

---

## 10 Conclusiones y Líneas Futuras

### 10.1 CONCLUSIONES

El TCP (Transmission Control Protocol) [RFC793] es el protocolo de transporte utilizado en Internet. Desde su creación en 1983 hasta nuestros días, las redes y las necesidades de los usuarios han ido evolucionando. Es por esta razón, que las premisas con las que el protocolo fue diseñado han quedado obsoletas, y por lo tanto son necesarios muchos esfuerzos en la adecuación del protocolo a su nuevo entorno de funcionamiento.

El organismo que gestiona proyectos técnicos de Internet a corto plazo es el IETF (*The Internet Engineering Task Force*) [<http://www.ietf.org>]. El IETF es quien se encarga del desarrollo de protocolos en Internet. Se estableció de formalmente en 1986 por la IAB (*Internet Architecture Board*) teniendo como responsable a Phill Gross, siendo la IAB el grupo que gestiona los aspectos tecnológicos del máximo organismo de Internet que es la *Internet Society (ISOC)*.

El trabajo desarrollado por la IETF se divide en áreas, teniendo cada una de las cuales unos grupos de trabajo. El área en la que se dedican esfuerzos para la adecuación del protocolo de transporte TCP a las nuevas necesidades de Internet, es el Área de Transporte [[http://www.ietf.org/html.charters/wg-dir.html#Transport\\_Area](http://www.ietf.org/html.charters/wg-dir.html#Transport_Area)], en la que podemos encontrar, entre otros, los siguientes grupos de trabajo:

- *Performance Implications of Link Characteristics (pilc)*
- *TCP Implementation (tcpimpl)*
- *Transport Area Working Group (tsvwg)*

El primero de ellos ha generado los siguientes *Internet Draft* como paso previo a la publicación de nuevos estándares a través de los RFC (*Request For Comments*):

- *End-to-end Performance Implications of Slow Links*
- *End-to-end Performance Implications of Links with Errors*
- *Performance Enhancing Proxies*
- *Advice for Internet Subnetwork Designers*
- *TCP Performance Implications of Network Asymmetry*

El segundo grupo de trabajo ha generado a su vez los siguientes RFC, algunos de los cuales están en fase experimental:

- *Some Testing Tools for TCP Implementors (RFC 2398)*
- *Increasing TCP's Initial Window (RFC 2414)*
- *Simulation Studies of Increased Initial TCP Window Size*
- *When TCP Starts Up With Four Packets Into Only Three Buffers (RFC 2416)*
- *Known TCP Implementation Problems (RFC 2525)*
- *TCP Congestion Control (RFC 2581)*
- *The NewReno Modification to TCP's Fast Recovery Algorithm (RFC 2582)*

Y finalmente, en el último grupo de trabajo, se proponen los siguientes objetivos, entre otros, a partir de Enero del 2000:

- *Actualización del RFC 793 para resolver el conflicto entre los servicios diferenciados (diffserv) y la interpretación de TCP sobre los bits de Precedencia de IP.*
- *Añadir al RFC 2018 el uso de TCP SACK para detectar retransmisiones innecesarias.*
- *Crear un Internet Draft sobre la ventana de congestión de TCP.*

Por lo tanto podemos ver los aspectos que están desarrollando los investigadores que contribuyen a la evolución de los protocolos de transporte de Internet. De forma paralela, en esta Tesis se ha contribuido con en el estudio de mejoras del protocolo de transporte TCP, basándonos en los diferentes entornos en los que éste opera. Los temas relacionados con los estudios realizados en esta Tesis que se discuten en los grupos de trabajo, anteriormente mencionados, son especialmente:

- *End-to-end Performance Implications of Slow Links (Octubre 1999):* En este trabajo se presenta la problemática de los **enlaces de baja velocidad** en las prestaciones extremo a extremo del protocolo TCP. Se detallan las alternativas existentes y se hacen recomendaciones. Concretamente se analizan los algoritmos de compresión de cabeceras [RFC1144, RFC2507, RFC2508, RFC2509]. También se tratan aspectos como el tamaño de la MTU óptima y las interacciones del comportamiento de TCP en enlaces de baja velocidad.

- *End-to-end Performance Implications of Links with Errors (Octubre 1999)*: El tema de **canales con errores** se trata en este otro trabajo. En él se apuntan las diferentes interacciones de los algoritmos presentes en TCP con los errores como los algoritmos de Inicio lento y Prevención de la Congestión, Retransmisión y Recuperación Rápidas, Reconocimientos Retardados, Retransmisión Selectiva y Notificación Explícita de Corrupción.
- *Performance Enhancing Proxies (Junio 1999)*: Las diferentes propuestas de *Proxy* para mejorar las prestaciones de los protocolos de Internet en entornos para los cuales éstos no fueron pensados, y los cuales degradan sus prestaciones, se presentan en este trabajo. Se tratan aquí, entre otros, los temas relacionados con las implementaciones *Indirect-TCP* [BaB95, BaB97] y *Snoop* [BSA95]. En todos los casos las propuestas rompen la filosofía extremo a extremo de TCP, aspecto que consideramos inadecuado debido a la propia naturaleza de TCP.
- *TCP Performance Implications of Network Asymmetry (Septiembre 1999)*: Las características asimétricas de algunas tecnologías de red están siendo un aspecto clave en el acceso a Internet de alta velocidad. Es en este trabajo en el que se ponen de manifiesto los aspectos a tener en cuenta en el comportamiento de TCP en **enlaces asimétricos**, se hace revisión de los diferentes estudios y propuestas, y se pretende obtener conclusiones sobre los cambios en TCP para su buen funcionamiento en enlaces asimétricos.
- *TCP Congestion Control (RFC 2581) (Abril 1999) y The NewReno Modification to TCP's Fast Recovery Algorithm (RFC 2582) (Abril 1999)*: Los aspectos relacionados en combatir la **congestión** en Internet, si bien empezaron en Octubre de 1986 con el gran colapso de Internet, todavía representan parte importante de los esfuerzos de los investigadores. En estos trabajos se detallan algoritmos, mejoras y recomendaciones para TCP con el objetivo de paliar los efectos de la congestión. Además el [RFC2481], que se encuentra en fase experimental, también contribuye al desarrollo de técnicas para la prevención de la congestión en Internet, con la técnica de notificación de congestión explícita en IP (*Explicit Congestion Notification*).

A continuación vamos a resumir el conjunto de aportaciones que se han realizado y presentado en esta Tesis, y que como puede verse están en consonancia con la investigación y desarrollo por los grupos de trabajo de Internet que existen en estas fechas: congestión, errores, asimetría y enlaces de baja velocidad.

En primer lugar la evolución ha llevado a que las redes fijas se caractericen por la pérdida de paquetes debida a congestión. El protocolo de transporte TCP incorpora ciertos mecanismos para actuar contra la congestión, pero todos ellos actúan a posteriori, ya que se activan una vez se ha producido la pérdida del paquete. A lo largo de esta Tesis se han analizado y evaluado estos mecanismos de TCP, para poder entender sus implicaciones en los diferentes

entornos en los que opera. En este ámbito se ha propuesto y analizado un algoritmo para actuar a priori a las situaciones de congestión aprovechando las indicaciones que algunos protocolos de red, como Frame Relay y ATM mandan por la red. Concretamente, el algoritmo de adaptación dinámica de la tasa propuesto se ha analizado para una red Frame Relay.

Los resultados y las conclusiones presentadas en el análisis de la congestión forman parte de un trabajo realizado para la *European Space Agency (ESA)*, desarrollado por Sema Group con la colaboración de la Universitat Politècnica de Catalunya. La conclusión más importante que se deriva del trabajo, es que la incorporación de mecanismos a nivel de transporte para aprovechar la información que algunas redes ofrecen como indicación de congestión, es recomendable. De esta forma se pueden activar algoritmos como el propuesto para controlar los datos que el usuario inyecta en la red evitando así en gran medida la congestión y la consecuente pérdida de datos. Cabe destacar el trabajo de estandarización en Internet para la propuesta de añadir la Notificación de Congestión Explícita en IP, *ECN (Explicit Congestion Notification)* que está definida en [RFC2481] y que actualmente se encuentra en fase experimental. En este ámbito existen estudios y desarrollos de ECN en TCP/IPv4 y TCP/IPv6.

Por otra parte, el auge en la comunicaciones móviles y los avances en la tecnología están haciendo que el acceso a Internet desde terminales móviles sea una realidad. Para este fin, es necesario que el protocolo de transporte TCP pueda adecuarse a las condiciones del enlace móvil. Los errores, las desconexiones y los reducidos anchos de banda provocan degradación en el comportamiento del protocolo. En esta Tesis se ha contribuido al estudio detallado de los efectos del canal radio en el comportamiento del TCP, y se han propuesto mejoras en los algoritmos de compresión de cabeceras destinados a mejorar el caudal en enlaces de baja velocidad.

Concretamente el análisis detallado del protocolo TCP en una implementación real nos ha mostrado la degradación que éste sufre en entornos con errores. Hemos evaluado la interacción de los mecanismos que activa TCP tras producirse una pérdida, viendo que si bien son adecuados en caso de congestión, éstos no lo son en caso de producirse errores. La degradación de las prestaciones de TCP nos ha llevado a analizar por una parte el valor óptimo de la MTU del enlace, como parámetro clave en su rendimiento en entornos con errores como el canal radio. Además, dado que los enlaces radio se caracterizan por tener velocidades bajas, se ha considerado conveniente analizar los mecanismos de compresión de cabeceras para mejorar las prestaciones del protocolo TCP en cuanto a caudal.

El estudio de los mecanismos de compresión de cabeceras ha partido del análisis del estándar en Internet [RFC1144] y el más utilizado en enlaces punto a punto de baja velocidad. Las conclusiones obtenidas son que este algoritmo, si bien es adecuado y óptimo para enlaces de baja velocidad libres de errores, su interacción con errores como los del canal radio hacen que su implementación sea desaconsejada, debido a la caída de las prestaciones del protocolo. Una vez identificada la problemática y las interacciones del algoritmo de compresión de

cabeceras con los errores y los mecanismos propios de TCP se han valorado diferentes propuestas detalladas en la bibliografía. El resultado final nos ha llevado a la propuesta de una mejora del algoritmo de compresión de cabeceras, que opera tanto en enlaces de baja velocidad libres de errores como para entornos como el radio en el que los errores son frecuentes. Con esta propuesta se mantienen las ventajas de los algoritmos de compresión de cabeceras en enlaces de baja velocidad en ausencia de errores, obteniendo a su vez la protección necesaria contra los efectos de los errores en enlaces radio.

Finalmente, también se ha considerado el hecho de que la mayor parte de las aplicaciones utilizadas en Internet se caracterizan por la transmisión de un mayor flujo de información desde el servidor hacia el cliente, que no en el sentido contrario. Ejemplos de estas aplicaciones son el acceso *web* y *ftp*. Por esta razón las tecnologías asimétricas están formando un papel importante en el acceso a Internet. No obstante, las características implícitas de TCP hacen que su caudal se degrade en canales asimétricos. En esta Tesis se ha estudiado el comportamiento del protocolo en este tipo de enlaces y se ha propuesto y evaluado un algoritmo para mejorar sus prestaciones, tanto en enlaces fijos como en enlaces con radio.

Esta propuesta ha requerido en primer lugar analizar el comportamiento de la implementación más utilizada de TCP sobre este tipo de entornos asimétricos, identificando así los aspectos críticos en la degradación de las prestaciones del protocolo TCP. Se han estudiado diferentes propuestas para solucionar los problemas que conlleva la asimetría en las comunicaciones extremo a extremo TCP y finalmente se ha propuesto y analizado un algoritmo para ser incorporado a TCP en caso de operar en enlaces asimétricos. La gran ventaja de esta propuesta sobre otras en las que se obtienen prestaciones similares es que su implementación se realiza en el nivel de transporte exclusivamente, manteniendo así la forma de actuación extremo a extremo de TCP. Los resultados obtenidos nos muestran como con la incorporación de este algoritmo se obtienen buenas prestaciones del protocolo tanto en accesos fijos sin errores como en accesos radio con errores de canal.

## 10.2 LÍNEAS FUTURAS

Entre las posibles líneas de continuación de este trabajo destacamos las siguientes:

- En primer lugar, sobre el estudio de TCP en redes con congestión cabría estudiar los nuevos mecanismos, que están en fase experimental, de notificación explícita de congestión en redes IP (ECN). La propuesta de ECN [<http://www.aciri.org/floyd/ecn.html>], se basa en la inclusión de la información de congestión en el datagrama IP. En [Flo94, Sch96, SNS98, RFC2481], se presentan propuestas para la inclusión de ECN y la respuesta de TCP a las notificaciones de congestión. En este ámbito deberían analizarse las soluciones que se plantean, estudiar la viabilidad del algoritmo propuesto para la

adaptación de la tasa para el uso eficiente de redes Frame Relay en conjunción con la propuesta sobre IP.

- En el estudio de TCP en enlaces móviles no se ha considerado la posible incorporación de mecanismos que, operando en el nivel de enlace, proporcionasen fiabilidad. De esta forma, TCP se enfrentaría a un canal de comunicación que le sería mucho más propicio. Estos mecanismos podrían estar basados en métodos ARQ (*Automatic Request Query*), FEC (*Forward Error Correction*) o en algoritmos híbridos resultado de una cierta combinación de ambos (*Hybrid ARQ*). En los métodos ARQ, no obstante, es imprescindible evaluar la posible interacción entre las retransmisiones a nivel de enlace y las retransmisiones a nivel TCP ya que la varianza del tiempo de ida y vuelta de los segmentos (fundamental para la gestión TCP de las retransmisiones) puede ser considerable cuando se utiliza ARQ y, en consecuencia, puede afectar a la temporización que mantiene el protocolo de transporte.

Los métodos FEC solucionan el problema de la interacción entre los niveles de enlace y transporte ya que no utilizan retransmisiones; sin embargo, no proporcionan el grado de fiabilidad de los métodos ARQ, ni funcionan adecuadamente cuando los errores se producen en forma de ráfagas (en ese caso, suelen requerir la introducción de técnicas de entrelazado).

El protocolo que opera en nuestro caso a nivel de enlace es PPP, que también puede proporcionar un servicio de transmisión de datos fiable. En [RFC1663], se describe un método para la negociación entre los dos extremos PPP del uso de un mecanismo, basado en el que incorpora HDLC, que permite ofrecer a los niveles superiores un enlace fiable.

Otro protocolo fiable a nivel de enlace propuesto para este tipo de arquitecturas es el RLP (*Radio Link Protocol*). En esta línea, podría añadirse éste a la arquitectura estudiada, y evaluar su interacción con TCP, ya que ambos utilizan retransmisiones para proporcionar fiabilidad.

- En el comportamiento del TCP en enlaces asimétricos se han estudiado y propuesto mecanismos basados en el hecho que un reconocimiento reconoce a varios paquetes. De esta forma, la fuente se caracteriza por la transmisión de ráfagas. Cuanto mayor es la asimetría, mayor es el tamaño de estas ráfagas. Si además de la asimetría consideramos congestión en el enlace, los efectos pueden ser muy perjudiciales. En [All98, BPK97, Joh95] se muestran estos efectos. En la bibliografía se han realizado varios estudios para evitar las ráfagas de paquetes, forzando un intervalo determinado entre transmisiones consecutivas de paquetes [BPK97, Kar96, ViH97] (suavizado de la fuente), o actuando sobre los reconocimientos recibidos [BPK97] (reconstrucción de reconocimientos) o [Par98] (suavizado de reconocimientos). Sería conveniente ver el efecto de la congestión en el algoritmo propuesto y plantear soluciones en caso necesario.
- En cuanto a los algoritmos de compresión de cabeceras analizados presentan un comportamiento casi óptimo tanto en enlaces libres de errores como en enlaces con

errores. No obstante, el algoritmo propuesto está basado en TCP/IPv4, por lo que debería proponerse su aplicación para la versión 6 del protocolo de red de Internet.

Además, podríamos pensar en un mecanismo que fuese capaz de detectar los estados de error en el enlace, de forma que para enlaces libres de errores se actuara con el algoritmo óptimo [RFC1144], y para enlaces con errores, con el propuesto.

Otro aspecto relacionado con la compresión, que sería conveniente analizar, es la interacción de estos mecanismos con los enlaces asimétricos. En este tipo de enlaces, parece adecuado utilizar técnicas de compresión en el sentido de los reconocimientos, para paliar los efectos negativos de la asimetría. El factor de asimetría se vería reducido por la compresión lo cual sería el aspecto positivo. Ya se ha comentado en el capítulo referente a la compresión de cabeceras, que, a diferencia de [RFC1144, RFC2507] el algoritmo propuesto de compresión de cabeceras en principio no interacciona negativamente con las técnicas de reconocimientos retardados, ya que la descompresión se realiza siempre respecto a una base fija. Un estudio más detallado de la interacción entre las técnicas de compresión y asimetría sería otra de las posibles líneas futuras de investigación a seguir.