de paquetización. También se muestra el rango de variaciones, es decir, la cantidad de jitter que puede introducir el entorno de satélite. Se puede ver que cuando el número de conversaciones simultáneas aumenta, la distribución del retardo tiende a ser uniforme en todo el rango de retardos, por lo que la cantidad de jitter introducida por el proceso de transmisión es elevada, hasta el retardo de paquetización, lo que implica una cantidad significativa.

Arquitectura de los servicios de multiconferencia

La provisión de servicios de multiconferencia multimedia sobre satélite, con garantías de calidad de servicio, afronta el principal reto de evitar el doble salto de satélite para los flujos multimedia, factor clave para la provisión de dichos servicios debido al excesivo retardo que provocaría dicho doble salto. Con el objetivo de solucionar este problema, se proponen varios modelos de conferencia y entre ellos, dos son seleccionados para un análisis detallado, incluyendo pruebas de laboratorio.

En el entorno de satélite son posibles varios modelos, con distintas implicaciones. Dependiendo del modelo y del tipo de terminales, serán necesarios servicios especiales como el mezclado o la conmutación de audio/vídeo. Se considera que cada participante en una conferencia multipunto puede enviar y recibir flujos multimedia. Los modelos que se estudian no imponen restricciones sobre el número de usuarios simultáneos de una conferencia. El estudio se lleva a cabo analizando los diferentes modelos para multiconferencia con tráfico IP multimedia. Se realizarán particularizaciones del modelo para el protocolo de señalización SIP, aunque la estructura general es válida para cualquier otro protocolo de señalización, como H.323.

Como se ha mencionado, se estudian diversos modelos de conferencia propuestos por los organismos de estandarización, proponiéndose alguno adicional para cubrir las necesidades específicas de los entornos de satélite (mezclado en los terminales, servidores de conferencia para llamadas entrantes o con generación de llamadas, conferencias centralizadas, multimedia distribuido,...). Para cada modelo se estudian diferentes aspectos como la forma en la que los usuarios son invitados a la conferencia, cómo añadir usuarios a una conferencia existente, escalabilidad, descubrimiento de otros usuarios,... Como ya se ha indicado, se descartan aquellos modelos que requieren un doble salto de satélite como aquellos de mezclado en los terminales o de servidores centralizados. Partiendo de este análisis teórico se realizan diversas pruebas de laboratorio con las herramientas disponibles, con objeto de estudiar la disponibilidad de componentes para implementar los diseños propuestos. Se realizan pruebas de laboratorio de los dos únicos modelos aptos para nuestro entorno de satélite: envío y recepción multicast (bien mediante conferencia multicast a gran escala o mediante señalización centralizada y multimedia distribuido por multicast) y múltiples MCUs- Unidades de MultiConferencia (múltiples servidores multimedia). Estas pruebas cubren de forma detallada todos los aspectos para dirimir si existen los componentes necesarios para una implementación real del modelo: herramientas, control de conferencia, capacidades del cliente, QoS, requisitos de multicast, protocolos, seguridad,... En el primero de los modelos, todos los terminales tienen soporte multicast completo y realizan el mezclado o conmutación de audio/vídeo. En el segundo, existen en la red dos o más MCUs que recogen los flujos multimedia, los procesan y generan flujos multicast que serán recibidos por el resto de MCUs. La descripción de cada uno de los modelos se completa con conclusiones sobre el estudio y propuestas de soluciones para las limitaciones de dicho modelo.

Los modelos de conferencia multicast tienen varias limitaciones, según se describe a continuación. Las aplicaciones Mbone proveen el soporte básico de conferencia para este modelo, a pesar de varias limitaciones en el soporte de dispositivos de vídeo y ciertos problemas de integración en el entorno de Microsoft Windows. Además, estas aplicaciones son software libre (no son productos comerciales) con las correspondientes limitaciones en cuanto a mantenimiento y soporte que podrían afectar

significativamente a un servicio de videoconferencia comercial. También tienen un soporte incompleto de funciones de control de la conferencia. Los clientes realizan el mezclado o conmutación del audio y video, por lo que deben ser terminales de alta capacidad. Los clientes deben también poder recibir los flujos multicast transmitidos por la red, por lo que su conexión de red debe ser de alta capacidad ya que debe proveer ancho de banda suficiente para soportar la suma de anchos de banda de todos los flujos multicast. Las aplicaciones no proveen ninguna interfaz con funcionalidades RSVP/DiffServ, por lo que se requiere algún desarrollo para superar esta limitación. Las aplicaciones se suponen compatibles con los estándares, pero no obstante hay ciertos problemas con el registro SIP por lo que hace falta desarrollar una aplicación externa. Se soporta un modelo multicast total así como la interconexión con equipos o redes de acceso no multicast. Para estos últimos se pueden utilizar técnicas de tunelado, desarrolladas también. Las aplicaciones también presentan ciertas limitaciones de seguridad, identificadas en un entorno de pruebas Windows. Como resumen, estos modelos son válidos para un entorno de satélite teniendo en cuenta la limitación del elevado ancho de banda de acceso que necesita cada terminal (proporcional al número de participantes en la conferencia enviando simultáneamente audio y video). El modelo provee funcionalidad multicast y saca partido de la naturaleza intrínseca multicast de las transmisiones por satélite. El soporte de usuarios sin acceso multicast puede ser provisto mediante mecanismos de tunelado. El mezclado del audio se realiza por los terminales de usuarios, y a pesar de que sólo los flujos activos son enviados de forma simultánea, estos son enviados de forma separada, sin mezclar, por lo que el ancho de banda podría ser reducido en mayor medida.

En cuanto al modelo de múltiples MCUs, las capacidades de los clientes en este entorno son simples (lo cuál representa su mayor ventaja) dado que no necesitan mezclar el audio o componer el video. No obstante, las capacidades de la MCU son altas ya que deben realizar todo el procesamiento multimedia. Afortunadamente, como se utiliza la transmisión multicast entre las MCUs, esa carga intensiva de CPU es distribuida y por tanto menor. En lo relativo a QoS, las aplicaciones de usuarios (como Windows Messenger) no incluyen soporte para mecanismos de QoS por sí mismas, aunque los sistemas operativos (como Windows XP) sí que soportan el protocolo RSVP. Es por ello que se realiza un esfuerzo adicional para proveer a los clientes soporte RSVP (como en el otro modelo). Este modelo utiliza pilas de protocolos (SIP) completamente compatibles. En lo relativo a multicast, las MCUs requieren soporte multicast, no así los clientes. El modelo se basa en funcionalidad multicast entre las MCUs, por lo que también aprovecha las capacidades multicast del satélite. El soporte de usuarios con acceso no multicast puede proveerse mediante el acceso unicast de las MCUs. El modelo provee mezclado de audio y video en las MCUs y por tanto el ancho de banda es más reducido. Finalmente, este modelo permite una mejor provisión de los requisitos del satélite, pero su principal limitación es el coste de una MCU en aquellos sitios con un bajo número de usuarios (incluso en un terminal con un único usuarios). Una posible aproximación es utilizar desarrollos abiertos de estos elementos, como *openMCU*, particularizándolos para el entorno de satélite. Esto reduce significativamente el coste, minimizando la desventaja del modelo. Para resumir, los modelos de conferencia multicast tienen varias limitaciones, principalmente los altos requerimientos en cuanto a CPU y ancho de banda (debido al mezclado de audio y conmutación de video de forma local). Requiere conectividad multicast (o tunelado a un núcleo de red multicast), pero esto supone una ventaja si la red terrestre soporta multicast. Las aplicaciones de usuario multicast existentes tienen alguna limitación adicional. Por otro lado, el modelo multi-MCU está basado en aplicaciones estándar tanto por la parte del usuario como de la MCU. La elección de una MCU de código abierto elimina las restricciones de alto coste para escenarios con pocos terminales.

Una buena aproximación para cumplir los requisitos del tráfico IP multimedia es una solución híbrida que combine ambos modelos. De esta manera, los usuarios multicast pueden participar en conferencias mixtas con usuarios conectados a las MCUs. Todas las MCUs y usuarios multicast usarán el modelo multicast para comunicarse entre ellos. Por tanto, se muestra la arquitectura global del sistema siguiendo este diseño mixto. Como ya se ha mencionado, esta arquitectura combina ambos modelos, multi-MCU para los usuarios unicast y multicast completa para aquellos usuarios que pertenecen a una red multicast terrestre. Finalmente, con el objetivo de complementar la arquitectura, se muestra un diseño detallado de todas las entidades involucradas y de la señalización que intercambian para los diferentes escenarios del servicio.

Efectivamente, y con más detalle, a partir de estas conclusiones de las pruebas se ha procedido a diseñar una arquitectura de un sistema de conferencia sobre satélite que combina los dos modelos indicados, explotando las ventajas de cada uno de ellos. Se ofrece entonces un escenario integrado de red terrestre y de satélite, para usuarios unicast y multicast. Los usuarios unicast pueden acceder a una multiconferencia mediante una MCU (que implementa las funciones de conmutación y mezclado), con la que tienen una conexión punto a punto exclusivamente terrestre. Los parámetros de enrutado IP deben establecerse de manera acorde para alcanzar este objetivo (empleando enrutado IP estático, o configurando el coste de los enlaces para enrutado dinámico). La MCU intercepta los mensajes de señalización que intercambian el

usuario y el servidor de conferencias (al que llama el usuario para unirse a una conferencia dada), que recupera la dirección multicast asociada a la conferencia. La MCU se une por tanto a los grupos multicast de la conferencia. La MCU intercepta la señalización multimedia IP cambiando la descripción de los flujos multimedia para conseguir el envío unicast de los usuarios a la MCU, y el envío multicast entre MCUs.

Los usuarios multicast por su parte no necesitan relación con la MCU. Si un usuario multicast recupera la dirección multicast de la conferencia bien a través de un servidor web o por medio de señalización IP multimedia recibida de otro usuario o servidor de conferencia, puede acceder directamente a la conferencia uniéndose a los grupos multicast mediante protocolos multicast IP. También puede unirse a la conferencia contactando directamente con el servidor de conferencias, en cuyo caso la MCU no intercepta la señalización multimedia al distinguir al usuario multicast de otro unicast. El usuario unicast configura la conferencia enviando un mensaje que contiene su dirección IP unicast, mientras el usuario multicast usa la dirección multicast de la conferencia.

Se pueden enviar múltiples flujos de audio simultáneamente en una conferencia. La mezcla de estas contribuciones audio se realiza en las MCUs y en los usuarios multicast. La mezcla de audio en la MCU debe evitar el eco de los usuarios unicast conectados a ella, y además varios flujos de video deben enviarse simultáneamente. En este caso el mezclado se realiza en las mismas máquinas que el audio, pero la mezcla no es una simple adición de señales. Si las MCUs combinan los flujos de video de los usuarios unicast en un mosaico de video para su transmisión multicast, la calidad resultante puede ser pobre, dependiendo del número de usuarios. En este caso las MCUs deben enviar sólo (multicast) el flujo de video del usuario cuyo audio está activo. El flujo de video enviado de cada MCU a los usuarios unicast puede ser el mosaico de todos los videos enviados multicast (de otras MCUs y usuarios multicast), o solo el flujo de video con el audio activo.

A partir de esta arquitectura propuesta, se describe un diseño detallado basado en dicha arquitectura, particularizado para el protocolo de señalización SIP. Para ello, se introducen las distintas entidades incluidas en la arquitectura e implicadas en el procedimiento de señalización, y se explica su funcionalidad. Se presentan los diagramas de señalización detallados para cada escenario y fase de las conferencias, para usuarios unicast y multicast. También se muestran los diagramas detallados para la creación de una conferencia, registro de usuario, acceso y salida de conferencia, etc.

Validación del tráfico IP multimedia en tiempo real sobre satélite

Como ya se ha comentado, el objetivo de la fase final de validación de este trabajo de investigación es la realización de medidas en un entorno real con el objetivo de evaluar la eficiencia de las contribuciones propuestas. De esta manera, partiendo de un estudio detallado inicial, se han propuesto una serie de contribuciones originales, basadas en un nuevo modelo, diseñado y validado de forma teórica. Finalmente por tanto, se presenta la validación de las nuevas técnicas propuestas, mediante ejecución de simulaciones, ejecución de una campaña de medidas en entorno real y análisis de los resultados obtenidos y validación final de las contribuciones propuestas. Por tanto, las conclusiones sobre el comportamiento de las mejoras propuestas suponen la contribución más importante de este trabajo de investigación.

La campaña de validación puede dividirse en dos etapas con sus escenarios asociados, y ejecución independiente. Primeramente se cubre el comportamiento básico de la voz a través de una red de satélite. La segunda etapa cubre un escenario de integración más complejo, basado en la arquitectura diseñada para servicios de multivideoconferencia avanzados, con un conjunto de pruebas y parámetros de calidad más extenso, partiendo de la experiencia adquirida y los resultados obtenidos en la primera etapa de la validación. Para cada escenario se describe la arquitectura del experimento junto con un detallado plan de pruebas para posteriormente proceder a la presentación y análisis de los resultados obtenidos.

La primera campaña está basada en un sistema de red mixto terrestre/satélite, utilizando un satélite real operando en la banda Ka de frecuencias y con un escenario internacional involucrado a tres países europeos. El procesamiento a bordo se implementa mediante un emulador terrestre. Aparte de los terminales de satélite, existen subredes terrestres conectadas a dichos terminales mediante túneles IP por Internet. Los escenarios estudiados comprenden llamadas PC a PC, PC a teléfono y viceversa, y teléfono a teléfono. Las llamadas de teléfono incluyen el uso de la RTC y de PBX. Las pruebas se realizan bajo tres condiciones de red: 1) única conversación de voz; 2) con tráfico adicional de voz; 3) con tráfico adicional de voz y datos. En todas las pruebas, se presta un énfasis especial a los escenarios que involucran sólo al satélite. Las pruebas en redes terrestres se incluyen sólo como referencia, ya que dependen mucho de las características particulares del canal terrestre seleccionado para la comparativa y de la carga de tráfico de los enlaces involucrados y de los instantes temporales en los que se realizan las pruebas. Se realiza una recopilación de medidas de QoS, enfocándose a los tres parámetros básicos:

retardo, jitter y pérdida de paquetes. Por tanto, la primera campaña de validación permite obtener conclusiones generales sobre la conveniencia del uso de satélites geoestacionarios para proporcionar servicios VoIP:

- Internet no puede satisfacer la demanda de servicios multimedia en tiempo real con garantías. Su actual modo de funcionamiento *best effort* implica que su comportamiento depende del estado de congestión en un momento dado que es por tanto difícil de controlar de cara a asegurar la calidad de servicio
- Las medidas de comportamiento de *jitter* en escenarios basados únicamente en el satélite son muy ventajosas comparadas con las de la Internet terrestre. Se consiguen valores de *jitter* muy bajos, incluso con tráfico de voz y datos.
- Las medidas de retardo están muy influenciadas por el uso del enlace de satélite geoestacionario, como era de prever. Las aplicaciones de audio pueden contribuir significativamente al retardo extremo a extremo, no sólo con el codec seleccionado, sino también con los buffers de *dejitter* que emplea la aplicación. Una comparación entre resultados PC a PC (con Netmeeting) y teléfono a teléfono muestra que este retardo adicional puede ser muy importante.
- Las medidas de pérdidas de paquetes resultan inferiores al 1% empleando el enlace de satélite, lo cual es tolerable en una conversación. La cifra de QoS empeora significativamente al emplear Internet terrestre.
- Para optimizar el comportamiento de la red de satélite y garantizar la calidad al servicio de VoIP (y en general a las aplicaciones en tiempo real), se recomienda evitar la multiplexación de voz y datos en la misma conexión de satélite. Esto significa que sólo las aplicaciones con los mismos requisitos de calidad pueden transmitirse juntas. Como alternativa, se debería implementar un procedimiento de control de prioridades.

Estos puntos muestran que el empleo del satélite para transportar tráfico de VoIP puede ofrecer una calidad aceptable, pese a la influencia negativa del retardo, dependiente del codec de audio elegido. Conviene reseñar también que la selección de codec con bajo retardo puede incrementar el uso de ancho de banda para tráfico VoIP, por lo que debe alcanzarse un compromiso. Además, la cifra de retardo puede incrementarse si se emplea una aplicación con búferes de *dejitter* de gran tamaño (como NetMeeting). El uso de aplicaciones con bajo retardo adicional debe considerarse seriamente, pues los resultados de las pruebas muestran que el jitter introducido por la red de satélite es menos que el experimentado en Internet, por lo que los búferes de *dejitter* de gran tamaño como los de NetMeeting no son adecuados en un entorno satelital. Las medidas de pérdida de paquetes y jitter son muy buenas, incluso en los casos en que se descartan paquetes (por debajo del 1%), de acuerdo a los valores recomendados por los organismos de estandarización. Por tanto, la VoIP en entornos de satélite muestra valores muy positivos para jitter y pérdida de paquetes. El retardo es, por tanto, la única limitación del sistema, como es previsible dada la posición del satélite. Pero se ha visto que hay ciertos puntos (configuración de codec y buffer de *dejitter*) que pueden ayudar a reducirlo a un valor aceptable que, junto con el buen comportamiento de pérdidas de paquetes y jitter, especialmente al compararlos con los valores obtenidos en Internet, hacen que el satélite sea apto para transportar conversaciones VoIP. Finalmente, la percepción global del usuario para medidas subjetivas de calidad, es buena para escenarios de teléfono a teléfono, en los que el umbral de retardo máximo se respeta

Esta campaña de validación preliminar permite partir de unos valores prácticos iniciales, de gran interés para el análisis teórico de las distintas contribuciones aportados por este trabajo de investigación, permitiendo ampliar el estudio a un entorno mucho más complejo en el que aparecen nuevos elementos como el video y la multiconferencia, así como un estudio mucho más detallado de la QoS. A partir de todos estos avances, se planifica una segunda campaña de validación mucho más ambiciosa con la que se valida de forma práctica todos los modelos teóricos aportados por este trabajo de investigación: autoadaptabilidad, buffer de jitter adaptativo, efecto combinado con las técnicas de QoS IP (modelo híbrido IntServ/DiffServ), modelos de retardo, interconexión del satélite con el tráfico IP multimedia, rendimiento del tráfico securizado,... Todas estas pruebas, se realizan en el marco de un escenario de integración mucho más complejo, basado en la arquitectura diseñada para la provisión de servicios de multivideoconferencia. Como ya se ha mencionado, las medidas de QoS son mucho más extensivas que en la primera campaña de validación, introduciendo nuevas técnicas de medida como los métodos preceptuales (PESQ) o automatizando otros como el E-Model. Finalmente, en esta segunda campaña de validación se cubren dos escenarios, el primero usando un satélite real y el segundo basado en un emulador de satélite. En ambos casos, se utilizan tres nodos de acceso de satélite, dos de ellos para usuarios con un acceso directo al satélite (bien sea colectivo como por ejemplo para empresas, o bien

individual como por ejemplo para el entorno residencial) y el tercero para la interconexión con una red terrestre IP (o de forma general, Internet).

De nuevo recalcamos, que este escenario de pruebas extendido, sirve para validar todas las técnicas propuestas y principales contribuciones del trabajo:

- Técnicas para la mejora de la calidad
- Modelo detallado de retardo para servicios multimedia sobre satélites geoestacionarios
- Adaptaciones y técnicas para optimizar el transporte de flujos multimedia IP en tiempo real sobre satélites geoestacionarios
- Modelos de conferencia que evitan el doble salto de satélite

Así pues, se demuestra la validez del sistema de multivideoconferencia diseñado, que comprende la arquitectura multicast y multi-MCU, las técnicas de provisión de QoS, y la adecuada integración entre la red de satélite y el segmento terrestre. Los requisitos del sistema se han validado adecuadamente en un escenario lo suficientemente amplio, donde la videoconferencia real se ha probado en distintas condiciones de tráfico. De esta manera, se ha dedicado una sección específica a comprobar que se cumplen todos los requisitos generales que un sistema de satélites multimedia debe satisfacer en aras a soportar aplicaciones de conferencia en tiempo real, cubriendo aspectos tanto del segmento terrestre como espacial: interconexión con redes terrestres, cobertura, garantías de QoS, capacidades de procesamiento, ancho de banda, seguridad,...

El modelo de conferencia elegido, basado en una arquitectura multi-MCU /multicast, ha demostrado ser el óptimo teniendo en cuenta el compromiso entre las capacidades de terminal (capacidad de mezclado y tasa de acceso) y los recursos necesarios de satélite. Para optimizar aún más el compromiso entre capacidades de terminal y eficiencia de ancho de banda, se recomienda implementar un mecanismo de control de conferencia. Estos mecanismos no son estándares en el contexto de VoIP, pero existen ya algunas propuestas de estandarización.

A nivel de detalle, a continuación se resumen las conclusiones y recomendaciones obtenidas de esta segunda campaña de pruebas:

- De nuevo, las medidas de retardo están en gran medida influenciadas por el uso de un enlace de satélite geoestacionario, como era previsible. Esto supone que el MOS objetivo está por debajo de calidad media si el factor de ventaja (*advantage factor*) no se considera. No obstante, si consideramos el sistema de satélite con el objeto de proporcionar servicios a zonas de difícil acceso, y sin competencia (dado el coste comparando con soluciones terrestres), el factor de ventaja, seleccionado según las guías de ITU y ETSI, mejora significativamente la calidad. Las medidas de pérdida de paquetes y jitter siguen ofreciendo resultados tolerables en una videoconferencia, como ocurría en la primera campaña de validación.
- Se determina el codec estándar (G.711) que proporciona la mejor calidad para las condiciones de red del sistema en términos tanto de los estándares perceptuales (PESQ) como del Modelo E. No es el óptimo en cuanto al consumo de ancho de banda, pero permite mejorar la calidad global en un sistema tan sensible al retardo. En caso de que exista restricción de ancho de banda, el codec G.723 5,5k debería ser el empleado, pues es el que presenta mejor comportamiento cuando disminuye el ancho de banda disponible, pero la calidad disminuye significativamente, por lo que no es adecuado en entornos de satélite donde las consecuencias del alto retardo son muy negativas. Los codecs Speex (no estandarizados aún) proporcionan un buen compromiso entre ancho de banda consumido, calidad MOS y retardo de codec.
- En lo que respecta a codecs de video, la calidad se mantiene a niveles aceptables incluso para una pérdida de paquetes de un 10% en el caso de H.263 y a partir de ese valor disminuye de forma abrupta. El rendimiento de H.263 es superior al de H.261 bajo todas las condiciones.
- El MOS subjetivo para audio y video ha sido evaluado empleando PESQ y VQM (video), y comparado con el MOS objetivo. Como ejemplo, tenemos los resultados de PESQ para los diferentes codecs de audio para el sistema de VoIP en el entorno de satélite. Si comparamos estos valores con los de otro sistema de acceso de banda ancha (como ADSL), podemos observar una diferencia de valor en torno a 0,5 en la escala MOS.
- Los clientes de videoconferencia emplean sus propias implementaciones (incluso para codecs estándar), por lo que los resultados dependen del cliente utilizado. De nuevo conviene resaltar que el cliente de videoconferencia que se vaya a emplear en el sistema final debe ser el que presente un comportamiento más adecuado para este entorno sensible al retardo. La influencia de la capacidad de proceso del terminal es normalmente ignorada, pero se ha demostrado que influye significativamente en la calidad percibida.

Resultados: Contribuciones del trabajo de investigación

En las siguientes líneas resumimos a modo de lista de elementos, las principales contribuciones originales que han sido realizadas en este trabajo de investigación:

- Contribución al estudio de las tecnologías IP multimedia, objeto de una continua evolución. Inclusión en el estudio del protocolo emergente SIP (estudios previos se basan principalmente en H.323)
- Particularización del estudio enfocándose a aspectos de QoS de estas tecnologías. La QoS se estudia al nivel de aplicación en lugar de al nivel de red. No se considera sólo la voz sino que también se extiende el estudio al video.
- Propuesta de nuevas técnicas para mejorar la calidad de los flujos IP multimedia sobre un sistema genérico.
- Estudio de la aplicabilidad de estas tecnologías IP multimedia a satélites geoestacionarios.
- Propuesta de nuevas técnicas de QoS enfocadas especialmente a las necesidades de los sistemas de satélites geoestacionarios.
- Propuesta de una nueva arquitectura para la provisión de servicios de multivideoconferencia IP sobre satélite, resolviendo las limitaciones que imponen los satélites geoestacionarios. El estudio tiene en cuenta los aspectos de multiconferencia y multicast.
- Validación de las nuevas técnicas propuestas, incluyendo sistemas de satélite reales (no sólo simuladores)

Líneas futuras de investigación

El avance en el estado del arte conseguido en este trabajo de investigación abre nuevas líneas de investigación interesantes que pueden ser explotadas por futuros trabajos:

- Mayor integración entre las técnicas de optimización de QoS para flujos IP multimedia y las entidades de control de llamada de acuerdo al trabajo que se está realizando en los organismos de estandarización como ETSI (grupo TISPAN, antiguo TIPHON).
- Interoperabilidad multi-dominio de las técnicas de QoS, atravesando los bordes de red de diferentes operadores.
- Extensión del estudio a nuevos codecs emergentes de video (y en menor medida de audio).
- Estudio más detallado de los nuevos métodos preceptuales de video (también de audio) que no están estandarizados aún.
- Desarrollo y validación de proxies multimedia IP avanzados, que implementen todas las nuevas técnicas propuestas.
- Extensión del estudio a otros tipos de sistemas de satélite, como los LEO
- Estudio más detallado de aspectos de satélite en las capas más bajas, y su posible impacto en el tráfico multimedia IP, como efectos de propagación y transmisión,...
- Extensión del estudio a otros sistemas de satélite multimedia de banda ancha próxima generación
- Particularización detallada del estudio a los sistemas de satélite DVB-RCS
- Estudio de aspectos específicos relativos a redes IPv6
- Extensión del estudio a otras tecnologías de banda ancha sobre redes terrestres, enfocándose a aspectos de redes de acceso de banda ancha

Publicaciones

Relación cronológica de todas las publicaciones nacionales o internacionales del autor relacionadas con la misma.

Se trata de una actividad muy intensa de publicaciones como fruto del trabajo realizado en la tesis doctoral. Un total de **40 publicaciones** repartidas entre 15 publicaciones en revista (7 de ellas internacionales, incluyendo revistas de máximo prestigio del IEEE y en general todas ellas con alto factor de impacto) y 25 en congresos (12 de ellas internacionales, incluyendo libros con actas de congresos). Todas ellas relacionadas con la temática principal de la tesis: satélite y Voz IP (comunicaciones en tiempo real, redes de banda ancha,...). Todas las publicaciones están comprendidas entre el año 2001 (en el que el trabajo de la tesis empezó a dar su fruto) y la actualidad (con publicaciones realizadas una vez finalizada la tesis)

Revistas

Autores: Antonio Sánchez Esguevillas, Haitham Cruickshank.
Título: Validation of IP-Telephony Over EuroSkyWay Network.
Revista/libro: SatNews OnLine Magazine
Págs: 2 Fecha: Febrero 2001
Autores: Antonio Sánchez Esguevillas, Marta García Moreno, David Artuñedo Guillén, Francisco Sáez Arance.
Título: Sistema Avanzado de Telefonía IP.
Revista/libro: Comunicaciones de Telefónica I+D (ISSN: 1130-4693), Número 20
Págs: 12 Fecha: Marzo 2001
Autores: Marta García Moreno, Antonio Sánchez Esguevillas, María Luisa Fernández Chaichío, Francisco Sáez Arance, Miguel Ángel Fernández Gutiérrez.
Título: Servicios Conversacionales de Nueva Generación.
Revista/libro: Comunicaciones de Telefónica I+D, Número 20
Págs: 16 Fecha: Marzo 2001
Autores: Antonio Sánchez Esguevillas, Haitham Cruickshank.
Título: Voz IP por satélite.
Revista/libro: Comunicaciones World
Págs: 2 Fecha: Mayo 2001
Autores: Antonio Sánchez, Haitham Cruickshank, Belén Carro.
Título: Voice over IP and Satellite.
Revista/libro: IEEE SSC Newsletter , Vol.11, No. 1
Págs: 2 Fecha: Junio 2001
Autores: B. Carro, A. Sánchez
Título: Tecnologías de acceso de banda ancha: pros y contras
Revista/libro: Comunicaciones World. Vol. N° 158
Págs: 56 a 59 Fecha: Julio/Agosto 2001
Autores: Antonio Sánchez Esguevillas, Marta García Moreno, Santiago Prieto Martín, Daniel Fernández Guillén.
Título: Servicios de Voz sobre IP en redes de satélites
Revista/libro: Comunicaciones de Telefónica I+D, Número 22
Págs: 12 Fecha: Septiembre 2001
Autores: H. Cruickshank, Z. Sun, F. Carducci, Antonio Sánchez.
Título: Analysis of IP voice conferencing over EuroSkyWay satellite systems
Revista/libro: IEE Proceeding on Communications (factor de impacto 1,23 citas por artículo)
Págs: 13 Fecha: Agosto 2001
Autores: Antonio Sánchez Esguevillas, Santiago Prieto Martín, David Artuñedo Guillén, Francisco Sáez.
Título: Servicios Avanzados de Voz sobre IP Basados en SIP
Revista/libro: Comunicaciones de Telefónica I+D, Número 24

Págs: 12 Fecha: 2002
Autores: Antonio Sánchez, Marta Heredia, Luis Miguel Vaquero
Título: Multiconferencia IP multicast por satélite
Revista/libro: Comunicaciones de Telefónica I+D, Número 30
Págs: 12 Fecha: Marzo 2003
Autores: Gonzalo Valencia Hernández, Antonio Sánchez Esguevillas, Antonio José del Carmen Pinto, Iban López Jiménez
Título: Plataforma de servicios de comunicaciones IP integradas
Revista/libro: Comunicaciones de Telefónica I+D, Número 30
Págs: 12 Fecha: Marzo 2003
Autores: B. Carro, A. Sánchez, J. Aguiar
Título: Validation of IP real-time multimedia over geostationary satellite
Revista/libro: IEEE SSC (Satellite and Space Communications) Newsletter vol. 13, n. 2
Págs: 6-7 Fecha: Diciembre 2003
Autores: Z. Sun, D. He, H. Cruickshank, L. Liang, A. Sanchez, C. Miguel, V. Schena, C. Tocci, B. Carro
Título: Scalable Architecture and Evaluation for Multiparty Conferencing over Satellite Links
Revista/libro: IEEE Journal on Selected Areas of Communications . Broadband IP networks via Satellite issue. Vol. 22, No. 3
Págs: 594-605 Fecha: Abril 2004
Autores: Antonio Sánchez, Belén Carro, Haitham Cruickshank, Zhili Sun, Carlos Miguel, José Luis Casas, Juan Ramón López

Congresos (incluyendo libros con actas de congresos)

Autores: H. Cruickshank Z. Sun , Antonio Sanchez and F. Carducci.
Título: Validation of IP-Telephony and conferencing over EuroSkyWay Network
Congreso: AIAA 19 th conference in Toulouse.
Págs: 12 Fecha: Abril 2001
Autores: Haitham Cruickshank, Antonio Sánchez, Zhili Sun, Belén Carro.
Título: Voice over IP over satellite links.
Congreso: Proceedings of the 8 th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS) . Malta. http://www.eng.um.edu.mt/microelectronics/icecs2001/
Págs: 473-476 Fecha: Septiembre 2001
Autores: Antonio Sánchez, Belén Carro, Haitham Cruickshank.
Título: Multi-videoconference over satellite.
Congreso: Proceedings of the IST Mobile Communications Summit. Barcelona.
Págs: 917-922 Fecha: Septiembre 2001
Autores: Antonio Sánchez, H. Cruickshank, Franco Carducci.
Título: Validation of IP-Telephony over EuroSkyWay Network.
Congreso: Proceedings of the 7th Ka-Band Utilization Conference. Genoa (Italy).

Págs: 485-493	Fecha: Septiembre 2001.
Autores: Antonio Sánchez Esguevillas, Maryan Vázquez Castro, Belén Carro Martínez	
Título: Videoconferencia Sobre IP Multicast y Satélite.	
Congreso: Libro de Actas del XVI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. Madrid	
Págs: 205-6	Fecha: Septiembre 2001
Autores: Antonio Sánchez Esguevillas, Maryan Vázquez Castro, Belén Carro Martínez	
Título: Voz IP por satélite.	
Congreso: Libro de Actas del XVI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. Madrid	
Págs: 203-4	Fecha: Septiembre 2001
Autores: B. Carro, H. N. Chan, A. Sánchez, J. Redoli, R. Mompó.	
Título: Nivel de enlace en canal de retorno HFC bajo ruido controlado	
Congreso: Libro de Actas del XVI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. Madrid	
Págs: 2	Fecha: Septiembre 2001
Autores: B. Carro, H. N. Chan, A. Sánchez, J. Redoli, R. Mompó.	
Título: Mantenimiento preventivo en redes HFC.	
Congreso: Libro de Actas del XVI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. Madrid	
Págs: 169-70	Fecha: Septiembre 2001
Autores: M.A. Vázquez Castro, G. Mohedano Moya, A. Sánchez Esguevillas, F. Pérez Fontán	
Título: Modelado geométrico de entornos urbanos para el estudio de la diversidad espacial en comunicaciones móviles	
Congreso: Libro de Actas del XVI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. Madrid	
Págs: 2	Fecha: Septiembre 2001
Autores: M.A. Vázquez-Castro, Dawit Belay Zelek, A. Sánchez Esguevillas.	
Título: Método de cálculo de disponibilidad multisatélite para aplicaciones de radionavegación	
Congreso: Libro de Actas del XVI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. Madrid	
Págs: 2	Fecha: Septiembre 2001
Autores: A. Sanchez, H. Cruickshank, B. Carro	
Título: VoIP Real-Time Flows In Satellite Networks With OBP	
Congreso: Seventh International Workshop on Digital Signal Processing Techniques for Space Communications . Lisboa (Portugal). Proceedings of ESA DSP 2001. P1.7	
Págs: 10	Fecha: Octubre 2001
Autores: B. Carro, H. N. Chan, A. Sánchez, J. Redoli, R. Mompó	
Título: Link-Level Effect of a Noisy Channel over Data Transmission on the Return Path of an HFC Network	
Congreso: IEEE Global Communications Conference, Globecom 2001 San Antonio, Texas. USA. Proceedings ISBN: 0-7803-7206-9	
Págs: 8	Fecha: 25-29 Noviembre 2001

Autores: Antonio Sánchez, Belén Carro, Maryan Vázquez
Título: Videoconferencia IP y Satélites.
Congreso: XI Jornadas de Telecom I+D. Madrid. Publicado en CDROM Archivo 55
Págs: 10 Fecha: Noviembre 2001
Autores: Antonio Sánchez, Belén Carro.
Título: Comunicaciones de Voz IP en entornos corporativos
Congreso: XI Jornadas de Telecom I+D. Madrid. Publicado en CDROM
Págs: 10 Fecha: Noviembre 2001
Autores: Antonio Sánchez, Belén Carro, Maryan Vázquez
Título: Experiencias de Voz IP por satélite.
Congreso: XI Jornadas de Telecom I+D. Madrid. Publicado en CDROM Archivo 57
Págs: 10 Fecha: Noviembre 2001
Autores: B. Carro, H. N. Chan, A. Sánchez, J. Redoli, R. Mompó
Título: Propuesta para el mantenimiento preventivo en redes HFC
Congreso: XI Jornadas de Telecom I+D. Madrid. Publicado en CDROM Archivo 46
Págs: 10 Fecha: Noviembre 2001
Autores: A. Sánchez, M. Vazquez-Castro, F. Pérez, B. Carro
Título: Multimedia Conference Services
Congreso: 20th AIAA International Communication Satellite Systems Conference and Exhibit Montreal. Canadá. Proceedings Paper Ref. AIAA 2002-1841
Págs: Fecha: Mayo 2002
Autores: G. Bianchi, N. Blefari-Melazzi, V. Marziale, C. Tocci, A. Sanchez, H. Cruickshank, B. Carro
Título: QoS For Real-Time Multicast Over Satellites
Congreso: IST Mobile & Wireless Telecommunications Summit, 2002 Thessaloniki. Grecia. ISBN/ISSN: 960-91918-0-0
Págs: Fecha: 16-19 Junio 2002
Autores: C. Miguel, C. Tocci, B Carro
Título: Multimedia Conference Model and Signalling over GEO OBP Satellite Networks
Congreso: ETSI, European Telecommunications Standards Institute. TC Satellite Earth Stations & Systems (TC-SES). BSM Working Group; Meeting #13 ETSI. Sophia Antipolis; Francia.
Págs: Fecha: 24-26 February 2003
Autores: H. Cruickshank, A. Sanchez, et al. (ICEBERGS Consortium)
Título: VoIP and IP conferencing over satellite
Congreso: Technical Workshop "IP Networking over Satellite". ESA. ESTEC, Noordwijk. Holanda
Págs: Fecha: 13-14 Mayo 2003
Autores: H. Cruickshank, Z. Sun, L. Liang, A. Sanchez, C. Miguel, C. Tocci, and B. Carro
Título: IP conference routing optimisation over GEO satellites
Congreso: IST-Mobile and Wireless Communications Summit. ISBN 972-98368-1-7
Págs: Fecha: Jun. 2003.
Autores: J. Aguiar, B. Carro, A. Sánchez
Título: Metodología de análisis de calidad de servicio extremo a extremo en aplicaciones de videoconferencia

Congreso: XIII Jornadas de Telecom I+D. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Madrid. Publicado en CDROM	
Págs:	Fecha:
Autores: J. Aguiar, B. Carro, A. Sánchez	
Título: Técnicas de optimización de calidad de servicio en aplicaciones de tiempo real	
Congreso: XIII Jornadas de Telecom I+D. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Madrid. Publicado en CDROM	
Págs:	Fecha: 18-20 Noviembre 2003
Autores: J. M. Aguiar, B. Carro, A. Sánchez, H. Cruickshank, L. Liang	
Título: QoS of multiparty videoconference over geostationary satellites	
Congreso: The IEE. Telecommunications Quality of Service: the business of success (QoS 2004). Proceedings. ISBN:086341 393-5. The IEE, Savoy Place London, UK Qos2004	
Págs: 70-74	Fecha: 2-3 March 2004
Autores: J. Aguiar, B. Carro, H. Vega, G. Gallizo, A. Sánchez	
Título: Comunicaciones Personales Multimedia. Publicado en CDROM. ISBN: 84-933783-4-8. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid	
Congreso: XIV Jornadas de Telecom I+D. Publicado en CDROM. ISBN: 84-933783-4-8	
Págs:	Fecha: 23-25 Noviembre 2004

Varios

Adicionalmente el autor es revisor de revistas de prestigio (por ej. IEEE Communications Magazine) y miembro del comité técnico de congresos internacionales (por ej. IST-Mobile Summit). Asimismo es evaluador de programas de I+D internacionales (por ej. Eureka-Celtic). También ha dirigido varios PFCs relacionados con el tema de la tesis. Imparte clases del programa de doctorado sobre la temática de la tesis.